



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

NICOLAS HENRIQUE SANTANA DE CARVALHO

**ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO E SUAVIZAÇÃO DE MALHA PARA
PROBLEMAS FLUIDO-ESTRUTURAIS ACOPLADOS**

Caruaru

2021

NICOLAS HENRIQUE SANTANA DE CARVALHO

**ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO E SUAVIZAÇÃO DE MALHA PARA
PROBLEMAS FLUIDO-ESTRUTURAIS ACOPLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade Federal de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Romário Echevarria Antunes

Coorientadora: Profa. Dra. Mariana Fernandes dos Santos Villela

Caruaru

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

- C331e Carvalho, Nicolas Henrique Santana de.
Estratégias de movimentação e suavização de malha para problemas fluido-
estruturais acoplados. / Nicolas Henrique Santana de Carvalho. – 2021.
121 f.; il.: 30 cm.
- Orientador: Alessandro Romário Echevarria Antunes.
Coorientadora: Mariana Fernandes dos Santos Villela.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia
Civil e Ambiental, 2021.
Inclui Referências.
1. Engenharia de estruturas. 2. Modelagem da informação na construção. 3.
Métodos de simulação. 4. Métodos dos elementos finitos. 5. Algoritmos
computacionais. 6. Otimização estrutural. I. Antunes, Alessandro Romário Echevarria
(Orientador). II. Villela, Mariana Fernandes dos Santos. III. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2021-013)

NICOLAS HENRIQUE SANTANA DE CARVALHO

**ESTRATÉGIAS DE MOVIMENTAÇÃO E SUAVIZAÇÃO DE MALHA PARA
PROBLEMAS FLUIDO-ESTRUTURAIS ACOPLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil e
Ambiental, da Universidade Federal de
Pernambuco para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Aprovada em: 24 / 02 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alessandro Romário Echevarria Antunes (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Bono (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano (Examinador Externo)
Universidade Federal de Goiás

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que permitiu que eu chegasse até aqui e aos meus pais e irmão, por todo o apoio;

À UFPE, pela oportunidade e suporte, especialmente aos meus orientadores de mestrado, Alessandro Antunes e Mariana Villela, que são exemplos de pessoas e acadêmico e que sempre me incentivaram;

Ao PPGECAm e aos que fazem parte dele, professores e profissionais, notadamente Marcelo José e Euclécia Arruda, que foram sempre muito pacientes e solícitos;

À Renatha Michelly, por ter estado ao meu lado ao longo do mestrado, provendo o apoio para suportar os momentos difíceis;

a Samuel Santos e Raul Soares, por todas as noites de conversas e desabaços sobre a vida;

Àqueles que acreditam em meu potencial e não medem esforços em me auxiliar, de maneira especial a Edvaldo Freire, Luis Nunes, Jeane Lopes e Brunno Santana;

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo suporte financeiro para essa pesquisa com o programa IBPG-0102-3.01/18.

Levanta-te, começa, neste mesmo instante e dize: é tempo de agir, é tempo de pelejar, é tempo de corrigir-me. Quanto te sentes aflito e atribulado, então tempo é de merecer. (DE KEMPIS, 2019, p. 49)

RESUMO

Problemas fluido-estruturais acoplados são de grande interesse na engenharia civil. Um dos grandes desafios na análise de problemas fluido-estruturais acoplados é o fato da malha computacional que discretiza o domínio fluido, sofrer grandes deformações na região próxima a estrutura. Nesta porção da malha utiliza-se uma discretização *Arbitrarian Lagrangean-Eulerian* (ALE), onde a malha computacional é tratada como um campo físico. Dessa forma, faz-se necessário um tratamento adequado para que a malha computacional absorva estes movimentos, para que sejam evitadas excessivas deformações dos elementos da malha, o que pode impedir a análise do problema. Sendo assim, neste trabalho é analisado um conjunto de técnicas de movimentação e suavização de malha, onde cada elemento da malha é considerado uma estrutura deformável, sendo o módulo de elasticidade local definido em função do tamanho deste elemento, além disso, esta técnica conta com parâmetros controlados pelo usuário com o objetivo de ajustar o comportamento de deformação da malha. Adicionalmente, foi implementada uma técnica de troca de arestas que, associada à técnica de movimentação de malha, possibilita grandes deslocamentos e deformações estruturais. Foram analisados escoamentos de fluidos incompressíveis, a estrutura é considerada rígida, também foi realizado um estudo dos parâmetros citados. Por fim, foi realizado um estudo de caso sobre uma edificação localizada na cidade de Caruaru, Pernambuco, onde se aplicou a metodologia *Design of Experiments* (DOE) para analisar alternativas que diminuíssem o deslocamento da estrutura. Concluiu-se neste trabalho que a implementação das metodologias foi satisfatória. Permitindo maiores deformações na malha de elementos finitos antes que o procedimento de remalhamento fosse mandatório. Há, porém, a necessidade de que os algoritmos, referentes as metodologias, sejam otimizados para que se tornem mais eficientes, requerendo assim menor tempo de execução.

Palavras-chave: Interação fluido-estrutura. Movimentação de malha. Escoamento incompressível. Vibrações induzidas por vórtices.

ABSTRACT

Fluid-Structure coupled problems are of great interest in industry, such as aeronautics, naval, oil, etc. In this kind of phenomena, interaction between different physics occur, therefore they cannot be analyzed separately. The great challenges in analysis of problems involving FSI is the fact that the computational mesh that discretizes the fluid domain, undergoes major deformations caused by displacements and/or structural deformations. An Arbitrary Lagrangian-Eulerian discretization is used, considering the computational mesh as a physical field. Additionally, it is necessary to have an adequate treatment so that the computational mesh absorbs these movements, avoiding excessive deformations. In this work, a set of mesh movement and smoothing techniques is analyzed, where each element of the mesh can be considered as a deformable structure, with the local Young module defined in terms of the characteristic length of the element. Furthermore, an edge swap technique was implemented, which associated with a mesh movement technique allows great structural displacements. Here the fluid is incompressible, and structure is a rigid body. The study of parameters was performed, considering the stiffness of the elements, so that there can be large displacements of the structure without excessive mesh deformation and quality decrease of the elements. Finally, a case study of a building located in the city of Caruaru, Pernambuco, was carried out, where the Design of Experiments (DOE) methodology was applied to analyze alternatives that would reduce the displacement of the structure. It was concluded in this work that the implementation of the methodologies was satisfactory. Allowing for greater deformations in the finite element mesh before the grinding procedure was mandatory. However, there is a need for the algorithms related to the methodologies to be optimized so that they become more efficient, thus requiring less execution time.

Keywords: Fluid structure interaction. Mesh movement. Incompressible flow. Vortex induced vibrations.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	a) Modelagem do corpo contínuo; b) Discretização do modelo contínuo em Elementos Finitos.....	18
Figura 2 -	Deslocamentos e esforços em um corpo rígido.....	32
Figura 3 -	Dimensões padrões para geração de malha de Elementos Finitos neste trabalho.....	42
Figura 4 -	a) Problema IFE antes do início das iterações b) Problema IFE após início das iterações e a movimentação da malha.....	43
Figura 5 -	Mola em repouso (equilíbrio) e ao ser comprimida, gerando uma força em sentido contrário ao deslocamento.....	45
Figura 6 -	Estado Plano de Tensões.....	46
Figura 7 -	Malha de elementos finitos ilustrando o tamanho dos elementos, menores são os elementos à medida que se aproxima da estrutura (círculo).....	47
Figura 8 -	Estado Plano de Tensões.....	48
Fluxograma 1 -	Analogia elástica para movimentação de malha.....	51
Figura 9 -	Malha utilizada no estudo de determinação do valor β	52
Figura 10 -	Aproximação da região em que se encontra a estrutura.....	52
Gráfico 1 -	Interpolação Spline, gráfico contendo o deslocamento máximo alcançado pelo cilindro para cada valor de β	53
Figura 11 -	Troca de arestas (Edge Swap).....	54
Quadro 1 -	Medidas de Qualidade utilizadas como critério para realização da troca de arestas.....	55
Figura 12 -	Critério de Delaunay.....	56
Figura 13 -	Malha utilizada para análise de Rotação Pura (Em azul – Região Euleriana; Em vermelho Região ALE em que ocorre a troca de arestas; Em preto – Região ALE em que ocorre a rotação da malha em conjunto com a estrutura).....	57
Figura 14 -	Troca de arestas numa malha circular.....	58
Fluxograma 2 -	Troca de arestas (Edge Swap).....	58
Figura 15 -	Critério de razão de proporcionalidade.....	59

Figura 16 -	Formação de vórtices na parte posterior de um corpo imerso em um escoamento.....	62
Figura 17 -	Desprendimento de vórtices.....	62
Gráfico 2 -	Frequência do desprendimento de vórtices em função da velocidade do escoamento.....	63
Figura 18 -	Gráfico representando o valor da resposta y para cada par de valores (hr,C°).....	64
Figura 19 -	Planejamento Composto Central de três fatores, simbolizado por um cubo, utilizado para modelar um modelo de segunda ordem...	67
Figura 20 -	Planejamento Fatorial 2 ³	67
Quadro 2 -	Experimentos e os respectivos fatores e níveis.....	68
Quadro 3 -	Interação entre dois fatores.....	69
Figura 21 -	Representação geométrica dos efeitos principais e das interações no planejamento 2 ³	70
Figura 22 -	Elemento distorcido de referência, qualidade igual a 0,175.....	71
Figura 23 -	Malha na configuração inicial onde as cores representam a qualidade dos elementos. Não houve deslocamento do cilindro...	71
Figura 24 -	Malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia de Antunes et al. (2015).....	72
Figura 25 -	Detalhe da malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia de Antunes et al. (2015).....	72
Gráfico 3 -	Gráfico Deslocamento x Qualidade dos elementos, metodologia de Antunes et al. (2015).....	73
Figura 26 -	Malha em que é utilizada a metodologia empregada neste trabalho no momento que alcança o deslocamento da malha que é utilizada a metodologia de Antunes et al. (2015).....	74
Figura 27 -	Detalhe da malha em que é utilizada a metodologia empregada neste trabalho no momento que alcança o deslocamento da malha que é utilizada a metodologia de Antunes et al. (2015).....	74

Figura 28 -	Malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia empregada neste trabalho.....	75
Figura 29 -	Detalhe da malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia empregada neste trabalho.....	75
Gráfico 4 -	Gráfico Deslocamento x Qualidade dos elementos, metodologia empregada neste trabalho.....	76
Figura 30 -	Gráfico gerado a partir de um algoritmo escrito no MATLAB, representando um perfil NACA0012 com o seu eixo longitudinal paralelo ao eixo x.....	79
Figura 31 -	Gráfico de 100 pontos gerados a partir de um algoritmo representando um perfil NACA0012 com o seu eixo longitudinal rotacionado 150° no sentido horário com relação ao eixo x.....	80
Figura 32 -	Malha de elementos triangulares com o perfil NACA0012 posicionado com um ângulo de ataque de 150° com relação ao escoamento, com a região fixa (verde) e móveis, onde ocorrem a rotação dos elementos juntamente com a estrutura (vermelho) e a troca de arestas (azul).....	80
Figura 33 -	Detalhe da malha de elementos triangulares com o perfil NACA0012 posicionado com um ângulo de ataque de 150° com relação ao escoamento, com a região fixa (verde) e móveis, onde ocorrem a rotação dos elementos juntamente com a estrutura (vermelho) e a troca de arestas (azul).....	81
Figura 34 -	Campo de velocidade (magnitude) do escoamento ao redor do perfil NACA0012.....	81
Gráfico 5 -	Posição na direção Y do ponto da borda de fuga ao longo do tempo.....	82
Figura 35 -	Malha de elementos triangulares com o cilindro posicionado no centro da região ALE (preto), com a região fixa (verde).....	83
Figura 36 -	Detalhe da malha de elementos triangulares com o cilindro posicionado no centro da região ALE (preto), com a região fixa (verde).....	83

Figura 37 -	Campo de velocidade (magnitude) e linhas de fluxo do escoamento ao redor do cilindro.....	84
Figura 38 -	Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo do escoamento ao redor do cilindro, atentar para a formação de vórtices na região posterior ao cilindro.....	84
Gráfico 6 -	Gráficos Tempo x Velocidade (à esquerda) e detalhe de uma região do gráfico (à direita).....	85
Gráfico 7 -	Gráfico contendo a frequência de liberação dos vórtices (azul) e oscilação da estrutura na direção vertical (laranja), evidenciando a ocorrência do efeito de lock-in.....	85
Figura 39 -	Localização do Edifício River Place relativo a outros pontos próximos.....	86
Figura 40 -	Perspectiva frontal de um modelo tridimensional do edifício River Place.....	86
Fotografia 1 -	Fachada do Edifício River Place ao nível da rua.....	87
Fotografia 2 -	Vista lateral do edifício River Place ao nível da rua.....	87
Planta 1 -	Vista frontal e lateral da edificação com medidas.....	88
Planta 2 -	Planta baixa do Edifício River Place (Pavimento Tipo).....	89
Figura 41 -	Direção média dos ventos na cidade de Caruaru.....	90
Figura 42 -	Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado com a maior dimensão perpendicular ao escoamento, com as regiões fixas (verde) e móveis (amarelo)....	91
Figura 43 -	Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão perpendicular ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.....	91
Figura 44 -	Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo..	92
Gráfico 8 -	Posição do CG do edifício na direção y ao longo do tempo.....	92
Figura 45 -	Malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão paralela ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.....	93

Figura 46 -	Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão paralela ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.....	93
Figura 47 -	Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.....	94
Figura 48 -	Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.	94
Gráfico 9 -	Posição do CG do edifício na direção y ao longo do tempo.....	95
Figura 49 -	Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.....	95
Figura 50 -	Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.....	96
Figura 51 -	Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo para o edifício posicionado de acordo com a posição real.....	97
Gráfico 10 -	Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.....	97
Gráfico 11 -	Detalhe do gráfico: Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.....	97
Figura 52 -	Representação do problema analisado.....	98
Gráfico 12 -	Estimativas dos efeitos principais.....	100
Gráfico 13 -	Influência dos efeitos principais no deslocamento da estrutura.....	101
Gráfico 14 -	Estimativas dos efeitos das Interações.....	101
Gráfico 15 -	Influência dos Efeitos das Interações de segunda ordem no deslocamento da estrutura.....	102
Gráfico 16 -	Otimização dos fatores para obtenção do menor deslocamento da estrutura.....	102
Figura 53 -	Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento para a análise do problema de otimização e a segunda estrutura posicionada a jusante da primeira, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.....	103

