

ANDRÉ REZENDE DESSIMONI CARVALHO

**Modelagem e Aplicação de Métodos de Fronteira
Imersa para Análise de Escoamentos Sobre
Atenuadores de VIV**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2021**

ANDRÉ REZENDE DESSIMONI CARVALHO

**Modelagem e Aplicação de Métodos de Fronteira Imersa para
Análise de Escoamentos Sobre Atenuadores de VIV**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto

Uberlândia - MG
2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C331
2021
Carvalho, André Rezende Dessimoni, 1993-
Modelagem e Aplicação de Métodos de Fronteira Imersa
para Análise de Escoamentos Sobre Atenuadores de VIV
[recurso eletrônico] / André Rezende Dessimoni Carvalho.
- 2021.

Orientador: João Marcelo Vedovotto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.415>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Vedovotto, João Marcelo,
1981-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 591, COPEM				
Data:	27/07/2021	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:10
Matrícula do Discente:	11912EMC001				
Nome do Discente:	André Rezende Dessimoni Carvalho				
Título do Trabalho:	Aplicação e Modelagem de Métodos de Fronteira Imersa para Análise de Escoamentos Sobre Atenuadores de VIV				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de webconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Aristeu da Silveira Neto - FEMEC/UFU; Aldemir Aparecido Cavalini Júnior - FEMEC/UFU; Leandro Franco de Souza - USP; e João Marcelo Vedovotto - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Aristeu da Silveira Neto, Aldemir Aparecido Cavalini Júnior, João Marcelo Vedovotto e o Discente participaram da defesa por meio de webconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, Prof. Leandro Franco de Souza desde a cidade de São Carlos/SP, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. João Marcelo Vedovotto, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/07/2021, às 15:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Franco de Souza, Usuário Externo**, em 27/07/2021, às 15:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2021, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aristeu da Silveira Neto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2021, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2934669** e o código CRC **7D6EACE5**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e aos meus pais, Elenara e Tarcísio, por todo apoio que me deram, me incentivando aos estudos desde cedo e sendo exemplos de dedicação, perseverança, honestidade e profissionalismo.

Agradeço também, ao Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto, ao Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto, e ao Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Junior, por terem me dado a oportunidade de fazer parte do Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) e por toda a orientação que me deram durante a vida acadêmica.

A todos os professores e técnicos da Universidade Federal de Uberlândia que de alguma forma estiveram presentes durante minha formação acadêmica, sou eternamente grato pelo aprendizado que me proporcionaram.

Um agradecimento especial devo ao amigo e colega de projeto, Dr. Hélio Ribeiro Neto, que desde o início deste trabalho esteve ao meu lado, ajudando e apoiando. Agradeço também a todos os colegas do MFLab, pelo companheirismo e apoio.

Agradeço também à Joice Martins, pela paciência e por ter acreditado em mim, me apoiando e me aparando nas horas difíceis.

Agradeço por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e à empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), pelo suporte financeiro; e à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (professores, técnicos e colaboradores), pela assistência de qualidade e por toda a estrutura fornecida.

CARVALHO, A. R. D. Modelagem e Aplicação de Métodos de Fronteira Imersa para Análise de Escoamentos Sobre Atenuadores de VIV. 2021. 105 p. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

No presente trabalho aborda-se o uso e implementação de métodos de fronteiras imersas para simulação de escoamentos sobre geometrias complexas de problemas reais. O trabalho é dividido em três partes. Na primeira, revisões bibliográficas sobre métodos de fronteira imersa e sobre a física do fenômeno de VIV são realizadas.

Na segunda parte, o método de Múltipla Forçagem Direta (MDF, do inglês, Multi-Direct Forcing), já implementado na plataforma MFSim, é empregado para a simulação de problemas de interação fluido-estrutura de cilindros equipados com *strakes* imersos no oceano. São analisados os efeitos de diferentes condições fluidodinâmicas e estruturais sobre o comportamento dinâmico das estruturas. Diversas configurações geométricas de *strakes* também são testadas e os resultados são analisados, destacando as variáveis de projeto mais relevantes.

Na terceira parte apresentam-se as etapas específicas de marcação de pontos eulerianos, necessárias para a implementação do Método de Volumes Fantasma Locais (LGC, do inglês, *Local Ghost Cell*) no código MFSim. Uma revisão geral do método é realizada, seguida do detalhamento da implementação computacional das marcações e otimizações realizadas nos algoritmos. A implementação das demais partes do método de Volumes Fantasma Locais faz parte do trabalho de Ribeiro Neto (2021).

A implementação do LGC fornecerá resultados mais precisos para escoamentos sobre geometrias complexas, como os *strakes*, dessa forma, entende-se a terceira parte como sendo uma continuidade da segunda, e cujo objetivo final é melhorar as simulações dos escoamentos sobre os mesmos.

Palavras chave: Fluido-dinâmica computacional, Métodos de Fronteira Imersa, Método de Volumes Fantasma Locais, Vibração Induzida por Vórtices, Dispositivos Supressores de VIV, Strakes.

CARVALHO, A. R. D. **Modelling and Application of Immersed Boundary Methods for Flow analysis in Vortex Suppressor Devices.** 2021. 105 p. Master Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The present work addresses the use and implementation of immersed boundary methods to simulate flows over complex geometries of real problems. The work is divided into three parts. In the first part, bibliographical reviews on immersed boundary methods and on the physics of the VIV phenomenon are carried out.

In the second part, the Multi-Direct Forcing (MDF) method, already implemented in the MFSim platform, is used for the simulation of fluid-structure interaction problems of cylinders equipped with strakes immersed in the ocean. The effects of different fluid dynamics and structural conditions on the dynamic behavior of structures are analyzed. Several geometric configurations of strakes are also tested, and the results are analyzed highlighting the most relevant design variables.

The third part presents the specific steps of marking Eulerian points, necessary for the implementation of the Local Ghost Cells Method (LGC) in the MFSim code. A general review of the method is carried out, followed by the details of the numerical implementation of the steps and optimizations carried out in the algorithms. The implementation of the remaining parts of the Local Ghost Volumes method is part of the work of Ribeiro Neto (2021).

The implementation of the LGC will provide more accurate results for flows over complex geometries, such as strakes, thus, the third part is understood as being a continuation of the second, and whose ultimate goal is to improve the simulations of the flows over strakes.

keywords: Computational Fluid Dynamics, Immersed Boundaries Method, Local Ghost Cell Method, Vortex-Induced vibrations, VIV Suppressor Devices, Strakes.

LISTA DE FIGURAS

1.1	Exemplos de osciladores sólidos e fluidos excitados por (a,b) excitação induzida por flutuação externa; (c,d) excitação induzida por instabilidades; e (e,f) excitação induzida por movimento.	4
1.2	Sequência de campos de pressão instantâneos durante um terço do período de desprendimento de estruturas turbilhonares.	5
1.3	Esquematização das linhas de corrente e distribuição de pressão no escoamento sobre um cilindro circular com separação da camada limite e formação de recirculação. S é o ponto de separação.	6
1.4	Desenvolvimento temporal da separação da camada limite em um corpo rombudo.	7
1.5	Formação de camada de cisalhamento.	7
1.6	(a) Antes do desprendimento da estrutura A, a estrutura B está formando e sendo atraída para a porção superior do cilindro; (b) Após o desprendimento da estrutura B, a estrutura C está se formando e sendo atraída para a porção inferior.	8
1.7	Esteiras de von Karman: (a) esteira ideal de von Karman; (b) Fotografia de uma esteira sobre cilindro circular (BEARMAN, 1987); (c) Fotografia de esteira de um aerofólio (STUBER; GHARIB, 1988); (d) Fotografia de esteira sobre seção de <i>deck</i> de ponte (NAKAMURA; NAKASHIMA, 1986).	9
1.8	Regimes de escoamento sobre cilindros circulares lisos.	10
1.9	Número de Strouhal em função do número de Reynolds e da rugosidade da superfície.	11

1.10	Forças de arrasto e sustentação obtidas por meio das medidas de distribuição de pressão do resultado da Fig. 1.2.	12
1.11	Aumento de C_D com a oscilação transversal de cilindros rígidos na frequência igual à de emissão de estruturas turbilhonares. Dados experimentais: \square : Sarpkaya (1979a) ($Re = 8000$); \circ : Tanida, Okajima e Watanabe (1973) ($Re = 4000$); \triangle : Torum e Anand (1985) ($Re = 15000$).	13
1.12	Frequência, amplitude e fase em função da velocidade reduzida para um cilindro circular imerso em ar.	14
1.13	Resposta na direção <i>cross-flow</i> de um cilindro circular montado em apoio flexível e sujeito a corrente uniforme de água ($m/\rho D^2 = 5.3$).	16
1.14	Dispositivos para atenuação de VIV em cilindros. (a) <i>Strake</i> helicoidal; (b) <i>Shroud</i> ; (c) <i>Slats</i> axiais; (d) Carenagem perfiladas; (e) <i>Splitter</i> ; (f) <i>Ribbons</i> ; (g) aleta pivotada; (h) <i>Spoilers</i>	18
1.15	Dispositivos para atenuação de VIV: (i) Saliências de superfície ((a) omnidirecionais e (b) unidirecionais); (ii) Coberturas; (iii) Estabilizadores de esteira. (\oplus : eficientes; \ominus : ineficientes).	19
1.16	Ilustração de <i>strake</i> helicoidal imerso no oceano.	20
1.17	<i>Strake</i> helicoidal sendo imerso no oceano.	20
1.18	Modelos de <i>strakes</i> : (a) <i>Strake</i> contínuo; (b) <i>Strake</i> laminado e (c) <i>Strake</i> laminado negativo.	21
1.19	Representação de um cilindro 2-D usando (a) Malha Conforme e (b) Malha não-conforme.	22
1.20	Malha lagrangiana de um cilindro imerso em uma malha euleriana multinível cartesiana gerada no código MFSim.	24
2.1	Modelo físico estrutural das simulações de interação fluido-estrutura.	30
2.2	Corte no plano x-y de malha euleriana multinível com refinamento próximo ao corpo e refinamento adaptativo de acordo com o critério de vorticidade.	31
2.3	Malha lagrangiana de <i>strake</i> imersa na malha euleriana.	32
2.4	Definições das variáveis geométricas.	35

2.5	Malha lagrangiana do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 com 1/3 de passo.	35
2.6	Malha lagrangiana do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 com passo completo.	36
2.7	Exemplo de remoção do trecho transiente do sinal.	36
2.8	Comparação entre a DFT dos deslocamentos <i>cross</i> do cilindro equivalente a 1/3 de passo e passo completo.	37
2.9	Comparação entre o sinal temporal dos deslocamentos <i>cross</i> do <i>strake</i> com 1/3 de passo e passo completo.	38
2.10	Comparação entre a DFT dos deslocamentos <i>cross</i> do <i>strake</i> com 1/3 de passo e passo completo.	39
2.11	Comparação entre a DFT das forças <i>cross</i> do <i>strake</i> com 1/3 de passo e passo completo.	39
2.12	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>cross</i> em escala logarítmica.	41
2.13	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>cross</i> em escala linear.	41
2.14	DFT dos sinais de força na direção <i>cross</i> em escala linear.	42
2.15	Posição das sondas.	43
2.16	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>in-line</i> e da componente <i>u</i> nas sondas.	44
2.17	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>in-line</i> e da componente <i>v</i> nas sondas.	44
2.18	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>cross</i> e da componente <i>v</i> nas sondas.	45
2.19	DFT dos sinais de deslocamento na direção <i>cross</i> e da componente <i>u</i> nas sondas.	45
2.20	DFTs das forças e deslocamentos na direção <i>in-line</i> do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 na condição de $u^* = 2\pi$	46
2.21	DFTs das forças <i>in-line</i> e deslocamentos <i>cross</i> do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 na condição de $u^* = 2\pi$	46
2.22	DFTs das forças <i>cross</i> e deslocamentos <i>in-line</i> do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 na condição de $u^* = 2\pi$	47
2.23	DFTs das forças e deslocamentos na direção <i>cross</i> do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 na condição de $u^* = 2\pi$	48

2.24	DFTs das forças e deslocamentos na direção <i>cross</i> do cilindro 05 e do <i>strake</i> 05 na condição de $u^* = 10\pi$	49
2.25	Planejamento composto central do <i>strake</i> 5 e casos para validação. Os números em vermelho são os números dos ensaios.	51
2.26	DFT do deslocamento na direção <i>cross</i> para cada ensaio do <i>strake</i> 5.	52
2.27	DFT do deslocamento na direção <i>cross</i> para ensaios com maiores picos de deslocamentos.	52
2.28	Amplitudes de deslocamento <i>cross</i> dos ensaios em função da velocidade reduzida. As amplitudes na frequência de pico foram adimensionalizadas pelo diâmetro. O tamanho das circunferências é proporcional ao número de Reynolds.	53
2.29	Amplitudes de deslocamento <i>cross</i> em função da velocidade reduzida no cilindro do experimento de Torum e Anand (1985).	53
2.30	Planejamento experimental.	54
2.31	Geometria das aletas.	55
2.32	Valores RMS de C_L em função dos parâmetros geométricos dos <i>strakes</i> . A geometria dos <i>strakes</i> e e h são destacados para comparação, uma vez que correspondem ao maior e menor valor do RMS, respectivamente.	56
2.33	Valores RMS de C_D em função dos parâmetros geométricos dos <i>strakes</i>	57
2.34	Mapa de calor da correlação entre as variáveis geométricas e os coeficientes de força fluidodinâmica.	58
2.35	Órbita do cilindro e dos <i>strakes</i> e e h	59
2.36	Comparação de deslocamentos na direção <i>cross</i> entre cilindro liso e <i>strakes</i> e e h	60
2.37	Visualização experimental em diferentes planos de escoamento sobre cilindro e cilindro com <i>strake</i> . As setas indicam a direção de rotação do escoamento.	61
2.38	Sinal temporal do deslocamento <i>cross</i> e instantes escolhidos para representação das iso-superfícies de critério Q e contornos de vorticidade das Figs. 2.39 a 2.42.	62
2.39	Campos de magnitude de vorticidade em plano x-y no centro do domínio.	63

2.40	Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista isométrica).	64
2.41	Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista lateral).	65
2.42	Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista superior).	66
3.1	Classificações de faces e centros eulerianos.	70
4.1	Exemplo de malha lagrangiana para simulação de escoamento interno em turbina francis. As setas vermelhas são as normais dos triângulos da malha. . .	72
4.2	Vetores utilizados para a classificação de volumes internos e externos. *: Centróides dos triângulos; ●: Centro dos volumes eulerianos; □: Volumes externos; ■: Volumes internos.	73
4.3	Resultado da marcação primária sobre um aerofólio NACA-0012.	74
4.4	Marcação completa no bordo de fuga de um NACA-0012.	75
4.5	Fluxograma para marcação secundária de centros eulerianos.	76
4.6	Nomenclaturas para a interseção entre triângulo e reta.	77
4.7	Análise de disponibilidade de faces para constituição do estêncil de interpolação de uma dada face.	78
4.8	Comparação entre marcação analítica e não-analítica em uma esfera.	79
4.9	Comparação entre marcação analítica e não-analítica no bordo de fuga de um aerofólio NACA-0012.	80
4.10	Marcação não-analítica de duas esferas.	81
4.11	Marcação não-analítica de placa fina com espessura finita.	82
4.12	Marcação não-analítica de placa fina sem espessura.	83
4.13	Sistema com três subdomínios de fluidos distintos (Ω_1, Ω_2 e Ω_3).	84
4.14	Trocador de energia térmica concêntrico.	84
4.15	Subdomínios formados pelas esferas e suas interseções.	85
4.16	Malhas eulerianas utilizadas para avaliação de custo computacional.	86
4.17	Malhas lagrangianas utilizadas para avaliação de custo computacional.	86

4.18 UML indicando as informações disponíveis na estrutura <code>eul_with_ib</code>	90
4.19 Marcação de centros em cilindro com <i>strakes</i>	95
4.20 Marcação de centros em cilindro com <i>strakes</i> , vista em corte.	96

LISTA DE TABELAS

2.1	Conjunto de simulações realizadas	30
2.2	Dados geométricos do <i>strake</i> modelo 05.	34
2.3	Parâmetros geométricos das aletas.	55
2.4	Resultados de Assi e Crespi (2020) para deslocamento na direção <i>cross</i> para cilindro liso e três modelos de <i>strakes</i>	60
4.1	Custos computacionais (<i>s</i>) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L32.	87
4.2	Custos computacionais (<i>s</i>) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L64.	87
4.3	Custos computacionais (<i>s</i>) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L96.	88
4.4	Otimizações do custo computacional por etapa.	94
4.5	Identificação das otimizações da Tabela 4.4.	94

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
PARTE I: INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Revisão Bibliográfica	5
1.1.1 Vibração Induzida por Vórtices (VIV) em cilindros	5
1.1.2 Dispositivos atenuadores de VIV	16
1.1.3 Métodos computacionais para simulações do fenômeno VIV	22
1.2 Motivação pelo tema	25
1.3 Objetivos	26
1.4 Plataforma computacional MFSim	27
PARTE II: SIMULAÇÕES FSI DO STRAKE	28
2 Simulações Fluido-Estrutura dos <i>Strakes</i>	29
2.1 Modelagem	32
2.1.1 Modelagem matemático-diferencial	32
2.1.2 Modelagem numérico-computacional	33
2.2 Conjunto 1: Comparações entre cilindro 05 e <i>strake</i> 05	34
2.2.1 Comparação 1/3 passo vs. passo completo	37
2.2.2 Comparação entre a dinâmica do cilindro 05 e <i>strake</i> 05	40

2.3	Conjunto 2: Simulações do <i>strake</i> 05 em diversas condições de escoamento	49
2.4	Conjunto 3: Avaliação de parâmetros geométricos	54
2.4.1	Análise de Dados	56
PARTE III: IMPLEMENTAÇÃO DAS ETAPAS DE MARCAÇÃO DO LGC		67
3	MÉTODO DE VOLUMES FANTASMAS LOCAIS	68
3.1	Introdução ao Método de Volumes Fantasma Locais	69
3.2	Classificação da Malha Euleriana	69
4	MODELAGEM NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DAS MARCAÇÕES	71
4.1	Marcação primária	71
4.2	Marcação secundária	74
4.3	Resultados e validação da marcação	79
4.3.1	Comparação com marcação analítica	79
4.3.2	Outras configurações	80
4.4	Custo computacional da implementação não otimizada	86
4.5	Redução do custo computacional da marcação	88
4.5.1	Novo mapa lagrangiano	89
4.5.2	Otimização do preenchimento da estrutura <code>eul_with_ib</code>	90
4.5.3	Otimização da rotina de interseção reta/triângulo	92
4.5.4	Resultados das otimizações	94
4.6	Marcação de um cilindro com <i>strake</i>	95
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		99

**PARTE I: INTRODUÇÃO E
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

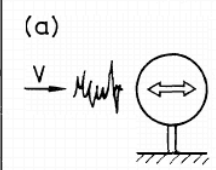
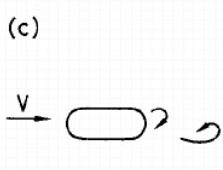
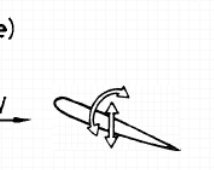
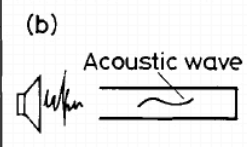
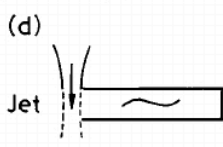

Interações entre escoamento e estrutura (FSI - *fluid-structure interaction*) são problemas complexos, frequentemente encontrados em aplicações de engenharia. O fenômeno pode ser encontrado em aeronaves (FARHAT; vAN dER ZEE; GEUZAINÉ, 2006; MIAN; WANG; YE, 2014), tubulações (BORGES *et al.*, 2010; LEE *et al.*, 2009), turbinas eólicas (WANG; LIU; KOLIOS, 2016; RAFIEE; TAHANI; MORADI, 2016; WANG; QUANT; KOLIOS, 2016), pontes (YING *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2016), plataformas marítimas (DUNBAR; CRAVEN; PATERSON, 2015; TRAN; KIM, 2015; LIU *et al.*, 2017), válvulas de compressores (BARBI *et al.*, 2016), entre outros (NAUDASCHER; ROCKWELL, 2017).

Os problemas onde o fenômeno de FSI ocorre podem apresentar naturezas distintas. Naudascher e Rockwell (2017) propõem a classificação das fontes de excitação em três tipos:

- Excitação induzida por flutuações externas (EIE - *Extraneously induced excitation*);
- Excitação induzidas por instabilidades (IIE - *Instability-induced excitation*); e
- Excitação induzida por movimento (MIE - *Movement-induced excitation*).

Naudascher e Rockwell (2017) também classificam em dois tipos os sistemas que podem ser excitados (osciladores): fluido e sólido (*fluid* e *body* na terminologia do autor). A Fig. 1.1 esquematiza os fenômenos de acordo com o tipo de oscilador e origem da excitação.

Figura 1.1: Exemplos de osciladores sólidos e fluidos excitados por (a,b) excitação induzida por flutuação externa; (c,d) excitação induzida por instabilidades; e (e,f) excitação induzida por movimento.

	EIE	IIE	MIE
BODY OSCILLATOR	<p>(a)</p>  <p>Turbulence buffeting</p>	<p>(c)</p>  <p>Vortex shedding</p>	<p>(e)</p>  <p>Flutter</p>
FLUID OSCILLATOR	<p>(b)</p>  <p>Noise (from loudspeaker)</p>	<p>(d)</p>  <p>Impinging shear layer</p>	<p>(f)</p>  <p>Oscillating shock front</p>

Fonte: Retirada de Naudascher e Rockwell (2017).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como foco a análise de FSI de cilindros equipados com *strakes* helicoidais utilizados na indústria petroquímica. Esses equipamentos são sujeitos ao fenômeno de *Vortex-induced Vibration* (Vibração Induzida por Vórtices, em tradução livre), que na classificação de Naudascher e Rockwell (2017), é um fenômeno FSI-IIE, uma vez que a estrutura é excitada por instabilidades devido ao desprendimento de estruturas turbilhonares (*vortex shedding*).

O termo “Vibração Induzida por Vórtices” é aqui utilizado como uma tradução do termo *Vortex-induced Vibration*, já consolidado pela literatura. No entanto, é importante ressaltar que o termo “vórtice” nesse contexto pode ser inadequado, uma vez que, de acordo com Silveira Neto (2020), do ponto de vista estatístico, a definição de vórtice requer uma completa invariância dos momentos estatísticos ao longo de toda a região coberta por ele.

As complexas interações não lineares envolvidas no fenômeno de VIV fazem com que sejam necessários métodos avançados para que seja possível obter representações detalhadas e confiáveis. Dessa forma, também apresenta-se uma contribuição para o avanço da implementação do método de Volumes Fantasmas Locais no código MFSim, que tem como

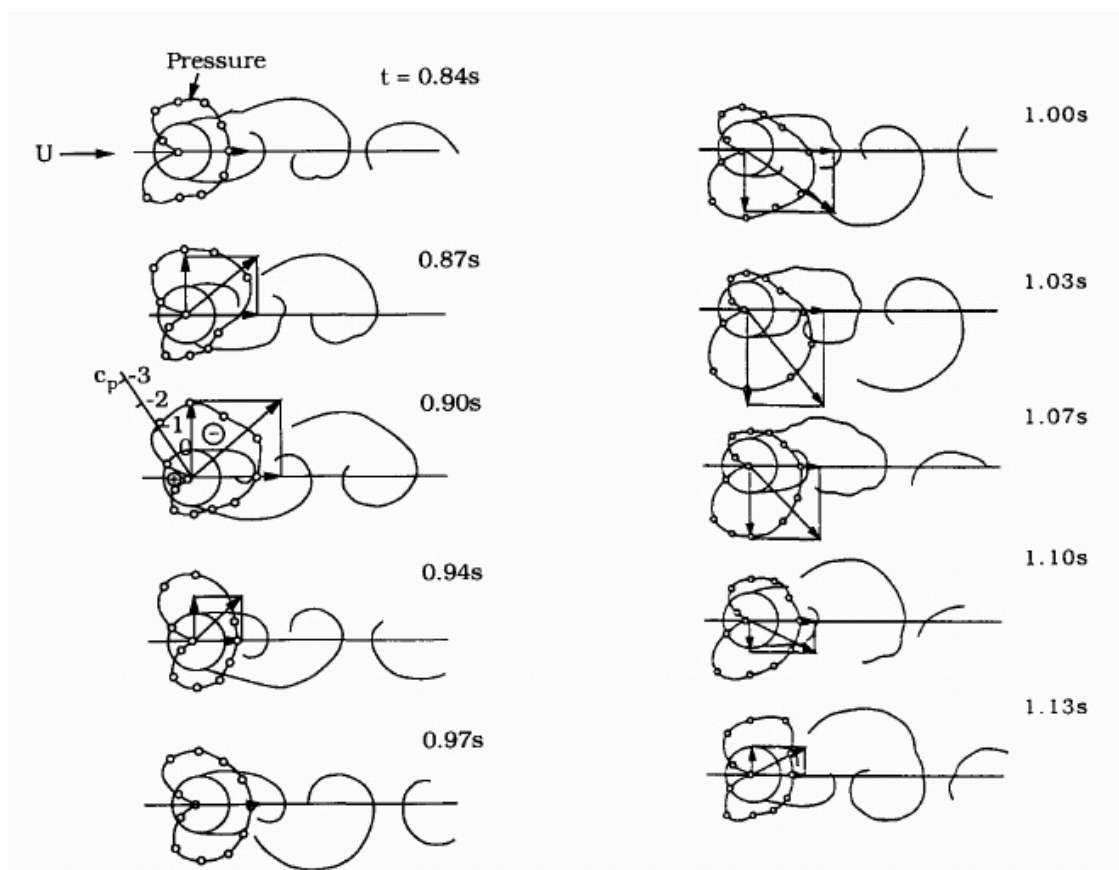
objetivo, aprimorar a representação de corpos esbeltos nos métodos de fronteira imersa.

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Vibração Induzida por Vórtices (VIV) em cilindros

De acordo com Blevins (2001), corpos imersos em escoamentos promovem a formação de estruturas turbilhonares sobre o corpo e na esteira a jusante. Quando o desprendimento das estruturas turbilhonares oscila entre os lados da geometria, surgem forças de pressão na superfície do corpo, que causam a vibração do mesmo, como esquematizado pela Fig. 1.2.

Figura 1.2: Sequência de campos de pressão instantâneos durante um terço do período de desprendimento de estruturas turbilhonares.

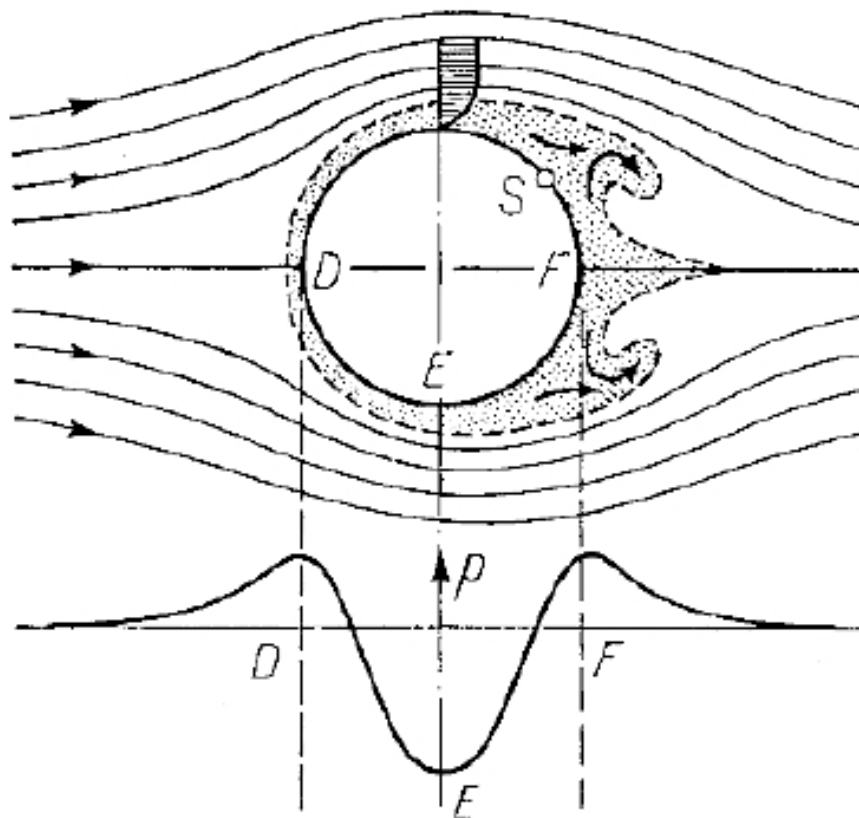


Fonte: Retirada de Drescher (1956) apud Sumer e Fredsøe (2006).

Detalhadamente, a medida em que partículas de fluido se deslocam em direção ao bordo de ataque de um cilindro (Fig. 1.3, ponto D), a pressão sobre elas aumenta da pressão

da corrente livre até alcançar a pressão de estagnação (BLEVINS, 2001). A alta pressão na frente do cilindro força o deslocamento das partículas em torno do corpo, formando uma camada limite.

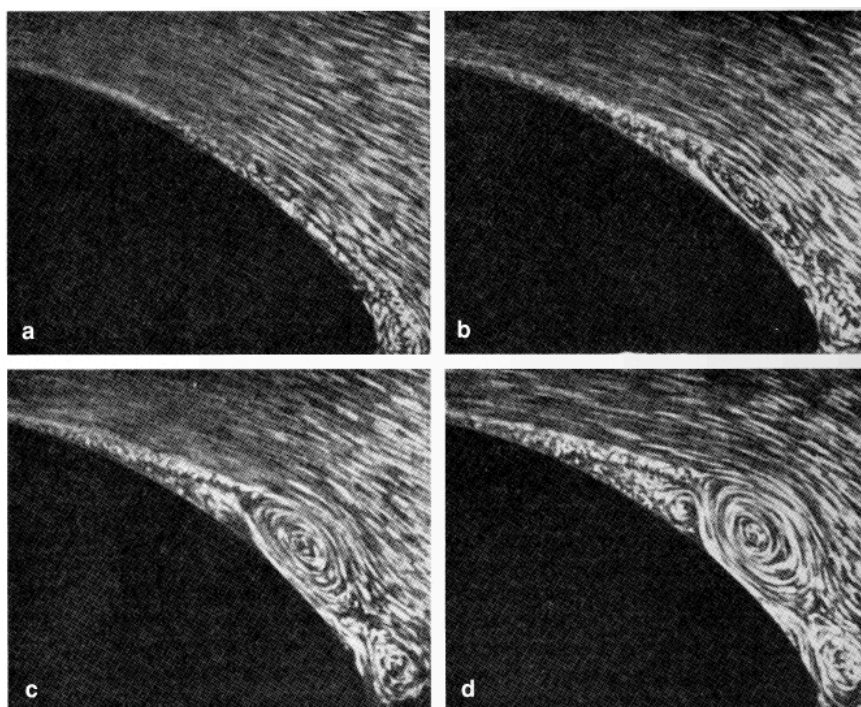
Figura 1.3: Esquematização das linhas de corrente e distribuição de pressão no escoamento sobre um cilindro circular com separação da camada limite e formação de recirculação. S é o ponto de separação.



Fonte: Retirada de Schlichting e Gersten (2017).

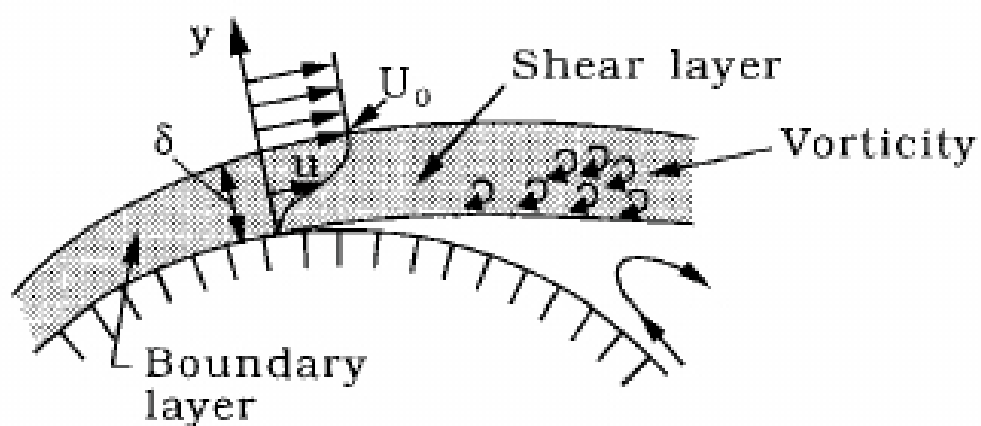
De acordo com Schlichting e Gersten (2017), a aceleração entre os pontos D e E da Fig. 1.3 promove uma queda de pressão, e de E para F, o escoamento desacelera com o aumento da pressão. No entanto, em altos números de Reynolds há uma posição em que o gradiente adverso de pressão impede o deslocamento das partículas sobre a superfície (Fig. 1.3, ponto S). Nessa posição, a camada limite se separa de cada lado do cilindro (Fig. 1.4) e forma duas camadas de cisalhamento (WILLIAMSON; ROSHKO, 1988; BLEVINS, 2001), como ilustrado na Fig. 1.5.

Figura 1.4: Desenvolvimento temporal da separação da camada limite em um corpo rombudo.



Fonte: Retirada de Tietjens e Prandtl (1931) apud Schlichting e Gersten (2017)

Figura 1.5: Formação de camada de cisalhamento.



**Detailed picture of
flow near separation**

Fonte: Retirada de Sumer e Fredsøe (2006).

Para números de Reynolds suficientemente altos, o desprendimento da camada limite se dá de forma alternada entre as partes inferior e superior. Sumer e Fredsøe (2006) ilustra o processo por meio da Fig. 1.6. Em um dado instante, a estrutura maior (estrutura A na Fig. 1.6) se torna grande o suficiente para atrair a estrutura oposta (estrutura B na Fig. 1.6). A vorticidade na estrutura A é na direção horária, enquanto a da estrutura B é na direção anti-horária. De acordo com Sumer e Fredsøe (2006), a aproximação da estrutura com vorticidade de sinal oposto corta o suprimento de vorticidade da estrutura A proveniente de sua camada limite. Nesse instante a estrutura A é liberada e transportada ao longo do escoamento. Esse padrão é repetido periodicamente dando origem a esteiras de von Karman, como as imagens mostradas na Fig. 1.7.

Figura 1.6: (a) Antes do desprendimento da estrutura A, a estrutura B está formando e sendo atraída para a porção superior do cilindro; (b) Após o desprendimento da estrutura B, a estrutura C está se formando e sendo atraída para a porção inferior.

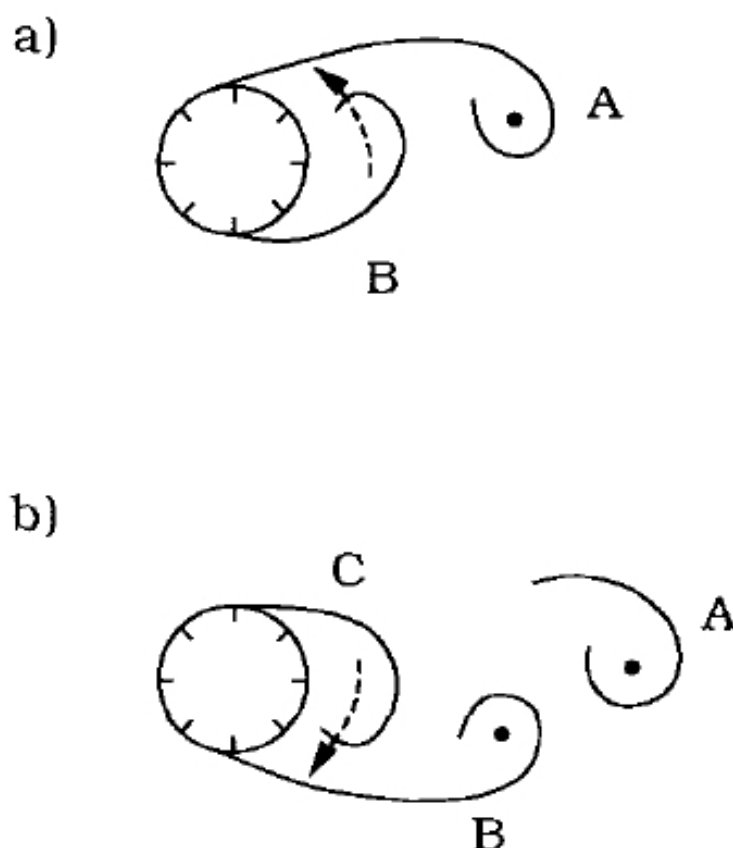
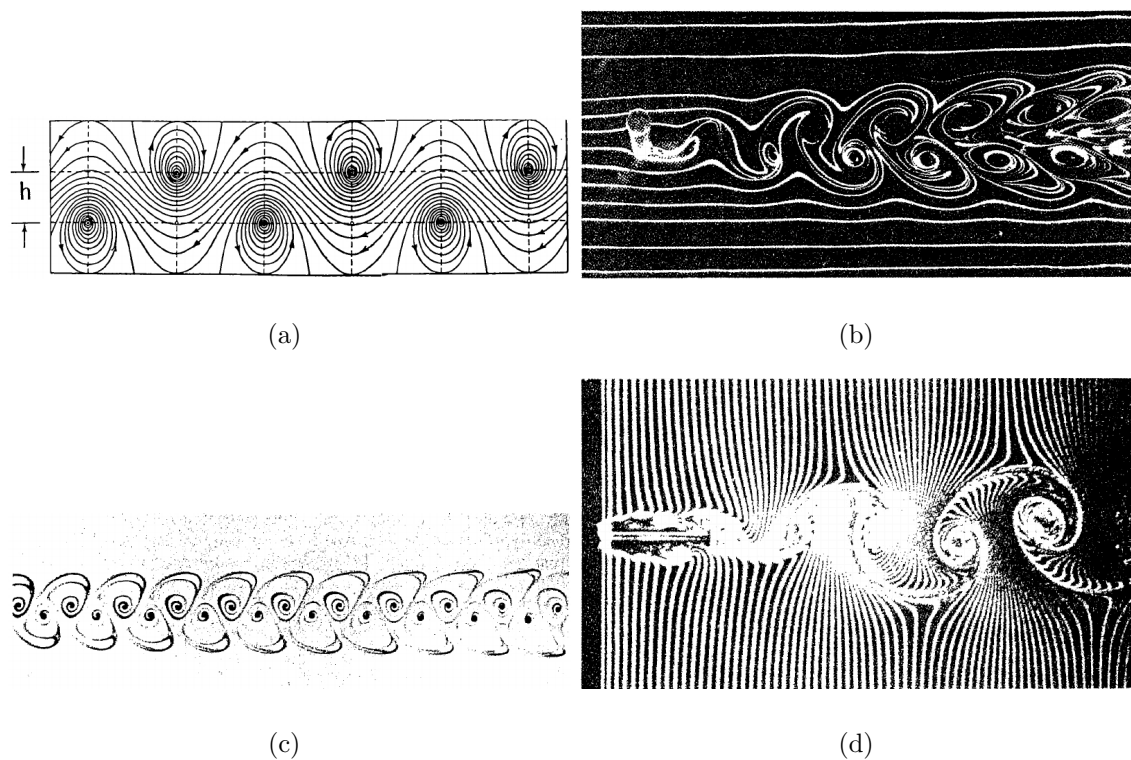


Figura 1.7: Esteiras de von Karman: (a) esteira ideal de von Karman; (b) Fotografia de uma esteira sobre cilindro circular (BEARMAN, 1987); (c) Fotografia de esteira de um aerofólio (STUBER; GHARIB, 1988); (d) Fotografia de esteira sobre seção de *deck* de ponte (NAKAMURA; NAKASHIMA, 1986).