Figura 54 -	Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.....	103
Figura 55 -	Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo...	104
Gráfico 17 -	Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.....	104
Figura 56 -	Experimento 1.....	116
Figura 57 -	Experimento 2.....	116
Figura 58 -	Experimento 3.....	116
Figura 59 -	Experimento 4.....	117
Figura 60 -	Experimento 5.....	117
Figura 61 -	Experimento 6.....	117
Figura 62 -	Experimento 7.....	118
Figura 63 -	Experimento 8.....	118
Figura 64 -	Experimento 9.....	118
Figura 65 -	Experimento 10.....	119
Figura 66 -	Experimento 11.....	119
Figura 67 -	Experimento 12.....	119
Figura 68 -	Experimento 13.....	120
Figura 69 -	Experimento 14.....	120
Figura 70 -	Experimento 15.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de qualidade para um triângulo equilátero.....	59
Tabela 2 - Qualidade do elemento 1.....	60
Tabela 3 - Qualidade do elemento 2.....	60
Tabela 4 - Comparativo entre metodologias apresentadas obtendo-se o deslocamento máximo por metodologia.....	76
Tabela 5 - Comparativo entre metodologias apresentadas para se obter o mesmo deslocamento.....	77
Tabela 6 - Fatores dos experimentos e respectivos níveis utilizados.....	99
Tabela 7 - Matriz de planejamento.....	99
Tabela 8 - Valores que os fatores devem assumir para minimizar o deslocamento.....	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	21
1.2	Organização Deste Trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA IFE	29
3.1	Mecânica dos Fluidos	29
3.2	Mecânica Estrutural	30
3.3	Interação Fluido-Estrutura (IFE)	33
3.3.1	Compatibilidade Cinemática	33
3.3.2	Compatibilidade Dinâmica	34
4	FORMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA IFE	36
4.1	Discretização do Problema Fluido	36
4.2	Discretização do Problema Estrutura	38
4.3	Acoplamento do Problema IFE	39
4.3.1	Algoritmo Segregado	40
5	METODOLOGIA	42
5.1	Movimentação de Malha	42
5.2	Analogia Elástica	44
5.2.1	Lei de Hooke para Meios Contínuos	44
5.2.2	Escolha do Valor de β	51
5.3	Método para Troca de Arestas (<i>Edge Swap</i>)	54
5.3.1	Escolha do Critério para Aplicação da Troca de Aresta	54
5.4	Aeroelasticidade	60
5.4.1	Instabilidade Aerodinâmica	61
5.4.2	Vibrações Induzidas por Vórtices	61
5.5	<i>Design of Experiments (DOE)</i>	63
5.5.1	Metodologia da Superfície de Resposta	64
5.5.2	Objetivos e Aplicações da MSR	66
5.5.3	Planejamento Fatorial	66
5.5.4	Ajuste de um Modelo de Segunda Ordem	66

5.5.5	O Planejamento 2 ³	67
5.6	Comparativo Entre Metodologias de Movimentação de Malha .	70
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
6.1	Perfil Aerodinâmico NACA0012	79
6.2	Seção Transversal de um Cilindro	82
6.3	Edifício River Place	85
6.3.1	Maior Dimensão Perpendicular ao Escoamento	90
6.3.2	Maior Dimensão Paralela ao Escoamento	92
6.3.3	Posição Real da Estrutura com Relação ao Escoamento	95
6.3.4	Problema de Otimização: Reduzir Deslocamento Máximo da Estrutura na Direção y	98
7	CONCLUSÕES	105
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	105
	REFERÊNCIAS	107
	ANEXO A - FIGURAS DA ESCOLHA DO CRITÉRIO DE QUALIDADE ADOTADO	113
	ANEXO B - MALHAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PARAMÉTRICO	116
	ANEXO C - PERMISSÃO PARA USO DE INFORMAÇÕES DO EDIFÍCIO RIVER PLACE	121

1 INTRODUÇÃO

Existe, em muitos ramos da engenharia e das ciências, um contínuo estudo a respeito dos fenômenos resultantes das interações entre fluidos e estruturas. Este acoplamento das leis da fluidodinâmica e mecânica estrutural é chamado de Interação Fluido-Estrutura (IFE). O completo conhecimento do fenômeno é de grande valia, na engenharia civil, por exemplo, nas etapas de concepção e dimensionamento visando estruturas mais eficientes e de menor custo.

Dentre os objetos de estudo que fazem parte das IFEs, estão desde as estruturas de concreto armado, comuns na engenharia civil, até pesquisas envolvendo problemas relacionados ao fluxo sanguíneo, como por exemplo, uma possível obstrução na artéria carótida que poderá acarretar em um aneurisma (OSHIMA et al., 2001); como também para a indústria aeronáutica através da análise do comportamento de aeronaves em velocidades usuais, bem como ao alcançar velocidade supersônica (LOSEILLE; LÖHNER, 2010) e para a indústria do petróleo com as estruturas de grandes navios, plataformas petrolíferas, e dutos submarinos, sujeitas à ações danosas do meio (MANGAL; IDICHANDY; GANAPATHY, 2001). Com o passar do tempo, tudo isso se tornou possível de ser estudado devido aos avanços nas tecnologias aplicadas nas análises dos fenômenos IFE bem como na matemática envolvida.

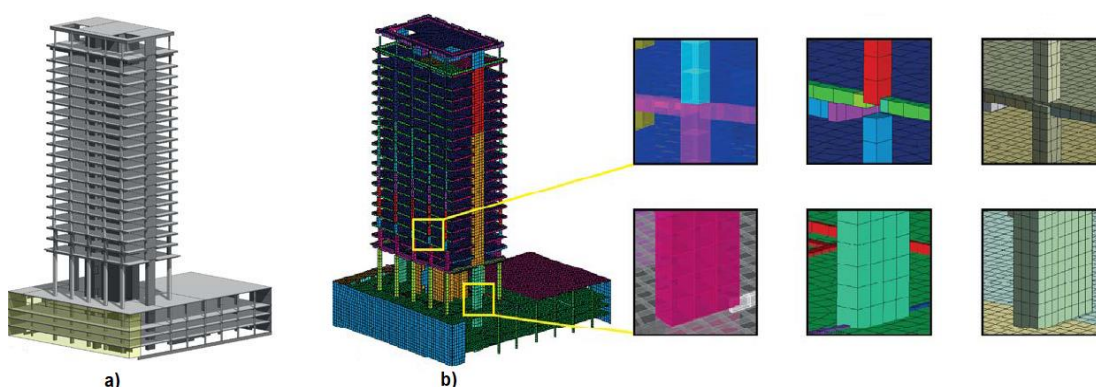
Tais estudos e análises, realizados ao longo de décadas, eram concretizados em grande parte por experimentos com modelos em escala reduzida, e somente uma pequena parcela por aplicações numéricas. Para poder se obter um resultado conclusivo acerca de um fenômeno físico, é necessário que sejam feitos repetidos experimentos, ajustando as variáveis diversas vezes. Deste modo torna-se inviável, tanto sob uma ótica econômica dos experimentos, quanto as capacidades dos equipamentos envolvidos, como por exemplo o túnel de vento, de possuir limites ao reproduzir as características do fluido e condições climáticas (viscosidade, velocidade, compressibilidade, etc.) desejadas. Enquanto em simulações numéricas o número de experimentos fica limitado à disponibilidade de tempo, e poder de processamento, além disso, as simulações podem ocorrer em passos de tempo diferentes, com possibilidade de reiniciar os testes de acordo com a necessidade do usuário pela análise, e por fim, possui custos consideravelmente menores (se comparado a utilização de modelos em escala para experimentação em laboratório), além de

superar muitas das dificuldades anteriormente descritas. Com o passar das décadas e com os avanços computacionais alcançados, a quantidade de modelagens numéricas em todas as áreas de conhecimento vem aumentando drasticamente. Vale ressaltar a importância da realização dos experimentos com a finalidade de validar os resultados obtidos numericamente.

Dentre os diversos métodos numéricos existentes para resolução de equações diferenciais parciais (EDP's), às quais descrevem um fenômeno físico, tem-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que foi originalmente desenvolvido para tratar problemas envolvendo análises estruturais, e posteriormente sua aplicação foi ampliada para diversos fenômenos físicos.

Para resolução das EDP's através de métodos numéricos, neste caso, com o MEF, um corpo físico que é tratado como contínuo, seja um fluido (líquido ou gás) ou uma estrutura (sólido), é modelado como um agrupamento de subdivisões chamadas de elementos finitos, um exemplo dessa modelagem pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - a) Modelagem do corpo contínuo; b) Discretização do modelo contínuo em Elementos Finitos.



Fonte: O Autor (2021).

Nota: Adaptado de Chacón, De La Llera e Hube (2017).

Essa subdivisão da geometria possibilita a resolução de um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples, viabilizando ao computador realizar com eficiência tais cálculos. Tais métodos propõem que o número infinito de incógnitas seja substituído por um número finito, nesse caso, de elementos. Estes podem ser triangulares, quadriláteros, entre outros, a depender do tipo e dimensão do problema, bem como da experiência do programador no momento da escolha. Por sua vez, os elementos são conectados por pontos, os quais são denominados de nós. O conjunto formado pelos elementos e nós recebe o nome de malha.

Devido a essa subdivisão finita, as equações diferenciais que modelam o fenômeno físico não são resolvidas de forma exata e sim aproximada (RAO, 2010). Quanto mais refinada a malha, ou seja, com um maior número de subdivisões, mais acurada será a solução, ou seja, a solução aproximada encontrada pelo método numérico representará de forma mais acurada a solução exata, porém com a desvantagem de necessitar de mais capacidade de memória e processamento para realizar os cálculos. Assim, fica evidente a relação direta entre a acurácia da solução aproximada e a disponibilidade de recursos computacionais. Além disso, a qualidade da malha é avaliada através do número de subdivisões aplicadas e o quanto os elementos estão distorcidos, ou seja, possuem seus ângulos internos dentro de um limite imposto, idealmente, distantes de serem nulos (0°) ou rasos (180°) (KNUPP, 2007).

Nos problemas de IFE, ocorre o deslocamento da estrutura devido às ações do escoamento do fluido no qual está imersa. Para que tais deslocamentos possam ser calculados pelo método, estes precisam ser absorvidos e distribuídos ao longo da malha, e se forem excessivos, então os elementos perderão qualidade. Portanto, a solução numérica perderá acurácia e, em alguns casos, chega-se a perder a representatividade do problema físico. Logo, se faz necessário lidar com tais deslocamentos e deformações nos elementos ao longo da malha.

De forma a contornar esses problemas, foram propostas ao longo de décadas, várias maneiras de tratar a malha, uma delas é através do remalhamento, acrescentando ou retirando nós e alterando a conectividade dos elementos, ou seja, mudar a topologia da malha (LÖHNER, 1989). Além disso, alternativas foram apresentadas, dentre elas a de implementar propriedades elásticas de modo a governar a movimentação dos nós sem alterar o número destes, considerando a malha de elementos finitos como um grande sistema de molas lineares onde cada aresta de elemento se comporta como uma mola (BATINA, 1990), ou em que cada nó existe uma mola torsora (DEGAND; FARHAT, 2002), sendo ainda possível, uma combinação de ambos estes métodos. Outra forma seria baseando-se na diferença entre os volumes dos elementos existentes, bem como na variação de volume e forma do elemento ao longo do tempo (STEIN; TEZDUYAR; BENNEY, 2003).

Com a contínua evolução tecnológica, e dos problemas a serem tratados, houve conseqüentemente o aprofundamento dos estudos para aumentar a eficácia e robustez dos métodos para tratamento de malhas. Li e Huang (2010), por exemplo,

implementaram um método de geração e adaptação de malhas anisotrópicas, para problemas em que ocorre o fenômeno de difusão anisotrópica em meios heterogêneos, no qual a condição anteriormente mencionada de ângulos não-obtusos agora é satisfeita, utilizando informações da matriz de difusão. Laug e Borouchaki (2017) propuseram um novo método para interpolação das métricas da malha, no qual após os cálculos para se obterem as soluções de um problema numa malha atual, e com a estimativa do erro (*a posteriori*) dessas soluções, é possível, a partir desse método de interpolação, recuperar o tensor métrico que indica qual o tamanho e direção os elementos devem ter, e assim, gerar uma nova malha.

Observa-se o contínuo surgimento de métodos para resolver os consequentes problemas de malhas com distorções acentuadas. Tendo em vista a contínua busca por métodos mais robustos, eficientes e que requeiram menos recursos computacionais e tempo de processamento, no presente trabalho, a atualização de malha será abordada de duas maneiras, na primeira, a malha se comporta como um conjunto de corpos deformáveis, onde as deformações sofridas pelos elementos são distribuídas de maneira mais eficiente, evitando distorções acentuadas bem como o colapso de elementos, ou seja, a ocorrência de elementos nulos. Na segunda abordagem, a topologia da malha é alterada através da análise da configuração dos elementos e haverá a troca da aresta compartilhada entre dois elementos triangulares sempre que a configuração atual estiver com uma qualidade inferior à que contenha a aresta trocada.

Para verificação dos métodos implementados, foram realizados alguns experimentos que são típicos nas análises de IFE 2D, como por exemplo, envolvendo um cilindro ou um perfil aerodinâmico imerso em um escoamento laminar.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver ferramentas computacionais, na linguagem MATLAB, que suavizem as distorções excessivas da malha de elementos finitos, a fim de se obter resultados mais acurados na resolução de problemas de Interação Fluido-Estrutura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Implementar métodos de movimentação e suavização de malhas utilizadas em Métodos de Elementos Finitos para simulação de Interação Fluido-Estrutura (IFE);
- Partindo da premissa de que cada elemento finito seja um sólido deformável com propriedades físicas definidas pelo usuário do algoritmo, a deformação deste elemento obedecerá às leis constitutivas da mecânica dos sólidos;
- Implementar o método da troca de arestas (Edge Swap) para trabalhar de maneira isolada ou em conjunto com o método de movimentação de malha descrito anteriormente;
- Analisar quantitativamente e qualitativamente a eficiência de tais métodos;
- Simular casos de IFE 2D com escoamentos incompressíveis de baixa velocidade e estruturas rígidas deslocáveis.

1.2 Organização Deste Trabalho

É feito uma revisão da teoria que abrange a Dinâmica dos Fluidos, Mecânica Estrutural e o acoplamento destes dois campos. Também é utilizado um algoritmo desenvolvido por Antunes, Lyra e Willmersdorf (2005) baseado em Elementos Finitos, que resolve problemas fluido-estruturais acoplados. Este programa de computador soluciona o sistema de equações de Navier-Stokes, incompressível, para o caso bidimensional, utilizando uma malha não-estruturada de elementos triangulares lineares. A seguir é apresentado, de forma sucinta, o conteúdo do presente trabalho:

- Exposição da Formulação Matemática, onde serão apresentadas as equações que representam os problemas da Dinâmica dos Fluidos, Mecânica das Estruturas e Acoplamento destes Fenômenos para o meio contínuo.
- Formulação Numérica, onde são mostradas as equações citadas anteriormente, porém na forma discretizada, permitindo a implementação numérica.
- Exposição dos métodos a serem aplicados, seguido de suas respectivas formulações matemáticas e numéricas.

- São apresentados resultados que permitem avaliar os métodos de maneira quantitativa e qualitativa.
- Problemas envolvendo um perfil NACA0012 e a seção transversal de um edifício são expostos e analisados utilizando-se a metodologia aqui empregada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A interação fluido-estrutura é uma classe de problemas com dependência mútua entre os campos da dinâmica dos fluidos e mecânica estrutural. O comportamento do escoamento do fluido, depende dos esforços que tal escoamento causa na estrutura. Os efeitos das IFE se tornam mais significativos e perceptíveis, a medida em que a dependência entre a influência do fluido e a resposta tornam-se mais intensas.

A vibração das asas em aeronaves, deflexões nas pás de turbinas eólicas, comportamento de um airbag ao ser ativado, o fluxo sanguíneo pelo coração, estruturas petrolíferas offshore, são todos exemplos de IFE. É possível observar as interações fluido-estruturais no dia a dia, desde nas engenharias, até mesmo na medicina.

Em aplicações na engenharia, a IFE, tem um importante papel na tomada de decisão, na etapa de concepção do projeto, onde serão escolhidas as formas que irão compor a estrutura, para em seguida analisar sua eficiência frente as atuações do fluido.

No presente capítulo será apresentado um breve histórico sobre os estudos realizados ao longo de décadas sobre o grande tema IFE, passando pelo seu uso na engenharia civil, até chegar ao que é objeto de estudo do presente trabalho e representa um dos principais desafios atualmente para resolução numérica de problemas IFE, a movimentação de malha.

Bessel (1828) apud Jo (2004) e Darrigol (2005) propôs pela primeira vez, o conceito de massa hidrodinâmica, que investigava o movimento de um pêndulo imerso em um fluido, no caso, ar. Foi o primeiro a levar em conta a inércia do ar que era movido pelo pêndulo, fazendo com que este tenha um período mais longo de oscilação do que se estivesse no vácuo. Isso significava que o fluido em que o pêndulo estava imerso aumentava a massa do sistema.

A partir disso, em 1843, Stokes realizou um estudo sobre a aceleração uniforme de um cilindro infinito movendo-se em um fluido e concluiu que a massa efetiva do cilindro, movendo-se no fluido, aumentava devido ao efeito causado pelo fluido circundante, no qual a quantidade de massa hidrodinâmica, ou seja, a massa acrescentada à massa do cilindro, era igual a massa do fluido deslocado. Essa descoberta produziu o conceito do que é conhecido hoje como IFE.

O conceito de massa hidrodinâmica vem sendo usado na engenharia há décadas, como por exemplo no dimensionamento de barragens (WESTERGAARD, 1933) e reservatórios de líquidos (HOUSNER, 1954) que fossem resistentes a terremotos.

Outros exemplos de estudos, que se mostram bastante recorrentes na engenharia civil até a atualidade, são os que envolvem edifícios altos e a influência do vento sobre estes. Harris (1933), realizou um estudo sobre a influência de estruturas vizinhas na pressão do vento em prédios altos, com o objetivo de determinar o efeito que estes exerciam sobre os que existiam nas proximidades. Foi constatado que enquanto a pressão do vento sobre algumas faces frontais da estrutura aumentou devido a presença de estruturas vizinhas, a pressão resultante nas faces perpendiculares à direção do vento, frontal e posterior, diminuiu.

Como apontado por Hughes (1980), muitos avanços foram feitos em análise computacional das estruturas, ao longo da década de 70, dentre os avanços, na modelagem de elementos finitos de IFE, ao desenvolver procedimentos integrados para a resolução dos problemas, tais procedimentos envolviam o uso da descrição Arbitrária Lagrangeana-Euleriana (ALE), assim necessitando um cuidado maior com as malhas de elementos empregados. Porém, diferentemente do início da década de 70, em que o MEF não foi considerado como sendo eficiente para análises de escoamento, a década de 80 decorreu de maneira muito produtiva, com o surgimento de novas abordagens com relação ao MEF, que provou que o método não somente era eficiente, mas idealmente preparado para escoamentos complexos (HUGHES; JANSEN, 1993). Dentre as questões envolvidas no desenvolvimento de ferramentas computacionais para uso da análise IFE, estão as descrições cinemáticas, as interfaces fluido-estrutura, algoritmos numéricos de resolução de equações de equações, paralelismo computacional e métodos discretizadores, que envolvem geradores de malha.

Como notado por Löhner (1990), para simulações precisas de fenômenos físicos, a qualidade da malha de elementos finitos empregada, em conjunto com a economia de recursos computacionais é preponderante. No decorrer das simulações a malha perdia a qualidade, ou seja, seus elementos distorciam demasiadamente, ocasionando a perda de acurácia no resultado. Löhner constatou uma redução do uso dos recursos computacionais ao usar uma malha que era parcialmente refinada, isso significa que a malha tinha uma região com uma maior densidade de elementos na

região de gradientes elevados, combinado com o uso de técnicas de remalhamento no decorrer da simulação, visando gerar novos elementos para repor os que estivessem muito distorcidos a ponto de diminuir a acurácia dos resultados. Porém, numa simulação em que havia grandes deslocamentos dos corpos, necessitava-se de dezenas ou até centenas de processos de remalhamento, aumentando a demanda computacional e o tempo necessário para o processamento.

Uma nova formulação de elementos finitos foi proposta por Tezduyar et al. (1992a, 1992b), com o objetivo de viabilizar as simulações de escoamentos compressíveis e incompressíveis, envolvendo fronteiras e interfaces móveis, como é o caso de problemas de IFE. No método, chamado de Domínio-Espacial-Deformante/Espaço-Tempo (DSD/ST), a formulação variacional de um problema é escrita sobre seu domínio considerando o espaço-tempo, dessa forma a deformação do domínio espacial com relação ao tempo é levada em consideração de maneira automática. A partir da relação intrínseca espaço-tempo, e da malha ser gerada sobre o domínio do problema, a cada passo de tempo, os nós da interface movem com a interface. Com essa metodologia foi possível superar os reveses do remalhamento que deveria ser feito a cada passo de tempo, se o procedimento mencionado não ocorresse. Além de reduzir os erros de projeção oriundos de tais operações de remalhamento.

Foi proposto por Tezduyar e Johnson (1994) um esquema de movimentação de malha no qual a movimentação dos nós é governada pelas equações de elasticidade linear, até que as distorções se tornem grandes demais, ao ponto de necessitar o uso do processo de remalhamento, esquema este que foi bastante utilizado em diversas simulações sobre IFE (STEIN; TEZDUYAR; BENNEY, 2003; ANTUNES; LYRA; WILLMERSDORF, 2005; DWIGHT, 2009; HICKEN; ZINGG, 2010).

Devido às desvantagens atreladas ao remalhamento, e apresentadas a seguir, esse processo deve ser evitado ao máximo, até o momento que seu uso se torne inevitável (TAKIZAWA; TEZDUYAR, 2016):

- Erros relacionados à projeção da solução, da malha antiga (deformada) para a nova, oriunda do processo de remalhamento;
- Custo computacional, consequentemente de tempo, ao iniciar a operação de geração de malha a cada iteração;
- Custo adicional ao se utilizar computação paralela, devido a necessidade de realizar conexões entre as partes fragmentadas do problema.

Na análise computacional de problemas de escoamento envolvendo fronteiras e interfaces móveis, dependendo da natureza do problema, podem ser usadas, técnicas de rastreamento de interface ou captura de interface (TEZDUYAR, 1999; TEZDUYAR; OSAWA, 1999). No caso do rastreamento de interface, é necessário que as malhas “rastreiem” as interfaces, ou seja, que as sigam, de maneira que a malha deve ser atualizada à medida que o escoamento se desenvolve. O método de captura de interface, consiste em cálculos que são baseados em domínios espaciais fixos, no qual uma função referente a interface, precisa ser calculada para “capturar” a interface. A interface é capturada de acordo com a resolução da malha de elementos finitos que cobre a área onde se encontra a interface.

Nos métodos de rastreio de malha, com o decorrer dos cálculos, a malha precisa ser atualizada para acomodar as mudanças no domínio espacial. É imperativo que isso ocorra da maneira mais eficiente possível. A atualização ótima da malha depende de diversos fatores, como a complexidade da interface e sua geometria, o quão instável a interface é, e como a malha foi inicialmente gerada. Em geral, a atualização de malha consiste em duas partes, deslocar a malha o máximo possível e realizar o remalhamento, completo ou parcial, quando as distorções dos elementos se tornarem excessivas (TEZDUYAR, 2001).

Como é possível observar, a malha de elementos finitos é um dos pontos cruciais na simulação numérica de IFE, desde a sua concepção e geração, até os métodos utilizados para movimentação e refinamento. Com relação a geração de malhas, existem métodos adaptativos desde a década de 80, em que ocorre um refinamento automático e adaptativo da malha, utilizado tanto na Dinâmica dos Fluidos Computacional quanto na Mecânica das Estruturas Computacional. O desenvolvimento de tais técnicas, como relatado por Löhner (1995), foi motivado pelo fato que, para solução numérica de um problema específico com a adaptação de malha, a acurácia básica do programa e a acurácia desejada, devem ser alcançadas com o menor número de graus de liberdade. Isso significa a menor quantidade de trabalho para uma dada acurácia. Além disso, com a adaptação de malha, o pesquisador não perderá mais tempo escolhendo a forma da malha mais adequada para o problema. Dessa maneira, a adaptação permite alcançar um novo patamar intuitivo para o pesquisador da mecânica computacional.

Qualquer esquema de refinamento adaptativo é composto de três partes principais:

1. Um critério de malha ótima, que indica como uma malha ótima deveria ser.
2. Indicador de erro, que aponta onde o refinamento da malha é necessário.
3. Algoritmo ou estratégia de controle de refinamento de malha.

Existem três grandes categorias de refinamento de malha, são elas:

- Movimentação de malha (métodos - r)
- Enriquecimento de malha (métodos – h/p)
- Remalhamento ou *remeshing* (métodos – m)

O objetivo da movimentação de malha reside em reposicionar os nós da malha de elementos finitos, visando obter a discretização ótima para um determinado problema. Sobre a movimentação de malha pode-se afirmar que:

Esquemas de movimentação de malha são relativamente simples de implementar [...]. Estes esquemas têm a desejada característica de alinhar elementos com características de menor dimensionalidade que o problema em questão. Este alongamento de elementos pode levar a economias se comparado a outros métodos. (LÖHNER, 1995, p. 824-825, tradução nossa).

O método de interfaces deslizantes, desenvolvido inicialmente para tratar de escoamentos em que havia movimentos relativos entre partes mecânicas como por exemplo a interação entre o rotor e torre eólica (BAZILEVS; HUGHES, 2008), foi aprimorado para o uso simulando toda a estrutura de uma torre eólica em funcionamento, juntamente com o fluido, desde a própria torre que sustenta todas as partes, até as pás da turbina (HSU; BAZILEVS, 2012; BAZILEVS et al., 2015).

Isola et al. (2010) implementou uma combinação de deformação de malha com um esquema adaptativo que permitiu-lhe estudar casos em que havia a necessidade da ocorrência de grandes deslocamentos nas fronteiras do problema. Considerando que o número de nós na malha permanecesse o mesmo, concluiu que a formulação ALE pode ser aplicada sem a necessidade de interpolações enquanto a malha se movia para a próxima configuração.

Para Huang e Russell (2010), a análise, compreensão e desenvolvimento de ferramentas para adaptação de malhas, necessitam fundamentar-se em dois critérios-chave, a equidistribuição e o alinhamento, o primeiro se refere a especificação do volume dos elementos e a segunda refere-se à garantia de que a malha está alinhada com o comportamento da solução física. Enquanto o conceito de equidistribuição é bastante disseminado e utilizado nos estudos de adaptação de malhas. O conhecimento de alinhamento em mais de uma dimensão é relativamente recente.

Os desafios computacionais que ainda buscam serem superados, envolvem a representação precisa do escoamento em pequena escala, ou seja, que ocorrem próximos às superfícies dos objetos imersos no fluido, como fronteiras e interfaces. Como dito anteriormente um método para escoamento com fronteiras ou interfaces móveis, pode ser visto como uma técnica de rastreamento de interface ou de captura de interface, ou até mesmo uma combinação de ambas. A formulação de elementos finitos, utilizando a descrição ALE, é o método mais utilizado para movimentação de malha (TAKIZAWA; TEZDUYAR, 2016). Porém, não há um método único que seja a melhor escolha para todos os tipos de problemas de IFE.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA IFE

Neste capítulo serão apresentadas, a teoria em que o problema se fundamenta e as formulações matemáticas utilizadas para a mecânica dos fluidos, mecânica estrutural e a interação fluido-estrutura.

No problema IFE, os conjuntos de equações diferenciais e condições de contorno associados aos domínios do Fluido e da Estrutura devem ser resolvidos de forma simultânea. Os domínios não se sobrepõem, compõe-se de dois sistemas que são acoplados através da interface fluido-estrutura, o que requer um conjunto de condições que sejam fisicamente válidas e satisfeitas nessa interface.

No domínio referente à estrutura, é utilizada uma descrição Lagrangeana, para o domínio fluido, uma descrição Euleriana. A partir disso, é obtido o problema acoplado dos domínios fluido-estrutura, no qual é aplicado uma descrição ALE.

3.1 Mecânica dos Fluidos

No presente trabalho, a hipótese considerada sobre o fluido é de que ele seja newtoniano e incompressível, ou seja, em que necessite de variações infinitas de pressão para que haja alteração na massa específica e que não haja variações de temperatura. A hipótese de incompressibilidade requer que o fluido tenha massa específica constante. Além disso, o escoamento do fluido trabalhado aqui possui baixa velocidade se comparado à velocidade local de propagação do som, o que também garante a incompressibilidade (JAYANTI, 2018).