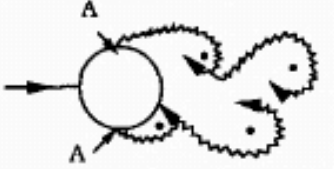
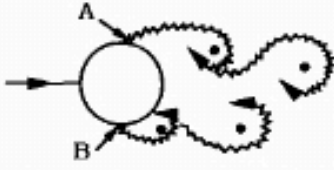
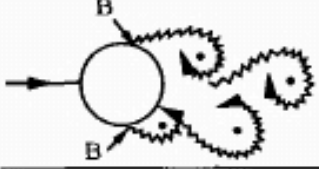
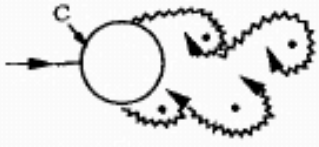



Fonte: Retirada de Blevins (2001).

De acordo com Sumer e Fredsøe (2006), o desprendimento de estruturas turbilhonares em um cilindro circular liso é função do número de Reynolds (Re). O número adimensional é baseado na velocidade da corrente livre (u_∞), do comprimento característico do cilindro, no caso o diâmetro (D), e da viscosidade cinemática do fluido (ν), sendo relacionados de acordo com a Eq. (1.1). Os principais regimes de formação de esteiras em função do número de Reynolds são sumarizados na Fig. 1.8.

$$Re = \frac{u_\infty D}{\nu}. \quad (1.1)$$

Figura 1.8: Regimes de escoamento sobre cilindros circulares lisos.

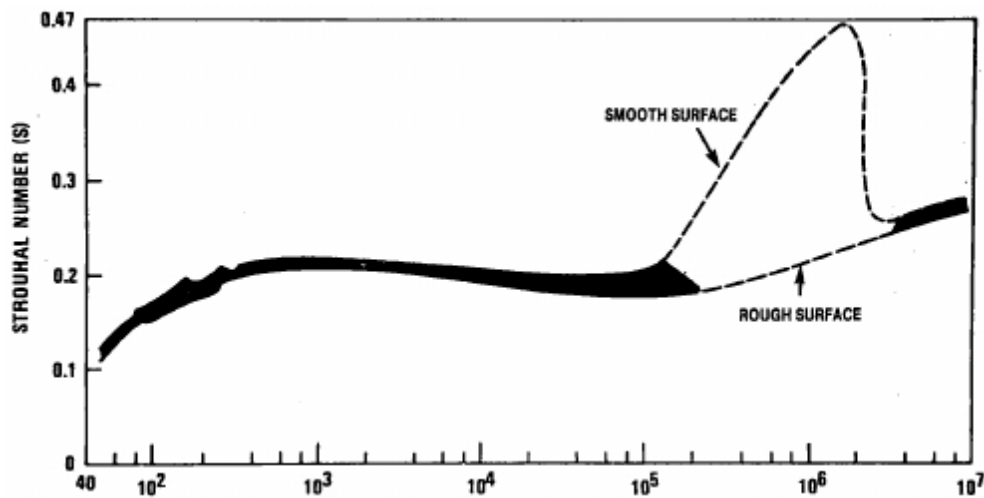
a)		No separation. Creeping flow	$Re < 5$
b)		A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
c)		Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
d)		Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
e)		Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$ Subcritical
f)		A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Critical (Lower transition)
g)		B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ Supercritical
h)		C: Boundary layer com- pletely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Upper transition
i)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$ Transcritical

Outro parâmetro de importância em tais problemas é o número de Strouhal (St). De acordo com Blevins (2001) o adimensional relaciona a frequência de emissão de estruturas turbilhonares da geometria imersa no escoamento (f_w), a velocidade do escoamento e o comprimento característico da geometria segundo a Eq. (1.2).

$$St = \frac{f_w D}{u_\infty}. \quad (1.2)$$

O número de Strouhal de um cilindro circular estacionário em escoamento subsônico é uma função do número de Reynolds, e em um menor grau, da rugosidade da superfície e do nível de turbulência da corrente livre, como indicado pela Fig. 1.9.

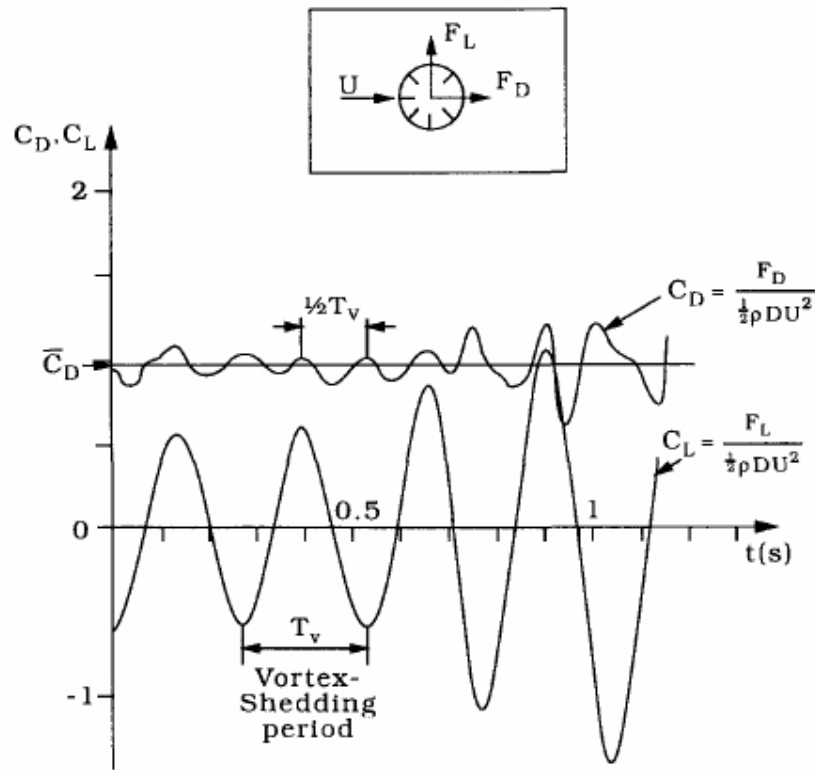
Figura 1.9: Número de Strouhal em função do número de Reynolds e da rugosidade da superfície.



Fonte: Retirada de Lienhard (1966) apud Blevins (2001).

Com experimentos mostra-se que a oscilação na força de sustentação (força perpendicular ao escoamento) apresenta frequência igual a f_w , enquanto a força de arrasto (força paralela ao escoamento) oscila no dobro de f_w . Esse fato é consequência da dinâmica de despreendimento de estruturas turbilhonares. Na Fig. 1.10 tal resultado é ilustrado.

Figura 1.10: Forças de arrasto e sustentação obtidas por meio das medidas de distribuição de pressão do resultado da Fig. 1.2.



Fonte: Retirada de Drescher (1956) apud Sumer e Fredsøe (2006).

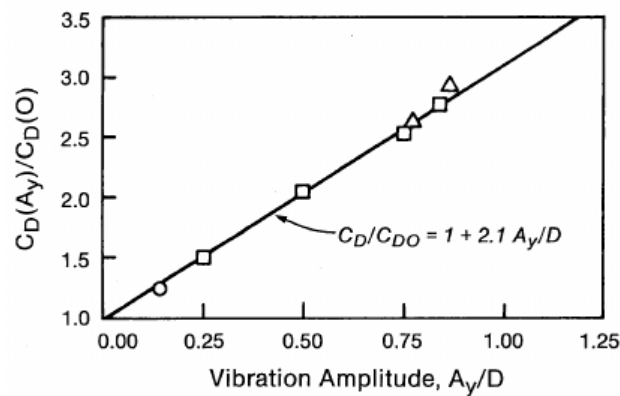
Blevins (2001) afirma que a vibração no sentido perpendicular ao escoamento (*cross-flow*), com frequência próxima à f_w , tem grande efeito sobre o padrão de formação das estruturas turbilhonares. A vibração do cilindro pode aumentar a intensidade das estruturas turbilhonares; aumentar a correlação da esteira na direção do eixo do cilindro; deslocar a frequência de emissão para próximo da frequência de vibração do cilindro (fenômeno de *lock-in*); aumentar a força de arrasto sobre o cilindro (como indicado pela Fig. 1.3); e alterar a fase, sequência e padrão das estruturas da esteira.

Três correlações são apresentadas por Blevins (2001) para o aumento do coeficiente de arrasto (C_D), dadas pela Eq. (1.3). Na Eq. (1.3), A_y é a amplitude transversal do deslocamento, Y_{rms} é o valor da raiz quadrada média (RMS) do sinal de deslocamento transversal, f é a frequência de vibração e f_s é a frequência de desprendimento de estruturas turbilhonares do cilindro estático. Segundo o autor, as três correlações apresentam valores distintos de até

15%.

$$\frac{C_D|_{A_y>0}}{C_D|_{A_y=0}} = \begin{cases} 1 + 2.1 (A_y/D) & \text{Fig. 1.11 - ajuste} \\ 1 + 1.043 (2Y_{\text{rms}}/D)^{0.65} & \text{Vandiver e Jong (1987)} \\ 1 + 1.16 \{[(1 + 2A_y/D) f/f_s] - 1\}^{0.65} & \text{Skop, Griffin e Ramberg (1977)} \end{cases} \quad (1.3)$$

Figura 1.11: Aumento de C_D com a oscilação transversal de cilindros rígidos na frequência igual à de emissão de estruturas turbilhonares. Dados experimentais: \square : Sarpkaya (1979a) ($Re = 8000$); \circ : Tanida, Okajima e Watanabe (1973) ($Re = 4000$); \triangle : Torum e Anand (1985) ($Re = 15000$).

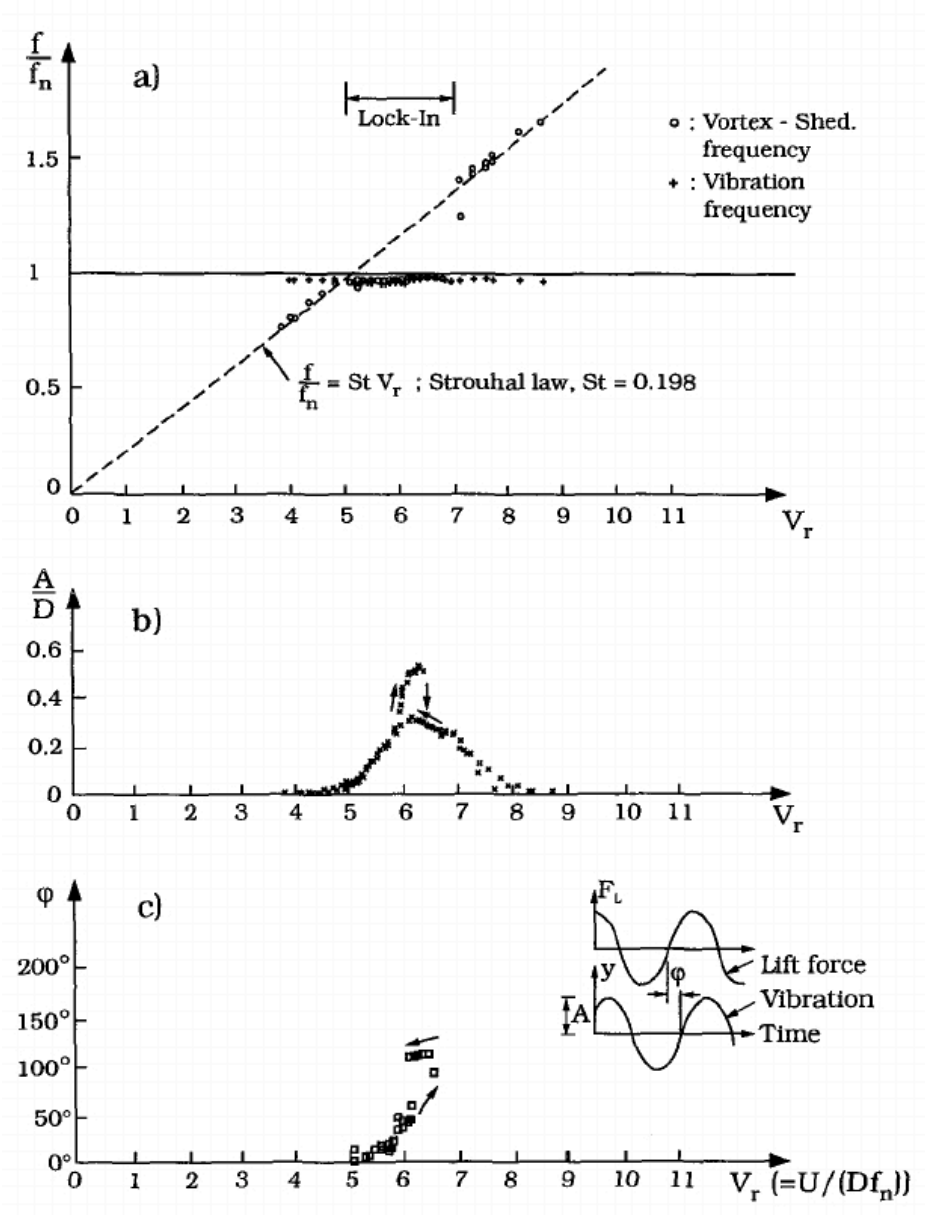


Fonte: Retirada de Blevins (2001).

No experimento de Feng (1968), o autor montou um cilindro circular sobre apoios flexíveis, com um grau de liberdade de movimentação. O sistema foi exposto a uma corrente de ar uniforme. A velocidade do escoamento foi aumentada a partir de zero em pequenos incrementos. As seguintes variáveis foram mensuradas para cada velocidade: frequência de desprendimento de estruturas turbilhonares (f_w), frequência de vibração (f), amplitude de vibração (A), e o ângulo de fase (φ) entre a vibração do cilindro e a força de sustentação. Os valores foram organizados em função da velocidade reduzida Eq. (1.4) (ou $V_r = U/(Df_n)$ na nomenclatura do autor). A Fig. 1.12 apresenta o diagrama resultante do experimento.

$$u^* = \frac{u_\infty}{Df_n} \quad (1.4)$$

Figura 1.12: Frequência, amplitude e fase em função da velocidade reduzida para um cilindro circular imerso em ar.



Fonte: Retirada de Feng (1968) apud Sumer e Fredsøe (2006).

De acordo com Sumer e Fredsøe (2006), as seguintes conclusões podem ser tecidas acerca do resultado da Fig. 1.12:

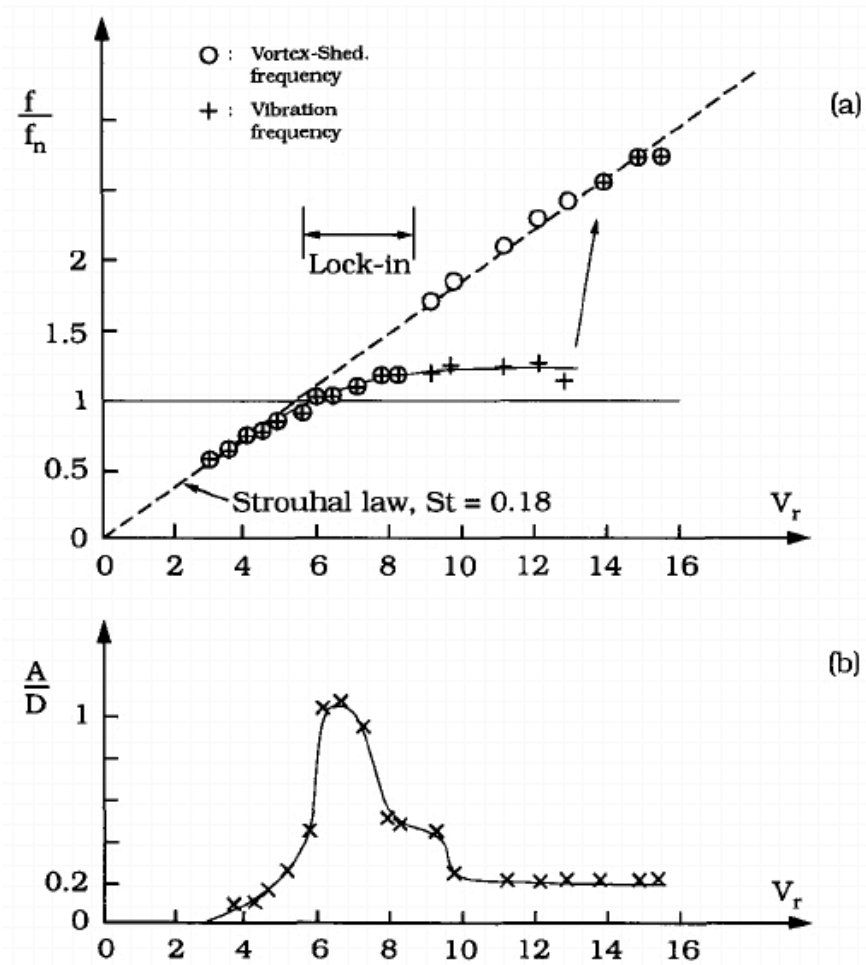
- A medida em que a velocidade do escoamento aumenta a partir de zero, nenhuma vibração é observada, até que se atinja $u^* = 4$. Nesse ponto, as vibrações começam a ser perceptíveis. O Diagrama de frequências indica que essas vibrações de pequena amplitude ocorrem na frequência natural da estrutura ($f/f_n = 1$), enquanto a frequência de

emissão de estruturas turbilhonares (estimada pela variação da força de sustentação) ocorre na frequência de Strouhal do cilindro estacionário ($f/f_n = S_t u_\infty / (D f_n)$)

- Na Fig. 1.12-a é mostrado que a frequência de emissão de estruturas turbilhonares segue a frequência de Strouhal do cilindro estacionário até que a velocidade reduzida atinja o valor de 5. No entanto, a partir desse ponto, com o aumento da velocidade a frequência de emissão passa a seguir a frequência natural do sistema. Esse fenômeno ocorre até que a velocidade reduzida atinja valores próximos a 7. Essa observação implica que a frequência de emissão sincroniza com a frequência natural em $u^* = 5$ e permanece sincronizada até $u^* = 7$. Esse fato evidencia que nesse intervalo, a emissão de estruturas turbilhonares não pode ser caracterizada apenas pela lei de Strouhal, e que a vibração do próprio cilindro apresenta forte influência. Esse fenômeno é conhecido como *lock-in*, e nesse intervalo a frequência de vibração, frequência natural e a de emissão coincidem ($f = f_n = f_w$).

As análises acerca do experimento de Feng (1968) são representativas para cilindros imersos no ar. Quando o cilindro é imerso em água no entanto, embora o comportamento da amplitude de vibração seja semelhante com o comportamento em ar, a resposta da frequência apresenta comportamento distinto, como evidenciado pela Fig. 1.13. A frequência de vibração na água não é igual à frequência natural do sistema no intervalo de *lock-in* e aumenta com o aumento da velocidade reduzida. Esse comportamento evidencia que a frequência natural do cilindro imerso em água aumenta com u^* durante o regime de *lock-in* (SUMER; FREDSE, 2006).

Figura 1.13: Resposta na direção *cross-flow* de um cilindro circular montado em apoio flexível e sujeito a corrente uniforme de água ($m/\rho D^2 = 5.3$).



Fonte: Retirada de Torum e Anand (1985) apud Sumer e Fredsøe (2006).

1.1.2 Dispositivos atenuadores de VIV

Na indústria de petróleo, a vida em fadiga de componentes como *risers*, oleodutos, cabos de ancoragem e umbilicais, está intimamente ligada ao fenômeno de VIV (RAUPP, 2007). Em algumas circunstâncias, as forças de pressão induzidas pelas estruturas turbilhonares podem ser fortes o suficiente para destruir a estrutura sólida. Wilson (2003) afirma que correntes marítimas de 2 Nós podem causar o colapso de uma plataforma *offshore* devido às estruturas turbilhonares periódicas que se formaram a jusante de seus pilares.

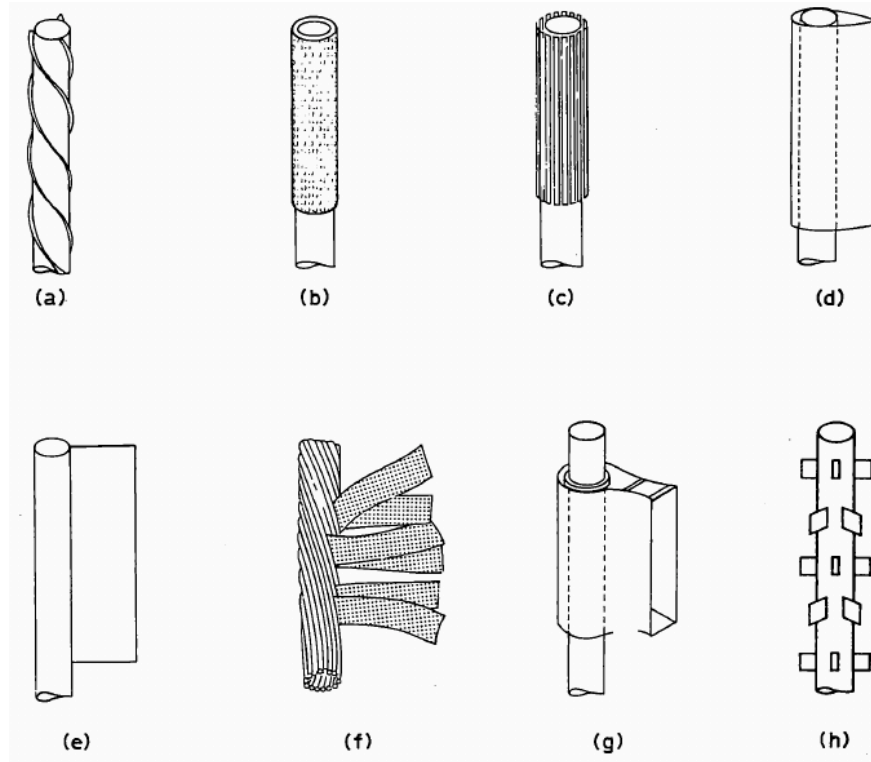
Segundo Blevins (2001), a amplitude da vibração de estruturas em VIV podem ser substancialmente reduzidas ao se modificar parâmetros da estrutura ou sua geometria. Dentre os parâmetros, é possível aumentar o amortecimento reduzido, o que pode ser obtido

utilizando materiais com alto amortecimento interno, como materiais viscoelásticos, borracha ou madeira, ou ainda, utilizando amortecedores externos. Também é possível, evitar ressonância ao aumentar a rigidez da estrutura.

De acordo com Paidoussis (1982), uma estratégia para evitar ressonância e o fenômeno de *lock-in* é alterar a frequência natural da estrutura de forma que fique pelo menos 40% distante da frequência de emissão de estruturas turbilhonares. Por meio do número de Strouhal (S_t), que pode ser obtido empiricamente (BLEVINS, 2001; SARPKAYA, 1979b; ERICSSON, 1980), e do número de Reynolds (Re), é possível obter uma estimativa de f_w , e com ela, calcular alteração necessária de f_n . Paidoussis (1982) também ressalta que embora existam estudos que sugiram formas de obter tal alteração em f_n (BLEVINS, 2001; MULCAHY, 1982), a partir de um dado comprimento da estrutura, é extremamente difícil, senão impraticável, alterar suficientemente o valor de f_n para prevenir os fenômenos indesejados.

Nesse contexto, os dispositivos atenuadores de VIV despontam como uma alternativa viável, uma vez que são acoplados ao equipamento original, não sendo necessárias grandes reformulações, nem alterando suas características de funcionamento. A Figura 1.14 ilustra oito dos principais dispositivos utilizados, que atuam quebrando ou prevenindo a formação de estruturas turbilhonares coerentes, de alta energia.

Figura 1.14: Dispositivos para atenuação de VIV em cilindros. (a) *Strake* helicoidal; (b) *Shroud*; (c) *Slats* axiais; (d) Carenagem perfiladas; (e) *Splitter*; (f) *Ribbons*; (g) aleta pivotada; (h) *Spoilers*.



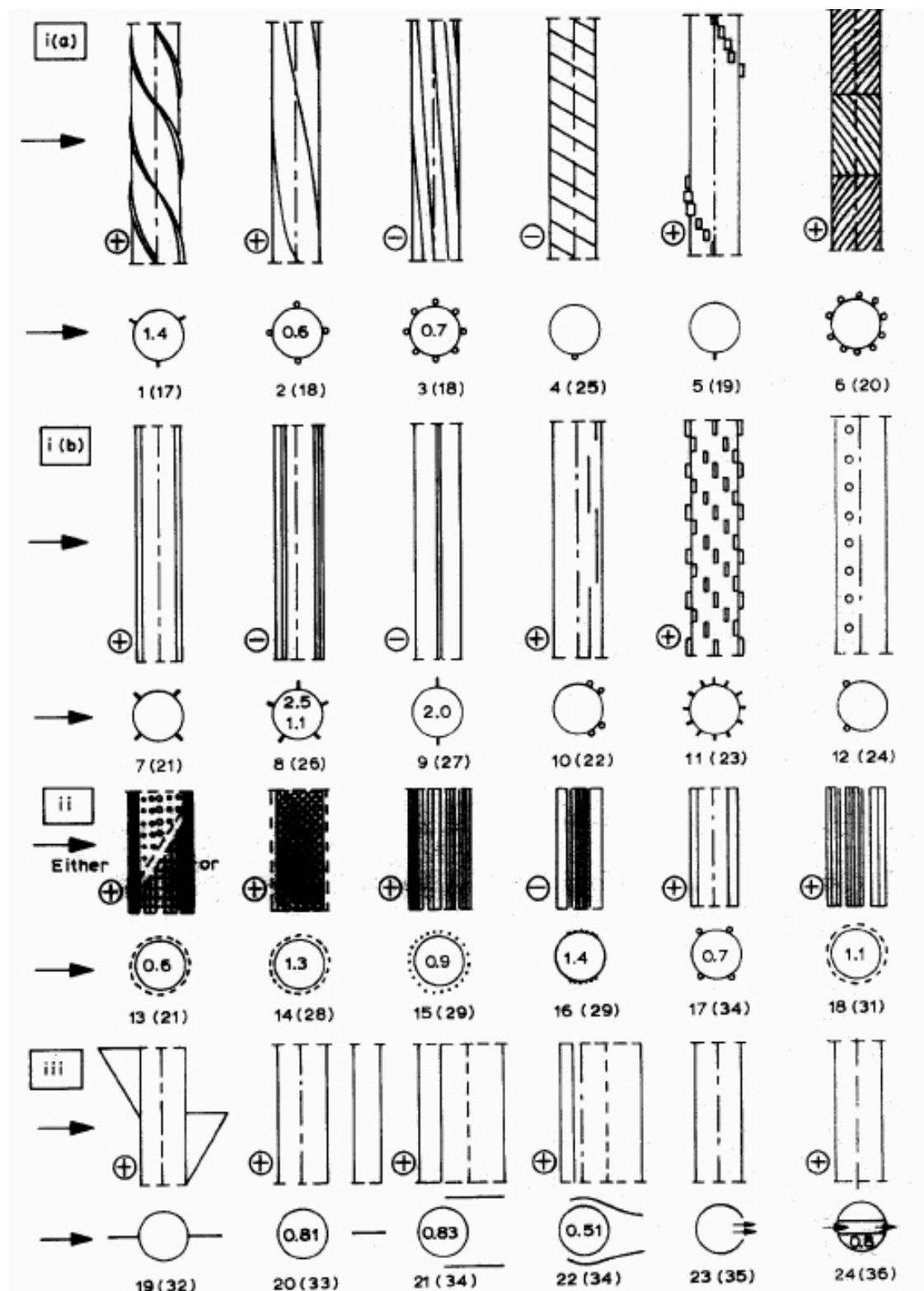
Fonte: Retirada de Blevins (2001).

Zdravkovich (1981) classifica os dispositivos atenuadores de VIV em três categorias, de acordo com o mecanismo fenomenológico:

- (i) Saliências de superfície (*strakes*, fios, barbatanas, esferas, etc.) que afetam a separação da camada limite;
- (ii) Coberturas (perfurações, hastes e lâminas axiais, etc.) que afetam o desenvolvimento das camadas limites;
- (iii) Estabilizadores de esteira (placas divisórias, placas guia, palhetas, fendas cortadas, etc.) que afetam o ponto de confluência.

A Fig. 1.15 mostra vários dispositivos agrupados nas três categorias. A primeira categoria foi dividida em duas subcategorias para separar os dispositivos omnidirecionais (não afetados pela direção do escoamento) dos unidirecionais. Na figura, o símbolo \oplus indica os dispositivos efetivos para redução da vibração, enquanto o símbolo \ominus indica os não efetivos.

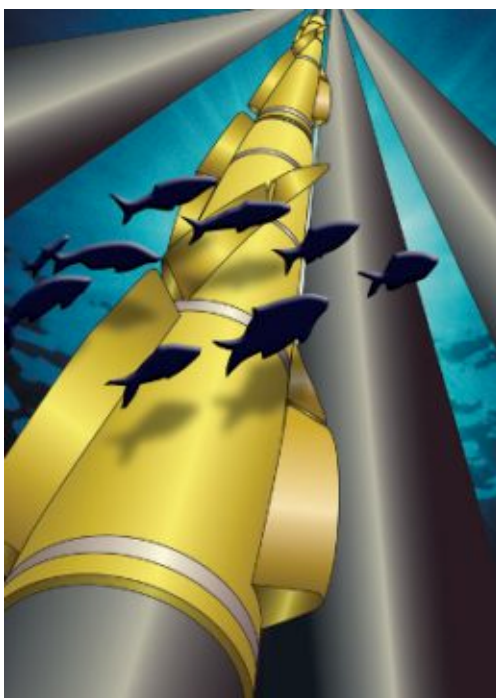
Figura 1.15: Dispositivos para atenuação de VIV: (i) Saliências de superfície ((a) omnidirecionais e (b) unidirecionais); (ii) Coberturas; (iii) Estabilizadores de esteira. (\oplus : eficientes; \ominus : ineficientes).



Fonte: Retirada de Zdravkovich (1981).

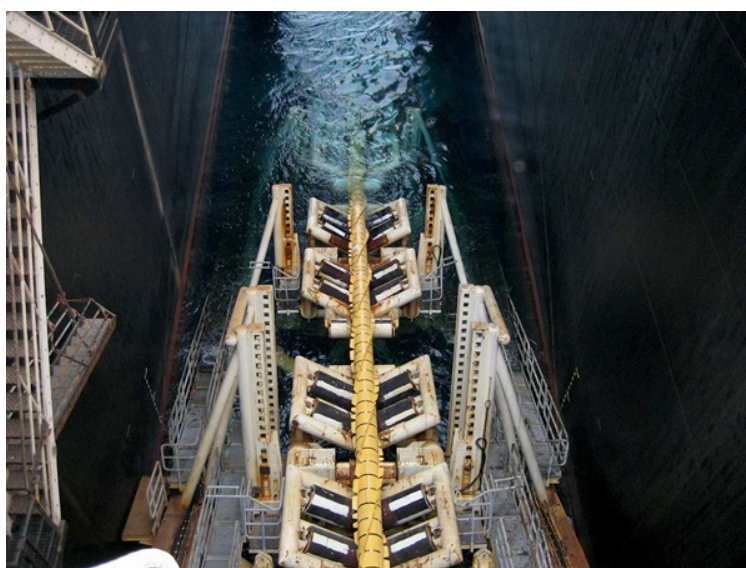
Wilson (2003) cita que embora existam diversos dispositivos atenuadores de VIV, um particularmente prático é o *strake* helicoidal em torno do cilindro (Fig. 1.14-a), como os exemplificados pelas Figs. 1.16 e 1.17.

Figura 1.16: Ilustração de *strake* helicoidal imerso no oceano.



Fonte: Retirada de Mark Tool Rubber & Company (2020).

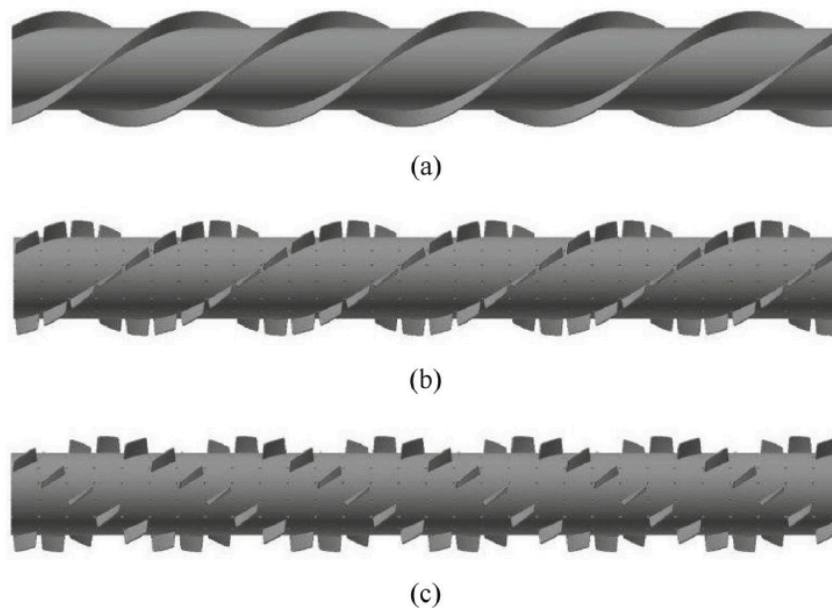
Figura 1.17: *Strake* helicoidal sendo imerso no oceano.



Fonte: Retirada de Lankhorst Engineered Products (2021).

Assi e Crespi (2020) avaliam os três tipos de *strakes* ilustrados na Fig. 1.18, e concluem que entre os três, o *strake* laminado apresentou os melhores resultados, sendo uma melhoria do *strake* contínuo tradicional; enquanto o *strake* laminado negativo apresentou o pior resultado para atenuação de VIV (os resultados dos autores podem ser conferidos na Tab. 2.4).

Figura 1.18: Modelos de *strakes*: (a) *Strake* contínuo; (b) *Strake* laminado e (c) *Strake* laminado negativo.



Fonte: Retirada de Assi e Crespi (2020).

Geometrias ótimas de *strakes* para a redução de carregamentos devido a VIV em cilindros circulares foram estudados por Wilson e Tinsley (1989). Os autores concluem com base nos 76 experimentos realizados que, para números de Reynolds entre 9000 e 15000, para o qual o $S_t = 0.21$, o valor do coeficiente de arrasto (C_D) geralmente aumenta com o aumento da quantidade de *strakes* e com o ângulo dos mesmos, e que o uso de 2, 3, ou 4 *strakes* é capaz de reduzir o valor do coeficiente de sustentação (C_L) em até 20%.

A realização de 76 experimentos para a determinação da geometria ótima, como realizado por Wilson (2003), não é sempre viável. Os altos custos envolvidos na preparação dos modelos e aquisição dos equipamentos necessários, e o tempo despendido em tal atividade, podem ser impraticáveis. Atualmente, métodos numérico-computacionais são capazes de

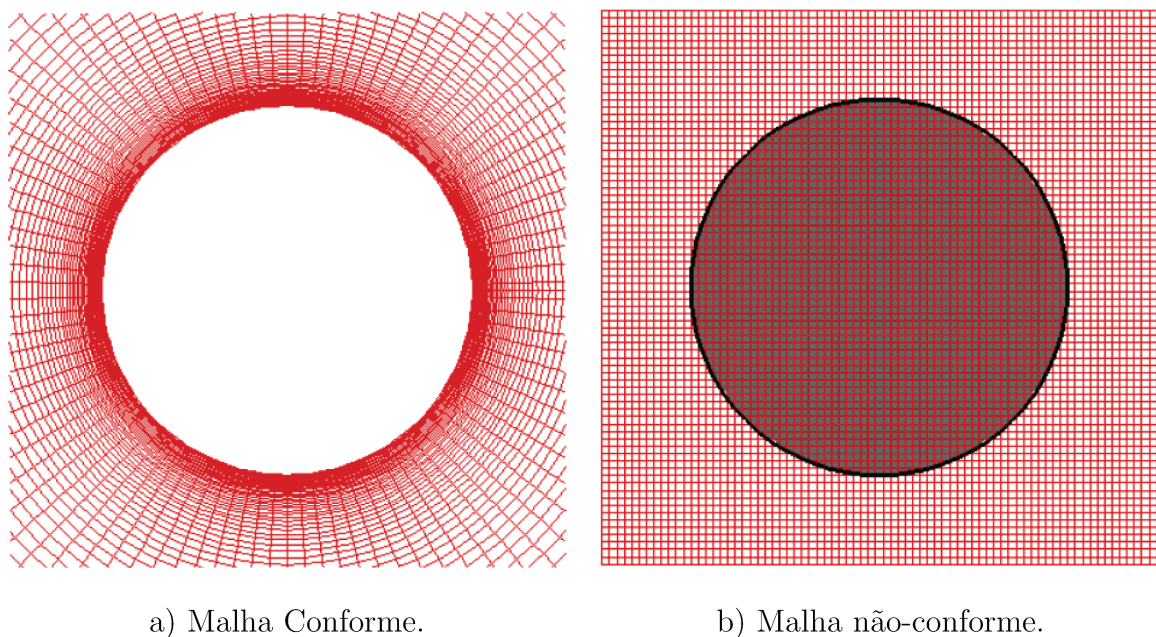
substituir ou pelo menos reduzir a quantidade de ensaios necessários.