A seguir é apresentado o sistema de equações de Navier-Stokes, que tentam representar os fenômenos associados ao fluido. As equações podem ser expressas utilizando-se a notação vetorial, desta forma, a equação de continuidade, que descreve a conservação de massa do meio para o caso do fluido incompressível é:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

onde $\mathbf{u}$ é a velocidade do fluido (m/s) e o operador ∇ representa o divergente (1/m)

A equação de conservação de momento pode ser escrita como:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) + \nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \mathbf{f}, \quad (2)$$

onde ρ é a massa específica (m^3/s) do fluido, p é a pressão (N/m^2), $\mathbf{f}$ são os esforços externos em (N/m^3), e:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é a tensão cisalhante e μ é a viscosidade dinâmica.

As Equações 1 e 2, compõem o sistema de equações de Navier-Stokes, que descrevem o movimento de um fluido Newtoniano livre de divergente com viscosidade constante.

3.2 Mecânica Estrutural

De acordo com Soriano (2014), as estruturas são sistemas físicos que estão sujeitos a ações externas, com capacidade de dissipar essas ações ou transmiti-las como esforços para outras estruturas. Boa parte dessas ações variam com o tempo, seja sua magnitude, direção e/ou sentido, em virtude disso são chamadas de ações dinâmicas.

Frequentemente essas ações ocorrem devido à ação humana, em razão da própria utilização da estrutura, ou como também é comum, originadas de ações da natureza. Essas ações, ou cargas, podem ser divididas entre periódicas e não-periódicas (ANDERSON; NAEIM, 2012). Ações periódicas sofrem a mesma variação no tempo para um considerável número de ciclos sucessivos. Os carregamentos que ocorrem mais frequentemente na natureza são complexos e não-harmônicos. Carregamentos não-periódicos variam entre, serem de duração muito curta (ondas de choque e explosões) e de longa duração (ondas marítimas e ventos). Cargas advindas de ventos são função da velocidade do vento, que por sua vez dependem da altura com relação ao solo, tipo de rugosidade do terreno, temperatura e umidade do ar, forma e rigidez da estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1988). Normalmente são representadas como pressões estáticas equivalentes atuando na superfície da estrutura. Essas características dão origem às forças aerodinâmicas que podem ser calculadas ou obtidas através de experimentos em túnel de vento, simulações numéricas, formulações empíricas e, dependendo das simplificações, equacionamento analítico.

É possível definir ações externas dinâmicas de três maneiras: experimental, analítica e numericamente em função do tempo, então essas ações são caracterizadas como determinísticas, ou caso contrário, são tratadas como probabilísticas. A partir dessas definições, também são estabelecidos os métodos de

análise dinâmica como determinística, onde é possível aferir o comportamento temporal da estrutura através das ações dinâmicas atuantes que são conhecidas, ou como probabilística, onde determinam-se os atributos probabilísticos do comportamento da estrutura a partir de informações probabilísticas das ações.

Como foi estabelecido, ações determinísticas são forças externas que podem ser simuladas na estrutura, através de forças dinâmicas equivalentes, de modo a se obter equações em termos de deslocamento da estrutura, em resposta às ações. A análise dinâmica das estruturas é definida pela formulação e resolução de tais equações por meio de métodos numéricos, bem como a interpretação dos resultados.

A análise dinâmica de estruturas sujeitas à esforços variáveis no tempo e deslocamentos, requer que idealizações conceituais e hipóteses simplificadoras sejam determinadas para que o sistema físico seja representado, sendo assim definido o modelo matemático (PAZ; KIM, 2018). Tais hipóteses simplificadoras dizem respeito à:

- Premissa sobre o material: Incluem propriedades do material como homogeneidade ou isotropia, massa (inércia) do corpo, se possui comportamento flexível ou rígido, amortecimento da estrutura, entre outros.
- Premissas sobre os carregamentos: Normalmente considera-se que os esforços externos estão concentrados em um ponto geométrico, como o centro de gravidade da estrutura. Se foram aplicados de forma súbita ou gradual e se são constantes ou periódicos.
- Premissas Geométricas: Como a estrutura será representada, por exemplo, comumente vigas e treliças são consideradas como elementos unidimensionais, placas como sistemas bidimensionais de pequena espessura.

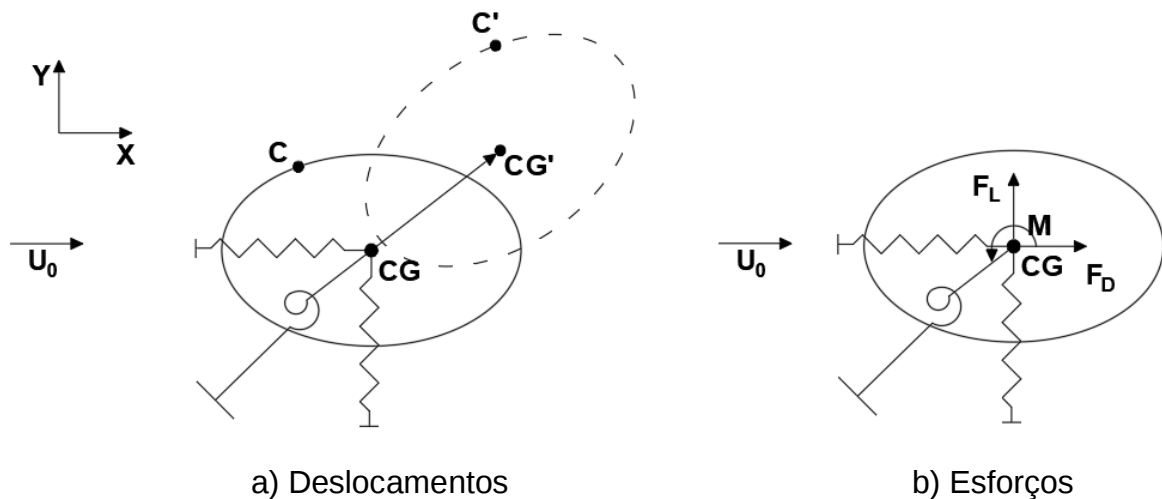
Através da combinação de diferentes princípios, como o de D'Alembert, dos deslocamentos virtuais e do trabalho virtual posto por Bernoulli, visando alcançar o equilíbrio dinâmico, é possível obter equações que descrevam o movimento da estrutura em função do tempo. Essa equação pode ser escrita como:

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d \Phi}{dt} + \mathbf{K} \Phi = \mathbf{F}, \quad \text{em } \Omega_E(t) \times I, \quad (4)$$

onde $\mathbf{M}$ é a matriz de massa, $\mathbf{C}$ é a matriz de amortecimento, $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez, todas as três matrizes são diagonais, $\mathbf{F}$ é o vetor dos carregamentos aplicados e Φ é o vetor dos deslocamentos do centro de gravidade da estrutura. Além disso, $\Omega_E(t)$ representa o domínio estrutural e I o intervalo de tempo considerado.

Na análise da interação fluido-estrutura, em que a estrutura se encontra imersa no fluido, normalmente considera-se somente os deslocamentos da estrutura, desprezando suas deformações, assim definindo o modelo estrutural como o de um sólido rígido. Sendo assim, a movimentação da estrutura é descrita, em duas dimensões, por duas componentes de translação e uma de rotação, definidas em seu centro de gravidade (CG), de coordenadas (x_{CG}, y_{CG}) , como pode ser visto na Figura 2:

Figura 2 - Deslocamentos e esforços em um corpo rígido.



Fonte: O Autor (2021).

Nota: Adaptado de Antunes, Lyra e Willmersdorf (2005).

onde U_0 é velocidade de referência do escoamento, F_L , F_D e M são respectivamente, as forças de sustentação ("Lift"), arrasto ("Drag") e momento, atuantes na estrutura. CG e CG' representam o centro de gravidade no estado anterior e posterior ao deslocamento δ devido aos esforços externos.

O vetor de deslocamentos é composto por:

$$\Phi^t = \{\Phi_x \ \Phi_y \ \theta\}, \quad (5)$$

onde Φ_x e Φ_y são as translações do corpo nas direções x e y, respectivamente e θ representa o ângulo referente a rotação do corpo.

Para simular o amortecimento no corpo, é considerado que este esteja suportado por molas elásticas, resistentes aos deslocamentos nas três direções citadas. O problema é então definido como de valor inicial, no qual deve-se encontrar os deslocamentos $\Phi = \Phi(t)$, satisfazendo a Equação (4) e com as seguintes condições iniciais:

$$\Phi(0) = \Phi^0 \quad (6)$$

$$\left. \frac{d\Phi}{dt} \right|_{t=0} = v^0 \quad (7)$$

Onde Φ^0 e v^0 são, respectivamente, o deslocamento e velocidade inicial.

3.3 Interação Fluido-Estrutura (IFE)

Após apresentar as equações que modelam os problemas fluido e estrutural, nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente, é necessário estabelecer condições que possibilitem e validem o acoplamento dos dois domínios em termos de deslocamentos e tensões.

Como dito anteriormente, os domínios fluido e estrutura não se sobrepõem, estes são acoplados através da interface que existe dividindo os domínios, o que requer que certas condições sejam satisfeitas nesta interface. As condições de acoplamento são as de compatibilidade cinemática e dinâmica (WALL; GERSTENBERGER; GAMNITZER, 2006).

3.3.1 Compatibilidade Cinemática

As condições de compatibilidade cinemática estão relacionadas aos campos velocidade e deslocamento na interface fluido-estrutura, lembrando que aqui é resolvido um problema de IFE para o caso de um corpo rígido. A Equação (4) serve para se obter as variáveis cinemáticas referentes somente ao centro de gravidade (CG) desse corpo rígido, ainda sendo necessário obter as variáveis sobre a superfície do corpo. Isso é possível através de uma matriz de transformação (TAKASHI; HUGHES, 1992). Seja “C” um ponto qualquer, de coordenadas (x,y) localizado na interface Γ_c do corpo rígido como visto na Figura 2, a relação entre o vetor $\mathbf{d}_c$ que descreve o deslocamento desse ponto e o vetor $\mathbf{h}_c$, referente ao deslocamento do CG é:

$$\begin{bmatrix} d_{c1} \\ d_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Diferenciando a Equação (8) em relação ao tempo, é obtida a seguinte relação na Equação (9):

$$\begin{bmatrix} u_{c1} \\ u_{c2} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \dot{d}_{c1} \\ \dot{d}_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} + \dot{\theta} \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & -\sin \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -L_{c2} \\ 0 & 1 & L_{c1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \dot{\mathbf{h}} \quad (9)$$

na qual a matriz $\mathbf{T}$ é a matriz de transformação, onde na Equação (10):

$$L_{c1} = x_1 \cos \theta - x_2 \sin \theta \quad \text{e} \quad L_{c2} = x_1 \sin \theta + x_2 \cos \theta \quad (10)$$

3.3.2 Compatibilidade Dinâmica

Na Equação (4), o vetor $\mathbf{F}$ representa as forças externas atuantes no corpo, mais precisamente, no seu centro de gravidade. Estas forças são causadas pelo fluido, que atua sobre o corpo exercendo tensões em sua superfície, ou seja, na interface fluido-estrutura. Este vetor pode ser assim escrito como:

$$\mathbf{F} = [F_D \quad F_L \quad M]^T \quad (11)$$

onde F_D e F_L são as forças de arrasto que atuam paralelamente a direção e sentido do fluxo (direção 1), como pode ser visto na Figura 2, e de sustentação, que atuam perpendicularmente a direção do fluxo (direção 2), respectivamente. O componente M , representa o momento tissor, perpendicular ao plano. Na Figura 2, é possível observar as componentes do vetor $\mathbf{F}$, atuantes no corpo rígido quando imerso em um escoamento. Essas forças são obtidas a partir do escoamento do fluido e podem ser escritas da seguinte maneira, na Equação (12):

$$\begin{cases} F_D = \int_{\Gamma_c} t_1 \, d\Gamma \\ F_L = \int_{\Gamma_c} t_2 \, d\Gamma \\ M = \int_{\Gamma_c} [t_2 (x - x_{CG}) - t_1 (y - y_{CG})] \, d\Gamma \end{cases} \quad (12)$$

onde as tensões de superfície (t_i) são dadas por $t_i = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}n_j$, $i, j = 1, 2$.

Nas integrais da Equação (12), as tensões calculadas sobre a superfície da estrutura são funções da pressão e do gradiente de velocidade, a partir das tensões

cisalhantes atuantes nesta mesma superfície. Desta forma, fica esclarecido o acoplamento dos campos fluido e estrutura, através dos carregamentos aplicados à estrutura pelo fluido, e a influência da velocidade e posição da estrutura sobre o fluido.

Normalmente essas forças são apresentadas na forma adimensional utilizando-se os coeficientes de arrasto (C_D), de sustentação (C_L) e de momento (C_M), como pode ser visto na Equação (13).

$$\begin{cases} C_D = \frac{F_D(t)}{0.5\rho U_0^2 D} \\ C_L = \frac{F_L(t)}{0.5\rho U_0^2 D} \\ C_M = \frac{M(t)}{0.5\rho U_0^2 D^2} \end{cases} \quad (13)$$

onde U_0 é a velocidade de referência do escoamento, tomada em uma região distante do corpo rígido, ou seja, onde ocorre o escoamento livre, e D é uma dimensão característica do corpo.

4 FORMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA IFE

Neste capítulo é apresentada a formulação numérica para o problema IFE de maneira separada, começando pela discretização do problema fluido, seguido do problema estrutural, finalizando com o acoplamento dessas duas discretizações.

Foi utilizado o método dos elementos finitos para realizar a discretização, dividindo o domínio contínuo em elementos para que as equações governantes do problema analisado fossem integradas espacialmente nesses elementos. A solução é obtida a partir da acumulação, em uma matriz, das contribuições nodais de cada elemento. Por fim, a matriz, que representa um sistema algébrico de equações, é resolvida utilizando-se algum método de solução de sistemas lineares ou não lineares.

Devido ao problema IFE ser multidisciplinar, ou seja, envolver diferentes físicas, cada problema foi abordado separadamente, para no final, tratar das relações e acoplamento entre as físicas.

4.1 Discretização do Problema Fluido

As formulações numéricas são baseadas no método de Galerkin, que são aproximações do tipo centradas, por essa razão obtém-se aproximações instáveis para as variáveis de pressão e velocidade (BAZILEVS; TAKIZAWA; TEZDUYAR, 2013). O que ocorre de fato é que em escoamentos com o fenômeno de convecção dominante, as aproximações não podem exceder a primeira ordem em regiões do fluido onde haja elevados gradientes de pressão, pois isto levará a geração de oscilações espúrias. A fim de se evitar tais oscilações, as equações discretizadas de Navier-Stokes devem ser acrescidas de termos de estabilização, satisfazendo as condições Ladyzhenskaya–Babuška–Brezzi (LBB) (GÚZMAN; SALGADO; SAYAS, 2013), possibilitando além disso, solucionar problemas com elevado número de Reynolds, ou seja, de escoamentos turbulentos.

Desta forma, foi utilizado o método do passo fracionado para discretização no tempo das equações de Navier-Stokes. Este método que consiste na decomposição do passo de tempo em dois ou mais passos, a fim de se obter a solução para um passo de tempo. Tal decomposição possibilita superar os problemas numéricos associados ao ponto de sela, que surge da formulação variacional de Navier-Stokes.

O método de passo fracionado, implementado por Antunes et al. (2015) e aqui utilizado, baseia-se no fracionamento algébrico do sistema de equações de Navier-

Stokes, dividindo o sistema completo em menores, para isso foi realizado uma fatoração ou decomposição LU, na qual uma matriz quadrada invertível é decomposta em um produto de uma matriz triangular inferior (*Lower*) por uma matriz triangular superior (*Upper*) (ROBBIANO, 2011). Finalmente, as equações de Navier-Stokes discretizadas e com os termos de estabilização podem ser escritas da seguinte maneira:

Dado $\mathbf{u}_h^n$, encontrar $(\mathbf{u}_h^{n+1}, p_h^{n+1}, \pi_h^{n+1}, \xi_h^{n+1})$ em $\mathbf{V}_h \times Q_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h$ tal que:

$$\frac{1}{\delta t}(\mathbf{u}_h^{n+1,i} - \mathbf{u}_h^n, \mathbf{v}_h) + (\mathbf{u}_h^{n+1,i-1} \cdot \mathbf{u}_h^{n+\omega,i}, \mathbf{v}_h) + (\mathcal{G} \nabla \mathbf{u}_h^{n+\omega,i}, \nabla \mathbf{v}_h) + (\nabla p_h^{n+1,i-1}, \mathbf{v}_h) + (\tau(\mathbf{u}_h^{n+\omega,i-1} \cdot \nabla \mathbf{u}_h^{n+\omega,i} - \kappa^{n+1,i-1} \pi_h^{n+\omega,i-1}), \mathbf{u}_h^{n+\omega,i-1} \cdot \nabla \mathbf{v}_h) = (\mathbf{f}^{n+\omega}, \mathbf{v}_h) + (\boldsymbol{\sigma}^{n+\omega,i-1} \cdot \mathbf{n}, \mathbf{v}_h)_{\Gamma_{nu}}, \quad (14)$$

$$\delta t(\nabla p_h^{n+1,i} - \nabla p_h^{n+1,i-1}, \nabla q_h) + [\tau(\nabla p_h^{n+1,i} - \kappa^{n+1,i-1} \xi_h^{n+1,i-1}), \nabla q_h] = -(\nabla \cdot \mathbf{u}_h^{n+1,i}, q_h), \quad (15)$$

$$(\pi_h^{n+\omega,i}, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\mathbf{u}_h^{n+\omega,i} \cdot \nabla \mathbf{u}_h^{n+\omega,i}, \tilde{\mathbf{v}}), \quad (16)$$

$$(\xi_h^{n+1,i}, \tilde{\mathbf{v}}_h) = (\nabla p_h^{n+1,i}, \tilde{\mathbf{v}}_h), \quad (17)$$

$$\forall (\mathbf{v}_h, q_h, \tilde{\mathbf{v}}_h, \tilde{\mathbf{v}}_h) \in \mathbf{V}_h \times Q_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h, \quad (18)$$

onde $\mathbf{u}_h^{n+1}, p_h^{n+1}, \pi_h^{n+1}, \xi_h^{n+1}$ são os vetores velocidade, pressão, projeção do termo convectivo e a projeção do gradiente de pressão no espaço dos elementos finitos, respectivamente. E $\mathbf{V}_h \times Q_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h \times \tilde{\mathbf{V}}_h$ são os espaços vetoriais correspondentes às variáveis citadas. Os índices sobrescritos n e i são o passo de tempo e o contador da iteração atual em cada passo de tempo. O índice subscrito h refere-se às variáveis discretas, δt refere-se ao tamanho do passo de tempo, κ é o parâmetro de estabilização na presença de gradientes acentuados, controlado pelo gradiente de pressão, cuja variação restringe-se ao intervalo $I = [0 \ 1]$, onde os valores próximos de 1 são regiões onde o campo de pressão é dito suave, e próximo de 0 são regiões com elevados gradientes de pressão, τ é o parâmetro que controla a estabilidade e convergência do sistema, ω é o controlador do método de integração no tempo ($\omega=1.0$ “*Backward Euler*” e $\omega=0.5$ “*Crank-Nicholson*”), $\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor das tensões viscosas, $\mathbf{f}$ é o vetor das forças externas aplicadas, Γ_{nu} é a porção do contorno com condições de contorno de Neumann, $\mathcal{G}$ é a viscosidade cinemática do fluido, $\boldsymbol{\pi}$ e ξ são variáveis auxiliares, portanto não necessitam de condições de contorno ou iniciais,

$\mathbf{v}_h$ são as funções de ponderação para a velocidade, $\tilde{\mathbf{v}}_h$ são as funções de ponderação para as projeções da convecção e do gradiente de pressão, por fim, q_h são as funções de ponderação para a pressão, respectivamente nos espaços de elementos finitos.

4.2 Discretização do Problema Estrutura

Métodos numéricos utilizados para integrar equações de movimento, são avaliados em termos de acurácia e estabilidade. Em geral, essa acurácia e estabilidade dependem da relação entre o passo de tempo utilizado, Δt , o período natural para a estrutura e o coeficiente CFL para o fluido, no qual o evento ocorre (HUGHES, 2000). Métodos numéricos implícitos tendem a ser incondicionalmente estáveis (SUBBARAJ; DOKAINISH, 1989). O método de Newmark é empregado neste trabalho objetivando a integração numérica da Equação (4), este método pode ser esquematizado a partir das Equações (19) a (21):

$$\mathbf{M}\mathbf{a}^{t+\Delta t} + \mathbf{C}\mathbf{v}^{t+\Delta t} + \mathbf{K}\mathbf{d}^{t+\Delta t} = \mathbf{F}^{t+\Delta t}, \quad (19)$$

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t} = \mathbf{v}^t + \Delta t \left[(1-\gamma)\mathbf{a}^t + \gamma\mathbf{a}^{t+\Delta t} \right], \quad (20)$$

$$\mathbf{d}^{t+\Delta t} = \mathbf{d}^t + \mathbf{v}^t \Delta t + \Delta t^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \mathbf{a}^t + \beta \mathbf{a}^{t+\Delta t} \right], \quad (21)$$

onde, $\mathbf{a}^t$, $\mathbf{v}^t$, $\mathbf{d}^t$ são aproximações dos vetores aceleração, $\frac{d^2\Phi}{dt^2}$, velocidade, $\frac{d\Phi}{dt}$, e deslocamento, $\Phi(t)$, respectivamente, β e γ são os parâmetros que determinam a estabilidade e acurácia do algoritmo utilizado.

Existem diversas formas de implementação do método, a seguir será apresentado como foi feita a implementação no presente trabalho. Dessa forma, valendo-se das condições iniciais estabelecidas para o problema nas Equações (6) e (7), tem-se:

$$\Phi(0) = \mathbf{d}(0) = \mathbf{d}_0, \quad (22)$$

$$\left. \frac{d\Phi}{dt} \right|_{t=0} = \mathbf{v}(0) = \mathbf{v}^0, \quad (23)$$

É possível agora, obter a aceleração $\mathbf{a}_0$ a partir da Equação (19), realizando as devidas operações:

$$\mathbf{M}\mathbf{a}_0 = \mathbf{F} - \mathbf{C}\mathbf{v}_0 - \mathbf{K}\mathbf{d}_0, \quad (24)$$

Em seguida, define-se os preditores:

$$\tilde{\mathbf{v}}^{t+\Delta t} = \mathbf{v}^t + (1-\gamma)\Delta t\mathbf{a}^t, \quad (25)$$

$$\tilde{\mathbf{d}}^{t+\Delta t} = \mathbf{d}^t + \mathbf{v}^t\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \lambda\right)\Delta t^2\mathbf{a}^t, \quad (26)$$

A Equação (27), respectiva relação recursiva, determina $\mathbf{a}^{t+\Delta t}$:

$$(\mathbf{M} + \gamma\Delta t\mathbf{C} + \lambda\Delta t^2\mathbf{K})\mathbf{a}^{t+\Delta t} = \mathbf{F}^{t+\Delta t} - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{v}}^{t+\Delta t} - \mathbf{K}\tilde{\mathbf{d}}^{t+\Delta t}, \quad (27)$$

E por fim, $\mathbf{a}^{t+\Delta t}$ sendo conhecida, as Equações (20) e (21) podem ser reescritas:

$$\mathbf{d}^{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{d}}^{t+\Delta t} + \lambda\Delta t^2\mathbf{a}^{t+\Delta t}, \quad (28)$$

$$\mathbf{v}^{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{v}}^{t+\Delta t} + \gamma\Delta t\mathbf{a}^{t+\Delta t}, \quad (29)$$

E assim obtém-se o cálculo das soluções $\mathbf{d}^{t+\Delta t}$ e $\mathbf{v}^{t+\Delta t}$, respectivamente.

Se os valores para os parâmetros escolhidos são $\lambda = 1/6$ e $\gamma = 1/2$ o método de Newmark é idêntico ao da aceleração linear, que é implícito e condicionalmente estável. Se $\beta = 1/4$ e $\gamma = 1/2$, então o método de Newmark é implícito e incondicionalmente estável, com precisão de segunda ordem. Neste caso a aceleração dentro do intervalo de tempo $t \in [t, t + \Delta t)$ é presumida como constante. A importância da necessidade de um método de integração que seja incondicionalmente estável, é devido ao fato de que o incremento de tempo no problema estrutural, é o mesmo do dinâmica dos fluidos.

4.3 Acoplamento do Problema IFE

O desenvolvimento de métodos numéricos para resolução de problemas físicos multidisciplinares, como por exemplo, a interação fluido-estrutura, envolve vários desafios. Um dos principais, refere-se à escolha da melhor forma para se acoplar os problemas físicos, numa única metodologia numérica.

Existem dois grupos de técnicas utilizadas para o acoplamento de IFE, algoritmos segregados e monolíticos (FERNÁNDEZ, 2011; HEIL; HAZEL, 2006).

No caso dos métodos segregados, ou fracamente acoplados, as equações de dinâmica dos fluidos, mecânica estrutural e de movimentação de malha são resolvidas de maneira sequencial. Para um dado passo de tempo, um algoritmo segregado obtém primeiramente as soluções para o problema fluido, entre elas tensões que o

fluido exerce na estrutura, a partir das condições de contorno de velocidade, obtidas através de uma extrapolação da quantidade de deslocamento sofrida pela interface com a estrutura. Após isso, são resolvidas as equações do problema estrutural, através das tensões atuantes na interface, que foram obtidas através das equações do problema fluido atualizadas. E por fim, com os deslocamentos estruturais na interface agora atualizados, são solucionadas as equações de movimentação de malha.

Essa forma de resolução do problema IFE, permite que sejam utilizados algoritmos já existentes, dos problemas separados, o que se torna um dos principais atrativos desta classe de métodos. Além disso, essa metodologia se mostra bastante eficiente para uma quantidade considerável de problemas (LÖHNER et al., 2006). No entanto, podem ocorrer dificuldades na obtenção dos resultados, com relação a convergência do método.

Os métodos monolíticos, ou fortemente acoplados, resolvem todos os problemas (fluido, estrutura e de movimentação de malha) de maneira simultânea. A principal vantagem é que algoritmos monolíticos são mais robustos, com relação a alguns problemas que podem ser encontrados nos métodos segregados (HEIL; HAZEL, 2006). No entanto, métodos fortemente acoplados requerem que sejam implementados algoritmos completamente integrados, ou, como foi dito anteriormente, que todas as equações sejam resolvidas simultaneamente, o que pode vir a se tornar uma dificuldade.

No presente trabalho, devido a pré-existência de algoritmos disponíveis, para resolver os problemas de maneira individual, será escolhido o método segregado de acoplamento para o tratamento e resolução das equações.

4.3.1 Algoritmo Segregado

O acoplamento segregado, aplicado neste trabalho, consiste em integrar separadamente, os campos fluido e estrutural, ou seja, utilizar diferentes técnicas de integração para cada campo. Assim, como mencionado anteriormente, a interação entre os campos ocorre na interface entre eles, através das condições de contornos de ambos. O fluido exerce o papel de um esforço externo na estrutura, e esta por sua vez, responde forçando o fluido a mover-se com a velocidade e deslocamento estrutural da interface.

Desta maneira, ao integrar o campo fluido, deve-se manter a estrutura fixa, e vice-versa, gerando assim uma defasagem de tempo entre as integrações, sendo esta uma das desvantagens do algoritmo segregado frente ao monolítico. Porém, aqui foram aplicados passos corretores, simulando então um algoritmo monolítico, para que ao final de cada iteração os campos fluido e estrutural encontrem-se no mesmo instante de tempo.

Utiliza-se este algoritmo buscando evitar o acúmulo de erros nas integrações, pois como foi dito, os campos são atualizados considerando-se uma defasagem no tempo.

Para que o algoritmo funcione, a parte mais importante está na predição da velocidade estrutural. A velocidade do centro de gravidade da estrutura referente ao intervalo de tempo analisado deve corresponder à distância percorrida no mesmo intervalo de tempo. Como a velocidade da estrutura é considerada como linear, a distância percorrida é calculada através de uma integração trapezoidal da velocidade. A velocidade na interface fluido-estrutura, que é usada como condição de contorno no cálculo do problema fluido, é obtida de acordo com a Equação (30) da seguinte maneira:

$$U^* = \frac{1}{2}(\dot{w}_I^{n+1} + \dot{w}_I^n), \quad (30)$$

onde $\dot{w}_I^n$ é a velocidade na interface fluido-estrutura no n-ésimo intervalo de tempo.