1.1.3 Métodos computacionais para simulações do fenômeno VIV

Frequentemente as geometrias envolvidas em problemas reais são complexas e móveis, podendo ter seu movimento imposto ou determinado pela interação fluido-estrutura. Essas características implicam em grande desafio do ponto de vista numérico, conforme observa Andrade (2015).

A abordagem convencional para tratar tais problemas envolve o uso de malhas estruturadas ou não-estruturadas, que se ajustam ao corpo (MITTAL; IACCARINO, 2005), razão pela qual são denominadas malhas conformes. Um exemplo de malha conforme para a representação de um cilindro 2-D é mostrado na Figura 1.19 (a).

Figura 1.19: Representação de um cilindro 2-D usando (a) Malha Conforme e (b) Malha não-conforme.



Fonte: Retirada de Nam (2015).

Dentre as vantagens das malhas conformes, cita-se o bom controle da quantidade e tamanho dos volumes necessários para captar corretamente os fenômenos físicos locais, especialmente em altos números de Reynolds. As malhas conformes também permitem a imposição direta de condições de contorno e relativa facilidade de representação de geometrias

esbeltas, uma vez que as faces dos volumes são coincidentes com a geometria.

Por outro lado, de modo geral, duas etapas são necessárias para a geração de malhas conformes: primeiro, uma malha superficial em torno do corpo é criada. Em seguida, uma malha volumétrica é gerada para representar o domínio ocupado pelo fluido (FERZIGER; PERIC, 2001). Esse procedimento se torna laborioso mesmo para geometrias minimamente complexas. A tentativa de construir malhas com resolução local adequada e quantidade viável de elementos pode resultar na deterioração da qualidade da malha, o que influencia negativamente na precisão e nas propriedades de convergência dos esquemas numéricos. Por esse motivo, Mittal e Iaccarino (2005) ressaltam que a geração de malhas conformes de boa qualidade requer significativa intervenção humana.

No caso de malhas conformes não-estruturadas, apesar da dificuldade de geração ligeiramente menor, se comparadas às malhas estruturadas, mais recursos computacionais são necessários para a definição da conectividade entre os elementos ou volumes.

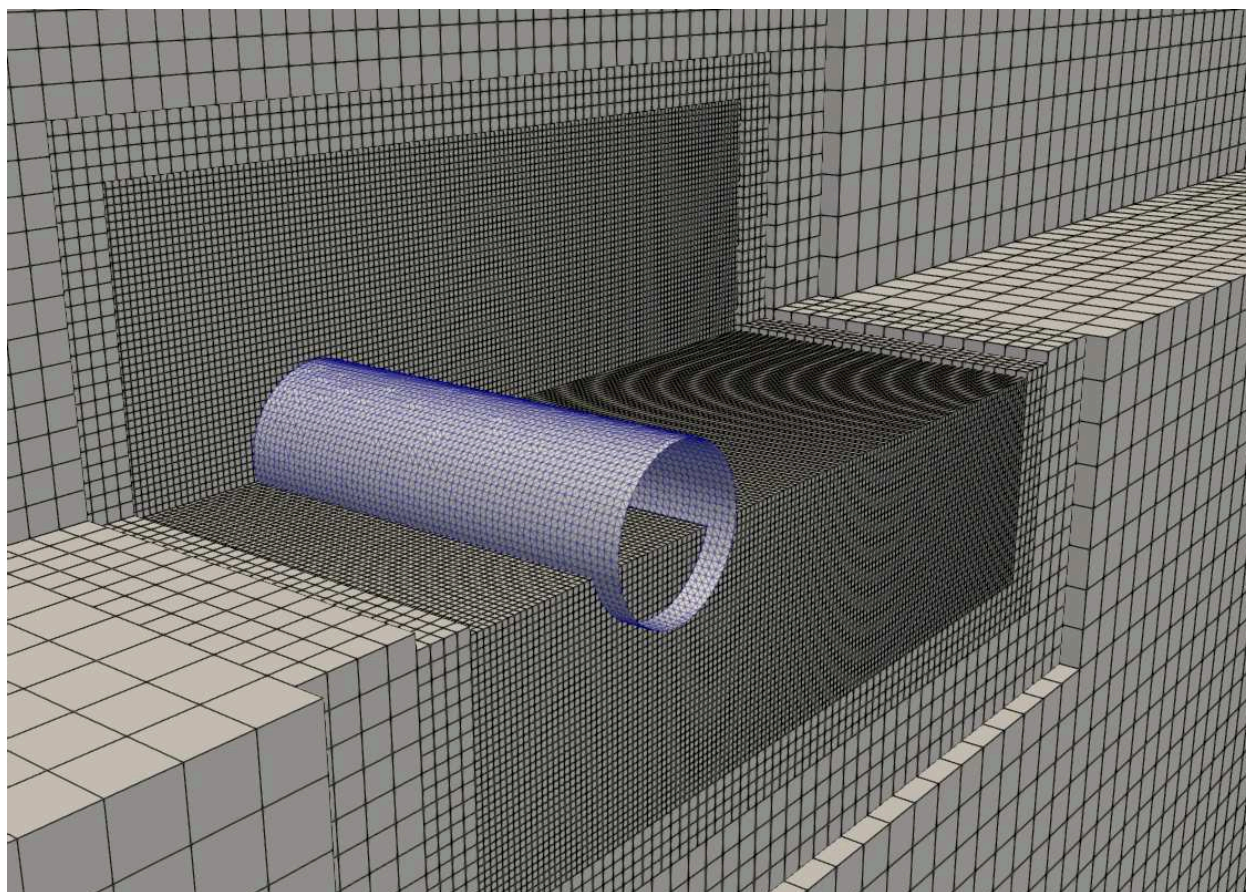
Em problemas envolvendo fronteiras móveis, as malhas conformes devem ser refeitas a cada passo de tempo e a solução deve ser projetada sobre a nova malha (TEZDUYAR, 2001). Nesses casos, além do alto custo computacional necessário para a reconstrução da malha, não há garantia de que a malha reconstruída apresentará a mesma qualidade da malha original.

Uma alternativa eficiente para o uso de malhas conformes, são os métodos de Fronteira Imersa (IB - *Immersed Boundary*), baseados em malhas não-conformes, como as da Figura 1.19 (b). Essa classe de métodos tem como principal vantagem a simplificação no processo de geração de malha e o menor esforço necessário para simulações envolvendo geometrias móveis. Tais vantagens justificam o uso desses métodos para as simulações dos fenômenos de interação fluido-estrutura dos dutos equipados com *strakes* abordados no presente trabalho.

O método de fronteira imersa foi proposto inicialmente por Peskin (1977) para simulação do fluxo sanguíneo em corações, a fim de projetar válvulas cardíacas artificiais. O método consiste no uso de dois tipos de malhas independentes e coexistentes para a simulação de escoamentos sobre corpos imersos. No primeiro tipo, chamado malha euleriana, as equações de balanço do fluido são resolvidas. Essa malha é não-conforme, sendo frequentemente fixa, estruturada e cartesiana. Métodos mais elaborados no entanto, permitem

também que a malha euleriana seja bloco-estruturada e com refinamento local adaptativo (multinível). O segundo tipo de malha, denominada lagrangiana, é responsável por representar a superfície da geometria imersa no escoamento. As malhas lagrangianas são usualmente compostas por elementos triangulares e não necessitam de informações sobre a conectividade entre os elementos. A Figura 1.20 exemplifica uma malha lagrangiana composta por elementos triangulares, imersa em uma malha euleriana cartesiana multinível gerada no código MFSim.

Figura 1.20: Malha lagrangiana de um cilindro imerso em uma malha euleriana multinível cartesiana gerada no código MFSim.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Os efeitos da presença do corpo imerso são transferidos para a malha euleriana por meio da imposição de condições de contorno. Ao contrário dos métodos de malha conforme, a imposição das condições de contorno no método de fronteira imersa não é evidente. Diferentes técnicas podem ser utilizadas para impor as condições de contorno, tais como a inserção de

termos fontes nas equações de transporte ou a modificação dos coeficientes dos sistemas lineares. As formas como essas condições são impostas são o que dá origem aos diversos métodos de fronteira imersa (MITTAL; IACCARINO, 2005).

Se comparado aos métodos tradicionais baseados em malhas conformes, a independência entre as malhas resulta em menor dificuldade de pré-processamento e maior agilidade para o tratamento de fronteiras móveis, uma vez que a malha onde as equações de transporte são resolvidas não precisa ser refeita a cada movimentação da estrutura (MITTAL; IACCARINO, 2005). Tais qualidades justificam o esforço empregado na melhoria dos métodos de fronteira imersa.

Entre as variantes do método de fronteira imersa, destacam-se os métodos de Múltipla Forçagem Direta (MDF) e o método de Volumes Fantasmas Locais (LGC). O método LGC proposto por Berthelsen e Faltinsen (2008), visa suprir uma das deficiências do MDF, que é a representação de geometrias esbeltas, como as aletas de *strakes*. Além disso, diferentemente do MDF, o LGC não necessita de um escoamento complementar para a imposição das condições de contorno, já que a imposição ocorre de forma direta (ANDRADE, 2015). Essa característica permite que os domínios internos e externos a um corpo sejam desacoplados, possibilitando que dois escoamentos distintos sejam simulados simultaneamente.

1.2 Motivação pelo tema

Historicamente, estruturas *offshore* são levemente amortecidas, apresentando frequências naturais dentro da faixa de frequências de excitação do oceano, e não são carenadas o suficiente para minimizar o arrasto e eliminar as adversidades das estruturas turbilhonares do tipo von-Karman (ROGERS, 1983). De acordo com Griffin (1981), estruturas marítimas são muito suscetíveis ao efeito de *lock-in* por não apresentarem magnitude de amortecimento reduzido (k_s) alta o suficiente. Segundo o autor, as oscilações podem ser efetivamente suprimidas com $k_s > 16$. No entanto, estruturas cilíndricas imersas em água frequentemente apresentam $k_s \leq 2$, e portanto, são suscetíveis a falhas catastróficas, seja por um único evento estrutural, ou por fadiga de curto prazo.

Rogers (1983) cita um incidente ocorrido com a Exxon em águas da costa brasileira,

quando a empresa implantava uma estrutura reforçada com 20 polegadas de diâmetro, e 27 toneladas de massa na extremidade livre inferior para combater as forças de arrasto. Embora a tubulação tenha se mantido relativamente vertical, houve uma falha por fadiga devido às severas excitações estruturais induzidas pelo escoamento (GARDNER; COLE, 1982). Dessa forma, Rogers (1983) conclui que tubulações e *risers* para aplicações em oceano profundo, devem utilizar dispositivos de atenuação de vórtices, seja para eliminar, ou pelo menos, minimizar os efeitos das estruturas turbilhonares.

As perdas financeiras devido a tais falhas, vão além do custo de reposição do equipamento. O vazamento do óleo que passa pelas estruturas acarretam em altas multas, custos de limpeza do ambiente, além de prejuízo ambiental incalculável. Fingas (2012) calcula entre \$40 a \$400 por litro, o custo de limpeza do ambiente devido ao vazamento de óleo, e que de 20% a 40% dos vazamentos ocorrem devido a falha de equipamentos.

Dada a complexidade dos fenômenos de interação fluido-estrutura, e os riscos a eles associados, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas computacionais mais sofisticadas, que permitam a simulação de dispositivos atenuadores de vórtices com agilidade e confiança. Nesse contexto, as atividades do presente trabalho são motivadas pela necessidade da compreensão da física de tais dispositivos, e pela necessidade do desenvolvimento de novas ferramentas para a análise do fenômeno

1.3 Objetivos

Os objetivos gerais da presente dissertação são (1) realizar simulações com interação fluido-estrutura de cilindros equipados com *strakes* utilizando o método de MDF, a fim de obter parâmetros que auxiliem no projeto de novos *strakes*; e (2) a implementação e validação de rotinas específicas do LGC que está sendo implementado no MFSim. O método LGC tem como objetivo macro, possibilitar que escoamentos sobre geometrias esbeltas (como as aletas dos *strakes*) sejam simuladas com maior fidelidade que o método MDF, além de permitir a simulação de configurações complexas, como a análise dos escoamentos internos e externos a um duto, simultaneamente.

Objetivos específicos

- Avaliar o uso do método de Múltipla Forçagem Direta sobre a geometria de *strakes*;
- Implementar e descrever rotinas específicas do método de Volumes Fantasma Locais:
 - Implementar a etapa de marcação dos volumes baseada em malhas triangulares não estruturadas:
 - * Marcação primária;
 - * Marcação secundária;
 - * Paralelização e otimização de custo computacional;
 - * Validação.
 - Acoplar a marcação às etapas já implementadas do método (correção das matrizes de velocidade e pressão)
 - Verificação e validação do método implementado;

1.4 Plataforma computacional MFSim

As simulações e implementações abordadas no presente trabalho foram realizadas no código computacional MFSim, o qual está em desenvolvimento há mais de 13 anos no laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da Universidade Federal de Uberlândia. O código teve seu início com o trabalho de VILLAR (2007), e desde então, diversos alunos e pesquisadores o tem aprimorado.

O código é baseado em discretização por volumes finitos e emprega malhas regulares, cartesianas, bloco-estruturadas para a discretização espacial das equações de transporte dos meios fluidos. Atualmente, para a simulação de escoamentos sobre corpos imersos, a técnica de múltipla forçagem direta está disponível (GASCHE; BARBI; VILLAR, 2012; VEDOVOTO; SERFATY; SILVEIRA NETO, 2015). Além disso, o código permite simulações de interação fluido-estrutura (RIBEIRO NETO *et al.*, 2019), escoamentos multifásicos (DENNER *et al.*, 2014), reativos (GONÇALVES; MAGALHÃES; VEDOVOTTO, 2020; DAMASCENO; SANTOS; VEDOVOTO, 2018), com mudança de fase (PINHEIRO, 2018) e modelagem de turbulência por meio dos métodos de Simulação das Grandes Escalas (LES), Médias

de Reynolds Transientes (URANS) (VEDOVOTO; SERFATY; SILVEIRA NETO, 2015; DAMASCENO; VEDOVOTO; SILVEIRA NETO, 2015). O acoplamento pressão-velocidade pode ser realizado por meio dos métodos SIMPLE ou Passos Fracionados. A integração temporal é semi-implícita, de forma que os termos difusivos das equações de transporte são resolvidos de forma implícita, enquanto os termos advectivos e de pressão são resolvidos explicitamente. Os sistemas lineares da velocidade e das equações de fechamento da turbulência podem ser resolvidos pelo método multigrid-multinível ou por meio dos algoritmos da biblioteca PETSC (BALAY *et al.*, 2021a), (BALAY *et al.*, 2021b).

PARTE II: SIMULAÇÕES FSI DO STRAKE

CAPÍTULO II

Simulações Fluido-Estrutura dos *Strakes*

Três conjuntos de simulações foram realizados. No primeiro conjunto, duas geometrias foram analisadas: um cilindro circular liso, e o mesmo cilindro equipado com um *strake* helicoidal. As geometrias são aqui denominadas “cilindro 05” e “*strake* 05”. O objetivo dessas simulações foi comparar o comportamento dinâmico das duas geometrias. Foram analisadas as frequências e amplitudes de pico de vibração para uma velocidade reduzida dentro do intervalo de *lock-in* e para uma velocidade fora do intervalo. As geometrias também foram avaliadas com passo completo e 1/3 de passo.

No segundo conjunto, o *strake* 05 foi simulado para diferentes números de Reynolds e de velocidades reduzidas, segundo um planejamento experimental. A análise permitiu o estudo da dinâmica do corpo em função do escoamento.

No terceiro conjunto, os parâmetros geométricos de altura, comprimento e ângulo das aletas do *strake* foram avaliados. Para tanto, um planejamento fatorial com 15 geometrias foi elaborado. Como resultado, foram obtidos os valores de C_L , C_D e deslocamentos para cada geometria. A Tab. 2.1 resume as informações acerca dos três conjuntos de simulação.

Em todas as simulações, as extremidades da estrutura foram ancoradas por molas de rigidez K . Os únicos graus de liberdade permitidos foram deslocamento de corpo rígido nas direções *cross* e *in-line*. Além disso, para evitar que o corpo se deslocasse excessivamente na direção *in-line* durante o regime transiente, uma força F_D foi adicionada na direção contrária ao escoamento, como mostrado na figura 2.1. Isso foi feito para que a simulação iniciasse

Tabela 2.1: Conjunto de simulações realizadas

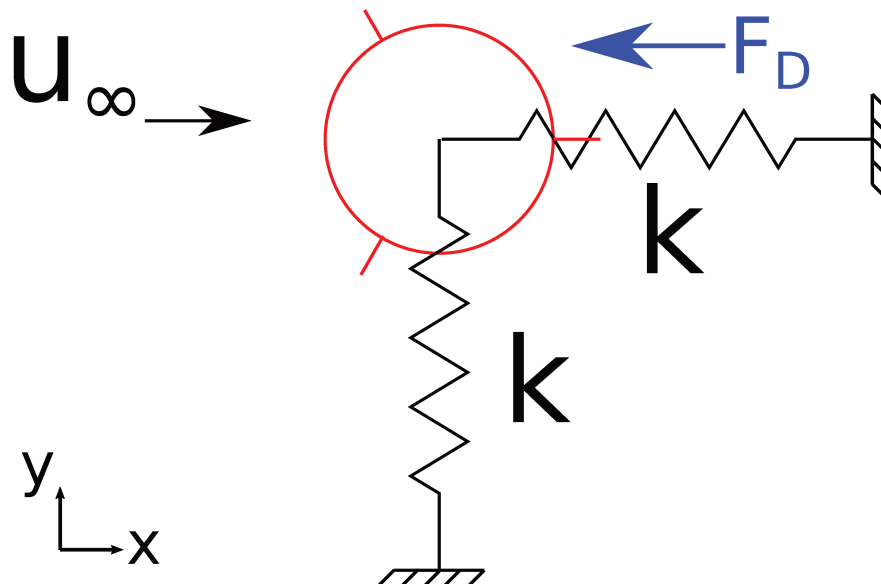
Conjunto	Geometrias	Condições	Objetivos
1	Clindro 05, <i>Strake</i> 05 (1/3 passo e passo completo)	$u^* = 2\pi$ e 10π $Re = 6600$	Comparar o comportamento dinâmico das geometrias e avaliar uso da metodologia para as próximas simulações.
2	<i>Strake</i> 05 (1/3 de passo)	$u^* = 1.07 - 9.63$, $Re = 8.13e4 - 3.21e5$	Avaliar a influência do número de Reynolds e da velocidade reduzida na dinâmica do <i>strake</i> 05.
3	15 <i>strakes</i> (1/3 de passo)	$u^* = 5$, $Re = 181000$	Avaliar a influência dos parâmetros geométricos no comportamento dinâmico dos <i>strakes</i> .

Fonte: Elaborada pelo autor.

em uma condição próxima ao equilíbrio estático. O valor dessa força foi definido segundo estimativas de coeficiente de arrasto para cilindros.

Para o cálculo da massa do cilindro, foi considerada a espessura da parede do duto como sendo 1,0 polegada, densidade do material de $7850,0 \text{ kg/m}^3$ e massa específica do fluido interno (escoamento complementar) de $1000,0 \text{ kg/m}^3$.

Figura 2.1: Modelo físico estrutural das simulações de interação fluido-estrutura.

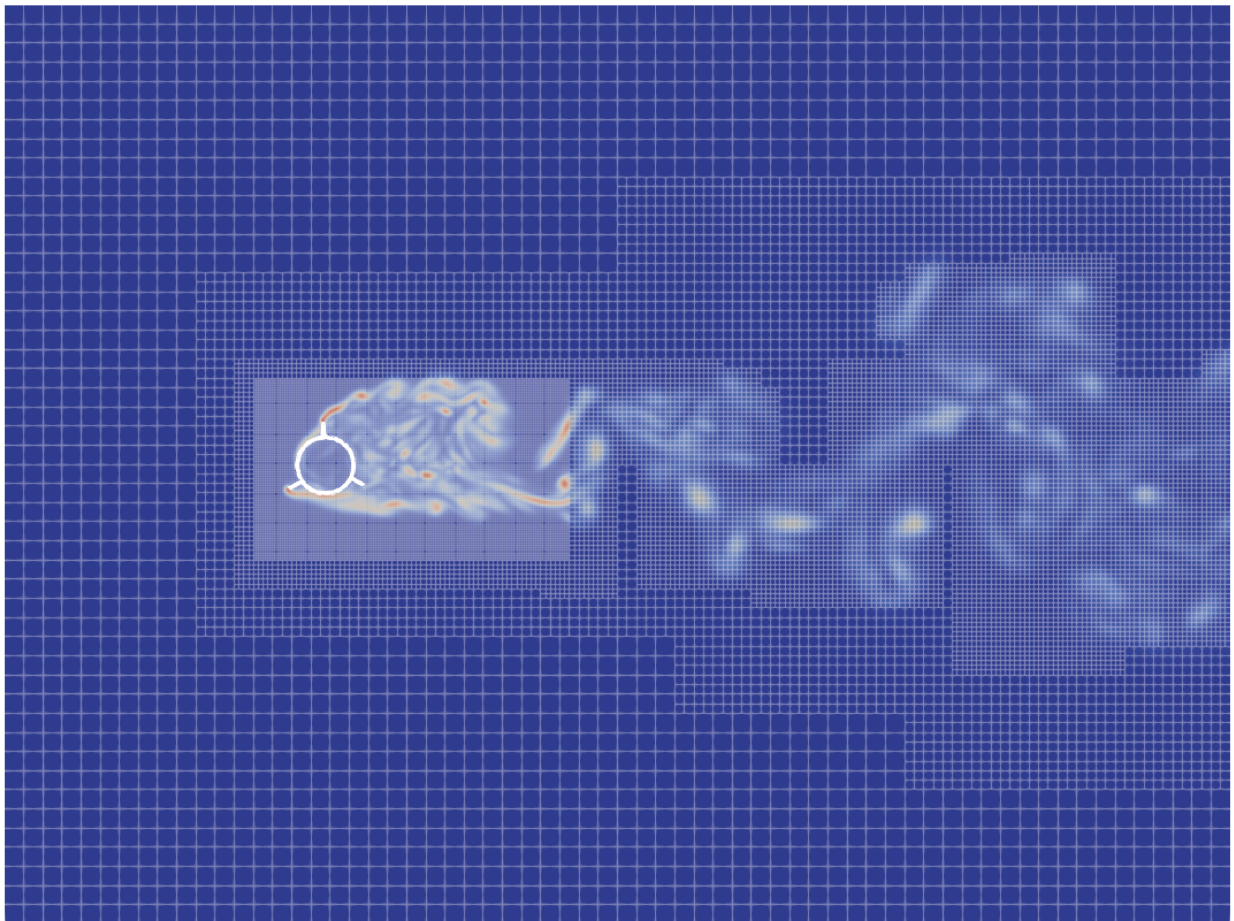


Fonte: Elaborada pelo autor.

O domínio computacional das simulações foi definido com dimensões de $22D$ na direção *in-line* (x) e $16D$ na direção *cross* (y). Na direção axial (z), o domínio apresenta dimensão igual ao comprimento do cilindro. Foram definidos 4 níveis de refinamento para a malha

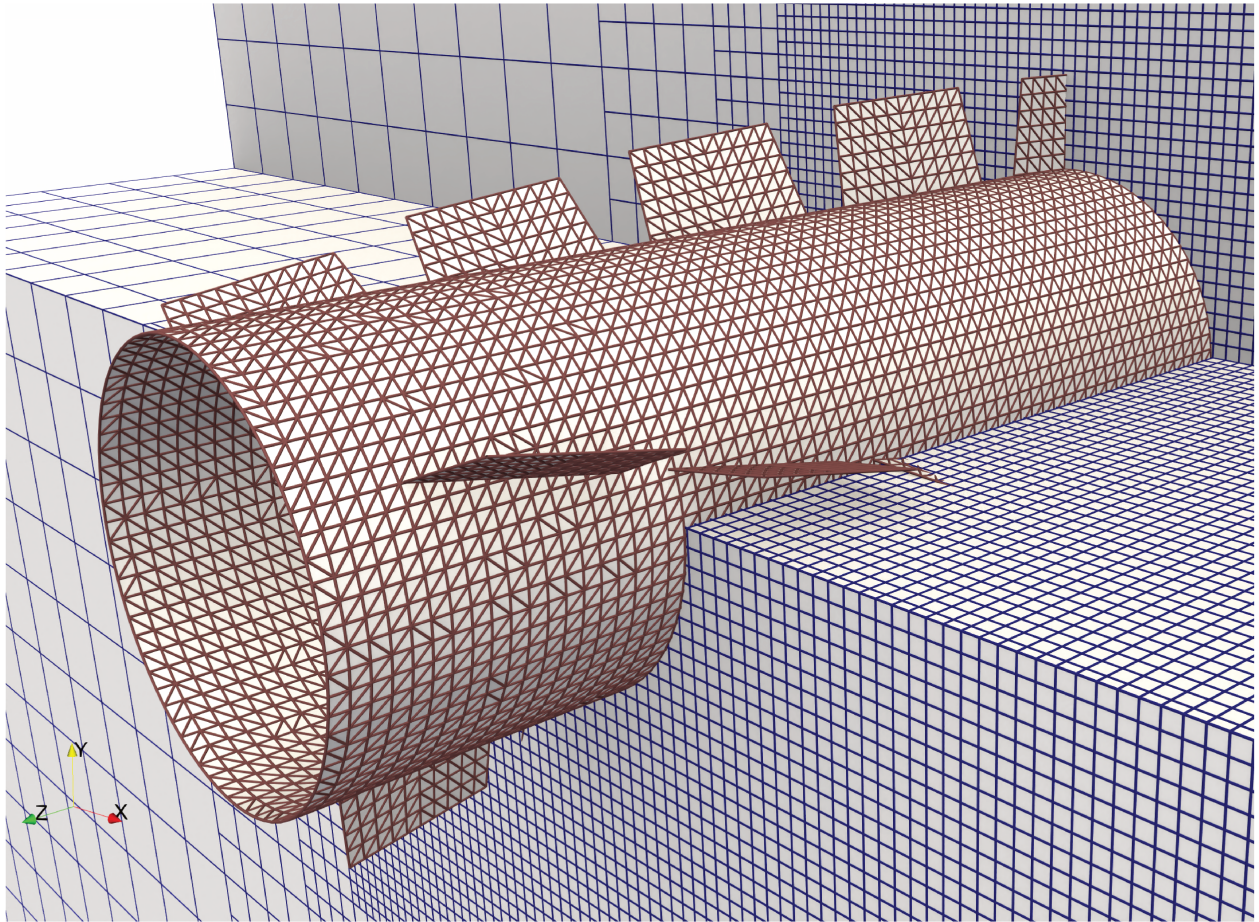
euleriana, de forma que no nível mais fino os volumes apresentem dimensões $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,014275 \text{ m} \approx D/22$. Cada nível apresenta uma razão de refinamento de 2 em relação ao nível vizinho. Para representação da esteira, foi aplicado o refinamento adaptativo por critério de vorticidade. Um exemplo de malha resultante é mostrado na Fig. 2.2. Na Fig. 2.3 é dado enfoque para a malha lagrangiana imersa na euleriana.

Figura 2.2: Corte no plano x-y de malha euleriana multinível com refinamento próximo ao corpo e refinamento adaptativo de acordo com o critério de vorticidade.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Figura 2.3: Malha lagrangiana de *strake* imersa na malha euleriana.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

2.1 Modelagem

2.1.1 Modelagem matemático-diferencial

Para a modelagem matemático-diferencial do escoamento, as equações resolvidas foram o balanço de massa para escoamentos incompressíveis e a equação de balanço da quantidade de movimento linear, considerando meio isotérmico e propriedades físicas constantes. A Eq. (2.1) expressa a equação do balanço de massa simplificada para escoamentos incompressíveis em coordenadas cartesianas, utilizando notação de indicial. Na equação, u_j é a

componente da velocidade na direção j , e x_j é a coordenada espacial na direção j .

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad j = 1, 2, 3. \quad (2.1)$$

O balanço de quantidade de movimento linear, na forma divergente, é expresso pela Eq. (2.2), onde $i, j = 1, 2, 3$; P é a pressão; ρ_f é a massa específica do fluido; ν é a viscosidade cinemática; e t é o tempo.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.2)$$

As equações Eqs. (2.1) e (2.2) são suficientes para a simulação dos escoamentos de interesse. No entanto, para o uso dessas equações, é necessário que todas as grandezas características da turbulência sejam resolvidas, o que é impraticável devido ao custo computacional. Dessa forma, é necessário o uso de modelos de fechamento para turbulência. O modelo utilizado no presente trabalho foi o LES (*Large Eddy Simulation*), que resolve as grandes estruturas da turbulência e modela as interações não-lineares entre elas e as menores estruturas, ou escalas sub-malha. No presente trabalho foi utilizado o modelo proposto por Smagorinsky (1963) com função de amortecimento de van Driest (FERZIGER; PERIC, 2001) para a modelagem das interações sub-malha. Mais detalhes sobre o modelo utilizado podem ser encontrados no trabalho de Damasceno, Vedovoto e Silveira Neto (2015).

2.1.2 Modelagem numérico-computacional

Para a discretização do termo temporal foi utilizado o método VSSBDF2 (*Variable Step-size Second-order Semi-implicit Backward Differentiation Formula*) com passo de tempo variável (WANG; RUUTH, 2008). A discretização do termo advectivo foi realizada com o método CUBISTA (*Convergent and Universally Bounded Interpolation Scheme for the Treatment of Advection*) proposto por Alves, Oliveira e Pinho (2003); enquanto o método CDS (Central Difference Scheme) (FERZIGER; PERIC, 2001) foi utilizado para a discretização

do termo difusivo. O acoplamento pressão-velocidade foi tratado com o método do passo fracionado proposto por Chorin (1967).

O tratamento da fronteira imersa foi realizado utilizando o método *Multi-direct Forcing* adaptado de Wang, Fan e Luo (2008) e cuja implementação é detalhada em Ribeiro Neto (2016) e Vedovoto, Serfaty e Silveira Neto (2015).

2.2 Conjunto 1: Comparações entre cilindro 05 e *strake* 05

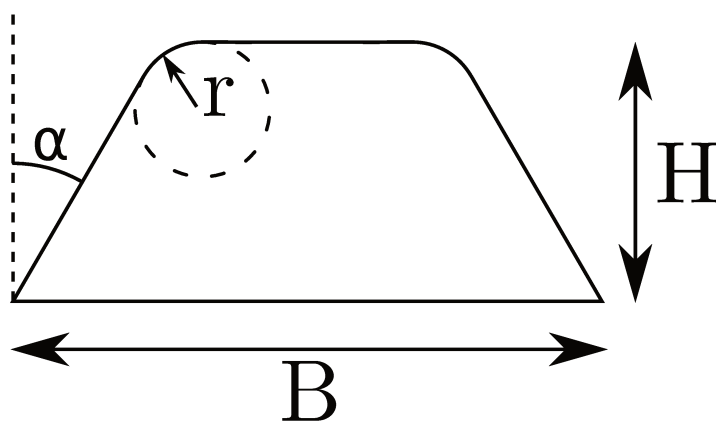
No primeiro conjunto de simulações, o cilindro 05 e o *strake* 05 foram comparados, tanto com 1/3 de passo quanto com passo completo. Os dados geométricos do *strake* 05 são expostos na tabela 2.2 e ilustrados na Fig. 2.4. Ressalta-se que o raio do *fillet* e a espessura da aleta não foram consideradas na malha lagrangiana devido às suas reduzidas dimensões, se comparadas ao restante da geometria.

Tabela 2.2: Dados geométricos do *strake* modelo 05.

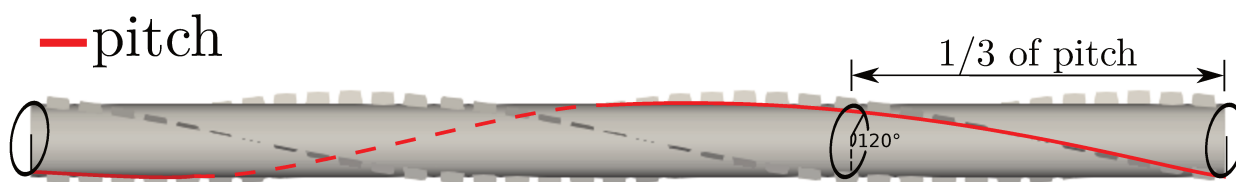
Parâmetro geométrico	Valor
Diâmetro do cilindro (D)	325,1 <i>mm</i>
Número de hélices	3
Passo (<i>Pitch</i>)	5,2016 <i>m</i>
Número de aletas / Passo	34
Altura da aleta (H - <i>vane height</i>)	67,6 <i>mm</i>
Ângulo (α)	9°
Raio do <i>fillet</i> (r)	20 <i>mm</i>
Espessura da aleta	15 <i>mm</i>
Comprimento da base das aletas (B - <i>vane width</i>)	137 <i>mm</i>
Espaçamento entre aletas	38 <i>mm</i>

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.4: Definições das variáveis geométricas.



(a) Variáveis geométricas da aleta.

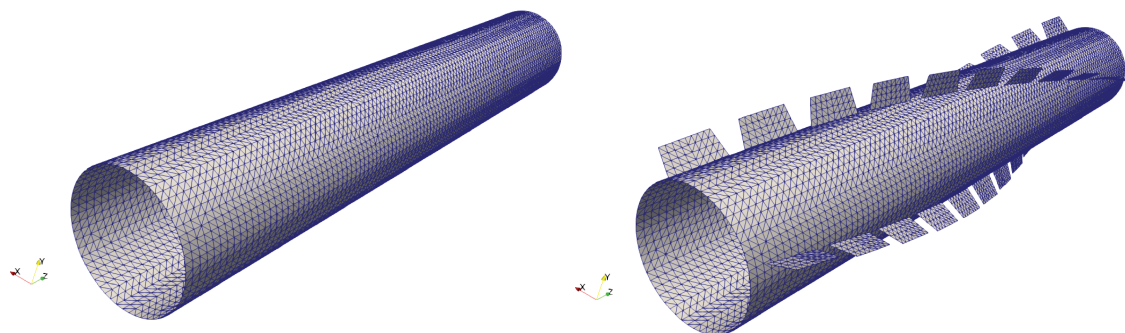


(b) Passo do *strake*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As malhas lagrangianas das geometrias com 1/3 de passo são mostradas na Fig. 2.5, enquanto as das geometrias com passo completo são expostas na Fig. 2.6.

Figura 2.5: Malha lagrangiana do cilindro 05 e do *strake* 05 com 1/3 de passo.

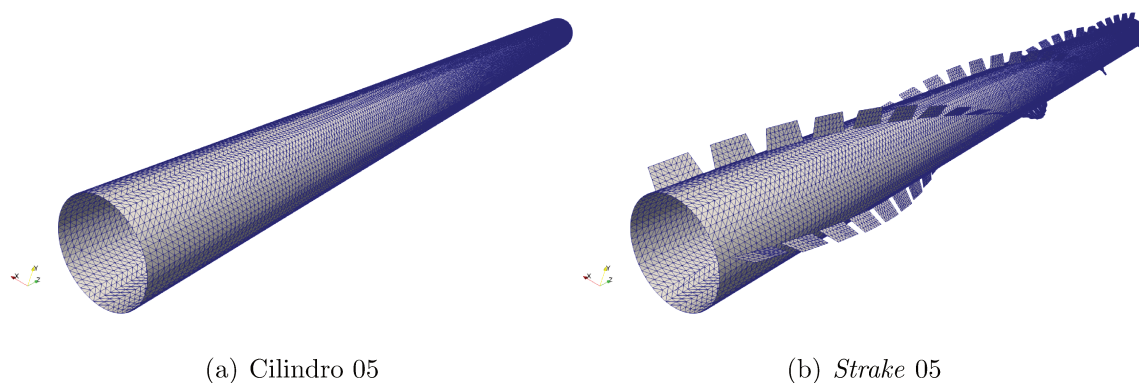


(a) Cilindro 05

(b) *Strake* 05

Fonte: Elaborada pelo autor.

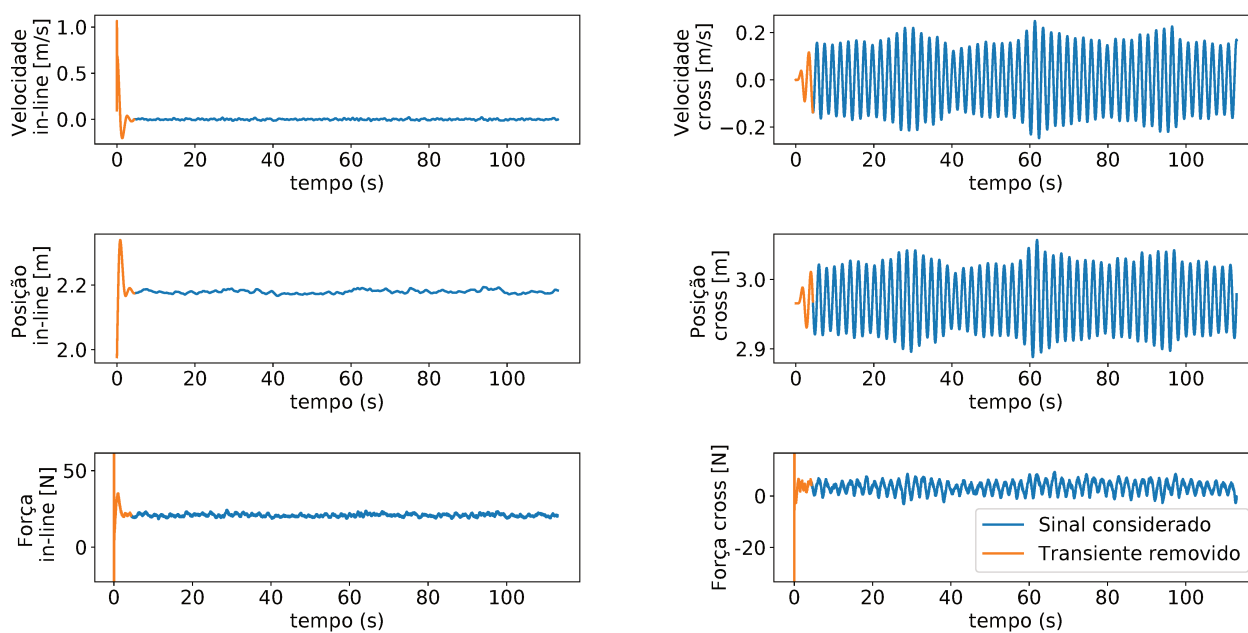
Figura 2.6: Malha lagrangiana do cilindro 05 e do *strake* 05 com passo completo.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Para a análise dos resultados, a parte transiente dos sinais foi removida, como exemplificado na Fig. 2.7. Pela figura fica clara a importância da adição da força contrária ao escoamento. Mesmo com a adição da força houve deslocamentos significativos na direção *in-line*. Sem a força o tempo para que o deslocamento entrasse em regime estatisticamente permanente era proibitivo.