A velocidade $\dot{w}_I^{n+1}$, por sua vez, é calculada através de extrapolação linear, da Equação (31):

$$\dot{w}_I^{n+1} = \dot{w}_I^n + \Delta t \ddot{w}_I^n, \quad (31)$$

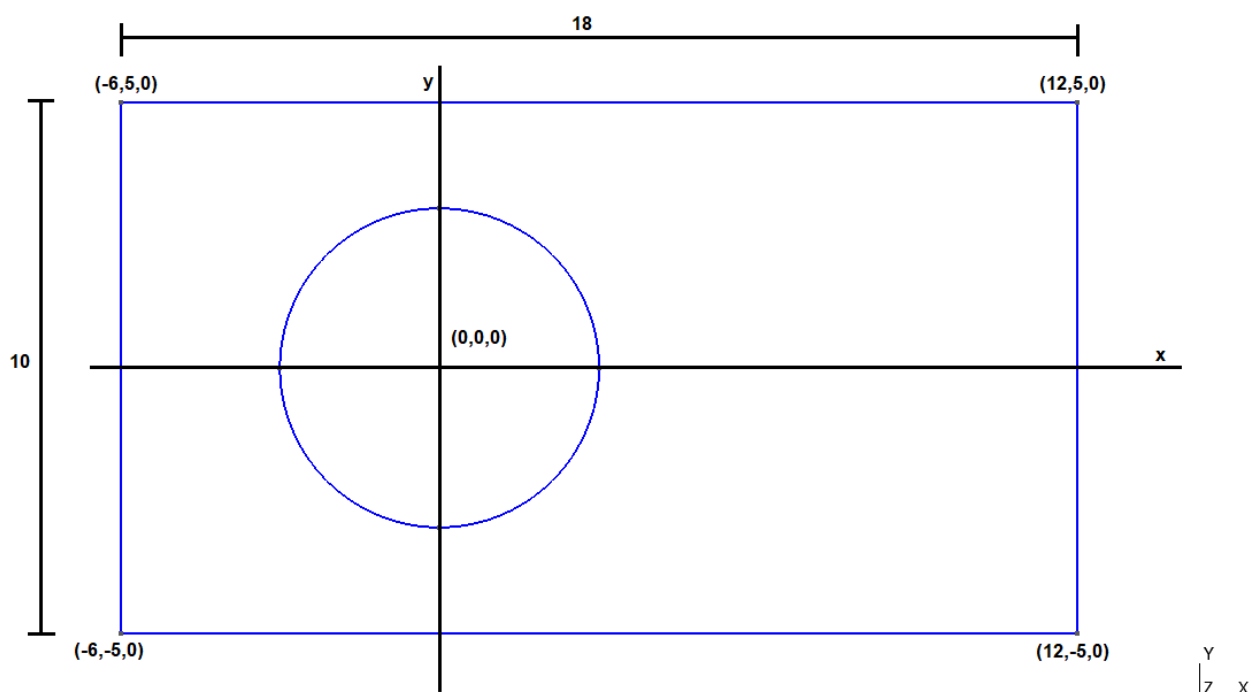
A utilização deste algoritmo garante o cumprimento da Lei de Conservação Geométrica Discreta (*DGCL – Discrete Geometric Conservation Law*), na qual assegura-se que a movimentação da malha utilizada não afetará a física do problema a ser resolvido (FARHAT; GEUZAIN; GRANDMONT, 2001).

5 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho. Primeiramente é feita uma introdução ao tema. Em seguida, o método de Analogia Elástica é explicado, iniciando com uma revisão sobre a lei de *Hooke*, que é necessária para a compreensão do método. Seguido pela apresentação do método de Troca de Arestas (*Edge Swap*). Depois, são comentados os temas de Aeroelasticidade e *Design of Experiments*, importantes para a compreensão dos experimentos realizados no capítulo 6. E por fim, um comparativo entre as seguintes metodologias, a implementada e utilizada neste trabalho e a implementada por Antunes et al. (2015).

A maioria das malhas de elementos finitos utilizadas aqui neste trabalho foram geradas através do software gmsht, com as dimensões apresentadas na Figura 3, com unidades em *Characteristic Length* (CL), ou Comprimento Característico.

Figura 3 - Dimensões padrões para geração de malha de Elementos Finitos neste trabalho.



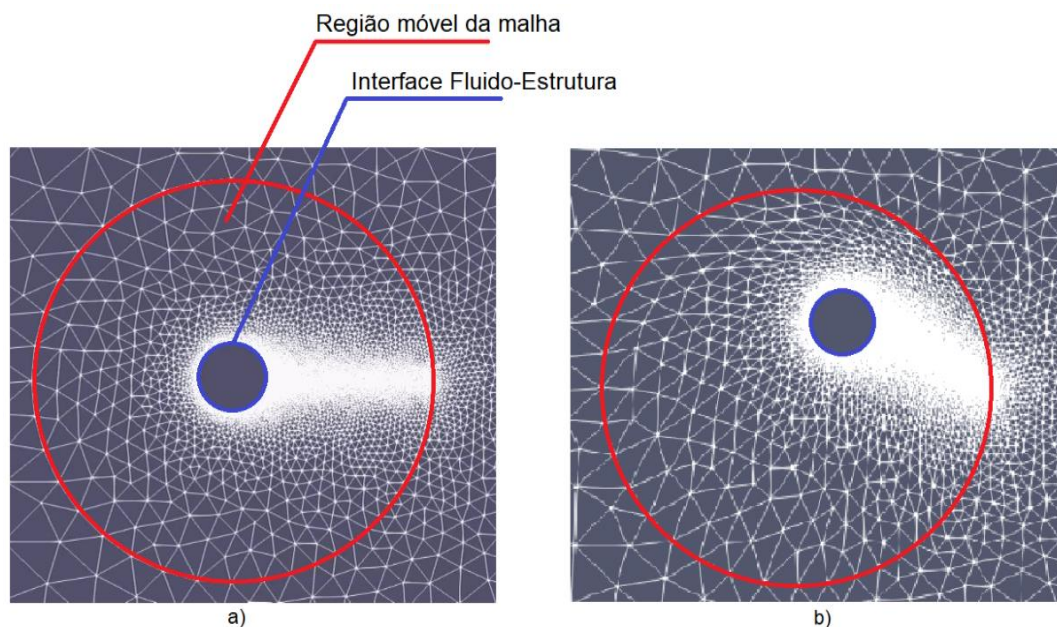
Fonte: O Autor (2021).

5.1 Movimentação de Malha

Os métodos para análise de problemas envolvendo o escoamento de fluidos e fronteiras móveis, podem ser vistos como técnicas de rastreamento de interfaces. Ao ocorrer o movimento da interface fluido-estrutura, o espaço no domínio ocupado pelo

fluido tem sua forma alterada, consequentemente, a malha também deve ser alterada tanto para acomodar essa mudança na forma da malha quanto para acompanhar o próprio movimento da interface, como pode ser observado através da Figura 4.

Figura 4 - a) Problema IFE antes do início das iterações b) Problema IFE após início das iterações e a movimentação da malha.



Fonte: O Autor (2021).

A ocorrência de grandes deslocamentos em análises numéricas é frequente, criando a necessidade de garantir a compatibilidade entre as malhas do fluido e estrutura, bem como na interface. Para isso o remalhamento, a movimentação da malha ou ambos, podem ser executados na malha referente ao fluido para alocar estes deslocamentos. No entanto, para o remalhamento, em simulações numéricas que envolvem muitos elementos, esse procedimento se torna computacionalmente caro em termos de recursos e tempo.

Busca-se mover a malha do fluido da maneira mais eficiente possível, evitando o remalhamento, para acompanhar os deslocamentos da interface fluido-estrutura, preservando assim a compatibilidade entre as malhas, além de possibilitar um controle preciso da qualidade da malha próximo à interface, região onde ocorrem as maiores variações de velocidade e pressão, para se obter soluções acuradas.

Neste capítulo será apresentada a metodologia, referente às hipóteses que serão aplicadas à malha e como estas servem para realizar a movimentação da malha. A primeira delas se baseia na suposição de que os elementos que compõem a malha são feitos de material deformável, mais precisamente de um material elástico,

linear, isotrópico e homogêneo, portanto, as suas deformações obedecem às relações constitutivas (CAVAGNA; QUARANTA; MANTEGAZZA, 2007). No segundo método, a topologia da malha será alterada se tal alteração resultar em uma configuração de elementos com melhor qualidade.

5.2 Analogia Elástica

Quando uma força é aplicada a um corpo, há uma tendência de alteração de forma e tamanho deste devido à força. Tais modificações na geometria são denominadas de deformações, e podem alterar completamente a forma do corpo bem como serem praticamente invisíveis de se observar. De modo geral, a deformação de um corpo não será uniforme em todo o seu volume.

Deslocamentos e deformações de um corpo podem ser observados, calculados ou medidos, relativos a um sistema de coordenadas. Todo deslocamento pode ser considerado como composto por duas partes, a primeira está relacionada aos movimentos relativos, ou seja, distorções sofridas pelo corpo em seu interior, a segunda que é uniforme ao longo do corpo, representa o deslocamento de corpo rígido. A análise entre os deslocamentos e as correspondentes distorções, sem levar em consideração os esforços que os causam, é chamada de cinemática (SHABANNA, 2018).

As relações que caracterizam as propriedades físicas de um material são chamadas de constitutivas. Embora a teoria da Mecânica do Contínuo tenha estabelecido princípios para o desenvolvimento sistemático das relações constitutivas, muitas destas foram desenvolvidas por meio de relações empíricas baseadas em evidências experimentais. O comportamento mecânico dos sólidos normalmente é determinado pelas relações constitutivas de tensão-deformação, neste trabalho restringiu-se tais relações como sendo lineares, portanto, os elementos finitos da malha são tratados como sólidos elásticos lineares.

5.2.1 Lei de Hooke para Meios Contínuos

As tensões e deformações que ocorrem no interior de um material elástico contínuo estão relacionadas linearmente de acordo com a Lei de Hooke Equação (32), porém esta lei se refere à uma mola que pode ter seu estado descrito por somente um vetor como é possível observar na Figura 4, ao contrário de um meio sólido. Pois esse meio sólido, por menor que seja, pode ser comprimido, esticado e cisalhado em

diferentes direções e ao mesmo tempo. De forma a tornar-se possível capturar essa complexidade, o estado de tensões no qual o meio contínuo se encontra deve ser representado através de dois tensores de segunda ordem, e um tensor de quarta ordem, este chamado de tensor de rigidez ou de elasticidade. Assim o análogo da Lei de Hooke para meios contínuos é escrito na forma da Equação (33).

$$F = -k \cdot x, \quad (32)$$

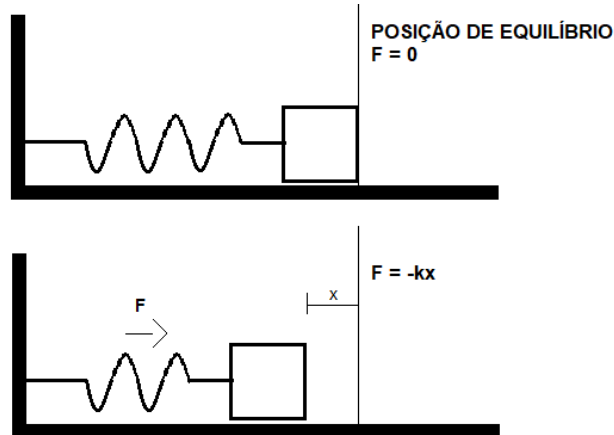
Onde:

F - força restauradora da mola

k - constante da mola

x - o quanto o extremo livre da mola deslocou de sua posição de equilíbrio

Figura 5 - Mola em repouso (equilíbrio) e ao ser comprimida, gerando uma força em sentido contrário ao deslocamento.



Fonte: O Autor (2021).

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (33)$$

Onde:

σ_{ij} - tensor de tensões (análogo a força restauradora da mola)

c_{ijkl} - tensor de elasticidade (análogo a constante da mola)

ϵ_{kl} - tensor de deformações (análogo ao deslocamento sofrido pela mola)

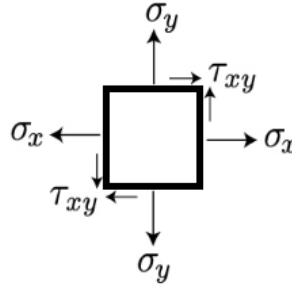
No sistema de coordenadas no espaço cartesiano, os tensores de tensão e deformação podem ser representados na forma matricial como na Equação (34) e Equação (35) respectivamente.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$\epsilon_{kl} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Sendo um operador linear entre os nove valores do tensor de tensão e os nove valores do tensor de deformação, o tensor $\mathbf{C}$ pode ser representado por uma matriz $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$, esta é a Lei de Hooke Generalizada. Porém, visto que o objeto analisado aqui é um elemento finito bidimensional, homogêneo e isotrópico, a Lei de Hooke é simplificada para o estado plano de tensões, este caso é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Estado Plano de Tensões.



Fonte: O Autor (2021).

Assim, para este caso em que o eixo z é livre de tensões, tem-se que:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0, \quad (36)$$

Assume-se também que as outras tensões independem de z , ou seja, são funções somente de x e y :

$$\sigma_x = \sigma_x(x, y), \quad \sigma_y = \sigma_y(x, y), \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, y), \quad (37)$$

Devido ao material ser considerado isotrópico o tensor $\mathbf{c}_{ijkl}$ assume a forma da Equação (38):

$$\mathbf{c}_{ijkl} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (38)$$

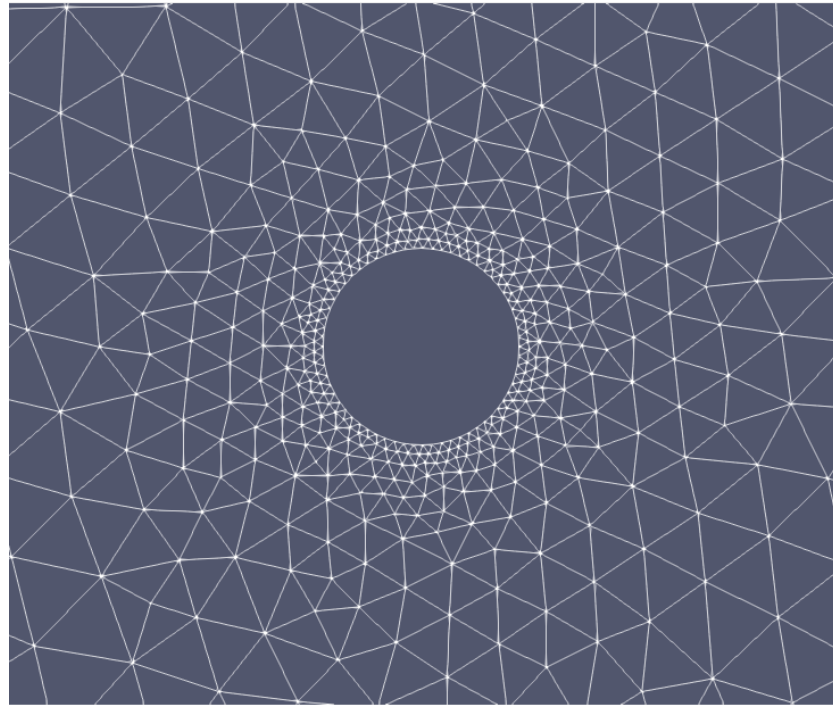
onde:

E - módulo de Young

ν - coeficiente de Poisson

As malhas de elementos finitos utilizadas aqui contêm elementos triangulares de diversos tamanhos, que são menores à medida que estão mais próximos da estrutura (Figura 7).

Figura 7 - Malha de elementos finitos ilustrando o tamanho dos elementos, menores são os elementos à medida que se aproxima da estrutura (círculo).



Fonte: Autor (2021).

Adota-se um coeficiente de Poisson $\nu \in [0; 0.45]$ de forma a se permitir maiores deformações e a evitar o mal condicionamento numérico, tal escolha depende do problema analisado e da experiência do usuário. É escolhido um módulo de Young para cada elemento, proporcional à dimensão de sua menor aresta, Equação (39). Dessa forma elementos próximos à estrutura serão mais rígidos e absorverão menos deformações, ficando estas para os maiores elementos, normalmente localizados a maiores distâncias da estrutura.

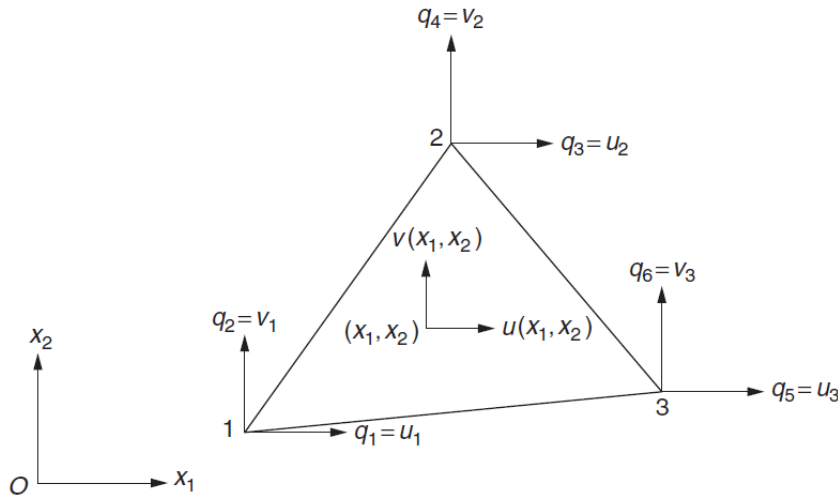
$$E_{el} = \frac{1}{\min_{j,k} \|x_j - x_k\|^\beta}, \quad (39)$$

Na Equação (39), o coeficiente β é utilizado para controlar o comportamento de deformação da malha, aumentando ou diminuindo a diferença de rigidez entre os menores e maiores elementos.

Estando o elemento triangular no plano x_1, x_2 como apresentado na Figura 7, assume-se que no interior do elemento ocorra uma variação de deslocamento linear, o polinômio assumido para a variável deslocamento pode ser expresso como:

$$\begin{cases} u(x_1, x_2) = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 x_2 \\ v(x_1, x_2) = \alpha_4 + \alpha_5 x_1 + \alpha_6 x_2 \end{cases}, \quad (40)$$

Figura 8 - Estado Plano de Tensões.



Fonte: O Autor (2021).

Considerando os deslocamentos u_i e v_i como graus de liberdade locais do nó i ($i=1,2,3$), as constantes $\alpha_1, \dots, \alpha_6$ podem ser obtidas em termos dos graus de liberdade nodais. Assim, através das condições da Equação (41):

$$\left. \begin{aligned} u(x_1, x_2) &= u_1 = q_1 \text{ e } v(x_1, x_2) = v_1 = q_2 \text{ para } i=1 \\ u(x_1, x_2) &= u_2 = q_3 \text{ e } v(x_1, x_2) = v_2 = q_4 \text{ para } i=2 \\ u(x_1, x_2) &= u_3 = q_5 \text{ e } v(x_1, x_2) = v_3 = q_6 \text{ para } i=3 \end{aligned} \right\}, \quad (41)$$

Obtém-se o modelo de deslocamento na Equação (42):

$$\vec{U} = \begin{Bmatrix} u(x_1, x_2) \\ v(x_1, x_2) \end{Bmatrix} = [N] \vec{q}^{(e)}, \quad (42)$$

onde

$$[N(x_1, x_2)] = \begin{bmatrix} N_1(x_1, x_2) & 0 & N_2(x_1, x_2) & 0 & N_3(x_1, x_2) & 0 \\ 0 & N_1(x_1, x_2) & 0 & N_2(x_1, x_2) & 0 & N_3(x_1, x_2) \end{bmatrix}, \quad (43)$$

$$\begin{cases} N_1(x_1, x_2) = \frac{1}{2A} [y_{32}(x - x_2) - x_{32}(y - y_2)] \\ N_2(x_1, x_2) = \frac{1}{2A} [-y_{31}(x - x_3) + x_{31}(y - y_3)] \\ N_3(x_1, x_2) = \frac{1}{2A} [y_{21}(x - x_1) - x_{21}(y - y_1)] \end{cases}, \quad (44)$$

$$A = \frac{1}{2} (x_{32}y_{21} - x_{21}y_{32}), \quad (45)$$

$$\left. \begin{aligned} x_{ij} &= x_i - x_j \\ y_{ij} &= y_i - y_j \end{aligned} \right\}, \quad (46)$$

$$\vec{q}^{(e)} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \end{Bmatrix}^{(e)} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix}^{(e)}, \quad (47)$$

Através da Equação (48) tem-se a relação entre deslocamento e deformação:

$$\vec{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix}, \quad (48)$$

E da Equação (42) tem-se que:

$$\vec{\varepsilon} = [B] \vec{q}^{(e)}, \quad (49)$$

Onde

$$[B] = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{Bmatrix} [N] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{32} & 0 & -y_{31} & 0 & y_{21} & 0 \\ 0 & -x_{32} & 0 & x_{31} & 0 & -x_{21} \\ -x_{32} & y_{32} & x_{31} & -y_{31} & -x_{21} & y_{21} \end{bmatrix}, \quad (50)$$

Como o elemento finito aqui utilizado é tratado como no estado plano de tensões, utiliza-se a relação constitutiva da Equação (51):

$$\vec{\sigma} = [D] \vec{\varepsilon}, \quad (51)$$

onde

$$[D] = \mathbf{c}_{ijkl} = \frac{E^{(el)}}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} \nu & 1 & 0 \\ 1 & \nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad (52)$$

Finalmente a matriz de rigidez referente ao elemento analisado pode ser obtida através da Equação (53):

$$[k^{(e)}] = \iint_{A^{(e)}} [B]^T [D] [B] dA = A^{(e)} [B]^T [D] [B], \quad (53)$$

Onde

$A^{(e)}$ - Área do elemento

Após a montagem da matriz de rigidez global, Equação (54), contendo a contribuição de todos os elementos da malha, obtém-se a Equação (55):

$$K = \sum_{e=1}^E [k^{(e)}], \quad (54)$$

Onde

E - Número total de elementos finitos na malha ou região escolhida

$$K_{ff} \mathbf{u}_f = -K_{fi} \mathbf{u}_i, \quad (55)$$

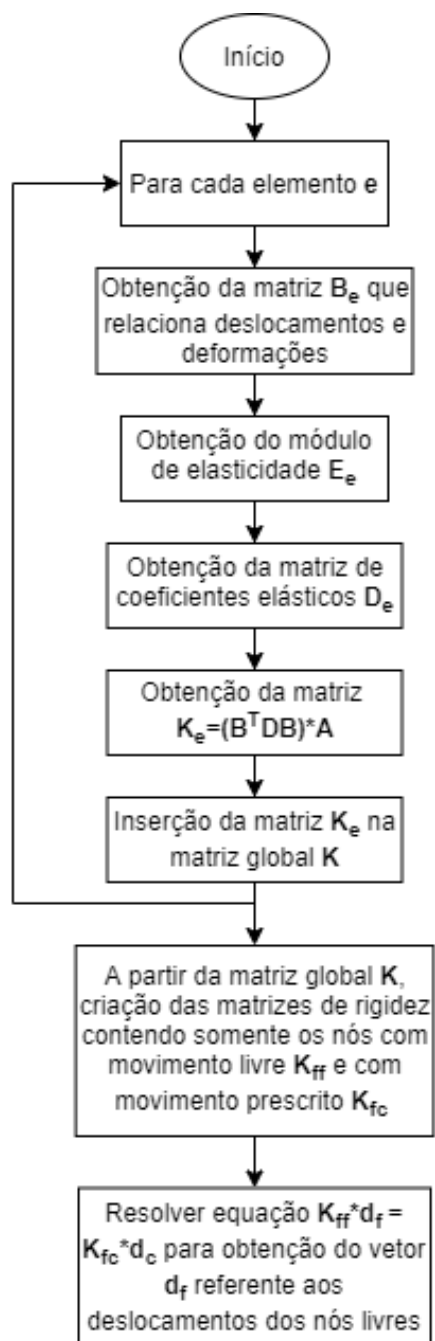
Onde

$\mathbf{u}_f$ - graus de liberdade que podem se mover livremente

$\mathbf{u}_i$ - graus de liberdade com deslocamento prescrito (movimentação da estrutura)

Resolvendo a Equação (55) para $\mathbf{u}_f$, obtemos as novas posições dos nós para os elementos. É possível ver o procedimento em forma de fluxograma no Fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Analogia elástica para movimentação de malha.



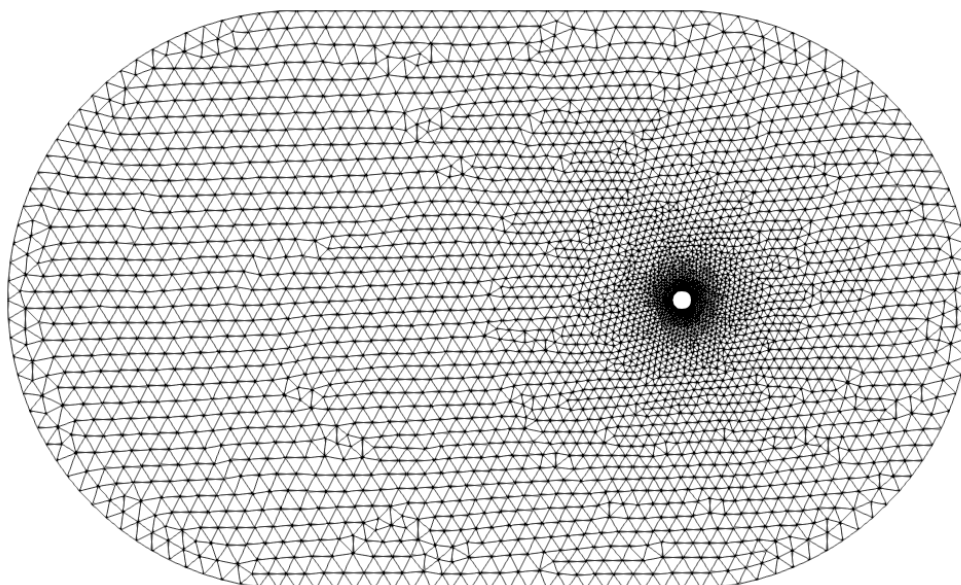
Fonte: O Autor (2021).

5.2.2 Escolha do Valor de β

Determinar qual o melhor valor de β para a Equação (39) exige experiência do usuário, conhecimento do problema e da malha utilizada. Para demonstrar a

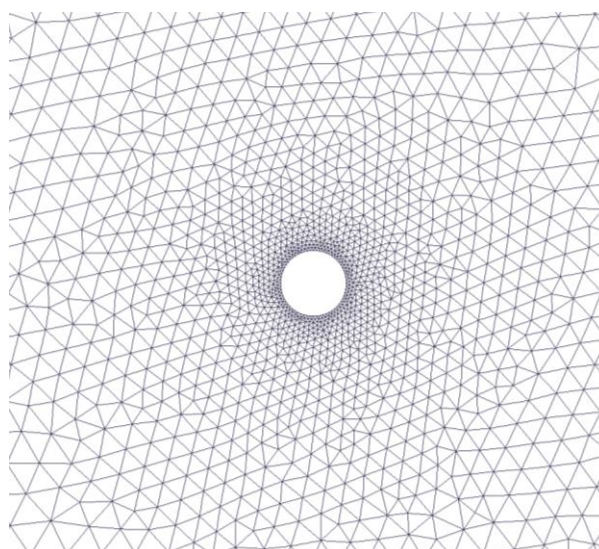
importância da escolha do valor para este parâmetro, foi feito um experimento para determinação de β , para um caso específico em que um cilindro se deslocava, até que algum elemento da malha alcançasse uma qualidade mínima estabelecida, a malha utilizada pode ser vista na Figura 9. Para isso foi definido o caso em que ocorre somente a translação de uma estrutura na direção x, para isso foi gerada uma malha de elementos finitos triangulares, como pode ser visto na Figura 9 e em detalhe na Figura 10, com um total de 8767 nós e 17026 triângulos.

Figura 9 - Malha utilizada no estudo de determinação do valor β .



Fonte: O Autor (2021).

Figura 10 - Aproximação da região em que se encontra a estrutura.