Figura 2.7: Exemplo de remoção do trecho transiente do sinal.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

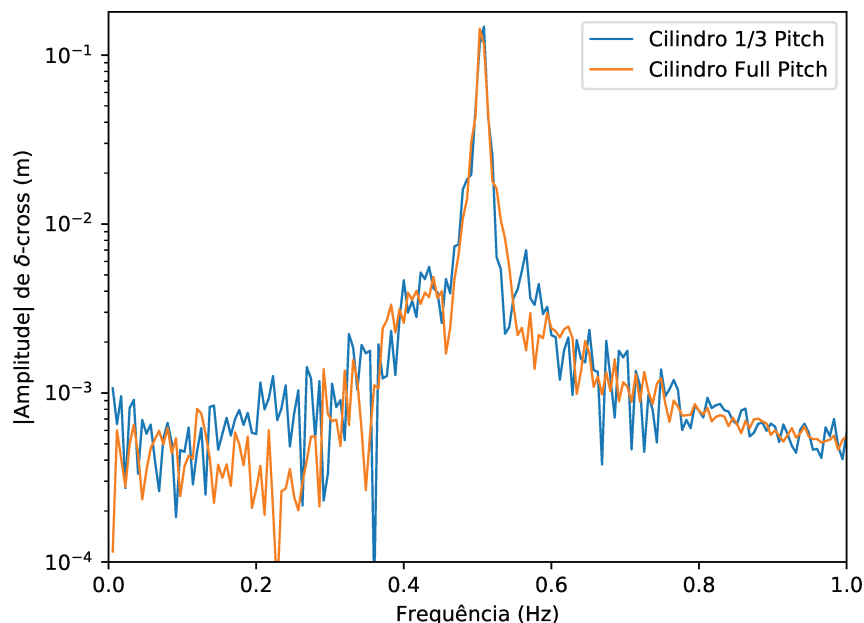
2.2.1 Comparação 1/3 passo vs. passo completo

Para reduzir o custo computacional, foi proposto o uso de geometrias com comprimento igual a 1/3 do passo do *strake*. Para validar a hipótese de que tal seção seria representativa, as geometrias do cilindro 05 e do *strake* 05 com 1/3 de passo e com passo completo foram simuladas na condição de $u^* = 5$ e $Re_D = 181000$.

Como a massa relativa aos dois comprimentos são diferentes, já que o material é o mesmo, a frequência natural das estruturas também é diferente. Dessa forma, para manter a velocidade reduzida constante, a rigidez das molas foram alteradas conforme necessário.

Na Fig. 2.8 é apresentada a Transformada Discreta de Fourier (DFT) do deslocamento na direção *cross* para os dois cilindros (1/3 e passo completo). Como pode ser observado, a diferença entre a frequência e amplitude no pico não foi significativa.

Figura 2.8: Comparação entre a DFT dos deslocamentos *cross* do cilindro equivalente a 1/3 de passo e passo completo.



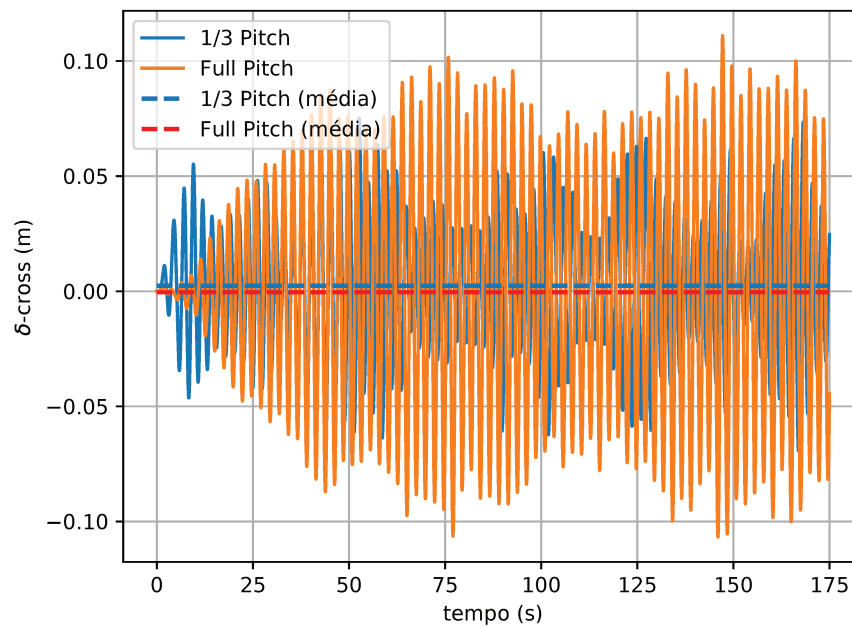
Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

No caso dos *strakes*, a discrepância foi maior, uma vez que ocorre uma assimetria na disposição das aletas, o que gera assimetria nas forças e na frequência de emissão de estruturas turbilhonares. Tal fenômeno pode ser verificado na média não nula dos deslocamentos do *strake* com 1/3 de passo, como mostrado na Figura 2.9. As figuras 2.10 e 2.11 revelam uma

diferença de 1,9% na frequência de pico das geometrias, bem como uma diferença de 46,3% na amplitude do deslocamento e 45,6% na amplitude da força.

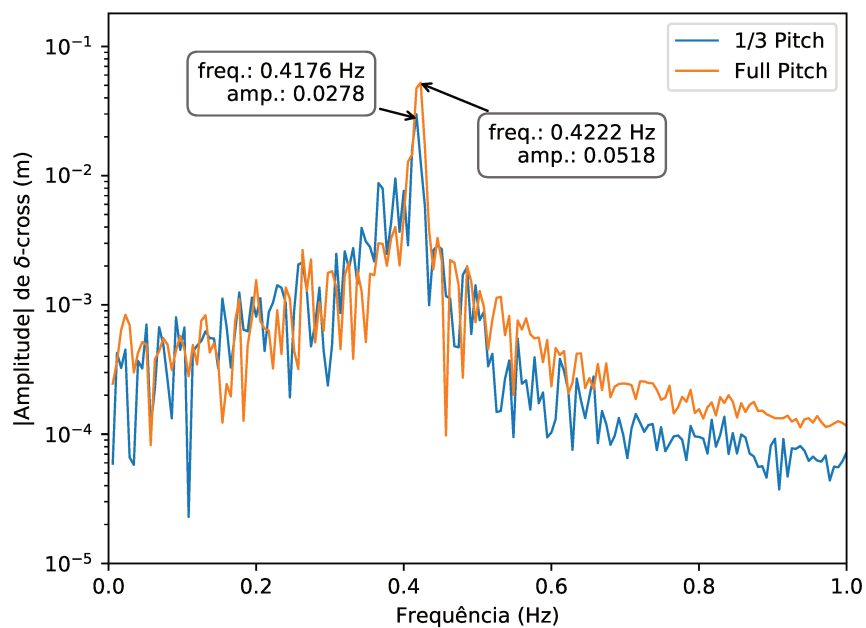
A grande diferença na inércia das duas geometrias pode justificar o desvio na amplitude da força e do deslocamento. No entanto, a boa aproximação da frequência e do padrão de vibração, especialmente para baixas frequências, justificaram o uso da geometria com 1/3 de passo. Mesmo com a significativa redução do custo computacional, cada simulação com 1/3 de passo ainda demandou em média, duas semanas para a simulação de 175 segundos físicos com processamento paralelo dividido em 8 processos em workstations com processadores Intel® Xeon® Silver 4214 CPU @ 2.20GHz e 32Gb de memória RAM.

Figura 2.9: Comparação entre o sinal temporal dos deslocamentos *cross* do *strake* com 1/3 de passo e passo completo.



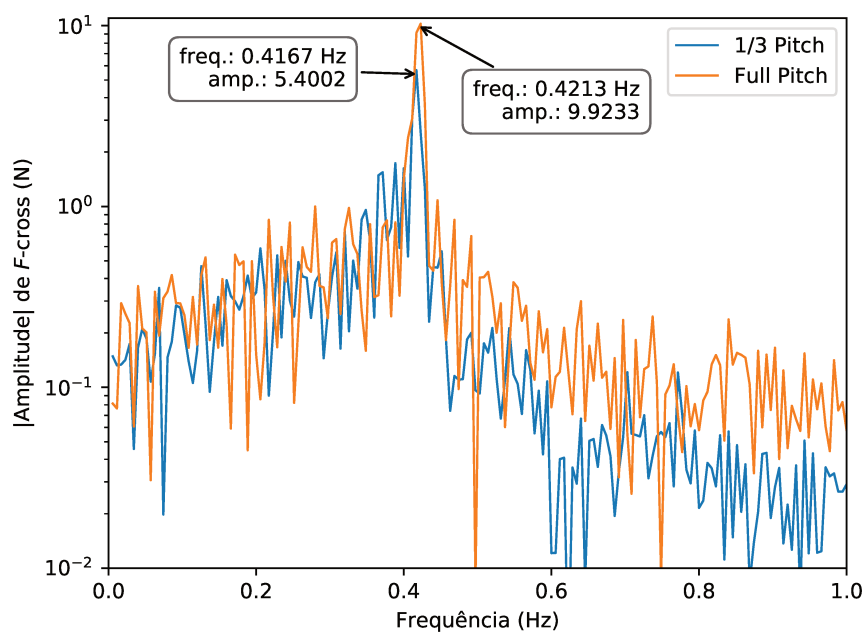
Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.10: Comparação entre a DFT dos deslocamentos *cross* do *strake* com 1/3 de passo e passo completo.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.11: Comparação entre a DFT das forças *cross* do *strake* com 1/3 de passo e passo completo.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

2.2.2 Comparação entre a dinâmica do cilindro 05 e *strake* 05

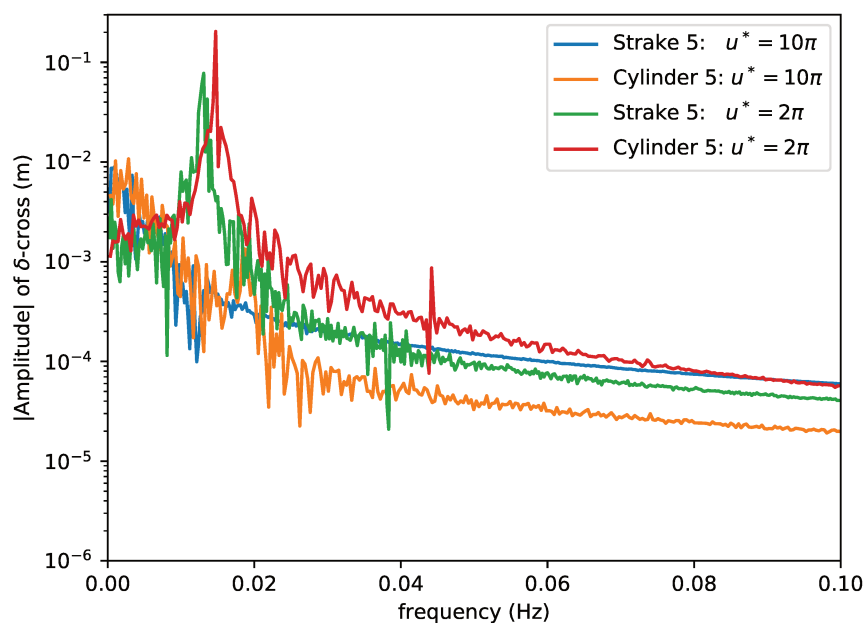
Após a confirmação de que as simulações com 1/3 de passo seriam representativas, foram realizadas mais comparações entre o cilindro 05 e o *strake* 05. Dessa vez foram definidas duas velocidades reduzidas, $u^* = 2\pi$ (dentro do intervalo esperado de *lock-in*) e $u^* = 10\pi$ (fora do intervalo esperado de *lock-in*). As condições físicas definidas são expostas abaixo:

$$\begin{aligned} Re_D &= 6600; \\ u_\infty &= 0,034 \text{ m/s}; \\ \rho &= 1000,0 \text{ kg/m}^3; \\ \mu &= 1,62 \cdot 10^{-3} \text{ kg/ms}^2; \\ u^* &= 2\pi \text{ e } 10\pi. \end{aligned}$$

Na Fig. 2.12, são comparadas a DFT do sinal de deslocamento na direção *cross* ($\delta - cross$), em escala logarítmica, para cada uma das simulações. Para melhor visualização das amplitudes dos sinais para os casos de $u^* = 2\pi$, os sinais em escala linear são mostrados na Figura 2.14. A partir da análise das figuras, ficam evidentes os picos de grande amplitude dos deslocamentos para os casos de $u^* = 2\pi$, indicando o fenômeno de VIV, como esperado. Com o uso do *strake* 05, a redução na frequência de vibração nessas condições foi de aproximadamente 10%, enquanto a redução da amplitude foi de aproximadamente 62%.

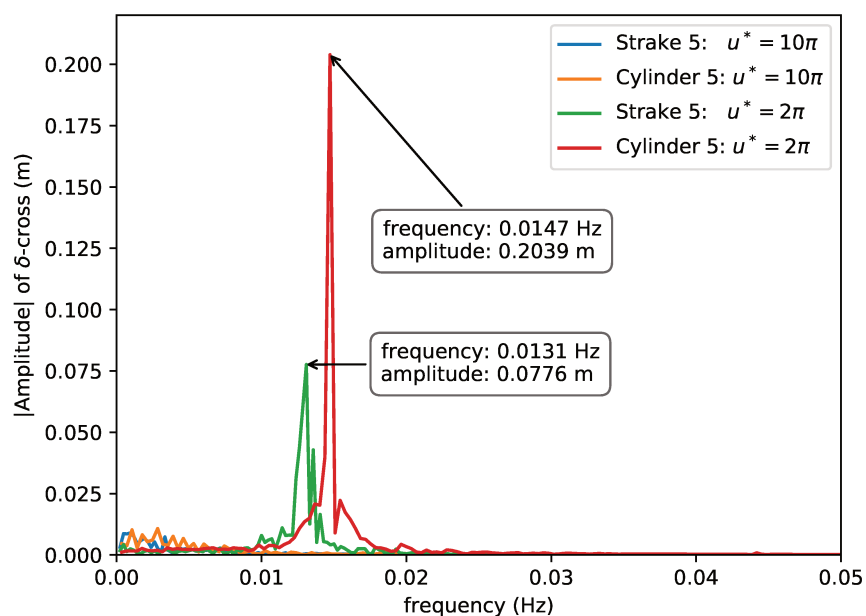
Também é importante notar que na Fig. 2.12, mesmo em $u^* = 10\pi$ o cilindro 05 apresenta um pico sutil de vibração próximo à frequência de 0,02 Hz. Para o *strake* 05 na mesma condição, não é observado um pico equivalente, o que revela que o *strake* foi eficaz mesmo fora da região de *lock-in*. Esse resultado pode ter efeito sobre a vida em fadiga do componente a longo prazo.

Figura 2.12: DFT dos sinais de deslocamento na direção *cross* em escala logarítmica.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.13: DFT dos sinais de deslocamento na direção *cross* em escala linear.

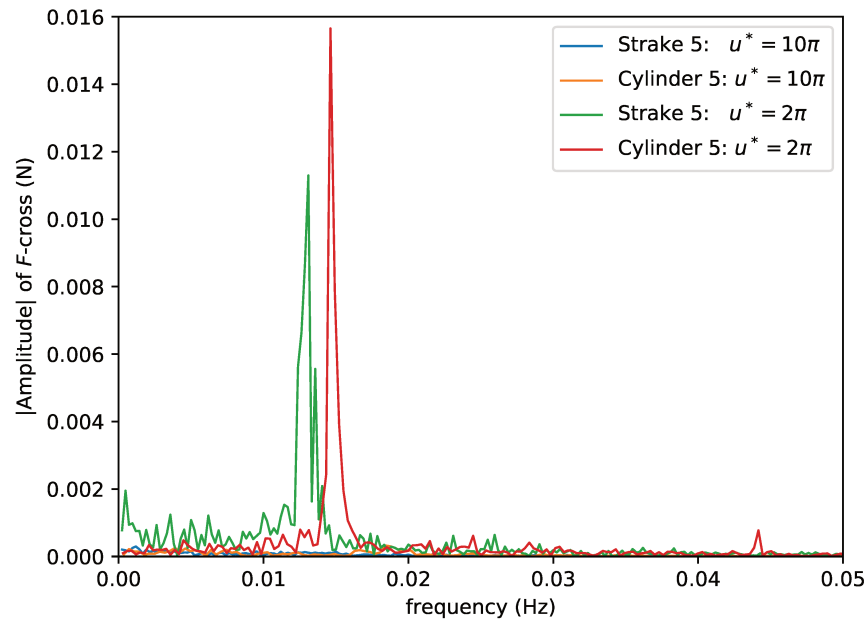


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Na Fig. 2.14 são mostradas as DFT dos sinais de força na direção *cross*. Observa-se que o comportamento da força foi coerente com o do deslocamento na mesma direção, ou

seja, houve redução equivalente na frequência e na amplitude de vibração.

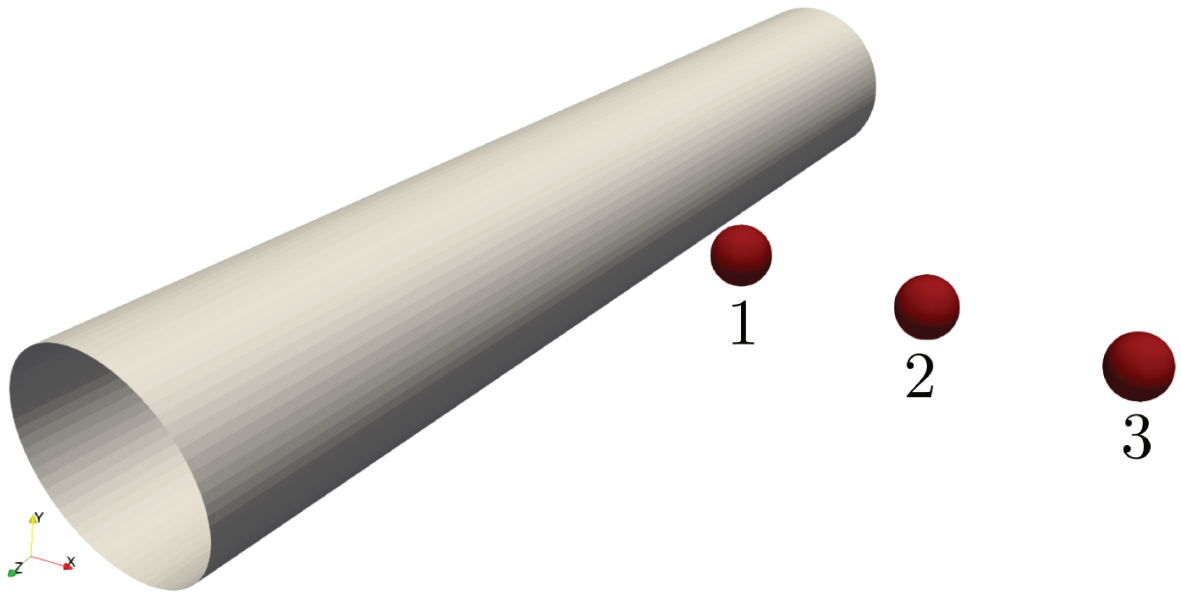
Figura 2.14: DFT dos sinais de força na direção *cross* em escala linear.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Posteriormente, os sinais de vibração do cilindro foram relacionados com os sinais de velocidade do escoamento por meio de sondas (*probes*) colocadas próximas ao corpo, na metade da posição axial. Na Fig. 2.15, são mostradas a posição das três sondas cujos sinais são estudados. As sondas estão distantes do centro do cilindro de $0.75D$, $1.75D$ e $2.75D$.

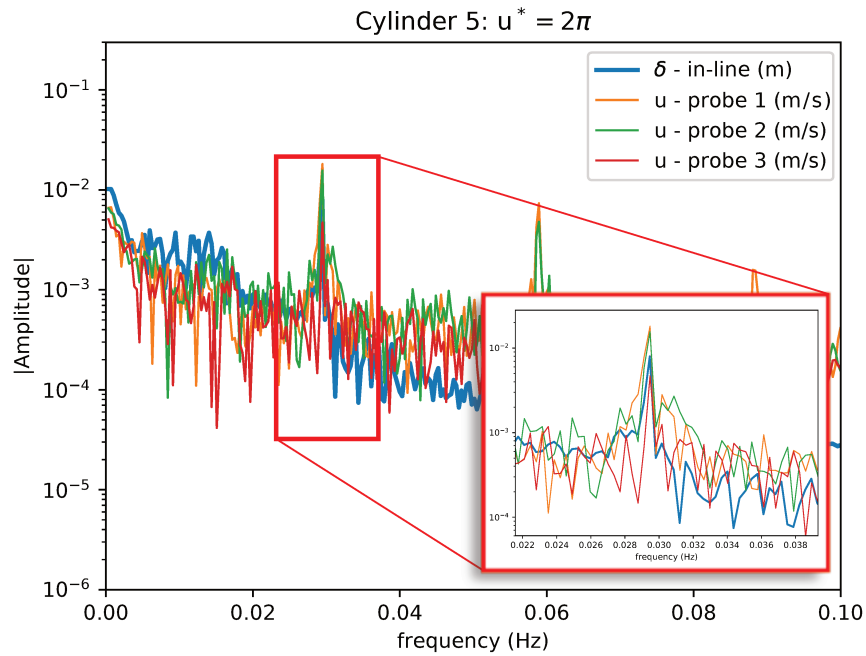
Figura 2.15: Posição das sondas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

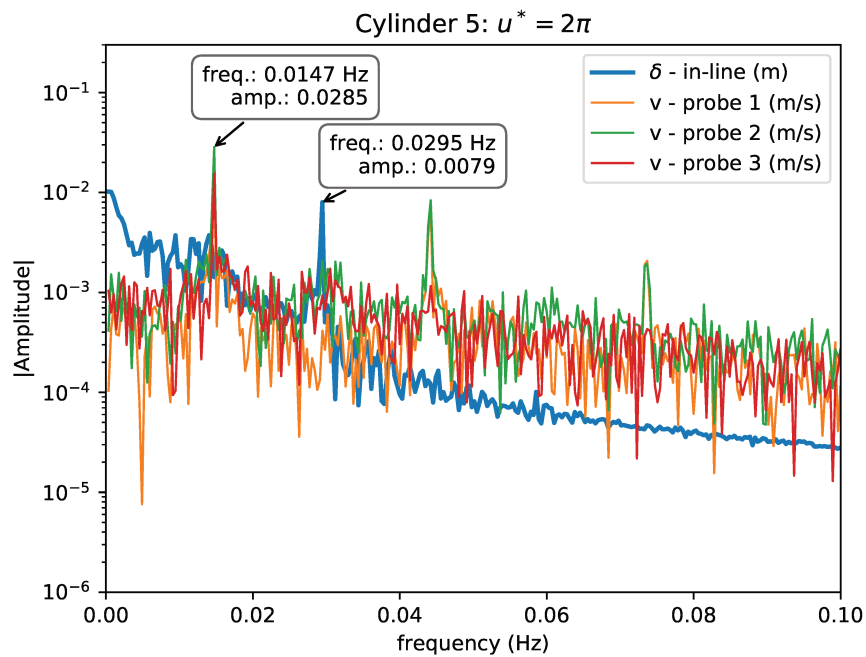
Na Fig. 2.16 o sinal de deslocamento *in-line* do cilindro 05 para a condição de $u^* = 2\pi$ é comparado com os sinais de velocidade u nas sondas. Como previsto, os picos dos sinais ocorrem na mesma frequência. Por outro lado, o deslocamento *inline* ocorre na metade da frequência da componente v do escoamento (Fig. 2.17).

Figura 2.16: DFT dos sinais de deslocamento na direção *in-line* e da componente *u* nas sondas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

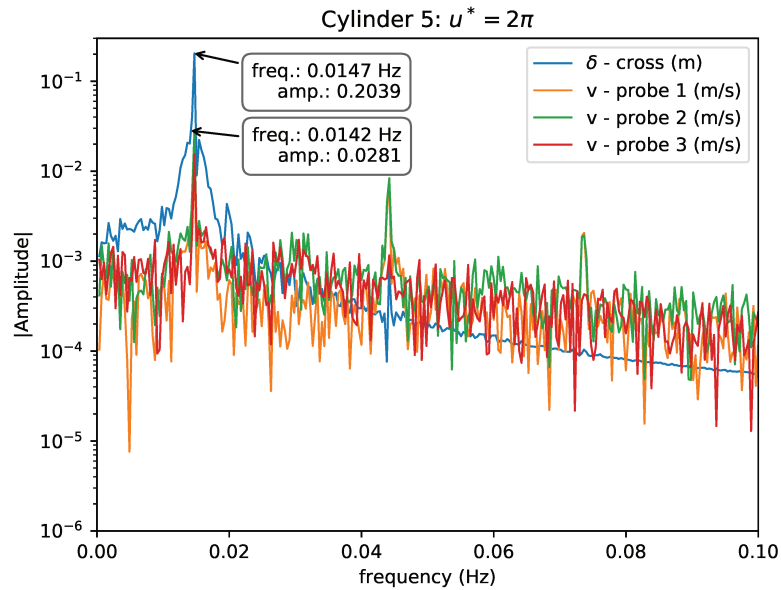
Figura 2.17: DFT dos sinais de deslocamento na direção *in-line* e da componente *v* nas sondas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

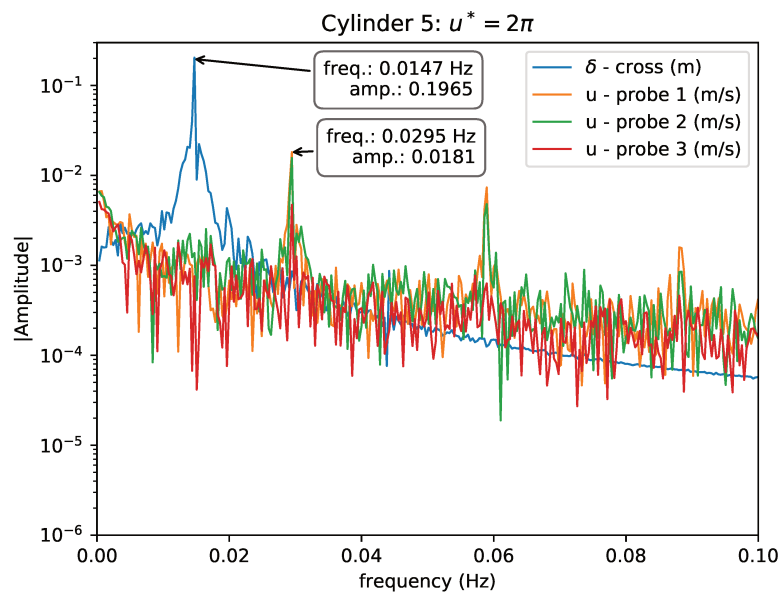
No caso do deslocamento na direção *cross*, o comportamento é o oposto. O deslocamento ocorre na mesma frequência da componente *v* velocidade (Fig. 2.18) e na metade da frequência da componente *u* (Fig. 2.19).

Figura 2.18: DFT dos sinais de deslocamento na direção *cross* e da componente *v* nas sondas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

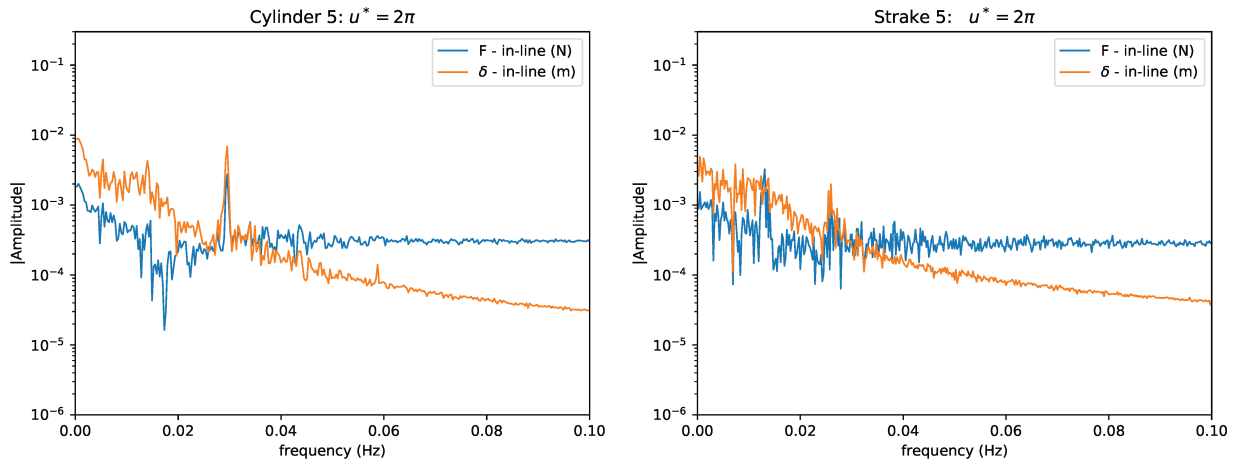
Figura 2.19: DFT dos sinais de deslocamento na direção *cross* e da componente *u* nas sondas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

As DFTs das forças e deslocamentos na direção *in-line* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 2\pi$ são mostradas na Fig. 2.20. Como esperado os picos de deslocamento e força acontecem na mesma frequência.

Figura 2.20: DFTs das forças e deslocamentos na direção *in-line* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 2\pi$.

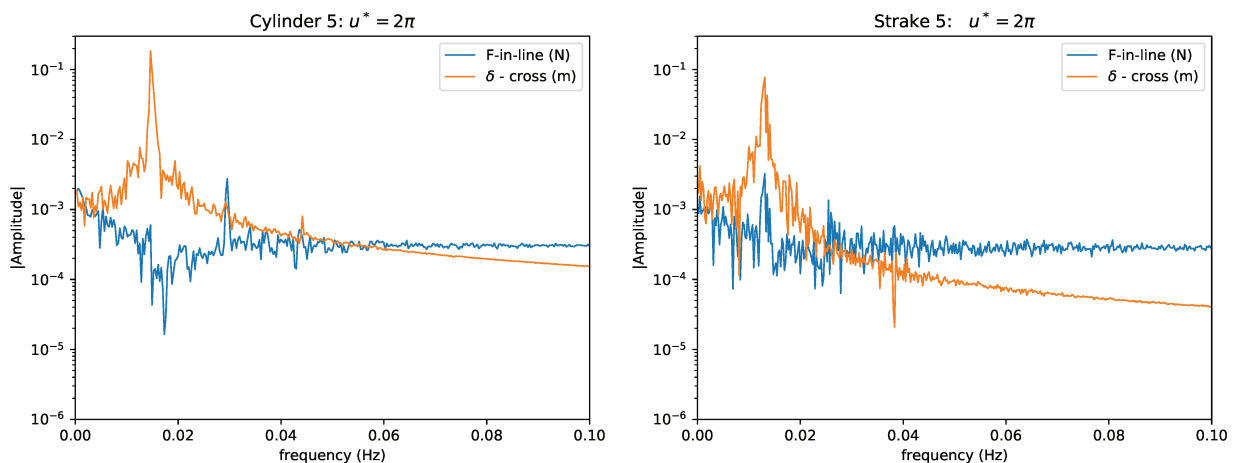


(a) Cilindro 05

(b) *Strake* 05

Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.21: DFTs das forças *in-line* e deslocamentos *cross* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 2\pi$.



(a) Cilindro 05

(b) *Strake* 05

Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

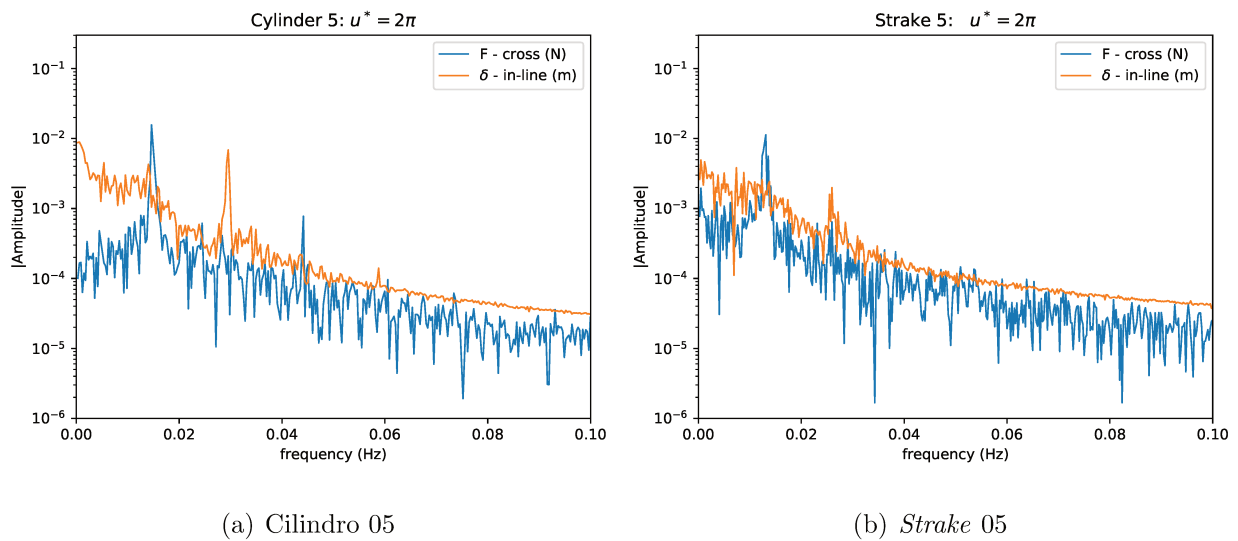
No *strake* as amplitudes dos picos são amenizadas. No entanto, há o surgimento de um

pico de força com frequência próxima a 0.018 Hz . O comportamento é diferente do cilindro, mas pode ser justificado uma vez que a dinâmica de separação de estruturas turbilhonares (apresentada na seção 1.1.1) é afetado pela adição das aletas.

É interessante notar que o pico de força *in-line* que surge no caso do *strake* 05 coincide com a frequência de deslocamento *cross* do corpo, como pode ser observado na Fig. 2.21.

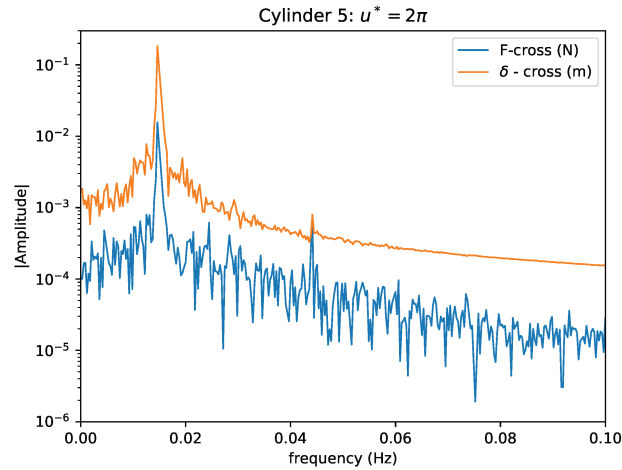
Quando comparados os sinais da força *cross* e deslocamento *in-line*, o comportamento foi o esperado, com a frequência de pico da força ocorrendo na metade da frequência de deslocamento, como pode ser observado na Fig. 2.22. Nota-se porém, a nítida redução da amplitude do pico de deslocamento do *strake* 05. O comportamento das forças *cross* e deslocamentos *cross* também foram conforme o esperado, apresentando picos de mesma frequência, como indicado na Fig. 2.23.

Figura 2.22: DFTs das forças *cross* e deslocamentos *in-line* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 2\pi$.

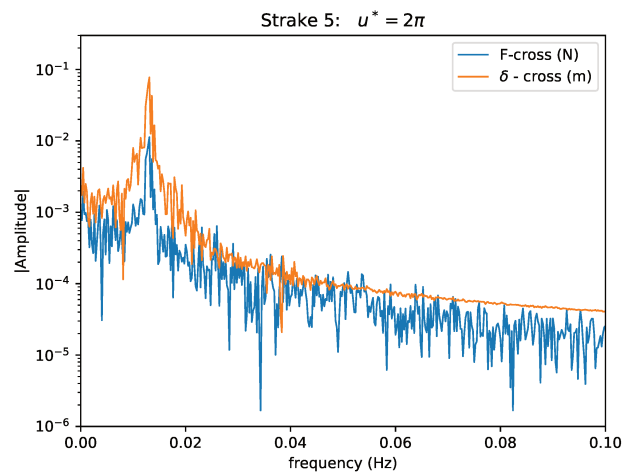


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.23: DFTs das forças e deslocamentos na direção *cross* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 2\pi$.



(a) Cilindro 05

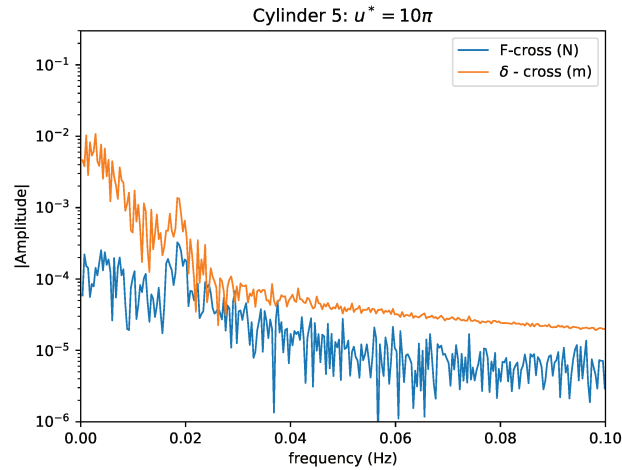


(b) *Strake* 05

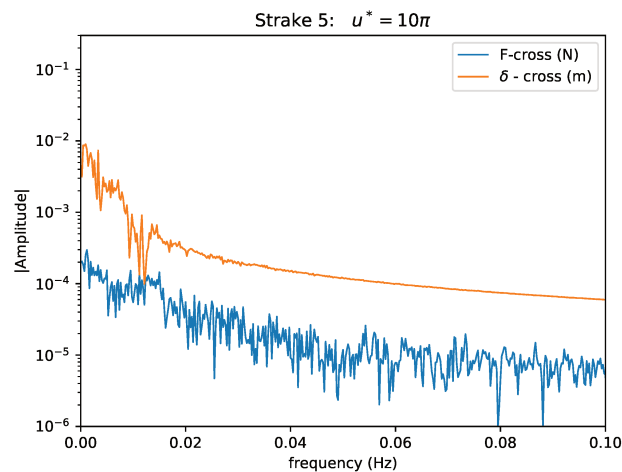
Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Quando a velocidade reduzida passa de 2π para 10π , o espectro de frequências de forças e deslocamentos apresentam uma distribuição de energia que tende a diminuir com o aumento da frequência, sem picos proeminentes. No entanto, é interessante notar pela Fig. 2.24, que o cilindro 05 ainda apresenta um pico sutil perto das frequências que ocorreram nas simulação de $u^* = 2\pi$. Esse fato evidencia que o *strake* 05 foi eficiente não só para a redução das amplitudes de força e deslocamento da faixa de *lock-in*, mas também fora desse intervalo.

Figura 2.24: DFTs das forças e deslocamentos na direção *cross* do cilindro 05 e do *strake* 05 na condição de $u^* = 10\pi$.



(a) Cilindro 05



(b) *Strake* 05

Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

2.3 Conjunto 2: Simulações do *strake* 05 em diversas condições de escoamento

Após comparados os comportamentos dinâmicos do cilindro 05 e do *strake* 05, foram realizadas simulações com o *strake* em diversas condições de escoamento, ou seja, para diversos números de Reynolds e de velocidade reduzida.

Para a definição das variáveis, foi utilizado um planejamento composto central, que permite a construção de metamodelos de segunda ordem, utilizando menos experimentos que o planejamento fatorial completo (SILVEIRA, 2003). O planejamento experimental

composto central é formado por três partes (BARROS NETO; SCARMÍNIO; BRUNS, 2001):

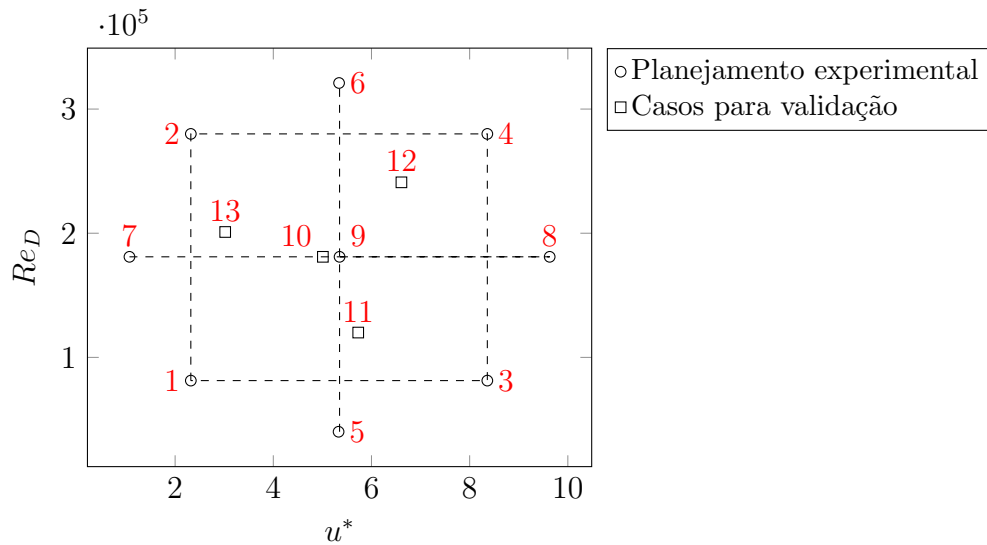
- Uma parte chamada de fatorial (cúbica) contendo um total de $n_{fat} = 2^\kappa$ pontos de coordenadas $x_i = \pm i$, para todos $i = 1, \dots, \kappa$, onde κ é o número de fatores;
- Uma parte axial (octagonal) formada por $n_{ax} = 2\kappa$ pontos com todas as coordenadas nulas, exceto uma, que é igual a um valor $\pm\alpha$, com $\alpha = \sqrt{\kappa}$;
- Um total de n_{cent} ensaios realizados no ponto central, no qual, $x_1, \dots, x_\kappa = 0$. Como os experimentos realizados são simulações computacionais que assumem o mesmo valor ao utilizar os mesmos parâmetros de entrada, $n_{cent} = 1$.

Os valores do número de Reynolds foram ajustados por meio da velocidade u_∞ , e os de velocidade reduzida por meio de u_∞ e das rigidezes das molas (k). Os valores de velocidade utilizados foram definidos com base em valores típicos de corrente marítimas no fundo do oceano ($0,2 \text{ m/s}$ a $1,6 \text{ m/s}$).

Os valores de velocidade reduzidas foram definidos de forma que $u^* \approx 5$ estivesse no ponto central do experimento, já que corresponde a uma velocidade crítica supondo $St = 0.2$. Os demais valores variam entre $u^* = 1$ e $u^* = 9$.

Além dos casos do planejamento experimental, outras 4 simulações com parâmetros dentro dos limites do planejamento foram definidas de forma aleatória para que pudessem ser utilizadas em validações de metamodelos. Na Fig. 2.25 são apresentados os 13 ensaios realizados, em função das duas variáveis.

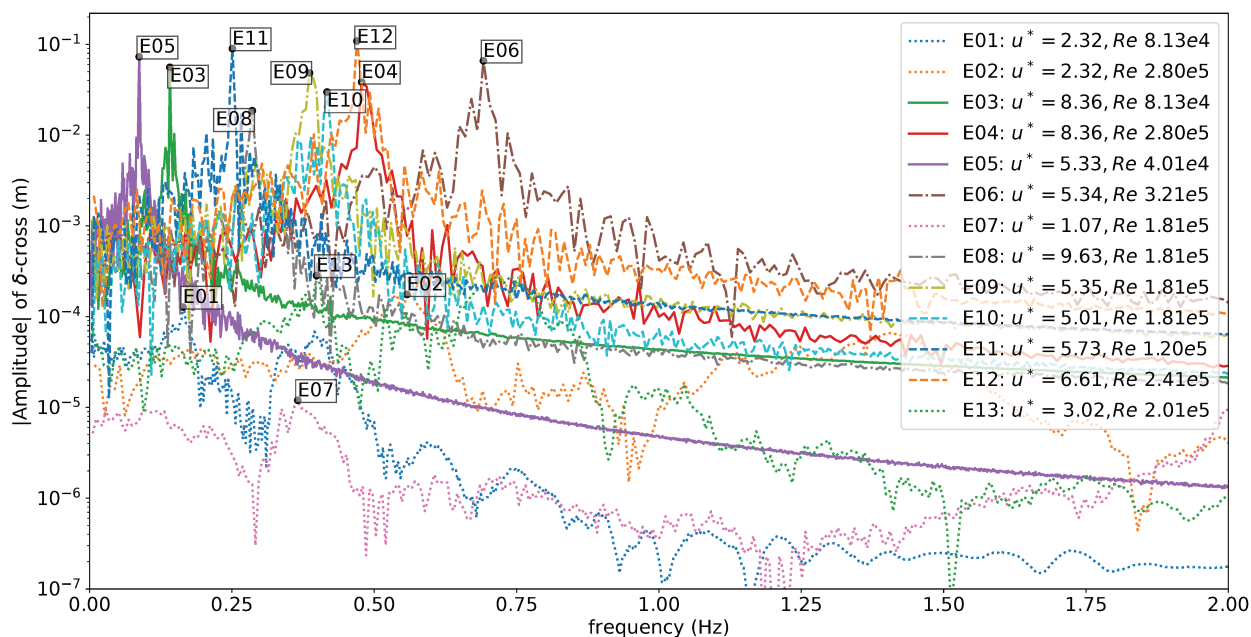
Figura 2.25: Planejamento composto central do *strake* 5 e casos para validação. Os números em vermelho são os números dos ensaios.



Fonte: Elaborada pelo autor.

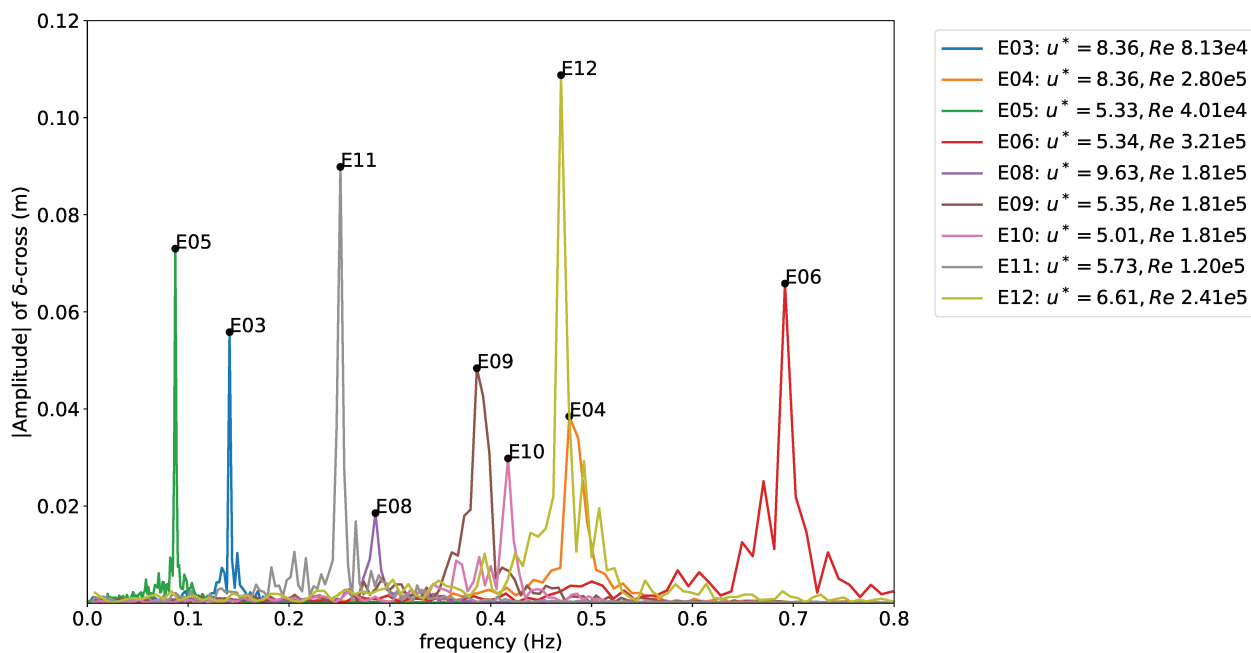
As nove condições definidas no planejamento experimental, bem como os casos de validação, foram simulados. Na Fig. 2.26 é mostrada a DFT do deslocamento na direção *cross* para cada condição. Na Fig. 2.27 são apresentados os mesmos dados, mas em escala linear, para os casos que apresentaram maiores picos de deslocamentos. Nota-se que os ensaios com as menores velocidades reduzidas (E01, E02, E07 e E13) não apresentaram picos significativos de deslocamento, como esperado.

Figura 2.26: DFT do deslocamento na direção *cross* para cada ensaio do *strake* 5.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.27: DFT do deslocamento na direção *cross* para ensaios com maiores picos de deslocamentos.

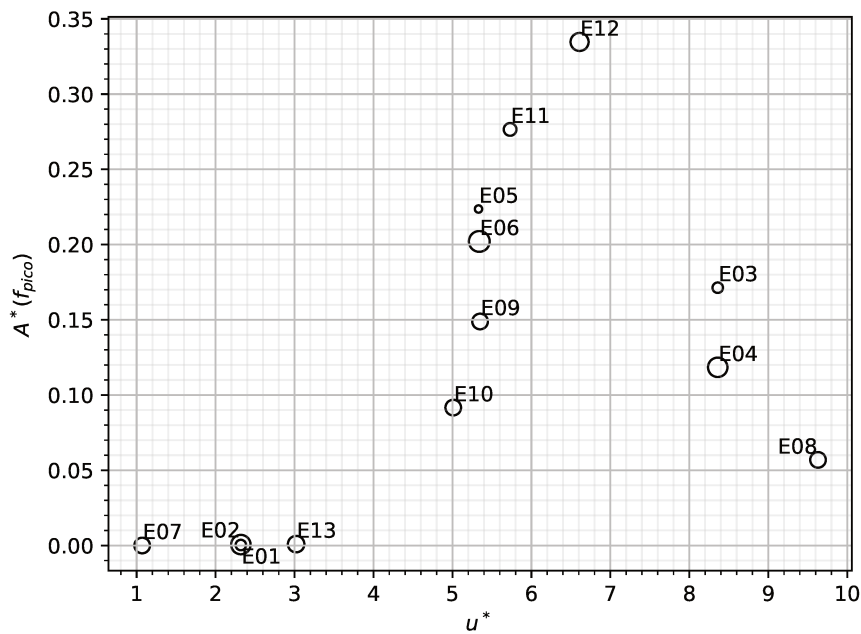


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Os dados da Fig. 2.26 podem ser agrupados em função da velocidade reduzida. Na

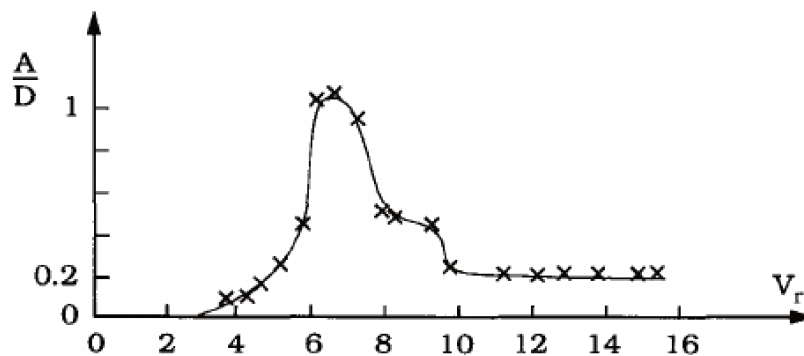
Fig. 2.28 essa análise é realizada. Observa-se a concordância do comportamento com os resultados da Fig. 2.29. Para velocidades reduzidas menor que 4, a amplitude das vibrações é quase nula. As amplitudes atingem o máximo próximo a $u^* = 7$ e então apresentam uma queda com tendência de estabilização para $u^* > 8$.

Figura 2.28: Amplitudes de deslocamento *cross* dos ensaios em função da velocidade reduzida. As amplitudes na frequência de pico foram adimensionalizadas pelo diâmetro. O tamanho das circunferências é proporcional ao número de Reynolds.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 2.29: Amplitudes de deslocamento *cross* em função da velocidade reduzida no cilindro do experimento de Torum e Anand (1985).



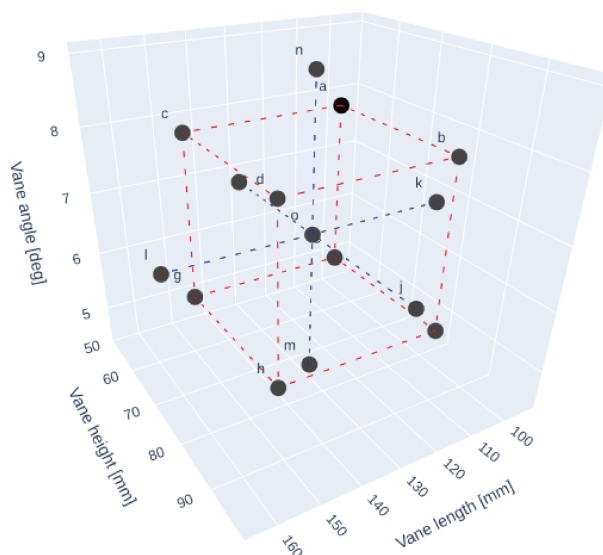
Fonte: Adaptada de Torum e Anand (1985) apud Sumer e Fredsøe (2006).

Williamson e Govardhan (2003) afirmam que tradicionalmente a razão $f^* = f/f_n$ permanece próxima da unidade no regime de *lock-in*. No entanto, corpos com baixa razão de massa (m^*), como é o caso das simulações realizadas ($m^* = 3$), tendem a oscilar com uma razão maior, em torno de $f^* = 1,4$. Considerando um número de Strouhal típico de 0,2, o valor de $f^* = 1,4$ faz com que o pico de ressonância ocorra em $u^* = 7$, que é coerente com os resultados obtidos.

2.4 Conjunto 3: Avaliação de parâmetros geométricos

Para o terceiro conjunto de simulações, foram definidas 15 geometrias de *strakes* baseadas no *strake* 05, tendo como variáveis os parâmetros geométricos da aleta: altura, comprimento e ângulo. Os valores das variáveis foram definidos de acordo com um planejamento experimental composto central. Na Fig. 2.30 o planejamento experimental resultante é ilustrado. Os valores da Fig. 2.30 são expostos na Tab. 2.3. As geometrias das aletas de cada *strake* são ilustradas na Fig. 2.31. Todas as simulações foram realizadas para a condição de $Re = 1,81 \cdot 10^5$ e $u^* = 5$.

Figura 2.30: Planejamento experimental.



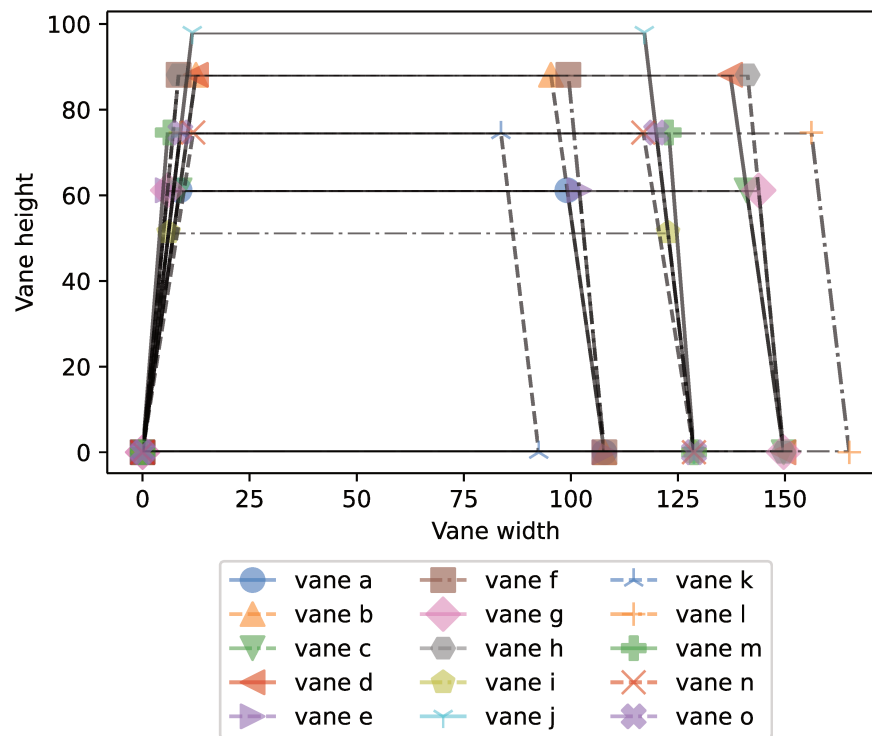
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 2.3: Parâmetros geométricos das aletas.

ID	Altura (<i>mm</i>)	Ângulo (graus)	Comprimento (<i>mm</i>)	ID	Altura (<i>mm</i>)	Ângulo (graus)	Comprimento (<i>mm</i>)
a	61.17	8.05	107.82	i	51.30	6.75	128.75
b	88.13	8.05	107.82	j	98.00	6.75	128.75
c	61.17	8.05	149.68	k	74.65	6.75	92.50
d	88.13	8.05	149.68	l	74.65	6.75	165.00
e	61.17	5.45	107.82	m	74.65	4.50	128.75
f	88.13	5.45	107.82	n	74.65	9.00	128.75
g	61.17	5.45	149.68	o	74.65	6.75	128.75
h	88.13	5.45	149.68				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 2.31: Geometria das aletas.

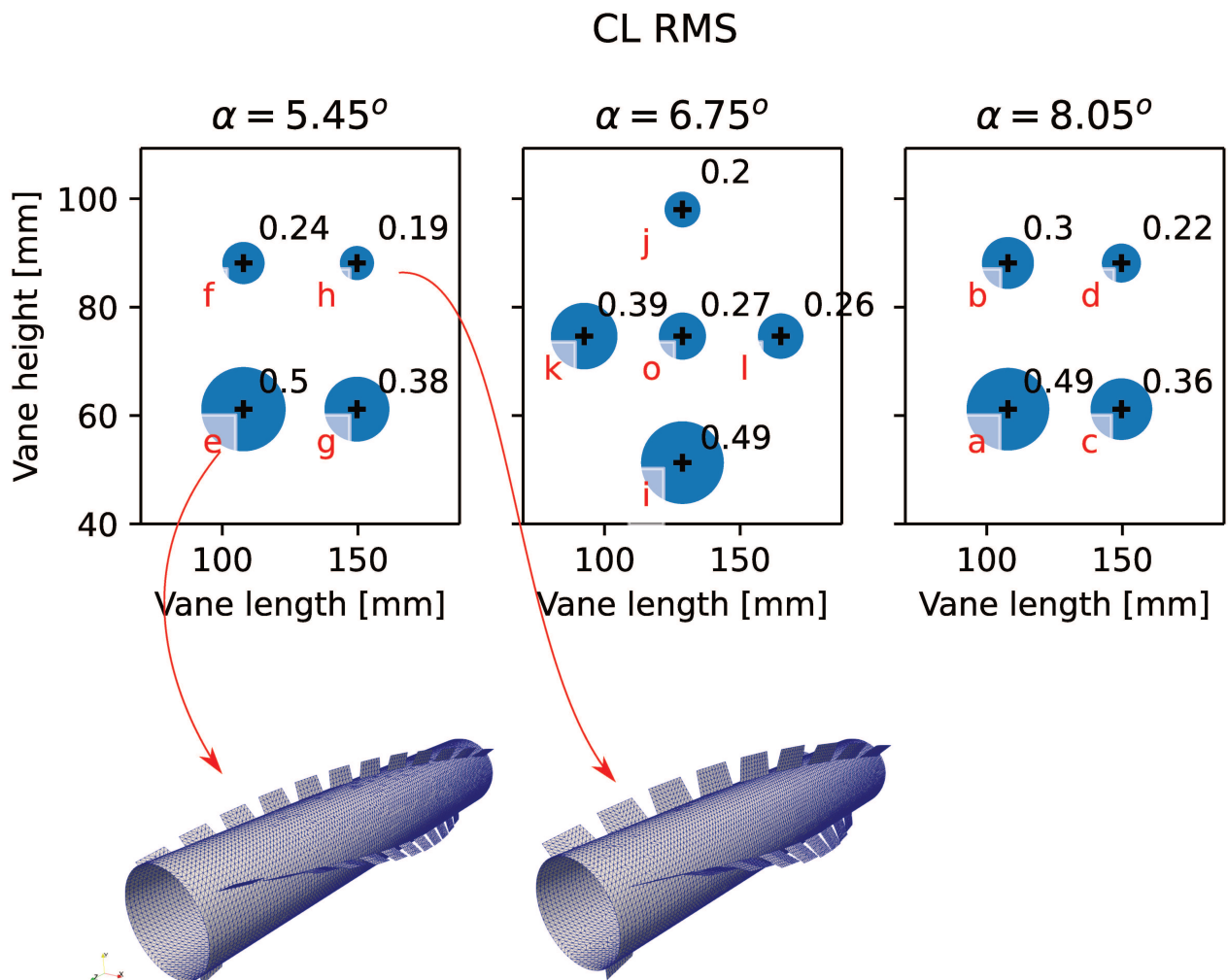


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

2.4.1 Análise de Dados

Na Fig. 2.32 são mostradas em três planos, as relações entre a altura e o comprimento da aleta e o valor RMS de C_L . Cada plano corresponde a um ângulo α da aleta. Na figura, o diâmetro das circunferências é proporcional ao valor RMS, anotado no canto superior de cada ponto. No intervalo estipulado, o RMS do C_L é estritamente decrescente em função da altura e do comprimento. O mesmo não pode ser inferido em relação ao ângulo. Ainda na Fig. 2.32, a geometria dos *strakes* **e** e **h** são destacadas para comparação, já que apresentam o maior e menor valor de C_L RMS, respectivamente.

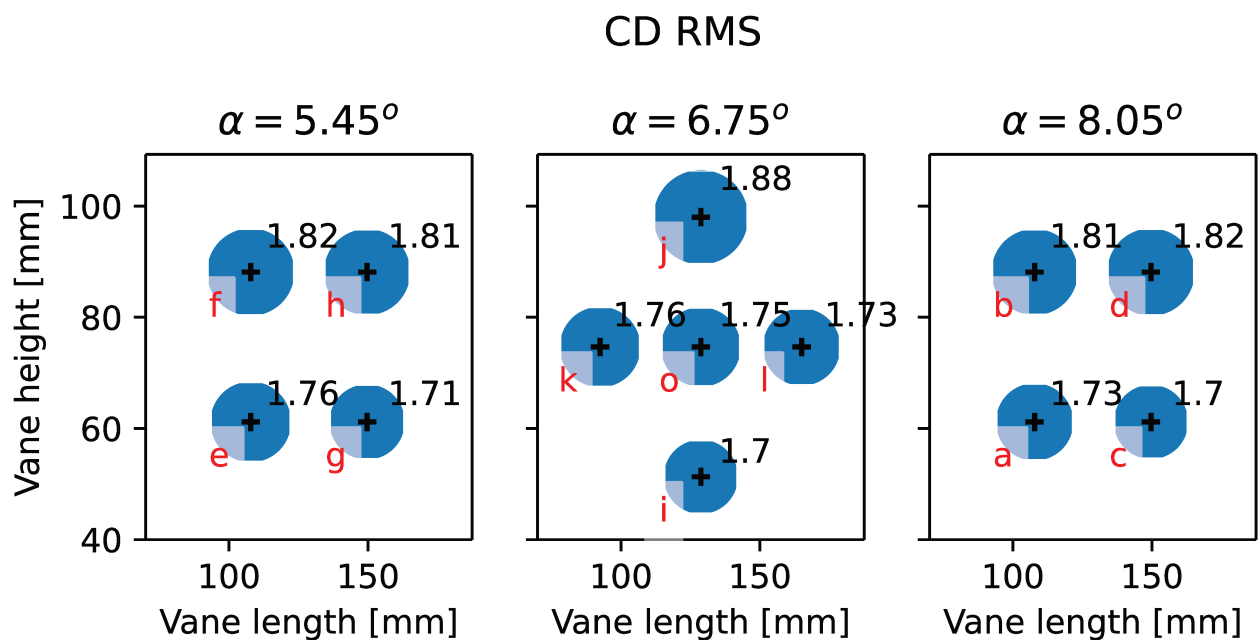
Figura 2.32: Valores RMS de C_L em função dos parâmetros geométricos dos *strake*. A geometria dos *strakes* **e** e **h** são destacados para comparação, uma vez que correspondem ao maior e menor valor do RMS, respectivamente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fig. 2.33 é similar à Fig. 2.32, no entanto, os valores representados são dos valores RMS de C_D . É possível notar que o coeficiente apresenta tendência estritamente crescente em função da altura da aleta, o que é esperado, já que a área frontal da geometria aumenta. No entanto, não há relação clara entre o coeficiente e as variáveis ângulo e comprimento.

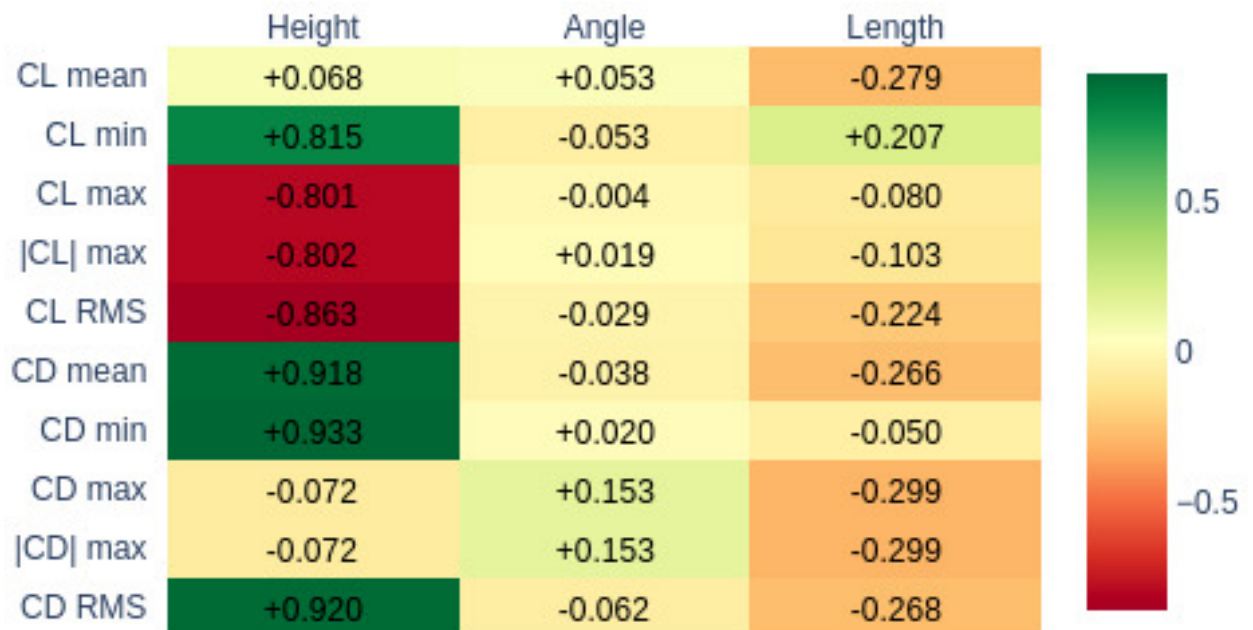
Figura 2.33: Valores RMS de C_D em função dos parâmetros geométricos dos *strakes*.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

A influência dos parâmetros geométricos nos coeficientes de força fluidodinâmica foi quantificada por meio do mapa de calor de correlação entre os parâmetros e os coeficientes, como mostrado na Fig. 2.34. Na figura, valores positivos próximos a 1 indicam relação direta entre os parâmetros e os coeficientes, valores próximos a -1 indicam relação inversa (ou seja, o coeficiente tende a diminuir com o aumento da variável), enquanto valores próximos a 0 indicam pouca relação. Pelo mapa de calor, fica nítida a influência da altura da aleta no sentido de aumentar o valor do coeficiente de arrasto e de diminuir o valor do coeficiente de sustentação. Nota-se também que a variável ângulo exerce pouca influência sobre os coeficientes no intervalo analisado.

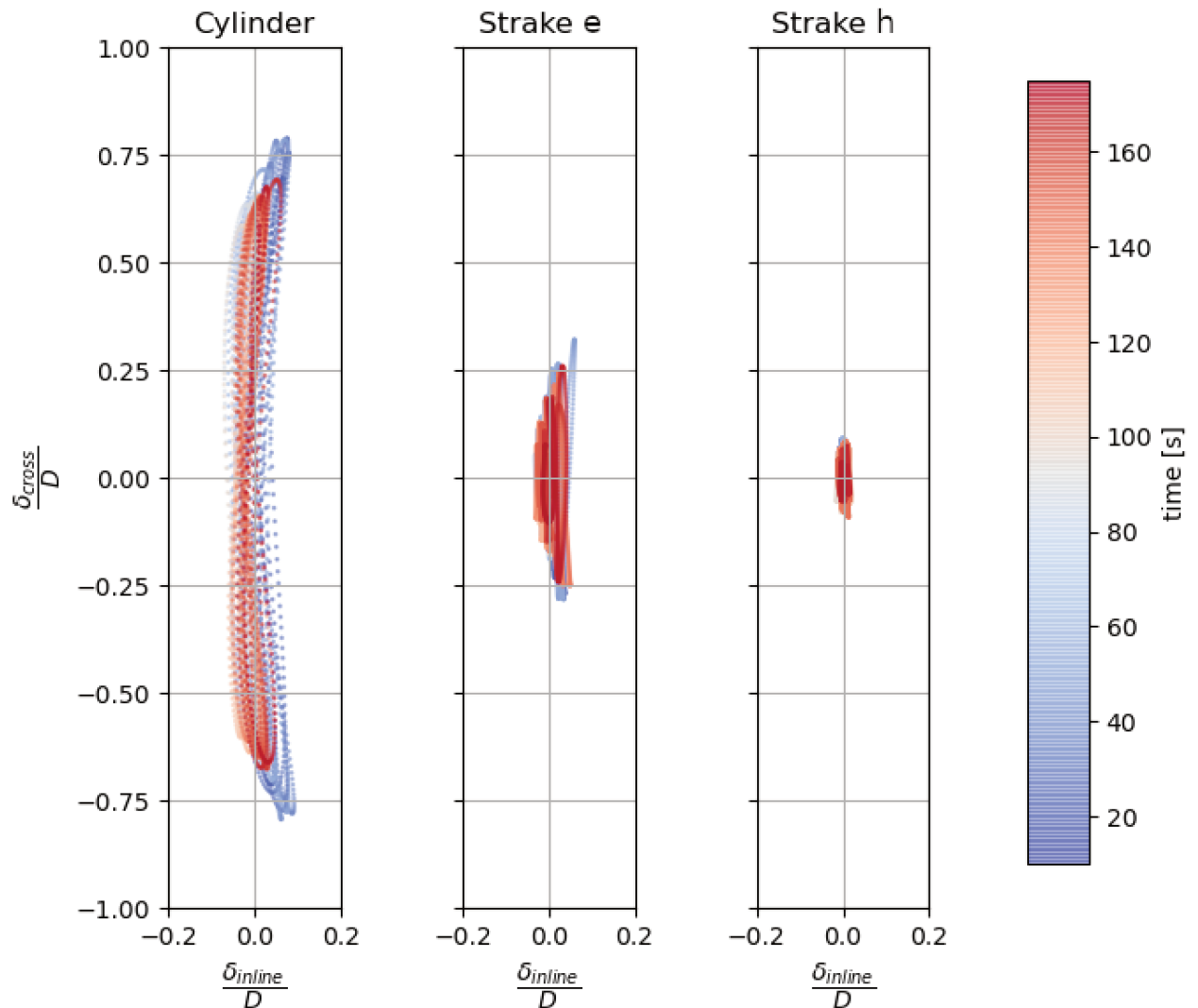
Figura 2.34: Mapa de calor da correlação entre as variáveis geométricas e os coeficientes de força fluidodinâmica.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os deslocamentos podem ser representados espacialmente pela órbita dos corpos, como mostrado na Fig. 2.35, em que são mostradas as órbitas dos *strakes* e do cilindro liso nas mesmas condições. É possível observar que o *strake h* apresenta tanto menor amplitude na direção *cross*, quanto menor variação na direção *in-line*, mesmo apresentando valores RMS de C_D maiores que o do *strake e*.

Figura 2.35: Órbita do cilindro e dos *strakes e* e *h*.

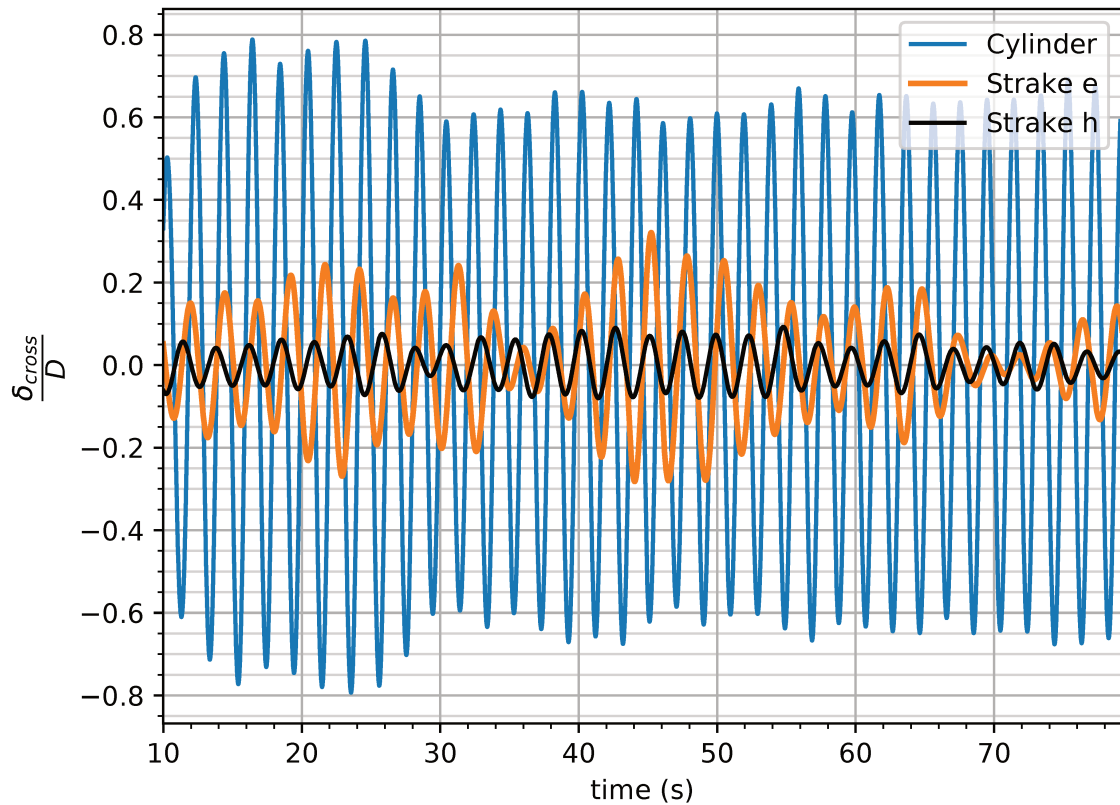


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

A eficiência dos *strakes* resultantes pode ser avaliada por meio da comparação dos deslocamentos na direção *cross* deles e do cilindro liso, como indicado na Fig. 2.36. Os resultados são coerentes com os obtidos por Assi e Crespi (2020). A Tab. 2.4 mostra que no experimento dos autores, o cilindro liso apresenta deslocamento adimensionalizado de 0.81,

enquanto para o *strake* laminado, esse valor é de 0.1 (valores próximos aos apresentados pelo cilindro e pelo *strake* **h** do presente trabalho).

Figura 2.36: Comparação de deslocamentos na direção *cross* entre cilindro liso e *strakes* **e** e **h**.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Tabela 2.4: Resultados de Assi e Crespi (2020) para deslocamento na direção *cross* para cilindro liso e três modelos de *strakes*.

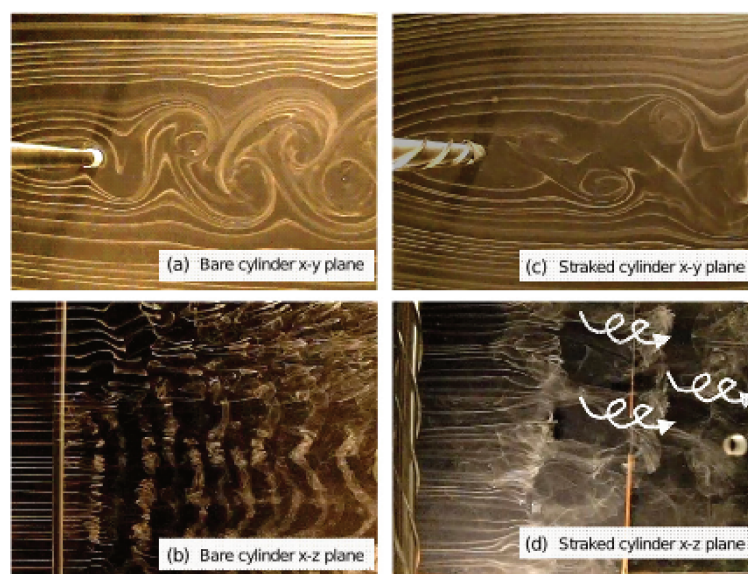
Modelo	(δ_{cross}/D) máximo	Atenuação
Cilindro liso	0.81	Ref.
<i>Strake</i> contínuo	0.15	80%
<i>Strake</i> laminado	0.10	88%
<i>Strake</i> laminado negativo	0.47	42%

Fonte: adaptada de Assi e Crespi (2020).

A eficiência dos *strakes* na atenuação de VIV pode ser explicada pela quebra das estruturas coerentes em menores estruturas turbilhonares, com menores níveis de energia, e consequentemente, menor nível de excitação da estrutura, conforme apontado por Zhou *et al.* (2011) em seu experimento (Fig. 2.37). Pode ser observado pelas Figs. 2.39 a 2.42 (os instantes escolhidos para a geração das imagens é mostrado na Fig. 2.38) que a esteira do cilindro apresenta grandes estruturas coerentes, do tipo von Karman. O *strake e*, embora tenha apresentado o pior resultado dentre os *strakes* avaliados, já apresenta boa quebra dessas estruturas, o que pode ser notado pela redução do nível de vorticidade na esteira próxima ao corpo. As regiões com grandes níveis de vorticidade são quebradas em um maior número de regiões, mas com menores intensidades. Se comparados os *strake e* e *h*, nota-se que o *strake h* é mais eficiente nesse sentido, ou seja, próximo ao corpo, as estruturas turbilhonares são menores e de menor intensidade.

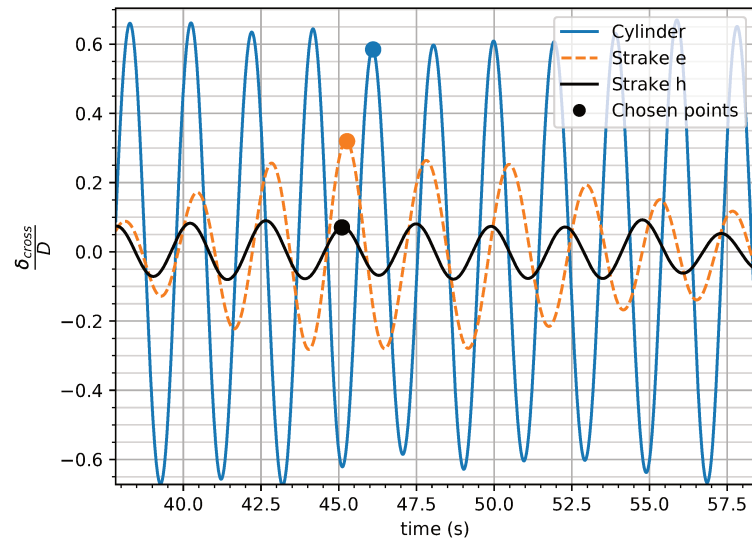
Por meio das Figs. 2.40 e 2.42, nota-se a formação de estruturas rotacionais tangenciais entre as aletas. Tais estruturas podem interagir com as demais e promover a quebra das estruturas coerentes, o que explicaria a maior eficiência do *strake* laminado frente ao contínuo, como concluído por Assi e Crespi (2020).

Figura 2.37: Visualização experimental em diferentes planos de escoamento sobre cilindro e cilindro com *strake*. As setas indicam a direção de rotação do escoamento.



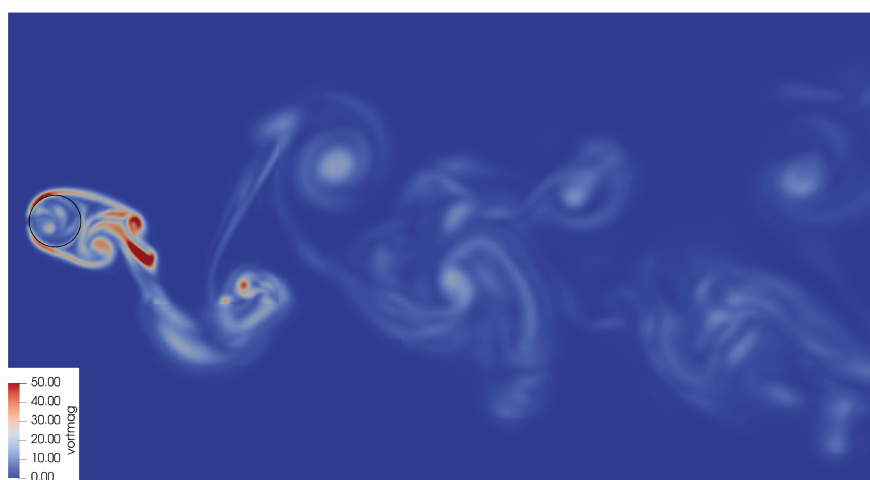
Fonte: Retirada de Zhou *et al.* (2011).

Figura 2.38: Sinal temporal do deslocamento *cross* e instantes escolhidos para representação das iso-superfícies de critério Q e contornos de vorticidade das Figs. 2.39 a 2.42.

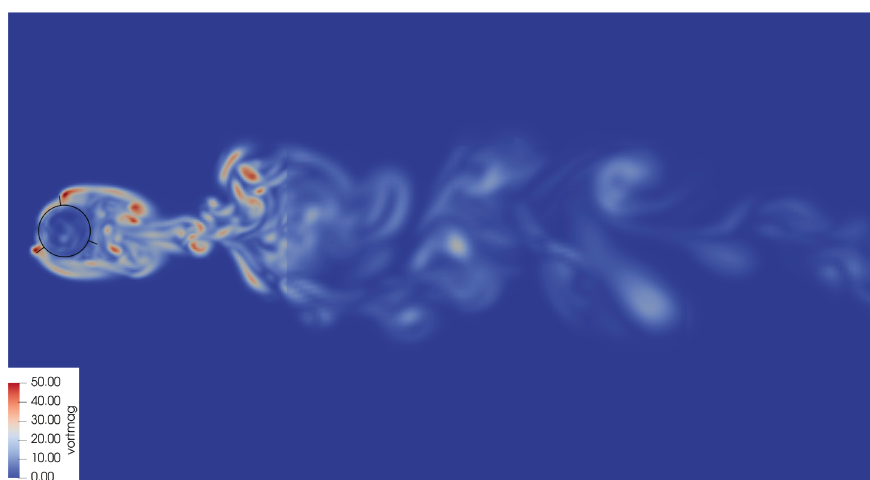


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

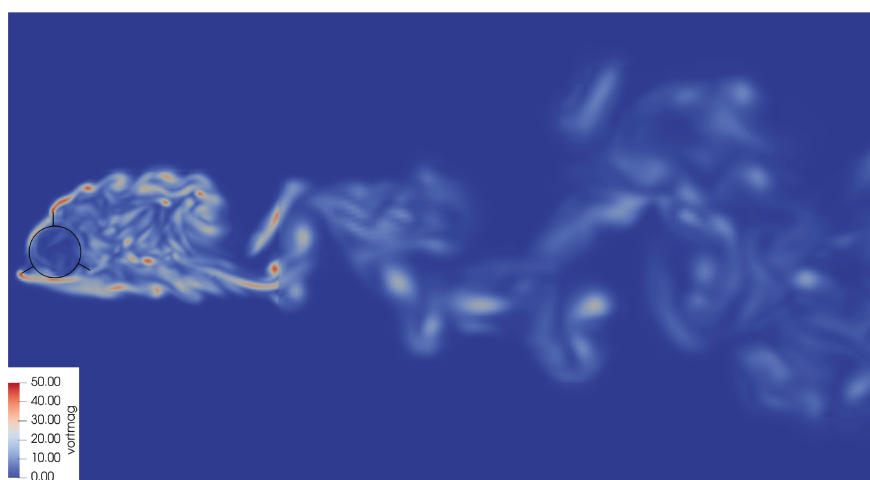
Figura 2.39: Campos de magnitude de vorticidade em plano x-y no centro do domínio.



(a) Cilindro



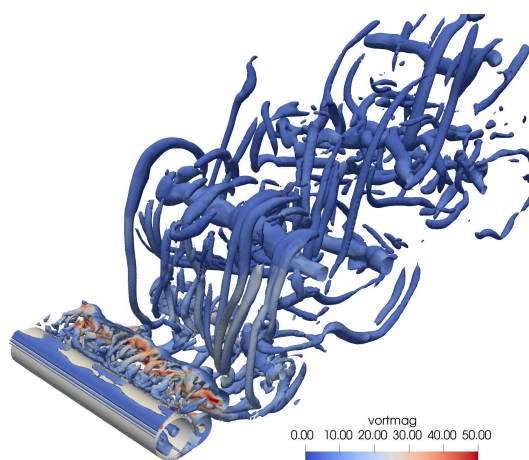
(b) *Strake e*



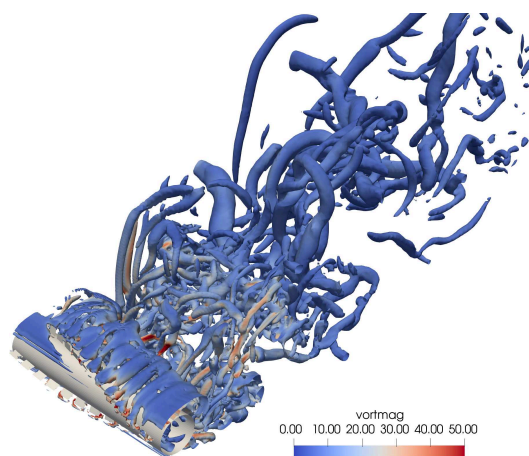
(c) *Strake h*

Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

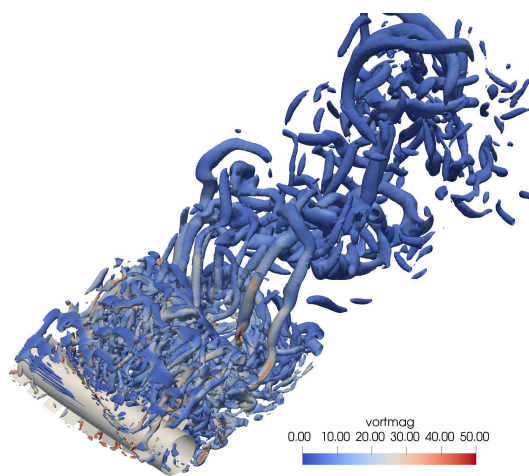
Figura 2.40: Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista isométrica).



(a) Cilindro



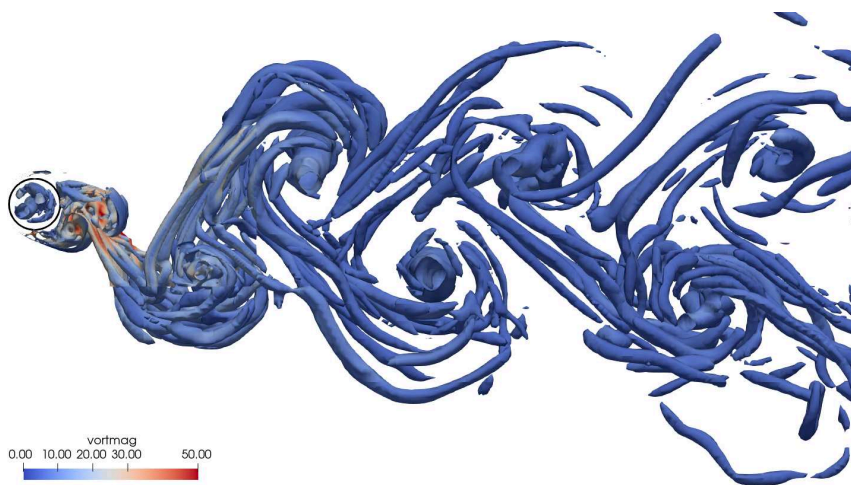
(b) *Strake e*



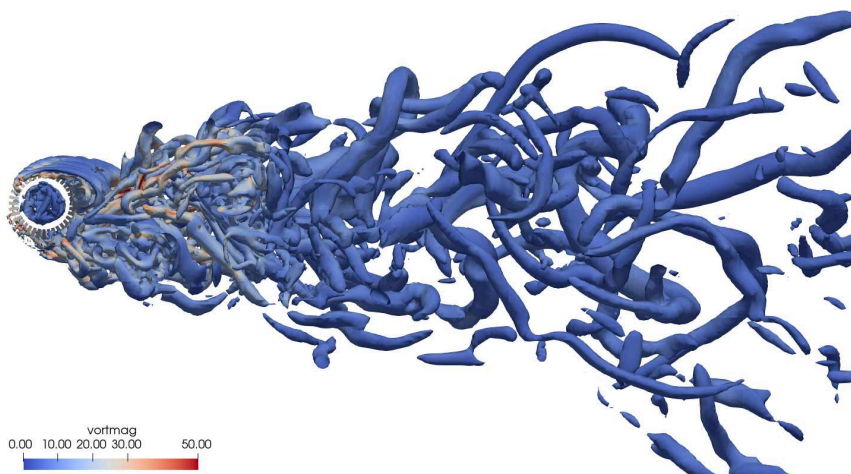
(c) *Strake h*

Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

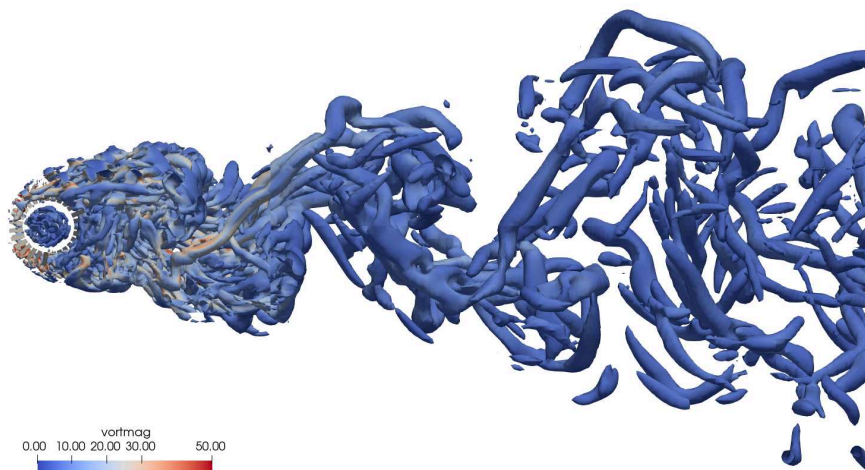
Figura 2.41: Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista lateral).



(a) Cilindro



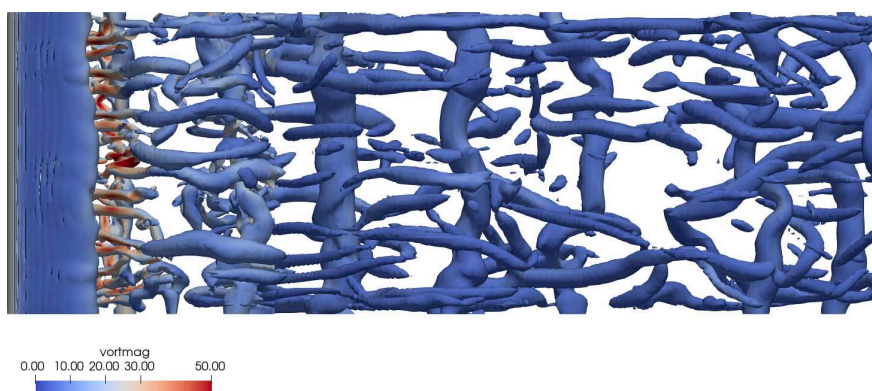
(b) *Strake e*



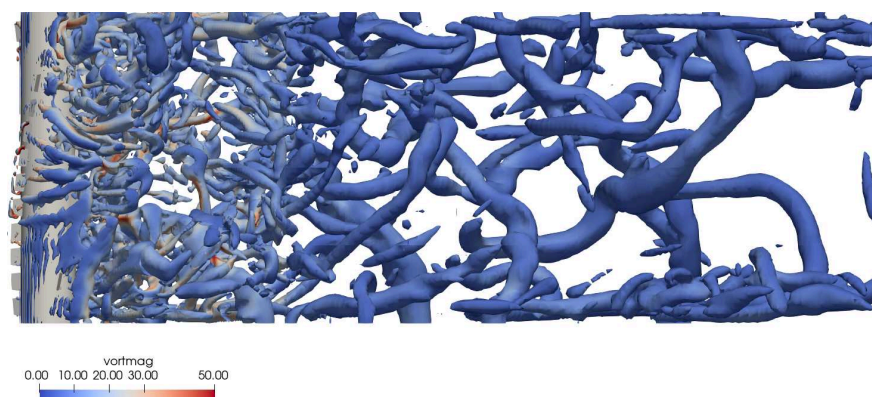
(c) *Strake h*

Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

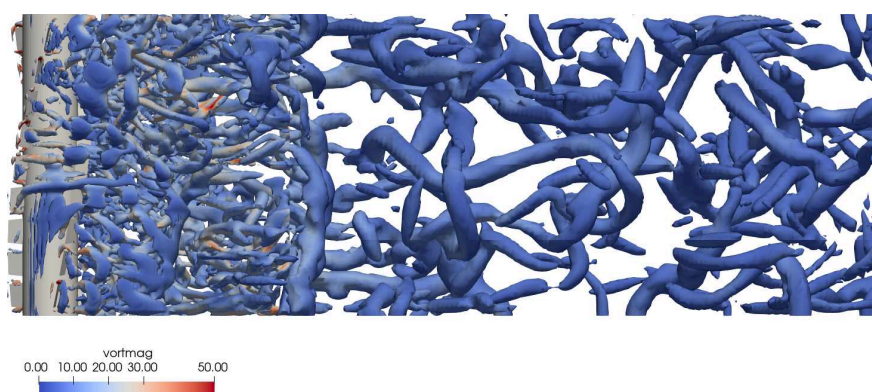
Figura 2.42: Iso-superfícies de critério Q ($Q=10$) coloridos pela magnitude da vorticidade (vista superior).



(a) Cilindro



(b) *Strake e*



(c) *Strake h*

Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

**PARTE III: IMPLEMENTAÇÃO
DAS ETAPAS DE MARCAÇÃO DO
LGC**

CAPÍTULO III

MÉTODO DE VOLUMES FANTASMAS LOCAIS

Tendo como objetivo a simulação de corpos esbeltos e configurações complexas como dutos com escoamento interno e externo, Ribeiro Neto (2021) deu início à implementação de um método de fronteira imersa baseado em volumes fantasmas locais (LGC) no código MFSim.

Anteriormente, Andrade (2015) havia implementado o método na plataforma MATLAB®, para escoamentos bidimensionais, com malha uniforme e serial. O trabalho foi importante para mostrar a viabilidade da metodologia proposta por Berthelsen e Faltinsen (2008) para a solução dos problemas de interesse. A implementação no MFSim contudo, exige que a metodologia seja estendida para códigos tridimensionais, paralelizados e com malha adaptativa. Tais necessidades aumentam consideravelmente a complexidade da metodologia.

A primeira etapa do método LGC é a marcação dos volumes que se encontram próximos à fronteira imersa. Ribeiro Neto (2021) tratou essa etapa utilizando geometrias que pudessem ser definidas por equações analíticas. Essa abordagem limita as simulações à geometrias simples. No entanto, essa estratégia foi fundamental para que as demais partes do LGC fossem implementadas, já que apresenta custo computacional significativamente menor, como apresentado na seção 4.4. Nesse contexto, o objetivo dos capítulos 3 e 4 é apresentar uma contribuição para o método estendendo a marcação proposta por Ribeiro Neto (2021) para superfícies arbitrárias, representadas por malhas triangulares não estruturadas.

3.1 Introdução ao Método de Volumes Fantasmas Locais

O LGC é um método de fronteira imersa com interface nítida (*sharp*), ou seja, diferentemente dos métodos de interface difusa, como o MDF, a fronteira é bem definida, e não difusa sobre os volumes vizinhos à malha lagrangiana. Essa característica é desejável para a solução de geometrias esbeltas como bordos de fuga de aerofólio e as aletas dos *strakes*. Além disso, o LGC apresenta imposição direta da condição de contorno, não necessitando de um escoamento complementar. Essa vantagem permite que sistemas complexos como escoamento externos e internos a dutos possam ser simulados simultaneamente (RIBEIRO NETO, 2021; ANDRADE, 2015; ANDRADE; SILVEIRA NETO; VEDOVOTO, 2015; ANDRADE *et al.*, 2018).

As etapas que constituem o método são:

1. Marcação da malha euleriana com base na posição da fronteira imersa;
2. Determinação das distâncias entre a malha euleriana e o corpo imerso;
3. Determinação dos polinômios de Lagrange para a interpolação e extrapolação;
4. Modificação do sistema linear das velocidades;
5. Modificação do sistema linear da pressão;
6. Realização dos cálculos a posteriori.

No presente trabalho, a etapa 1 é generalizada para corpos arbitrários descritos pelas malhas de suas superfícies. A formulação da primeira etapa utilizando equações analíticas, bem como as demais etapas do método são descritas no trabalho de Ribeiro Neto (2021).

3.2 Classificação da Malha Euleriana

A classificação dos pontos eulerianos (faces ou centros do domínio computacional) é realizada conforme sua posição em relação à fronteira imersa. Assim, é possível classificar os centros dos volumes como inativos (sólidos), ativos (regulares) e irregulares. As faces

dos volumes recebem as mesmas classificações, acrescida da classificação de face regular com derivada modificada.

Berthelsen e Faltinsen (2008) propõem as seguintes regras para a classificação dos centros dos volumes:

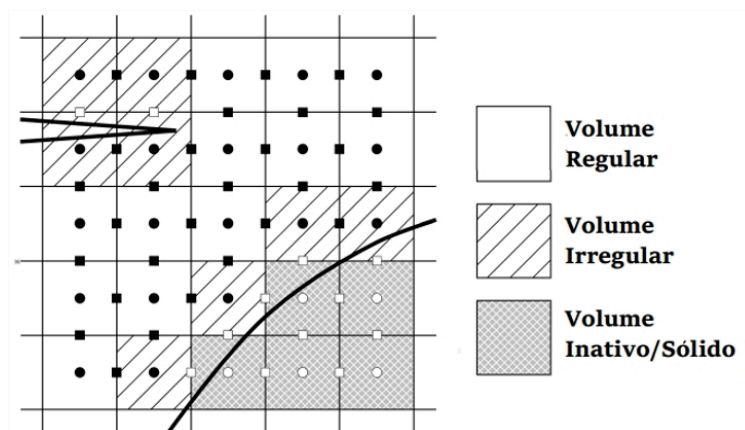
- Um centro é inativo se está localizado no interior da fronteira imersa;
- Caso seja externo, mas vizinho de um inativo, será adotado como irregular;
- Se dois centros são separados pela fronteira, também serão classificados como irregulares;
- O volume será regular somente se for externo e não for irregular.

Quanto à classificação das faces, são apresentadas as seguintes convenções:

- Uma face é ativa se, e somente se, os dois volumes adjacentes à ela forem ativos;
- Uma face interna à fronteira é qualificada como inativa;
- Todas as faces externas pertencentes a um volume inativo são irregulares;
- As faces de dois volumes irregulares separados pela fronteira é irregular;
- As faces externas vizinhas a faces inativas na mesma direção, são regulares com derivada modificada.

A Figura 3.1 ilustra as possíveis classificações.

Figura 3.1: Classificações de faces e centros eulerianos.



Fonte: Retirada de Andrade (2015).

CAPÍTULO IV

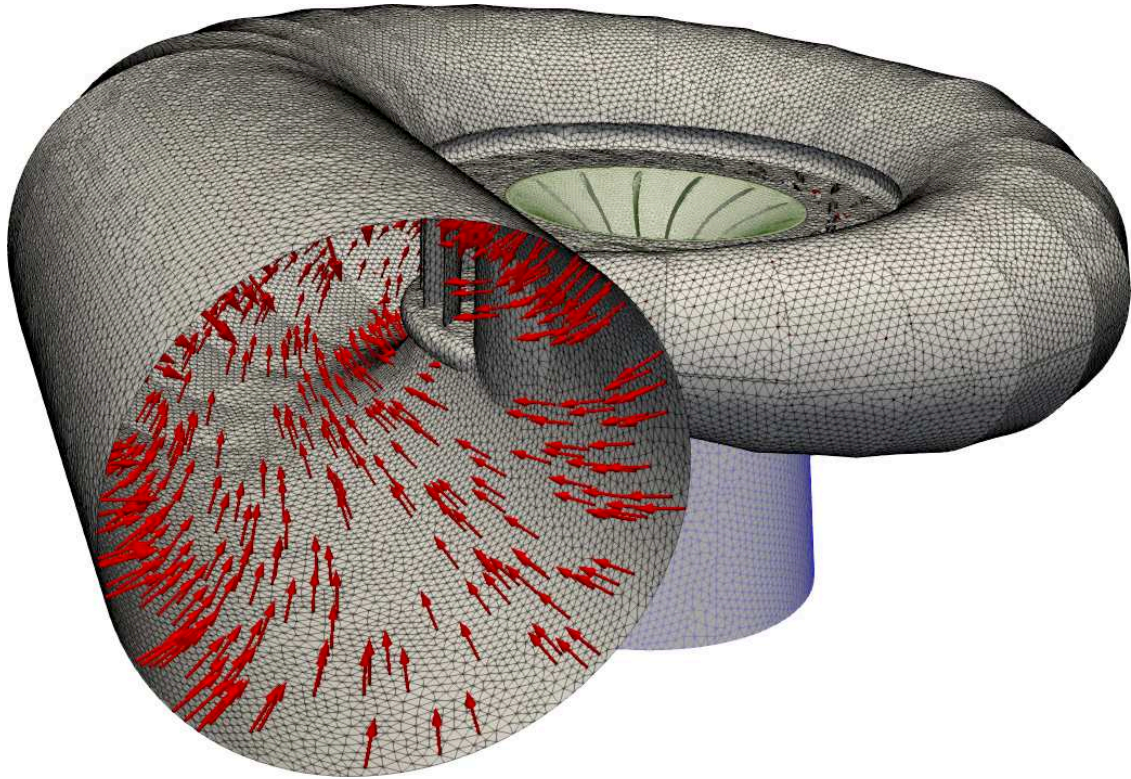
MODELAGEM NUMÉRICO-COMPUTACIONAL DAS MARCAÇÕES

Na seção 3.2 foram apresentadas as regras de marcação propostas por Berthelsen e Fal-tinsen (2008). No presente capítulo, tem-se como objetivo apresentar a abordagem numérico-computacional adotada para a implementação das marcações, bem como as adaptações e contribuições para a metodologia.

4.1 Marcação primária

A marcação primária consiste na identificação dos centros eulerianos que são internos e externos à fronteira imersa. Para tanto, a fronteira deve ser representada por uma malha de triângulos cujas normais, por convenção, apontam para fora. Genericamente, as normais devem apontar para o escoamento que se deseja simular. Para escoamentos internos a tubulações por exemplo, as normais apontam para dentro da geometria. Na Fig. 4.1 uma malha triangular para escoamento interno é exemplificada.

Figura 4.1: Exemplo de malha lagrangiana para simulação de escoamento interno em turbina francis. As setas vermelhas são as normais dos triângulos da malha.

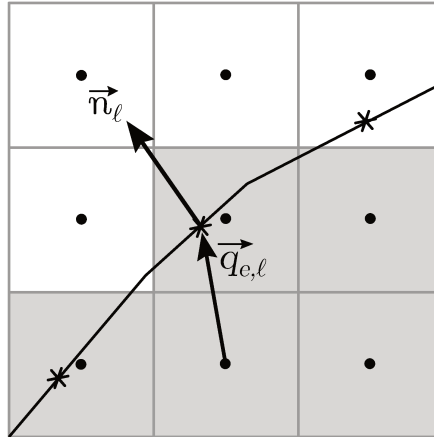


Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Para a classificação de um dado volume euleriano, um vetor é definido partindo de seu centro até o centroide de triângulo mais próximo ($\vec{q}_{e,\ell}$). Em seguida, é realizado o produto escalar entre o vetor $\vec{q}_{e,\ell}$ e a normal do triângulo (\vec{n}_ℓ), como ilustrado pela Figura 4.2. Se o produto escalar for negativo, o volume é interno, caso contrário, o volume é externo, conforme a Eq. (4.1):

$$\text{centro euleriano} = \begin{cases} \text{Interno, se } \vec{q}_{e,\ell} \cdot \vec{n}_\ell > 0, \\ \text{Externo, se } \vec{q}_{e,\ell} \cdot \vec{n}_\ell \leq 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

Figura 4.2: Vetores utilizados para a classificação de volumes internos e externos. *: Centróides dos triângulos; •: Centro dos volumes eulerianos; □: Volumes externos; ■: Volumes internos.

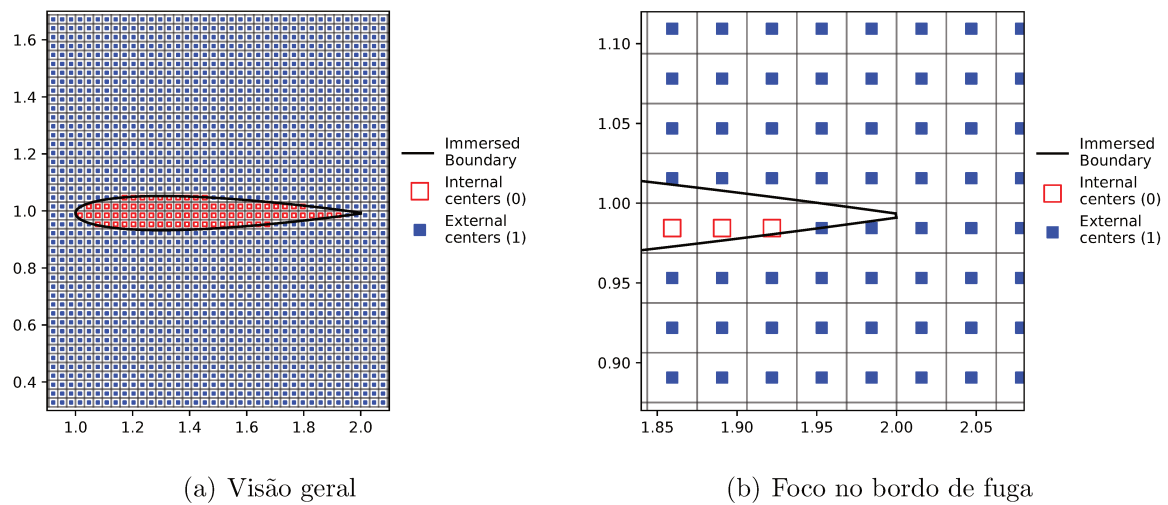


Fonte: Elaborada pelo autor.

A busca pelo centróide mais próximo do ponto euleriano pode ser extremamente cara se não for implementada de forma otimizada. A forma mais simples de implementa o  , para cada ponto euleriano, buscar todos os centróides avaliando a distância entre os pontos e armazenar a menor distância. O custo computacional dessa estratégia no entanto, se torna proibitivo a partir de um pequeno número de elementos nas malhas. Será mostrado na se o 4.5 a estrutura elaborada para a otimiza o da busca.

A Figura 4.3 mostra o resultado da marca o primária em um NACA0012 realizada pelo algoritmo implementado no código MFSim.

Figura 4.3: Resultado da marcação primária sobre um aerofólio NACA-0012.

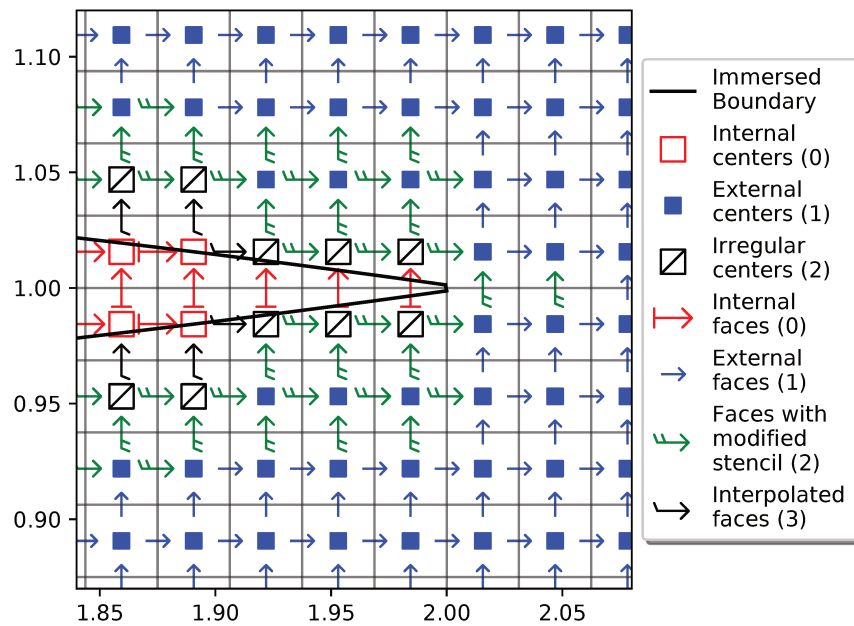


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

4.2 Marcação secundária

A marcação secundária é responsável por identificar os volumes irregulares; as faces ativas e inativas; as faces cujos valores de velocidade serão interpolados, e as cujo estêncil de interpolação será modificado (seção 3.2). A Figura 4.4 ilustra o bordo de fuga de um aerofólio NACA-0012 onde todos os tipos de marcação estão presentes.

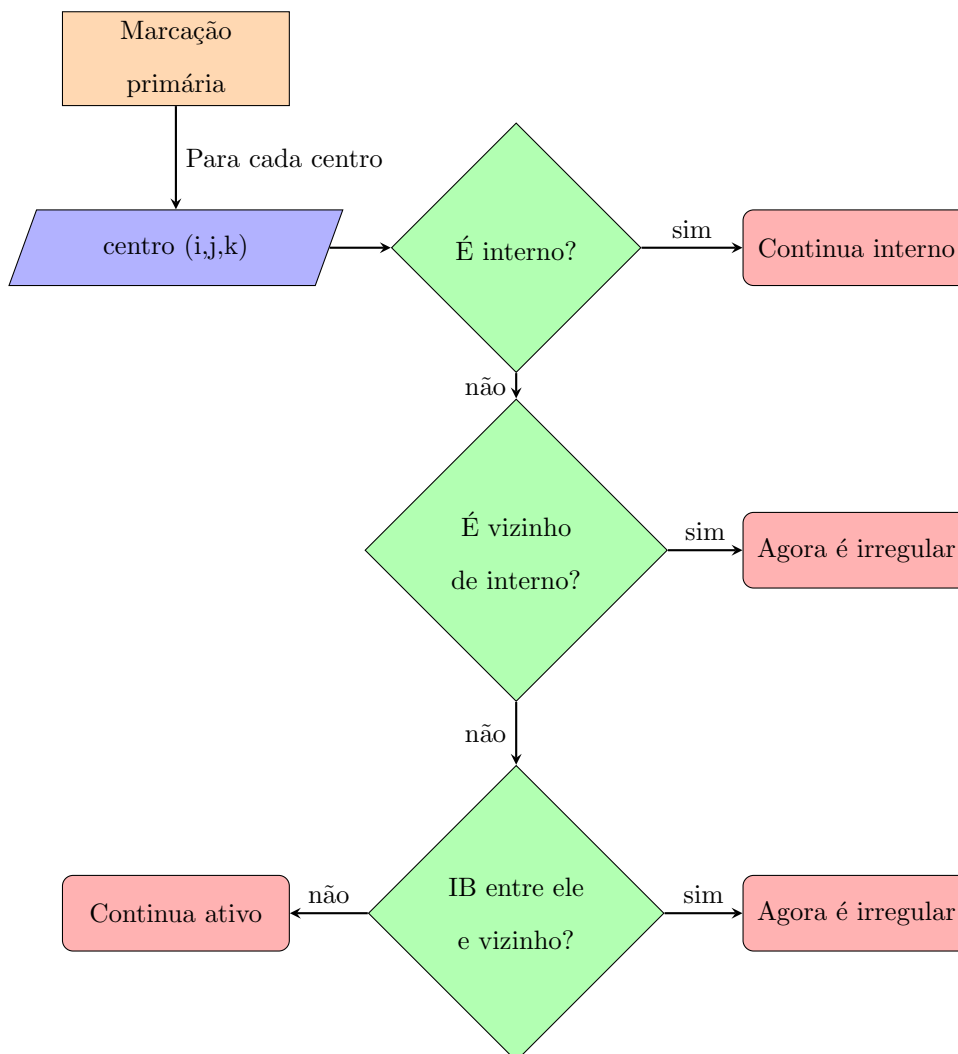
Figura 4.4: Marcação completa no bordo de fuga de um NACA-0012.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Os volumes são classificados como irregulares em duas circunstâncias. Na primeira, os volumes são irregulares quando são vizinhos de volumes internos. Nesse caso, pode-se utilizar da marcação primária para classificá-los de forma eficiente. A segunda circunstância ocorre quando dois centros de volumes externos são separados por uma fronteira, como ocorre no bordo de fuga do aerofólio. O procedimento é esquematizado no fluxograma da Fig. 4.5.

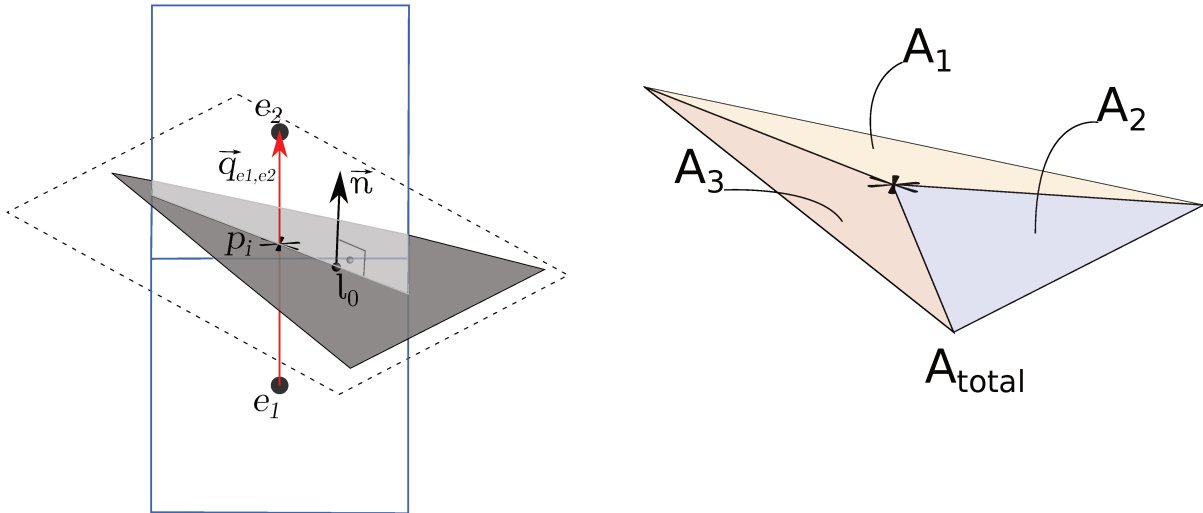
Figura 4.5: Fluxograma para marcação secundária de centros eulerianos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a segunda circunstância, é necessário verificar se há interseção entre algum triângulo da fronteira e as retas que ligam o ponto euleriano em análise aos seu vizinhos. Na Fig. 4.6-a é ilustrada a interseção entre o ponto em análise e_1 e seu vizinho e_2 .

Figura 4.6: Nomenclaturas para a interseção entre triângulo e reta.



(a) Interseção com triângulo da reta que une dois pontos eulerianos.

(b) Sub-triângulos formados com o ponto de interseção.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O algoritmo de cálculo de interseção reta-triângulo envolve o cálculo da interseção da reta com o plano no qual o triângulo está contido, seguido pela análise para verificar se o ponto de interseção obtido encontra-se dentro do triângulo.

As coordenadas p_i do ponto de interseção com o plano são calculadas, de forma algébrica, por $p_i = e_1 + \vec{q}_{e_1,e_2}d$ onde e_1 é um ponto de referência, no caso, as coordenadas de um dos pontos eulerianos, e \vec{q}_{e_1,e_2} é o vetor que une os dois pontos eulerianos. O parâmetro d é calculado por:

$$d = \frac{(e_1 - l_0) \cdot \vec{n}}{\vec{q}_{e_1,e_2} \cdot \vec{n}}, \quad (4.2)$$

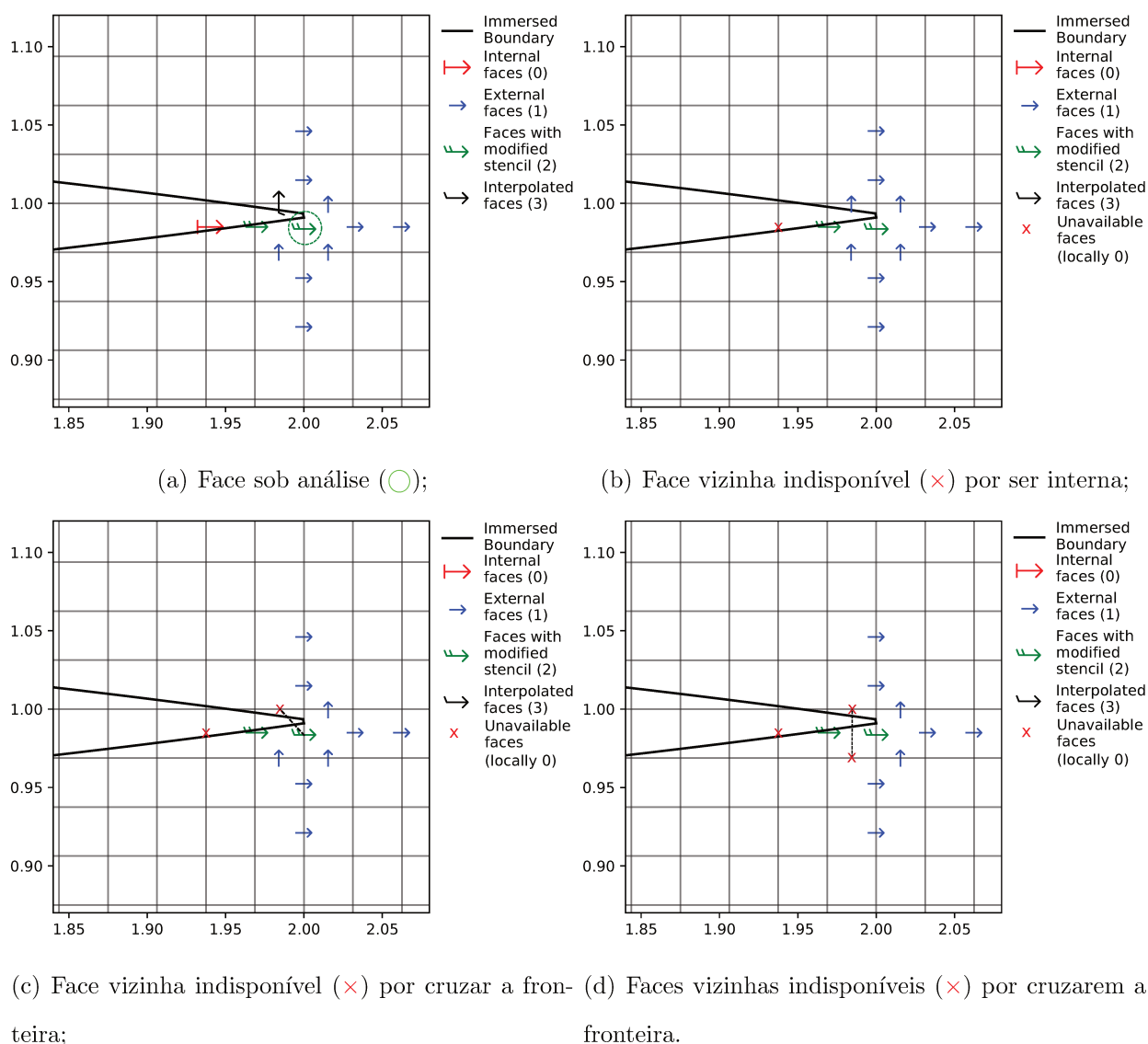
onde l_0 é um ponto no plano, no caso, o centróide do triângulo, e \vec{n} é a normal do triângulo.

Para verificar se o ponto de interseção obtido está contido no triângulo, três novos triângulos são formados, utilizando o ponto de interseção e os vértices do triângulo original, como mostra a Figura 4.6-b. Se a soma das áreas dos novos triângulos for igual à área do

triângulo sob análise, o ponto de interseção está contido no triângulo.

Análises semelhantes são realizadas para as faces cujo estêncil de interpolação necessita ser modificado. Para determinar quais as faces vizinhas podem ser utilizadas no estêncil, é necessário conferir quais as vizinhas não cruzam a fronteira, como mostra a Figura 4.7. Para tanto, é utilizado a mesma lógica descrita para a marcação dos volumes irregulares. Um mapa guarda para cada face, quais as faces vizinhas não estão disponíveis para interpolação. A fim de reduzir o consumo de memória, esse mapa só é alocado para as faces cujo stencil precisa ser modificado.

Figura 4.7: Análise de disponibilidade de faces para constituição do estêncil de interpolação de uma dada face.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Como é possível prever, o cálculo das interseções seria excessivamente caro caso fosse necessário calcular todas as possíveis interseções com cada triângulo da malha lagrangiana para cada par de pontos eulerianos desejado. Por essa razão, foi criada uma estrutura de dados que armazena previamente os pontos lagrangianos próximos a cada ponto euleriano, bem como as interseções em cada direção, de forma que essas informações não necessitem ser recalculadas, visto que são utilizadas em várias etapas da implementação do LGC. Estudos de otimização da marcação serão detalhadas na seção 4.5.

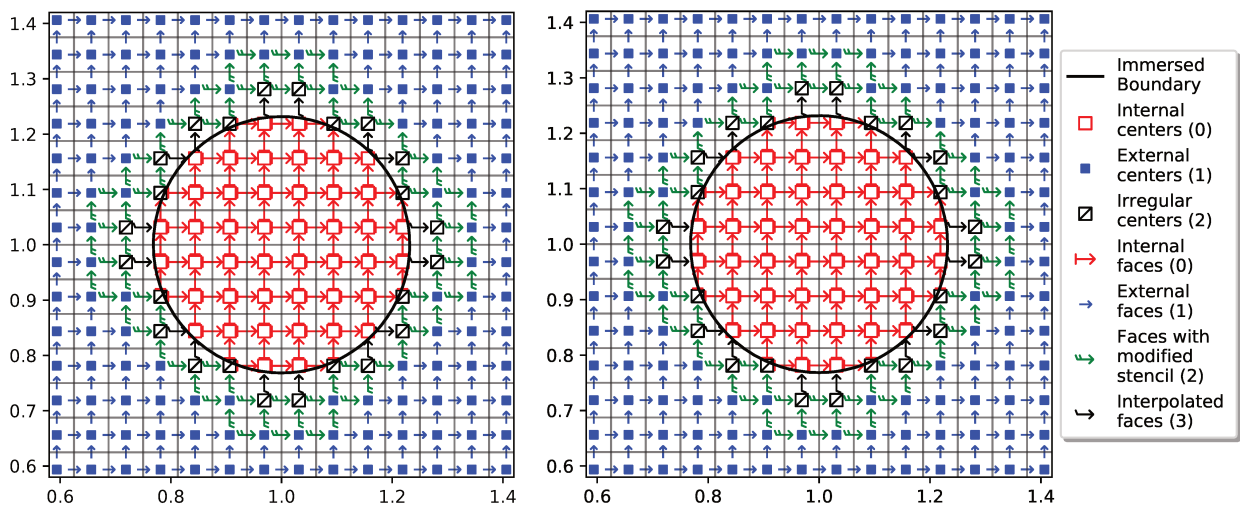
4.3 Resultados e validação da marcação

Os resultados da marcação proposta foram validados com a marcação analítica implementada por Ribeiro Neto (2021). Além disso, o algoritmo foi testado em configurações mais complexas, como placas finas, múltiplas geometrias imersas, e marcação em paralelo.

4.3.1 Comparação com marcação analítica

Nas Figs. 4.8 e 4.9 os pontos eulerianos classificados pela marcação analítica e pela não-analítica são comparados. Nota-se que não há diferenças entre as marcações.

Figura 4.8: Comparação entre marcação analítica e não-analítica em uma esfera.

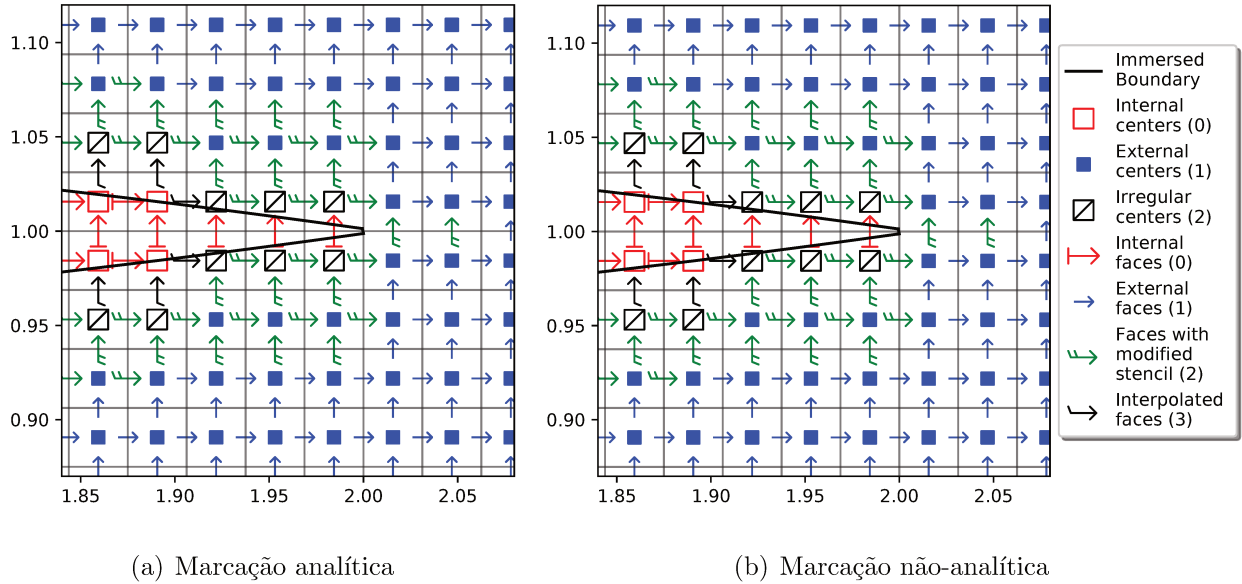


(a) Marcação analítica

(b) Marcação não-analítica

Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Figura 4.9: Comparação entre marcação analítica e não-analítica no bordo de fuga de um aerofólio NACA-0012.

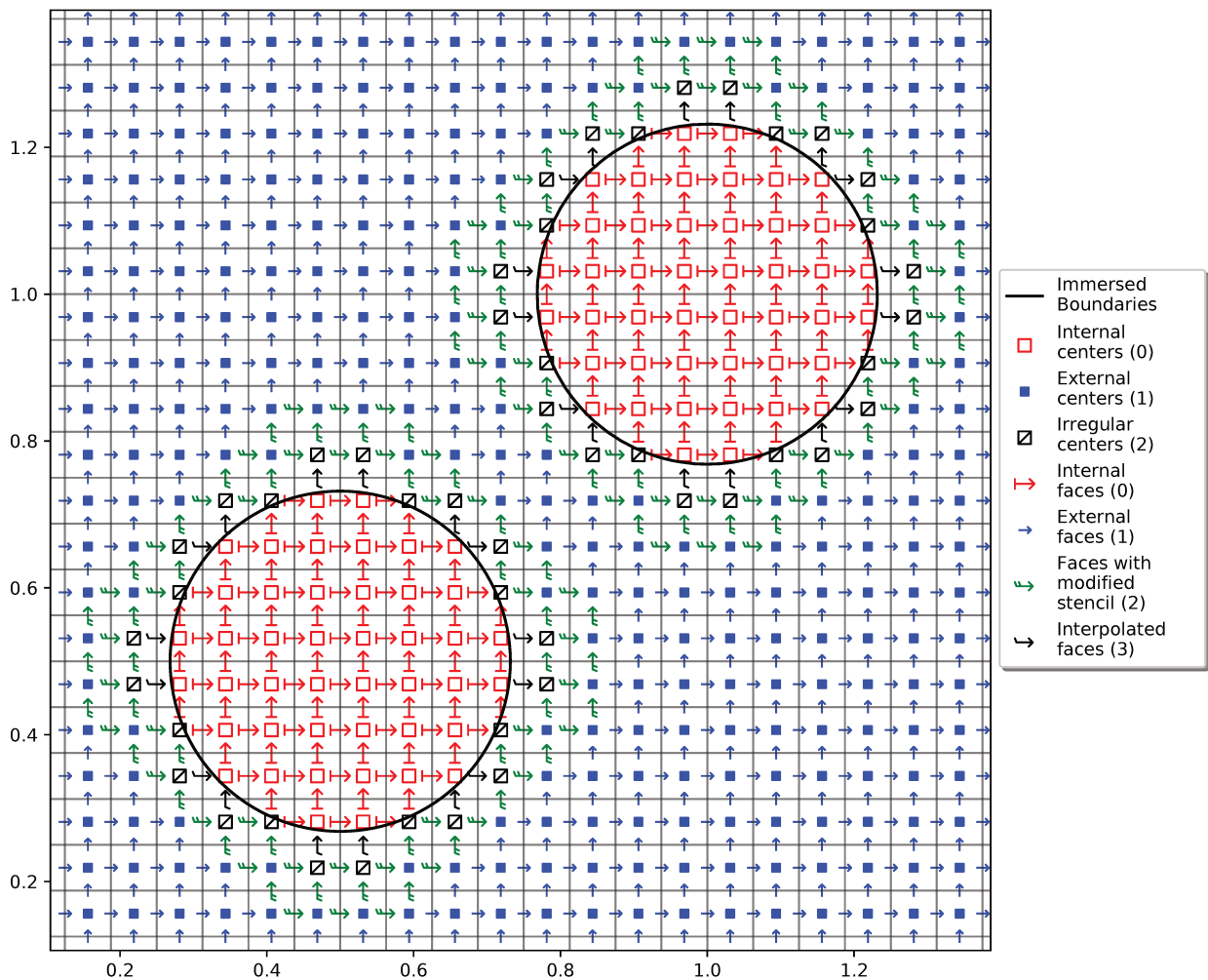


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

4.3.2 Outras configurações

Em casos mais complexos, o método deve ser capaz de marcar múltiplas geometrias imersas, representadas por arquivos de malhas triangulares individuais. Para tanto, é necessário que as estruturas que armazenam o mapa de classificação, bem como os algoritmos de busca por pontos lagrangianos, sejam capazes de lidar com tal situação. Para provar a capacidade do algoritmo implementado, a Figura 4.10 mostra a correta classificação de duas esferas representadas por malhas lagrangianas individuais.

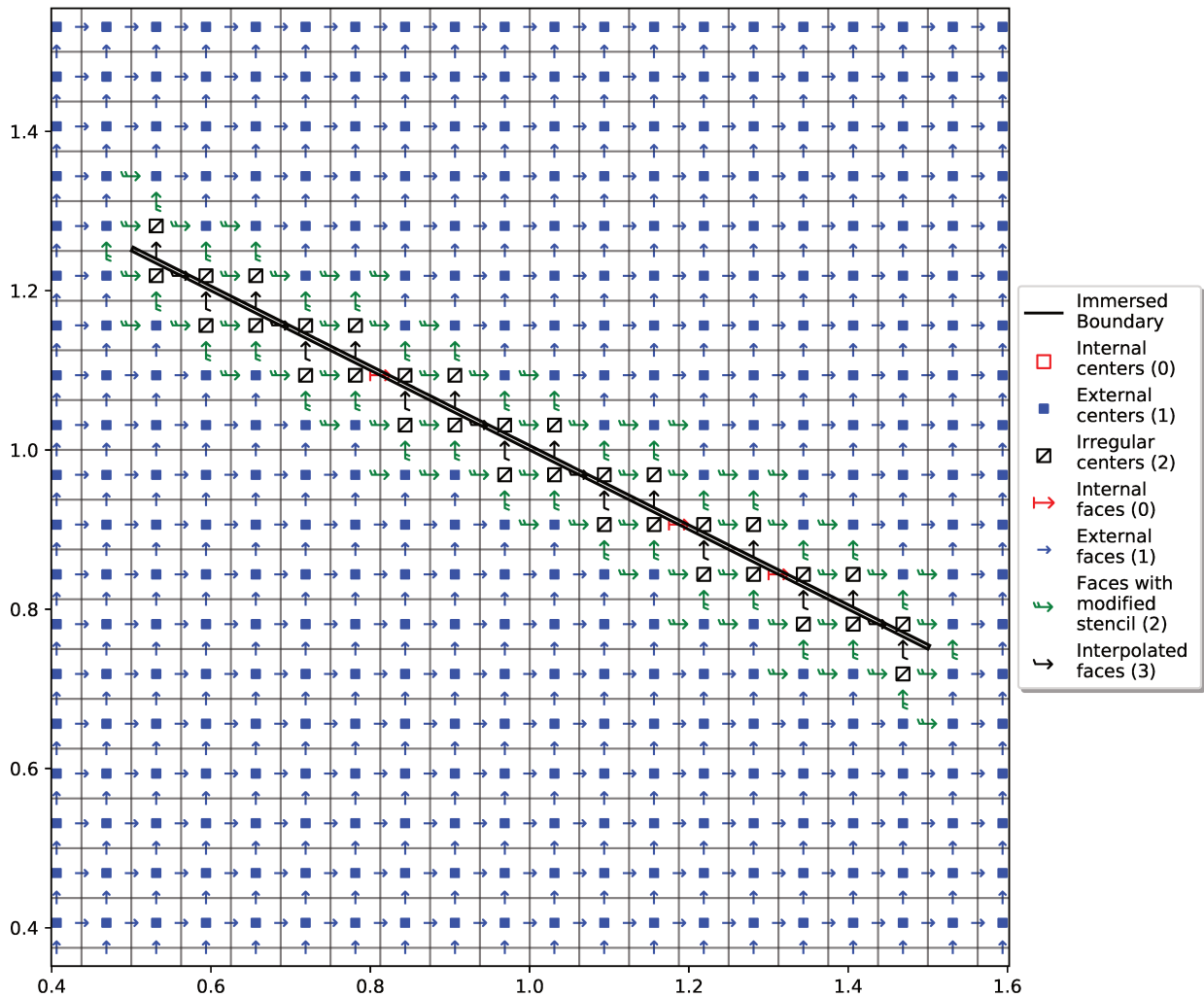
Figura 4.10: Marcação não-analítica de duas esferas.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Outro caso complexo, envolve a simulação de placas finas. Nesses casos é necessário que uma parede de espessura reduzida seja criada, a fim de que haja normais apontando para os dois lados da placa, caso contrário, a marcação primária, que depende da direção das normais, falharia. A Figura 4.11 mostra a marcação de uma geometria com tais características. Eventualmente alguns centros ou faces podem ficar internos à geometria, sem que acarrete em prejuízos para a simulação.

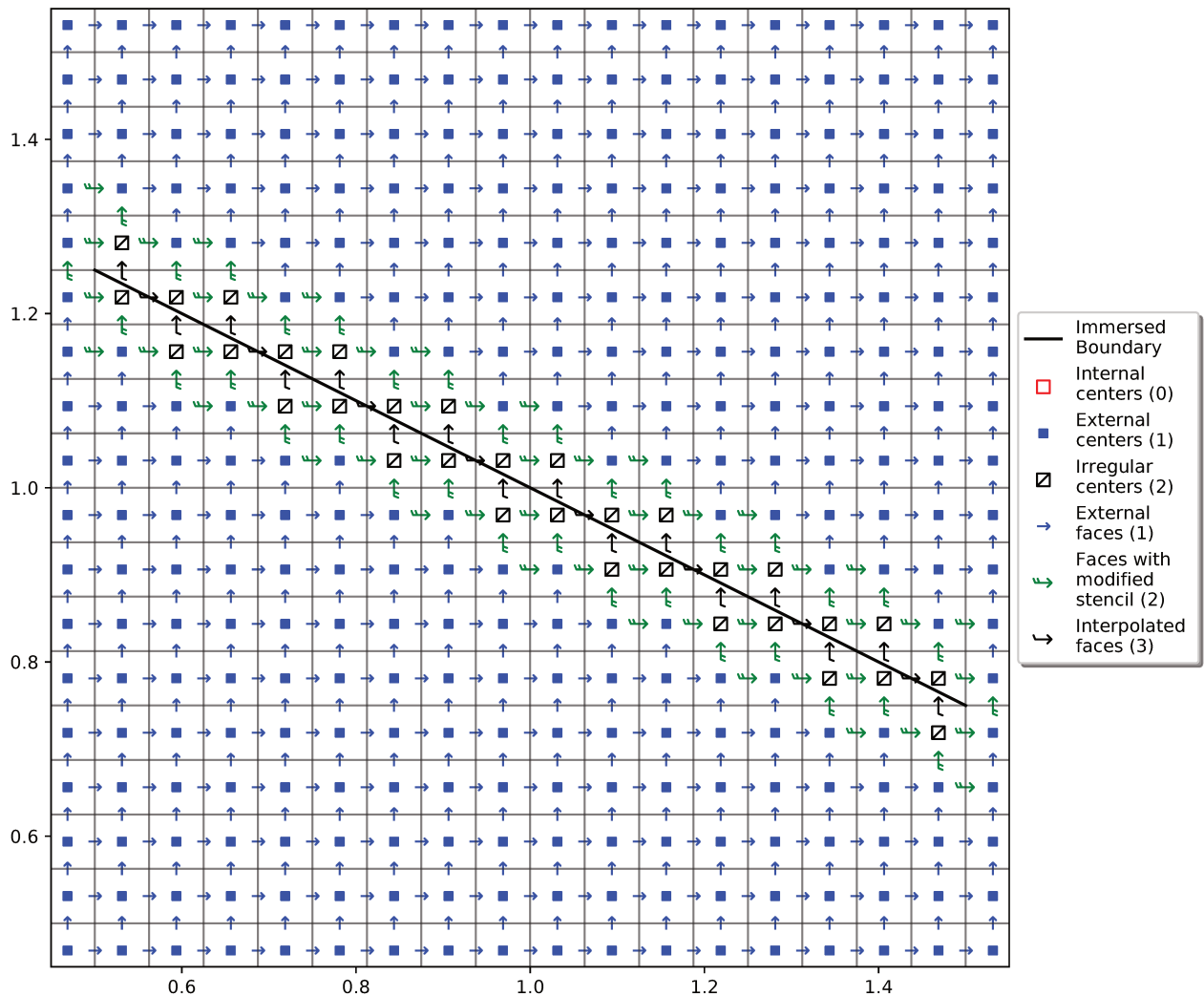
Figura 4.11: Marcação não-analítica de placa fina com espessura finita.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

Outra alternativa mais viável para o problema da placa fina é desativar a marcação primária e utilizar uma placa sem espessura (não é necessário ter normais apontando para os dois lados nesse caso). Dessa forma no algoritmo da Fig. 4.5, os dois primeiros condicionais serão falsos e todos os casos cairão no terceiro condicional. Isso pode aumentar o tempo computacional da marcação de volumes irregulares, já que os dois primeiros condicionais são mais rápidos de serem verificados. Esse tempo pode ser compensado no entanto, já que não é necessário realizar a marcação primária. Na Fig. 4.12 é mostrado o resultado da marcação da placa fina utilizando tal abordagem. Nota-se que diferente do que ocorre para a Fig. 4.11, não existem pontos internos nessa abordagem.

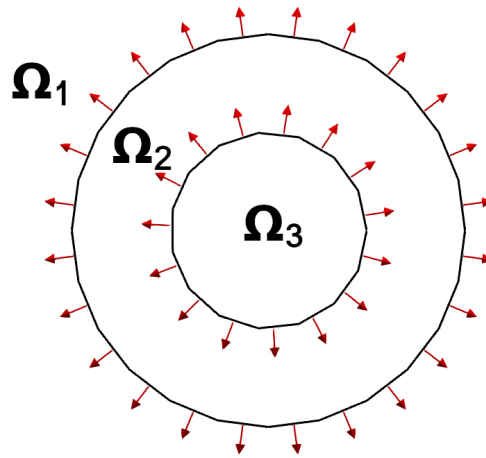
Figura 4.12: Marcação não-analítica de placa fina sem espessura.



Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

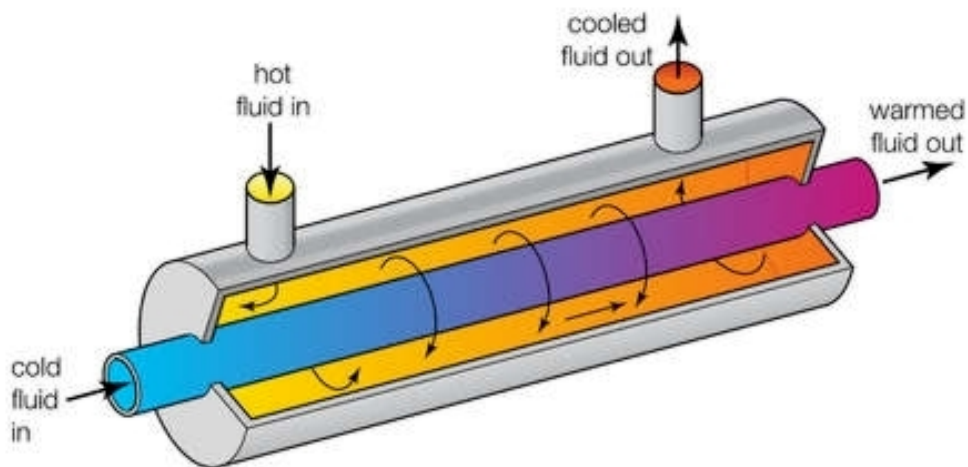
A marcação primária como proposta por Berthelsen e Faltinsen (2008) é suficiente para a simulação de escoamentos externos, internos, ou ambos de forma simultânea. No entanto, em sistemas mais complexos podem existir casos de fronteiras imersas interiores a outras fronteiras, como o caso de duas tubulações concêntricas, sujeitas a escoamento externo, cada tubulação com seus fluidos de propriedades diferentes, como esquematizado na Fig. 4.13. Essa configuração é utilizada por exemplo, em trocadores de energia térmica concêntricos (Fig. 4.14).

Figura 4.13: Sistema com três subdomínios de fluidos distintos (Ω_1 , Ω_2 e Ω_3).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.14: Trocador de energia térmica concêntrico.



Fonte: Retirada de Çengel (2006).

No caso da Fig. 4.13, a marcação primária indicando apenas “externo” ou “interno” não é suficiente, pois um volume pertencente a Ω_2 por exemplo, é externo a Ω_3 e interno a Ω_1 , de acordo com a abordagem da Eq. (4.1). A solução proposta no presente trabalho é criar um identificador de domínios, de forma que cada domínio tenha um identificador único, e portanto, o código possa acessar o identificador e definir propriedades distintas para cada escoamento. Essa abordagem também é útil para que ao montar o estêncil de interpolação, o código possa verificar se todos os pontos do estêncil pertencem ao mesmo subdomínio.

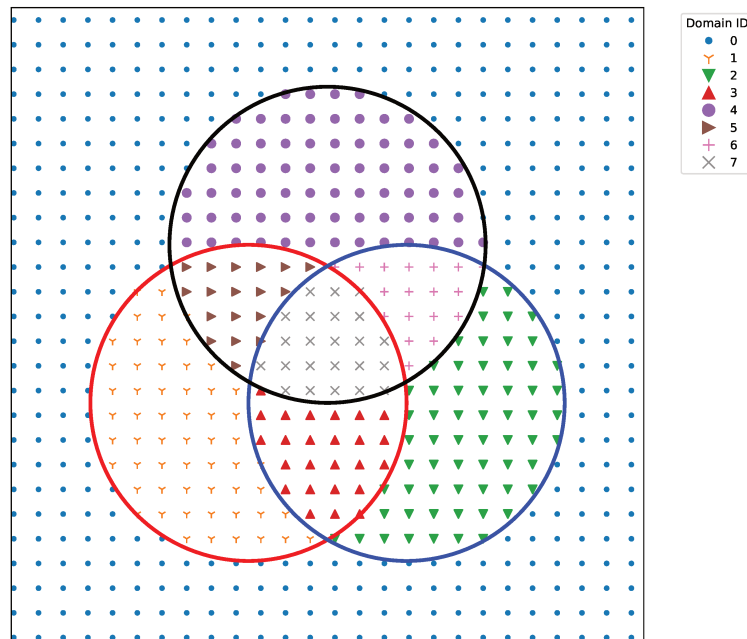
Na solução proposta, cada fronteira imersa recebe um identificador, conforme a Eq. (4.3), onde IB_n é a n -ésima fronteira imersa.

$$ID_{IB_n} = 2^{n-1}. \quad (4.3)$$

Em seguida, no começo da marcação primária, cada ponto euleriano e_i é inicializado com uma variável $ID_{e_i} = 0$. A marcação primária é então realizada para o ponto euleriano e_i , considerando cada fronteira imersa individualmente. Se o ponto é interior à fronteira IB_n , a variável ID_{e_i} é atualizada: $ID_{e_i} = ID_{e_i} + ID_{IB_n}$.

Essa abordagem garante que cada subdomínio tenha um identificador único. Na Fig. 4.15 é mostrado em um plano, o resultado obtido para o caso de três esferas que se intersectam formando subdomínios. Na Fig. 4.15, a esfera vermelha recebe o identificador $ID_1 = 2^{(1-1)} = 1$; a esfera azul recebe $ID_2 = 2^{(2-1)} = 2$; e a esfera preta recebe $ID_3 = 2^{(3-1)} = 4$. Dessa forma, os pontos e_i interiores às esferas vermelha e preta por exemplo, recebem os identificadores $ID_{e_i} = ID_1 + ID_3 = 5$.

Figura 4.15: Subdomínios formados pelas esferas e suas interseções.

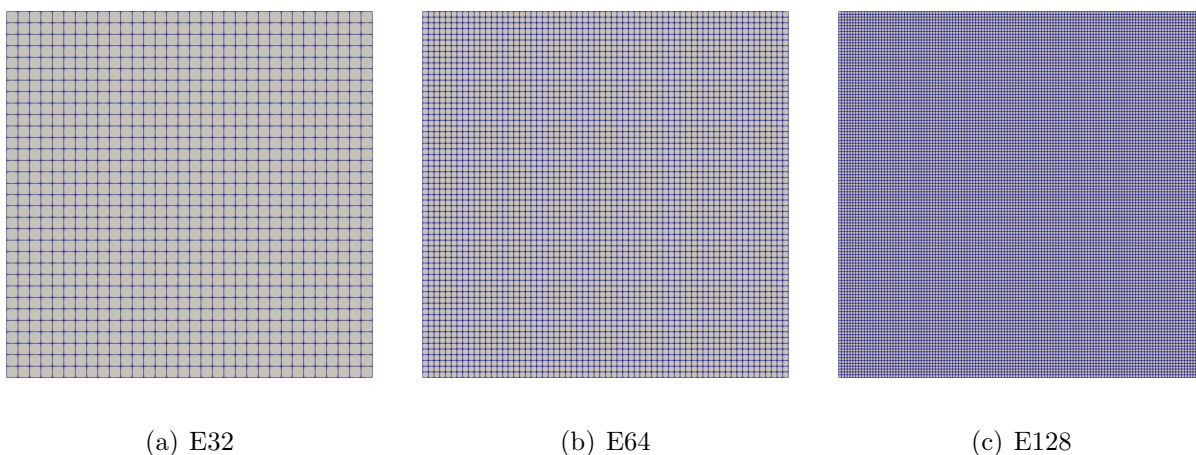


Fonte: Elaborada pelo autor. Figura feita com Matplotlib (HUNTER, 2007).

4.4 Custo computacional da implementação não otimizada

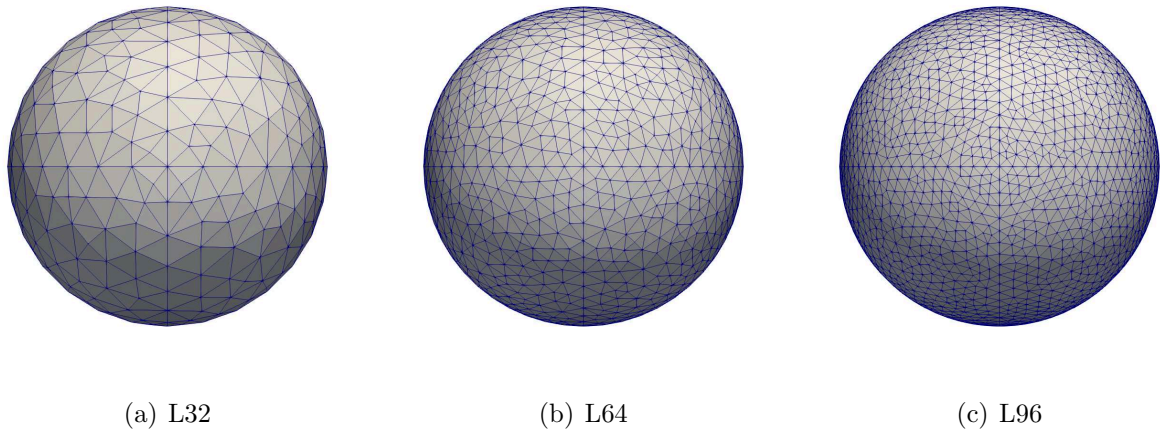
Após a validação da marcação, foi realizado um estudo de custo computacional por etapas, a fim de identificar quais rotinas deveriam ser foco de otimização. Para tanto, foram geradas três malhas eulerianas com 32^3 , 64^3 e 128^3 volumes, e três malhas lagrangianas com triângulos compatíveis com o tamanho dos volumes eulerianos. As malhas eulerianas, denominadas E32, E64 e E128 são apresentadas na Figura 4.16, enquanto as lagrangianas, denominadas L32, L64 e L96 são mostradas na Figura 4.17

Figura 4.16: Malhas eulerianas utilizadas para avaliação de custo computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Figura 4.17: Malhas lagrangianas utilizadas para avaliação de custo computacional.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

As marcações foram realizadas utilizando combinações entre as malhas eulerianas e lagrangianas. Para cada configuração, foi obtido o custo computacional médio (\bar{t}), bem como o custo médio por ponto lagrangiano (\bar{t}/n_{Lag}), por ponto euleriano (\bar{t}/n_{Eul}) e por pontos ($\bar{t}/(n_{Lag}n_{Eul})$). Para fins de comparação, também foi avaliado o custo da marcação analítica ($\bar{t}_{analítico}$) com as mesmas malhas eulerianas. As tabelas 4.1 a 4.3 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 4.1: Custos computacionais (s) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L32.

	L32E32	L32E64	L32E128
\bar{t}	0.1621	1.0204	7.1775
$\bar{t}_{analítico}$	0.0011	0.0064	0.0451
\bar{t}/n_{Lag}	0.0002	0.0014	0.0102
\bar{t}/n_{Eul}	2.95E-06	2.97E-06	2.98E-06
$\bar{t}/(n_{Lag}n_{Eul})$	4.20E-09	4.23E-09	4.24E-09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.2: Custos computacionais (s) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L64.

	L64E32	L64E64	L64E128
\bar{t}	0.7316	4.5954	32.3671
$\bar{t}_{\text{analítico}}$	0.0010	0.0064	0.0457
\bar{t}/n_{Lag}	0.0003	0.0019	0.0137
\bar{t}/n_{Eul}	1.33E-05	1.34E-05	1.35E-05
$\bar{t}/(n_{Lag}n_{Eul})$	5.63E-09	5.65E-09	5.68E-09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4.3: Custos computacionais (s) entre as malhas eulerianas utilizando a malha lagrangiana L96.

	L96E32	L96E64	L96E128
\bar{t}	1.5538	9.7481	69.1970
$\bar{t}_{\text{analítico}}$	0.0011	0.0066	0.0452
\bar{t}/n_{Lag}	0.0003	0.0020	0.0141
\bar{t}/n_{Eul}	2.83E-05	2.84E-05	2.88E-05
$\bar{t}/(n_{Lag}n_{Eul})$	5.78E-09	5.80E-09	5.87E-09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se que há significativo aumento no custo computacional a medida em que se aumenta a quantidade de pontos eulerianos ou lagrangianos, o que inviabilizaria o emprego do método em problemas práticos, sobretudo naqueles envolvendo remalhagem ou fronteiras móveis, uma vez que nesses casos, o mapa deve ser reconstruído a cada nova posição das malhas. Tal custo justifica o esforço despendido na otimização das rotinas de marcação, que serão detalhadas na seção 4.5. Também é interessante notar o reduzido custo computacional da marcação analítica, o que possibilitou o desenvolvimento das outras etapas do método durante o trabalho de Ribeiro Neto (2021). O aumento no custo computacional da marcação analítica em função da quantidade de pontos lagrangianos ocorre porque nessa metodologia, a malha lagrangiana foi utilizada para cálculos de distâncias.

4.5 Redução do custo computacional da marcação

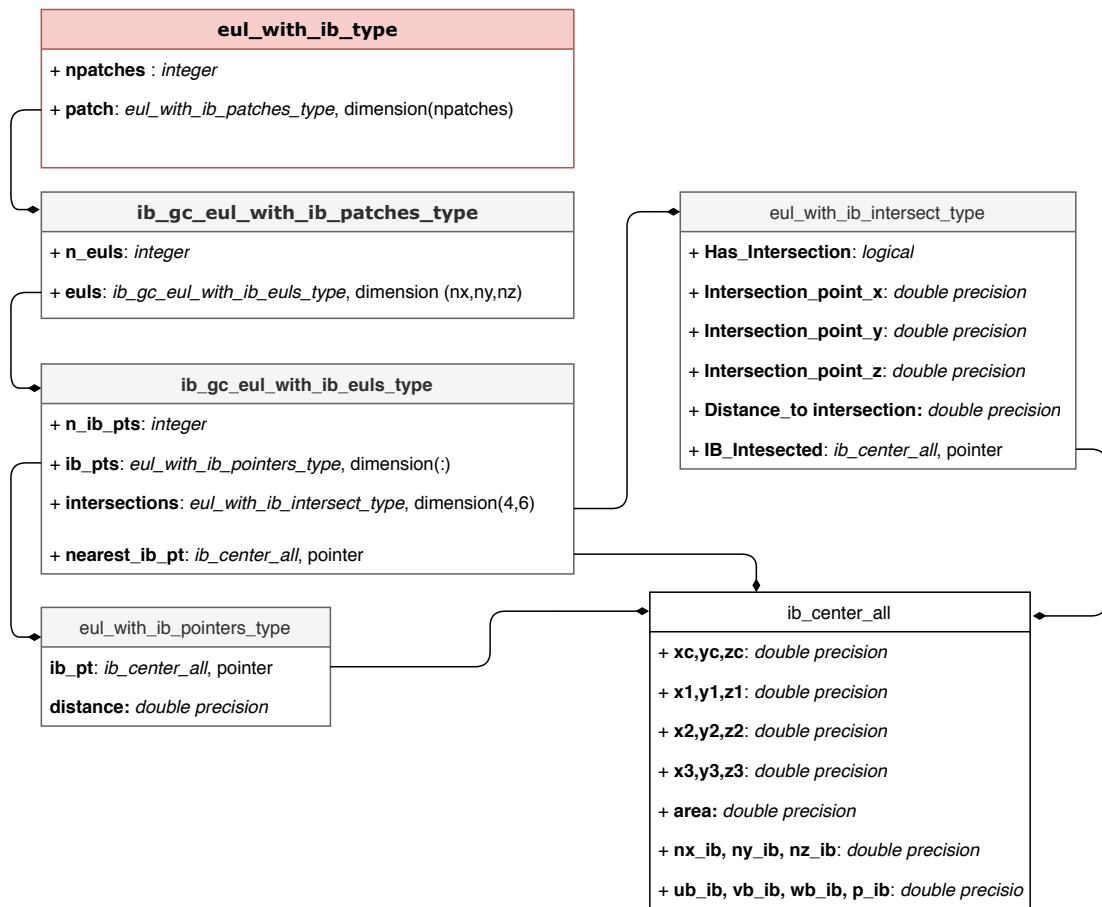
Visando a redução do custo computacional geral das rotinas de marcação, foi criado um novo mapa lagrangiano, que fornece informações para as rotinas de marcação. Além disso, foi dado foco nas rotinas que envolvem o cálculo de interseção entre pontos lagrangianos e as fronteiras imersas, uma vez que representam a maior parte do custo computacional.

4.5.1 Novo mapa lagrangiano

Na implementação inicial, era utilizada uma *hash table* já implementada no código MFSim para a obtenção de pontos lagrangianos próximos a pontos eulerianos, bem como para a obtenção das interseções. Após análises de custo computacional, foi identificado que o acesso a tal estrutura de dados, na forma como necessário para as rotinas de marcação, representava um gargalo. Por esse motivo, foi implementada uma nova estrutura de dados, que fornece as informações necessárias de forma mais eficiente. Como mostrado entre as otimizações 0 e 1 da Tabela 4.4 da seção 4.5.4, realmente houve uma redução de 87,74% do custo computacional para um dado caso utilizando a nova estrutura.

A nova estrutura, denominada `eul_with_ib` é esquematizada na Fig. 4.18. O mapa é alocado para cada *patch* no nível mais fino da malha (l_{top}), e contém informações apenas dos volumes próximos à fronteira. Para cada volume próximo de uma fronteira, a estrutura fornece um vetor de ponteiros que apontam para os pontos lagrangianos próximos. Também é armazenado a informação para cada um dos quatro tipos de pontos eulerianos (três faces e centro), sobre suas interseções com a fronteira imersa em cada uma das seis direções.

Figura 4.18: UML indicando as informações disponíveis na estrutura `eul_with_ib`.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5.2 Otimização do preenchimento da estrutura `eul_with_ib`

Inicialmente a nova estrutura de dados era alocada para todos os volumes no ℓ_{top} e para cada volume, eram percorridos todos os pontos lagrangianos, buscando os que estavam contidos em uma *bounding box* em torno do volume, a lógica é mostrada no código 4.1. Posteriormente a lógica foi otimizada, e em vez de percorrer cada um dos volumes, o algoritmo passou a percorrer os pontos lagrangianos, e identificar os volumes próximos a eles, para então alocar a estrutura, como mostrado no código 4.2.

Como mostrado entre as otimizações 1 e 2 da Tabela 4.4 da seção 4.5.4, o custo de preenchimento da estrutura (etapa 0) passou de 341,133 s para 1,478 s, representando uma redução de 78,88% no custo computacional total em relação à otimização 1.

Código 4.1: Método inicial de alocação da estrutura eul_with_ib

```

1      ! Tamanho da bounding box
2      nbb ← 3
3
4      ! Quantidade de pontos no volume de controle i,j,k
5      pontos_no_volume(ncell) ← 0
6
7      para cada patch no ℓtop faça:
8          para cada volume i,j,k no patch no ℓtop faça:
9              para cada ponto lagrangiano (IB_Id,pto_ID) faça:
10                 (x, y, z) ← coordenadas x, y e z do centro do volume
11                 (xc,yc,zc) ← coordenadas x, y e z do centro do triangulo
12
13                 ! confere se o centro do triangulo esta contido na bounding box
14                 se (x - dx · nbb ≤ xc ≤ x + dx · nbb e
15                    y - dy · nbb ≤ yc ≤ y + dy · nbb e
16                    z - dz · nbb ≤ zc ≤ z + dz · nbb):
17                     pontos_no_volume(i,j,k) += 1
18
19         ! Etapa de alocação
20         para cada volume i,j,k do patch ℓtop faça:
21             alocar eul_with_ib(patch)%euls(i,j,k)%ib_pts(pontos_no_volume(i,j,k))

```

Código 4.2: Otimização da alocação da estrutura eul_with_ib

```

1      ! Tamanho da bounding box
2      nbb ← 3
3
4      ! Quantidade de pontos no volume de controle i,j,k
5      pontos_no_volume(ncell) ← 0
6
7      para cada patch no ℓtop faça:
8          para cada ponto lagrangiano (IB_Id, pto_ID) faça:
9
10             (xc,yc,zc) ← coordenadas x, y e z do centro do triângulo
11             ! i,j,k do volume euleriano no qual o centro do triângulo está contido
12             (ic,jc,kc) = [ (xc - ga1)/Δx, (yc - ga2)/Δy, (zc - ga3)/Δz ]
13
14             ! Adiciona 1 ponto lagrangiano a cada volume euleriano na bounding box
15             faça i=ic-nbb : ic+nbb:
16                 faça j=jc-nbb : jc+nbb:
17                     faça k=kc-nbb : kc+nbb:
18                         pontos_no_volume(i,j,k) += 1
19
20         ! Etapa de alocação
21         para cada volume i,j,k do patch ℓtop faça:
22             alocar eul_with_ib(patch)%euls(i,j,k)%ib_pts(pontos_no_volume(i,j,k))

```

Após alocada a estrutura, os pontos próximos e as informações relacionadas às interseções são armazenadas, conforme esquematizado no código 4.3. Ressalta-se que inicialmente as informações sobre as interseções não eram armazenadas. No entanto, após o armazenamento de tais informações, houve um aumento no custo computacional da etapa 0, mas uma redução significativa no custo da etapa 4, como indicado entre as otimizações 3 e 4 da Tabela 4.4.

Código 4.3: Preenchimento da estrutura `eul_with_ib`

```

1  nbb ← 3
2  n_pts_lag_added(nccell) ← 0
3
4  para cada patch no  $\ell_{top}$  faça:
5      para cada ponto lagrangiano (IB_Id,pto_ID) faça:
6          (xc,yc,zc) ← coordenadas x, y e z do centro do triângulo
7          (ic,jc,kc) = [ (xc - ga1)/ $\delta x$ , (yc - ga2)/ $\delta y$ , (zc - ga3)/ $\delta z$  ]
8
9          faça i=ic-nbb : ic+nbb:
10             faça j=jc-nbb : jc+nbb:
11                 faça k=kc-nbb : kc+nbb:
12                     n_pts_lag_added(i, j, k) + = 1
13                     eul_with_ib(patch)%euls(i, j, k)%ib_pts(n_pts_lag_added(i, j, k))%ib_pt ...
14                     aponta para ib_data_all(IB_Id)%ib_vector(pto_ID)
15
16  para cada volume i, j, k do patch  $\ell_{top}$  faça:
17      se alocado eul_with_ib(patch)%euls(i, j, k), faça:
18          eul_with_ib%euls(i, j, k)%intersections(0, 1 : 6) ← Info. da intersec. do centro com a IB nas 6 dir.
19          eul_with_ib%euls(i, j, k)%intersections(1, 1 : 6) ← Info. da intersec. da face u com a IB nas 6 dir.
20          eul_with_ib%euls(i, j, k)%intersections(2, 1 : 6) ← Info. da intersec. da face v com a IB nas 6 dir.
21          eul_with_ib%euls(i, j, k)%intersections(3, 1 : 6) ← Info. da intersec. da face w com a IB nas 6 dir.

```

4.5.3 Otimização da rotina de interseção reta/triângulo

Outra otimização realizada, foi no cálculo para conferir se o ponto de interseção está contido no triângulo, conforme explicado na seção 4.2.

Originalmente, eram calculadas as áreas de cada sub-triângulo e do triângulo original, para então, verificar se a soma das áreas dos sub-triângulos era maior que a do triângulo original, como mostrado no código 4.4.

A lógica foi otimizada para que após cada cálculo de área de um sub-triângulo, a mesma

seja comparada com a área do triângulo original, e se for maior, o ponto já é considerado externo ao triângulo, e os demais cálculos são interrompidos, como explicado no código 4.5.

Após análises, foi constatado que a grande maioria dos casos é interrompido após verificar que a área do primeiro sub-triângulo é maior que a do triângulo original, evitando o cálculo de mais duas áreas. Esse fato justifica a redução do custo computacional obtida e apresentada na Tabela 4.4 entre as otimizações 2 e 3.

Código 4.4: Ponto contido em triângulo (Original)

```

1  Area_tri ← Área do triângulo lagrangiano
2  Area_1 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 1 e 2
3  Area_2 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 2 e 3
4  Area_3 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 1 e 3
5
6  se  $Area_1 + Area_2 + Area_3 \geq Area\_tri$ :
7      O ponto de interseção está fora do triângulo.
8  caso contrario:
9      O ponto de interseção está contido no triângulo.
10
11 fim

```

Código 4.5: Ponto contido em triângulo (Otimizado)

```

1  Area_tri ← Área do triângulo lagrangiano
2  Area_1 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 1 e 2
3  se  $Area_1 \geq Area\_tri$ :
4      O ponto de interseção está fora do triângulo.
5      fim
6  Area_2 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 2 e 3
7  se  $Area_2 \geq Area\_tri$ :
8      O ponto de interseção está fora do triângulo.
9      fim
10 Area_3 ← Área do triângulo formado pelo ponto de interseção e os vértices 1 e 3
11 se  $Area_3 \geq Area\_tri$ :
12     O ponto de interseção está fora do triângulo.
13     fim
14
15 se  $Area_1 + Area_2 + Area_3 \geq Area\_tri$ :
16     O ponto de interseção está fora do triângulo.
17 caso contrario:
18     O ponto de interseção está contido no triângulo.
19
20 fim

```

4.5.4 Resultados das otimizações

Nas seções anteriores foram apresentados os procedimentos para otimização das rotinas de marcação, correspondentes às otimizações 1 a 4 da tabela 4.4. A otimização 5 se refere à forma como as classificações são armazenadas, que anteriormente era feita de forma redundante, sem necessidade. A otimização 6 não é uma otimização de algoritmos propriamente, e sim uma rodada com o mesmo código da otimização 5, mas utilizando quatro processos para a marcação.

A tabela 4.4 foi obtida por simulações de um caso com 2997787 volumes eulerianos e 55632 pontos lagrangianos, valores típicos de simulações práticas. Na Tab. 4.5 são identificados as otimizações correspondentes à Tab. 4.4.

Tabela 4.4: Otimizações do custo computacional por etapa.

Otimização	Custo médio por etapa (s)							Razão
	0	1	2	3	4	5	Total	
0	-	121.893	25.213	1.294	3107.86	5.404	3261.66	-
1	341.133	3.430	3.922	1.310	50.198	0.023	400.02	87.74%
2	1.478	4.173	4.957	1.323	72.545	0.023	84.50	78.88%
3	1.481	3.510	3.699	1.325	47.676	0.918	58.61	30.64%
4	8.104	1.879	0.625	1.328	11.012	0.057	23.01	60.75%
5	8.147	1.089	0.623	0.229	1.329	0.071	11.49	50.06%
6	2.745	0.241	0.355	0.133	0.209	0.023	3.849	66.50%

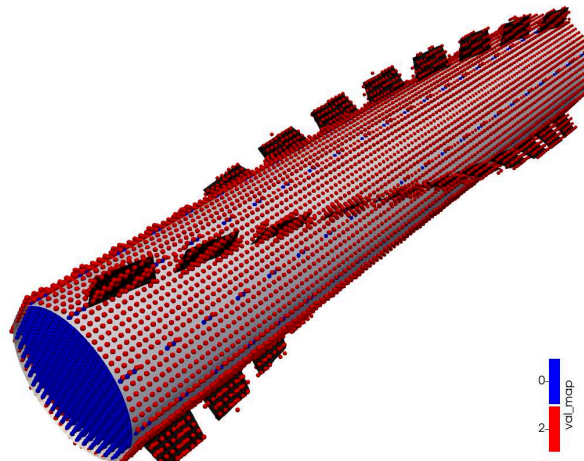
Tabela 4.5: Identificação das otimizações da Tabela 4.4.

- 0: Original (*hash*) 1: Novo mapa
 2: Novo preenchimento 3: Reta/Triângulo
 4: IB entre dois pontos 5: Alocações da classificação
 6: Paralelo (4 procs.)

4.6 Marcação de um cilindro com *strake*

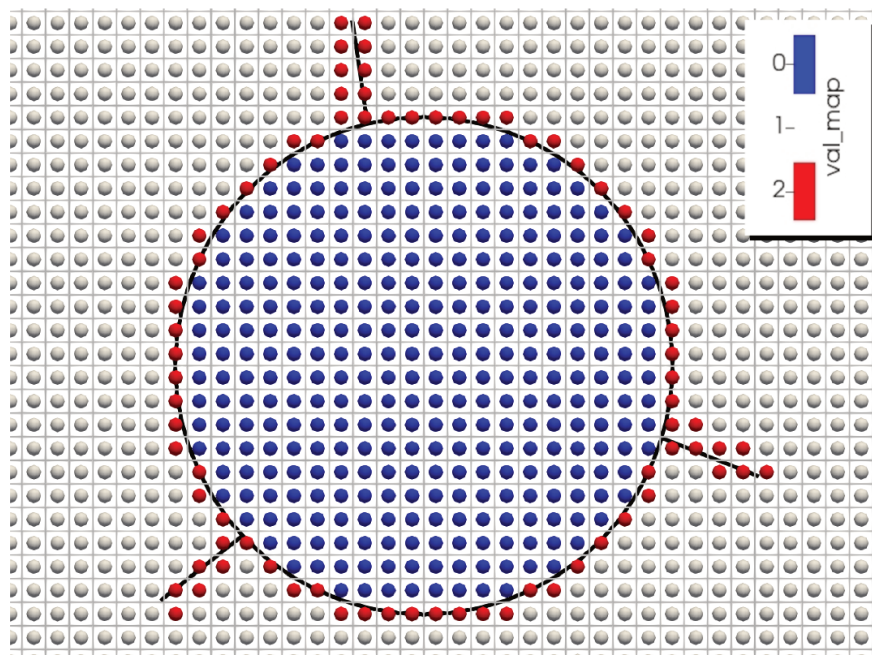
Após todas as otimizações realizadas, o algoritmo implementado foi utilizado para a marcação de uma geometria de *strake*. Para tanto, a geometria foi dividida em duas fronteiras imersas: uma contendo o cilindro, e outra contendo as aletas. As aletas são tratadas como placas finas, sem espessura, e portanto, a marcação primária para elas foi desativada. A marcação primária para o cilindro permaneceu ativa. Na Fig. 4.19 é mostrada a marcação tridimensional do *strake*. Os volumes ativos foram ocultados para facilitar a visualização. Na Fig. 4.20 um corte sobre o domínio é realizado para melhor visualização da marcação. A marcação do *strake* tem como objetivo a simulação futura das geometrias no método LGC.

Figura 4.19: Marcação de centros em cilindro com *strakes*.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

Figura 4.20: Marcação de centros em cilindro com *strakes*, vista em corte.



Fonte: Elaborada pelo autor. Captura de tela do software Paraview (AHRENS; GEVECI; LAW, 2005).

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho foi realizada a revisão bibliográfica sobre os temas de VIV e os dispositivos atenuadores do fenômeno. Tal revisão fundamentou a realização das simulações seguintes, em que cilindros e *strakes* foram analisados para diferentes condições de escoamento e com diferentes geometrias de aletas.

No primeiro conjunto de simulações, foram comparados os comportamentos dinâmicos do cilindro 05 e do *strake* 05. Os resultados foram coerentes com o esperado, apresentando os fenômenos descritos na revisão bibliográfica. No segundo conjunto, o *strake* 05 foi submetido a diferentes condições de escoamento (Re e u^*), novamente houve boa concordância com a literatura. Para o terceiro experimento, *strakes* com diferentes geometrias foram analisados para a mesma condição de escoamento, o que possibilitou observar a influência dos parâmetros geométricos sobre seus comportamentos dinâmicos. Nota-se por exemplo, a grande influência da altura da aleta sobre o coeficiente C_L . Também foi possível observar como as aletas atuam sobre as estruturas turbilhonares, justificando os comportamentos apresentados.

As simulações foram realizadas utilizando o método MDF que até então, era o único método de fronteira imersa disponível no MFSim. Visando a melhoria de simulações futuras, no presente trabalho também foi apresentada uma contribuição para a etapa de marcação do método LGC. O algoritmo de marcação se mostrou versátil e capaz de marcar a geometria dos *strakes*. Foi no entanto, necessário realizar otimizações para que a marcação pudesse ser

realizada com custo computacional factível.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Ampliação dos limites do planejamento experimental para valores de velocidade reduzida acima de $u^* = 9$;
- Ampliação dos limites de variação do ângulo da aleta, a fim melhor verificar o impacto da variável no comportamento dos *strakes*;
- Verificação dos efeitos de amortecimento estrutural; e
- Realização de outras otimizações nas rotinas de marcação do LGC, visando reduções ainda maiores no custo computacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, J.; GEVECI, B.; LAW, C. Paraview: An end-user tool for large-data visualization. In: HANSEN, C. D.; JOHNSON, C. R. (Ed.). *Visualization Handbook*. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005. p. 717–731. ISBN 978-0-12-387582-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-012387582-2/50038-1>.
- ALVES, M.; OLIVEIRA, P.; PINHO, F. A convergent and universally bounded interpolation scheme for the treatment of advection. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, v. 41, p. 47–75, jan. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/flid.428>.
- ANDRADE, J. R. *Metodos de fronteira imersa para corpos esbeltos: implementação e validação*. 133 p. Dissertação (Mestrado) — Federal University of Uberlandia (UFU), 2015.
- ANDRADE, J. R. *et al.* Assessment of two immersed boundary methods for flow over thin plates and sharp edges. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 40, n. 6, p. 288, jun. 2018. ISSN 1678-5878, 1806-3691. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1212-7>.
- ANDRADE, J. R.; SILVEIRA NETO, A.; VEDOVOTO, J. A directional immersed boundary method for flow past solid obstacles. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/CPS/COB-2015-0204>.
- ASSI, G. R. S.; CRESPI, T. Comparison of serrated helical strakes in suppressing the vortex-induced vibrations of a circular cylinder. In: MORENO VICE ADMIRAL JORGE ENRIQUEAND VEGA SAENZ, A. C.; COUCE, L. C.; ARENAS, J. S. (Ed.). *Proceeding of the VI International Ship Design & Naval Engineering Congress (CIDIN) and XXVI Pan-American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL)*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 287–297. ISBN 978-3-030-35963-8.
- BALAY, S. *et al.* *PETSc Users Manual*. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.mcs.anl.gov/petsc>.
- BALAY, S. *et al.* *PETSc Web page*. 2021. <https://www.mcs.anl.gov/petsc>. Disponível em: <https://www.mcs.anl.gov/petsc>.
- BARBI, F. *et al.* Numerical simulation of the flow through a compressor-valve model using an immersed-boundary method. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Taylor & Francis, v. 10, n. 1, p. 255–271, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19942060.2016.1140076>.

- BARROS NETO, B. de; SCARMÍNIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 2a. ed. [S.l.: s.n.], 2001. ISBN 8577806529.
- BEARMAN, P. W. *personal correspondence and transmittal of photograph of vortex wake taken at Imperial College of Science and Technology*. 1987.
- BERTHELSEN, P.; FALTINSEN, O. A local directional ghost cell approach for incompressible viscous flow problems with irregular boundaries. *Journal of Computational Physics - J COMPUT PHYS*, v. 227, p. 4354–4397, 04 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.12.022>.
- BLEVINS, R. D. *Flow-Induced Vibration*. Second edition. [S.l.]: Krieger Publishing Company, 2001. ISBN 1-57524-183-8.
- BORGES, A. *et al.* Fluid-structure interaction of cylinders by combining the cosserat beams theory and immersed boundary methodology. *Argentina Mechanical Computation Conference*, v. 29, p. 15–18, 2010.
- CHORIN, A. J. The numerical solution of the navier-stokes equations for an incompressible fluid. *Bull. Amer. Math. Soc.*, American Mathematical Society, v. 73, n. 6, p. 928–931, 11 1967. Disponível em: <http://projecteuclid.org/euclid.bams/1183529112>.
- DAMASCENO, M. M. R.; SANTOS, J. G. de F.; VEDOVOTO, J. M. Simulation of turbulent reactive flows using a fdf methodology – advances in particle density control for normalized variables. *Computers & Fluids*, v. 170, p. 128–140, 2018. ISSN 0045-7930. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.05.004>.
- DAMASCENO, M. M. R.; VEDOVOTO, J. M.; SILVEIRA NETO, A. da. Turbulent inlet conditions modeling using large-eddy simulations. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, v. 104, n. 2, p. 105–132, 2015. ISSN 1526-1506. Disponível em: <https://doi.org/10.3970/cmcs.2015.104.105>.
- DENNER, F. *et al.* Comparative study of mass-conserving interface capturing frameworks for two-phase flows with surface tension. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 61, p. 37–47, 2014. ISSN 0301-9322. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.12.011>.
- DRESCHER, H. Messung der auf querongestromte zylinder ausgeubten seitlich veranderten drucke. *Zeitschrijt fur Flugwissensschajt*, v. 4, p. 17–21, 1956.
- DUNBAR, A. J.; CRAVEN, B. A.; PATERSON, E. G. Development and validation of a tightly coupled cfd/6-dof solver for simulating floating offshore wind turbine platforms. *Ocean Engineering*, v. 110, p. 98 – 105, 2015. ISSN 0029-8018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.066>.
- ERICSSON, L. Karman vortex shedding and the effect of body motion. *AIAA Journal*, v. 18, n. 8, p. 935–944, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/3.50837>.
- FARHAT, C.; VAN DER ZEE, K. G.; GEUZAINÉ, P. Provably second-order time-accurate loosely-coupled solution algorithms for transient nonlinear computational aeroelasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 195, n. 17, p. 1973 – 2001, 2006. ISSN 0045-7825. Fluid-Structure Interaction. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.11.031>.

- FENG, C. *The measurement of vortex induced effects in flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders*. Tese (Doutorado) — University of British Columbia, 1968.
- FERZIGER, J.; PERIC, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 9783540420743. Disponível em: [⟨https://books.google.com.br/books?id=1D3EQgAACAAJ⟩](https://books.google.com.br/books?id=1D3EQgAACAAJ).
- FINGAS, M. *The Basics of Oil Spill Cleanup, Third Edition*. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2012. ISBN 9781439862469.
- GARDNER, T. N.; COLE, M. W. Deepwater drilling in high current environment. In: ONEPETRO. *Offshore Technology Conference*. 1982. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.4043/4316-MS⟩](https://doi.org/10.4043/4316-MS).
- GASCHE, J. L.; BARBI, F.; VILLAR, M. M. An efficient immersed boundary method for solving the unsteady flow through actual geometries of reed valves. In: . [S.l.: s.n.], 2012.
- GONÇALVES, V.; MAGALHÃES, G.; VEDOVOTTO, J. Urans simulation of turbulent non-premixed and non-reacting propane jet flow. In: . [S.l.: s.n.], 2020.
- GRIFFIN, O. M. Otec cold water pipe design for problems caused by vortex-excited oscillations. *Ocean Engineering*, v. 8, n. 2, p. 129–209, 1981. ISSN 0029-8018. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/0029-8018\(81\)90023-8⟩](https://doi.org/10.1016/0029-8018(81)90023-8).
- HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing In Science & Engineering*, IEEE COMPUTER SOC, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55⟩](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55).
- Lankhorst Engineered Products. *Vortex induced vibrations suppression solutions for efficient pipeline protection*. Lankhorst, 2021. Disponível em: [⟨https://www.lankhorst-offshore.com/en/vortex-induced-vibrations⟩](https://www.lankhorst-offshore.com/en/vortex-induced-vibrations).
- LEE, L. *et al.* In-line motion of subsea pipeline span models experiencing vortex-shedding. *ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, v. 5, p. 269–276, 2009. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79084⟩](https://doi.org/10.1115/OMAE2009-79084).
- LEE, N. *et al.* Aeroelastic analysis of bridge deck flutter with modified implicit coupling method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 155, p. 11 – 22, 2016. ISSN 0167-6105. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.010⟩](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.04.010).
- LIENHARD, J. *Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders*. [S.l.]: Technical Extension Service, Washington State University, 1966. (Bulletin (Washington State University. College of Engineering. Research Division)).
- LIU, Y. *et al.* Establishing a fully coupled cfd analysis tool for floating offshore wind turbines. *Renewable Energy*, v. 112, p. 280 – 301, 2017. ISSN 0960-1481. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.052⟩](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.052).
- Mark Tool Rubber & Company. *Vortex Induced Vibration (VIV) Suppression Strakes: Mark Tool Rubber*. 2020. Disponível em: [⟨https://www.marktool.com/urethane/ureguard-viv-strakes/⟩](https://www.marktool.com/urethane/ureguard-viv-strakes/).

- MIAN, H. H.; WANG, G.; YE, Z.-Y. Numerical investigation of structural geometric nonlinearity effect in high-aspect-ratio wing using cfd/csd coupled approach. *Journal of Fluids and Structures*, v. 49, p. 186 – 201, 2014. ISSN 0889-9746. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.04.011⟩](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.04.011).
- MITTAL, R.; IACCARINO, G. Immersed boundary methods. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 37, n. 1, p. 239–261, 2005. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175743⟩](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175743).
- MULCAHY, T. *Design guide for single circular cylinder in turbulent crossflow*. [S.l.], 1982.
- NAKAMURA, Y.; NAKASHIMA, M. Vortex excitation of prisms with elongated rectangular, h and t cross-sections. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 163, p. 149–169, 1986. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1017/S0022112086002252⟩](https://doi.org/10.1017/S0022112086002252).
- NAM, J.-W. *Non-Body Conformal Grid Methods for Large-Eddy Simulations of Compressible Flows and their Applications in Computational Aeroacoustics*. Tese (PhD Thesis) — University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2015.
- NAUDASCHER, E.; ROCKWELL, D. *Flow-induced Vibrations: an Engineering Guide*. [S.l.]: Taylor and Francis;CRC Press, 2017. ISBN 90-5410-131-8,269-273-281-2,9781351447867,1351447866,9789054101314.
- PAIDOUSSIS, M. P. Flow-induced vibration of cylindrical structures: a review of the status of the art. 1982.
- PESKIN, C. S. Numerical analysis of blood flow in the heart. *Journal of Computational Physics*, v. 25, n. 3, p. 220 – 252, 1977. ISSN 0021-9991. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/0021-9991\(77\)90100-0⟩](https://doi.org/10.1016/0021-9991(77)90100-0).
- PINHEIRO, A. P. *Lagrangian modeling of droplet evaporation*. Uberlândia: [s.n.], 2018. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1180⟩](https://doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1180).
- RAFIEE, R.; TAHANI, M.; MORADI, M. Simulation of aeroelastic behavior in a composite wind turbine blade. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 151, p. 60 – 69, 2016. ISSN 0167-6105. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.01.010⟩](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.01.010).
- RAUPP, E. M. *Estudo Numérico Do Escoamento ao Redor de um Cilindro Oscilando*. 2007. 122 p.
- RIBEIRO NETO, H. *Modelagem matemática para a interação fluido estrutura acoplado escoamentos incompressíveis e viga de Timoshenko*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- RIBEIRO NETO, H. *Modelagem matemática e computacional de acoplamento fluido-estrutura em ambiente paralelo e com malha adaptativa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.
- RIBEIRO NETO, H. *et al.* Influence of seabed proximity on the vibration responses of a pipeline accounting for fluid-structure interaction. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 114, p. 224–238, 2019. ISSN 0888-3270. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.017⟩](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.017).

An Assessment of Vortex Suppression Devices for Production Risers and Towed Deep Ocean Pipe Strings, All Days de *OTC Offshore Technology Conference*, (OTC Offshore Technology Conference, All Days). OTC-4594-MS. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.4043/4594-MS⟩](https://doi.org/10.4043/4594-MS).

SARPKAYA, T. Vortex-induced oscillations: A selective review. *Journal of Applied Mechanics*, v. 46, n. 2, p. 241–258, 06 1979. ISSN 0021-8936. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1115/1.3424537⟩](https://doi.org/10.1115/1.3424537).

SARPKAYA, T. Vortex-induced oscillations: a selective review. 1979. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1115/1.3424537⟩](https://doi.org/10.1115/1.3424537).

SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. *Boundary-Layer Theory*. Ninth edition. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-662-52917-1.

SILVEIRA NETO, A. da. *Escoamentos Turbulentos - Análise Física e Modelagem Teórica*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2020. ISBN 6599036511.

SILVEIRA, Z. de C. *Análise Estatística e Otimização de Parâmetros de Projeto em Componentes de Sistemas Mecânicos*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2003.

SKOP, R. A.; GRIFFIN, O. M.; RAMBERG, S. E. Strumming predictions for the seacon ii experimental mooring. In: ONEPETRO. *Offshore Technology Conference*. 1977. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.4043/2884-MS⟩](https://doi.org/10.4043/2884-MS).

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, v. 91, n. 3, 1963. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091⟨0099:GCEWTP⟩2.3.CO;2⟩](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091⟨0099:GCEWTP⟩2.3.CO;2).

STUBER, K.; GHARIB, M. Experiment on the forced wake of an airfoil transition from order to chaos. *AIAA*, n. 88, 1988.

SUMER, B. M.; FREDSE, J. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures (Advanced Series on Ocean Engineering)*. Revised. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 9812700390,9789812700391,9789812772770.

TANIDA, Y.; OKAJIMA, A.; WATANABE, Y. Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 61, n. 4, p. 769–784, 1973. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1017/S0022112073000935⟩](https://doi.org/10.1017/S0022112073000935).

TEZDUYAR, T. E. Finite element methods for flow problems with moving boundaries and interfaces. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 8, n. 2, p. 83–130, jun. 2001. ISSN 1134-3060, 1886-1784. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/BF02897870⟩](https://doi.org/10.1007/BF02897870).

TIETJENS, O.; PRANDTL, L. *Hydro- und Aeromechanik : nach Vorlesungen von L. Prandtl. 2. Bewegung reibender Flüssigkeiten und technische Anwendungen*. Springer, 1931. Disponível em: [⟨https://books.google.com.br/books?id=Uwb7wwEACAAJ⟩](https://books.google.com.br/books?id=Uwb7wwEACAAJ).

TORUM, A.; ANAND, N. M. Free span vibrations of submarine pipelines in steady flows—effect of free-stream turbulence on mean drag coefficients. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 107, n. 4, p. 415–420, dez. 1985. ISSN 0195-0738, 1528-8994. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1115/1.3231212⟩](https://doi.org/10.1115/1.3231212).

- TRAN, T. T.; KIM, D.-H. The coupled dynamic response computation for a semi-submersible platform of floating offshore wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 147, p. 104 – 119, 2015. ISSN 0167-6105. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.09.016>.
- VANDIVER, J.; JONG, J.-Y. The relationship between in-line and cross-flow vortex-induced vibration of cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, v. 1, n. 4, p. 381–399, 1987. ISSN 0889-9746. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(87\)90279-9](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(87)90279-9).
- VEDOVOTO, J. M.; SERFATY, R.; SILVEIRA NETO, A. D. Mathematical and numerical modeling of turbulent flows. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 87, n. 2, p. 1195–1232, jun. 2015. ISSN 0001-3765. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140510>.
- VILLAR, M. M. *Análise Numérica Detalhada De Escoamentos Multifásicos Bidimensionais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14664>.
- WANG, D.; RUUTH, S. Variable step-size implicit-explicit linear multistep methods for time-dependent partial differential equations. *Journal of Computational Mathematics*, v. 26, p. 838–855, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2142/18708>.
- WANG, L.; LIU, X.; KOLIOS, A. State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 64, p. 195 – 210, 2016. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.007>.
- WANG, L.; QUANT, R.; KOLIOS, A. Fluid structure interaction modelling of horizontal-axis wind turbine blades based on cfd and fea. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 158, p. 11 – 25, 2016. ISSN 0167-6105. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.09.006>.
- WANG, Z.; FAN, J.; LUO, K. Combined multi-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 34, n. 3, p. 283 – 302, 2008. ISSN 0301-9322. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.10.004>.
- WILLIAMSON, C.; ROSHKO, A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, v. 2, n. 4, p. 355–381, 1988. ISSN 0889-9746. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8).
- WILLIAMSON, C. H. K.; GOVARDHAN, R. Vortex-induced vibrations. p. 53, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>.
- WILSON, J. F. *Dynamics of Offshore Structures*. 2nd ed. ed. [S.l.]: J. Wiley, 2003. ISBN 0471264679,9780471264675.
- WILSON, J. F.; TINSLEY, J. C. Vortex load reduction: Experiments in optimal helical strake geometry for rigid cylinders. *Journal of Energy Resources Technology*, v. 111, n. 2, p. 72–76, jun. 1989. ISSN 0195-0738, 1528-8994. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article/111/2/72/405509/Vortex-Load-Reduction-Experiments-in-Optimal>.

YING, X. *et al.* Numerical explorations of the limit cycle flutter characteristics of a bridge deck. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 169, p. 30 – 38, 2017. ISSN 0167-6105. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.020>.

ZDRAVKOVICH, M. Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 7, n. 2, p. 145–189, 1981. ISSN 0167-6105. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0167-6105(81)90036-2).

ZHOU, T. *et al.* On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes. *Journal of Fluids and Structures*, v. 27, n. 7, p. 903–917, 2011. ISSN 0889-9746. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.04.014>.

ÇENGEL, Y. A. *Heat and Mass Transfer A Practical Approach*. 3rd. ed. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 9780071257398,007125739X.