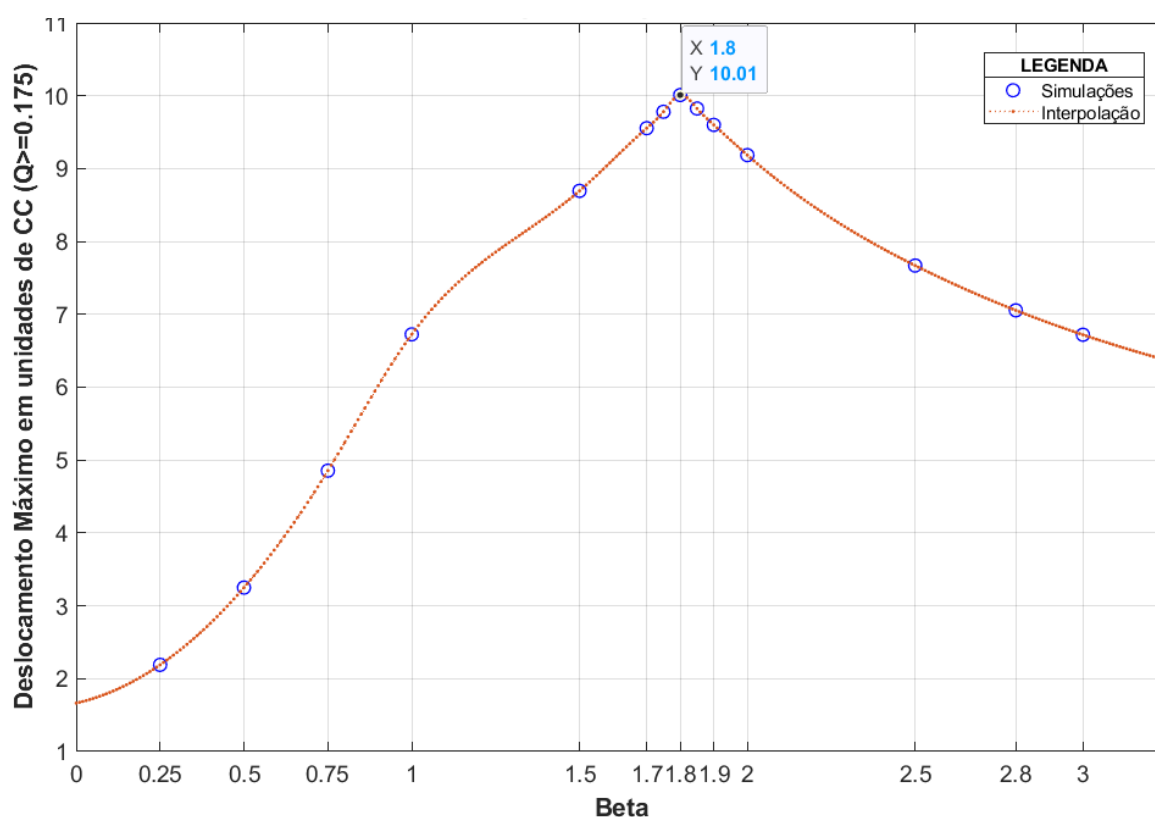


Fonte: O Autor (2021).

Além disso, foram testados vários valores de β , para demonstrar que a escolha do valor deste parâmetro influencia nas deformações dos elementos e, consequentemente, no deslocamento máximo da estrutura antes que a malha alcance um estado avançado de deterioração e necessite de um remalhamento.

Utilizando o critério de qualidade de condicionamento apresentado no Quadro 1 com valor igual a 0,175 como critério de parada para a simulação, foram analisados valores para $\beta \in [0,25; 2,8]$. No Gráfico 1 é apresentado o gráfico Beta x Distância Máxima de deslocamento.

Gráfico 1 - Interpolação Spline, gráfico contendo o deslocamento máximo alcançado pelo cilindro para cada valor de β .



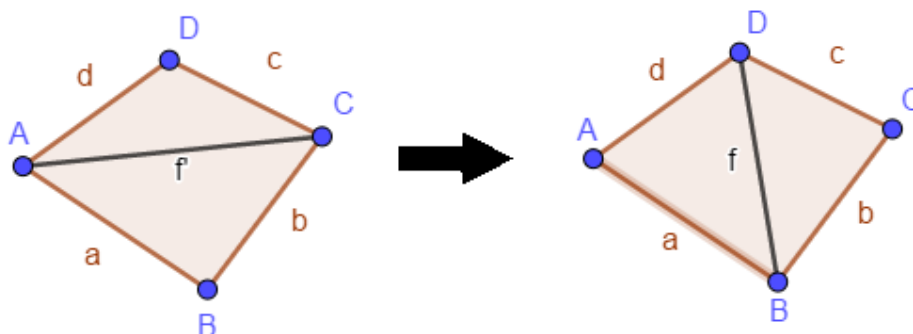
Fonte: O Autor (2021).

A escolha do valor de β converge para o valor 1.8, como é possível observar no Gráfico 1. Esse é o valor que permite que haja o maior deslocamento da estrutura ao longo da malha ao mesmo tempo que mantém os elementos com a menor distorção possível.

5.3 Método para Troca de Arestas (*Edge Swap*)

O método de troca de arestas (*Edge Swap*), como definido por George (1996), é a modificação local de dois elementos, que compartilham uma aresta e que formam um quadrilátero convexo, em dois novos elementos que passam a utilizar a outra diagonal como aresta compartilhada, esse método pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Troca de arestas (*Edge Swap*).



Fonte: O Autor (2021).

Cada aresta da malha e a qualidade dos respectivos elementos que a contém são analisados. A escolha do critério para análise de qualidade é apresentada no item 5.3.1.

5.3.1 Escolha do Critério para Aplicação da Troca de Aresta

Para decidir se uma aresta deve ser trocada, primeiro é necessário estabelecer um critério de qualidade dos elementos associados. Em seu estudo, Schewchuk (2002) apresentou algumas medidas de qualidade para elementos triangulares lineares, essas medidas estão relacionadas à otimização do erro de interpolação da solução e do gradiente da solução ou do condicionamento da matriz de rigidez do problema fluido, além disso também foram categorizadas entre serem invariantes ou não com relação ao tamanho dos elementos, mas sempre analisando a forma. Das medidas de qualidade apresentadas, aqui somente serão analisadas as medidas que são invariantes ao tamanho dos elementos (Quadro 1), pois nos problemas de IFE normalmente são utilizadas malhas que possuem uma gradação do tamanho dos elementos, os que se localizam próximos a estrutura são os menores e vão aumentando conforme cresce a distância da estrutura.

Quadro 1 - Medidas de Qualidade utilizadas como critério para realização da troca de arestas.

Medida de qualidade da interpolação, baseada em $\ f - g\ _{\infty}$ (diferença entre a função analisada e uma aproximação linear desta, ou seja, o erro)	
Invariante ao tamanho	A/r_{mc}^2
Medida de qualidade da interpolação, baseada em $\ \nabla f - \nabla g\ _{\infty}$ (diferença entre o gradiente da função analisada e o gradiente da aproximação linear desta, ou seja, o erro)	
Invariante ao tamanho	$A / (l_{m\acute{a}x} l_{m\acute{e}d} l_{m\acute{i}n} + 4 r_{in})^{2/3}$
Medida de qualidade do condicionamento	
Invariante ao tamanho	$A / (3l_{rms}^2 + \sqrt{3l_{rms}^4 - 48A^2})$

Fonte: O Autor (2021).

onde

A - é a área do elemento finito triangular

r_{mc} - é o raio da menor circunferência que circunscreve o elemento triangular

$l_{m\acute{a}x}$, $l_{m\acute{e}d}$ e $l_{m\acute{i}n}$ - são a maior, mediana e menor aresta do elemento triangular, respectivamente

r_{in} - é o raio da circunferência inscrita no elemento triangular

l_{rms} - é a raiz do valor quadrático médio do comprimento de aresta do elemento triangular

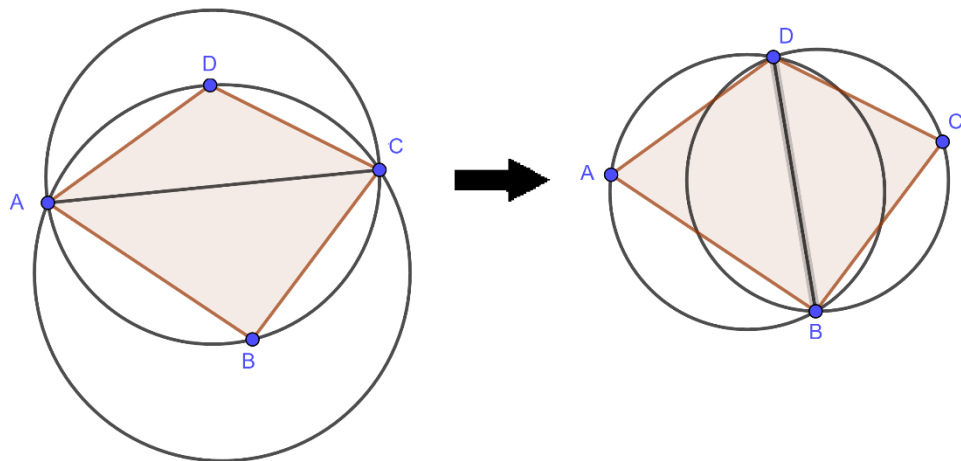
Schewchuk também explica em seu trabalho que o erro $\|\nabla f - \nabla g\|_{\infty}$, onde f é uma função escalar contínua definida na malha de elementos finitos e g é uma aproximação linear de f , pode crescer proporcionalmente à medida que os elementos se deteriorem diferentemente de $\|f - g\|_{\infty}$, como exemplo, conforme a área de um elemento triangular se aproxime de zero e os comprimentos das arestas sofram poucas alterações, ∇g pode ou não tender ao infinito. Devido a essa sensibilidade, normalmente se escolhe as formas dos elementos para controlar $\|\nabla f - \nabla g\|_{\infty}$, e não $\|f - g\|_{\infty}$, que pode ser reduzido utilizando elementos menores, desta forma serão analisados somente os critérios baseados em $\|\nabla f - \nabla g\|_{\infty}$ e condicionamento.

Normalmente, a dificuldade de resolução para um sistema linear de equações associado ao método de elementos finitos cresce à medida que o número de condicionamento da matriz cresce, um número de condicionamento com valor elevado significa que resolvedores iterativos terão maior dificuldade para solucionar este sistema. O número de condicionamento está atrelado às propriedades do sistema físico que está sendo modelado, ao tamanho e forma dos elementos. Com relação ao tamanho dos elementos há pouco o que se fazer nos casos que são analisados problemas de IFE devido a gradação anteriormente comentada. Restando assim, o controle da deterioração dos elementos.

Outra medida de qualidade existente, que também é utilizada na etapa de geração de malhas, é o critério de Delaunay. A utilização do critério de Delaunay maximiza o menor ângulo interno de todos os ângulos, dos triângulos analisados.

O critério de Delaunay é avaliado da seguinte maneira, dado 4 pontos no plano, como pode ser visto na Figura 12, se um dos 4 pontos estiver na região interna da circunferência formada pelos outros 3 pontos, esta triangulação não atende ao critério de Delaunay.

Figura 12 - Critério de Delaunay.



Fonte: O Autor (2021).

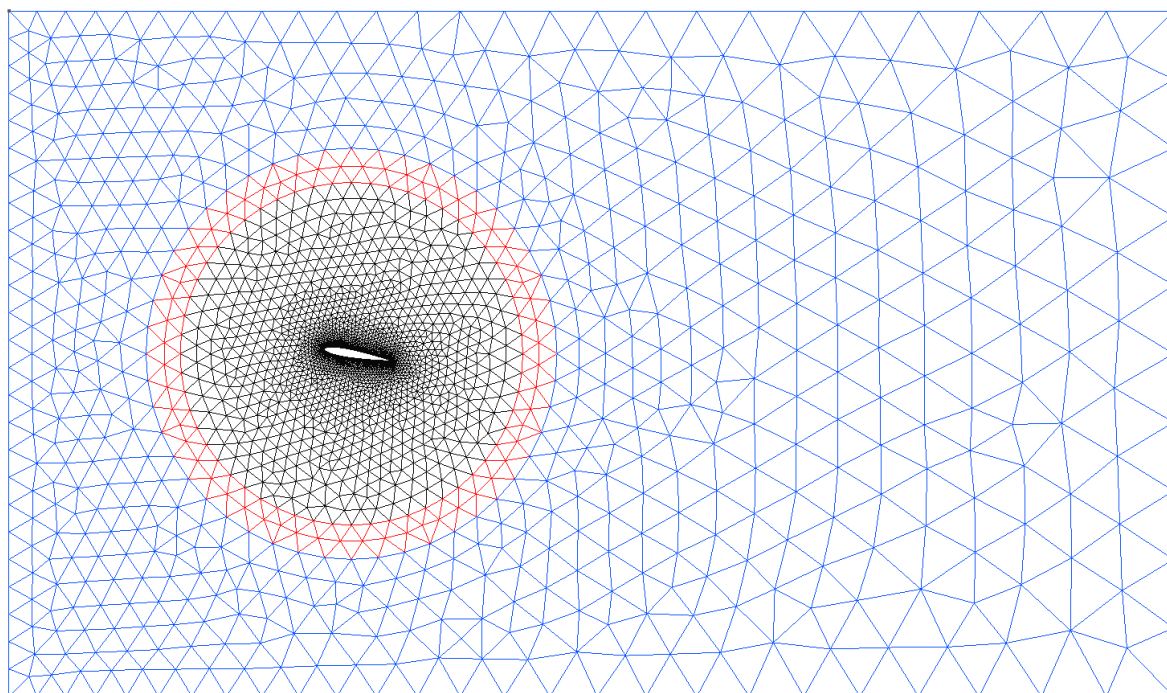
Uma maneira de verificar essa condição, é através do determinante apresentado na Equação (56).

$$\begin{vmatrix} A_x & A_y & A_x^2 + A_y^2 & 1 \\ B_x & B_y & B_x^2 + B_y^2 & 1 \\ C_x & C_y & C_x^2 + C_y^2 & 1 \\ D_x & D_y & D_x^2 + D_y^2 & 1 \end{vmatrix} > 0, \quad (56)$$

Estando os pontos A, B, C, D distribuídos no sentido anti-horário, o determinante resulta um valor positivo se, e somente se, o ponto D estiver localizado no interior da circunferência formada pelos pontos A, B, C .

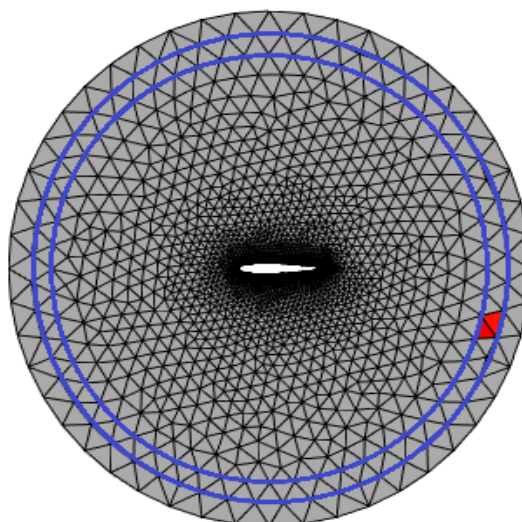
Neste trabalho, a escolha da medida de qualidade se baseou num conjunto de simulações em que um perfil NACA0012 localizado no centro de uma malha circular, Figura 13, sofria rotação pura, e, enquanto rotacionava, foi escolhida uma aresta e seus respectivos elementos (em vermelho) que se encontrava na região, em azul, em que ocorria a troca de aresta. Este fato pode ser visto na Figura 14.

Figura 13 - Malha utilizada para análise de Rotação Pura (Em azul – Região Euleriana; Em vermelho - Região ALE em que ocorre a troca de arestas; Em preto – Região ALE em que ocorre a rotação da malha em conjunto com a estrutura).



Fonte: O Autor (2021).

Figura 14 - Troca de arestas numa malha circular.

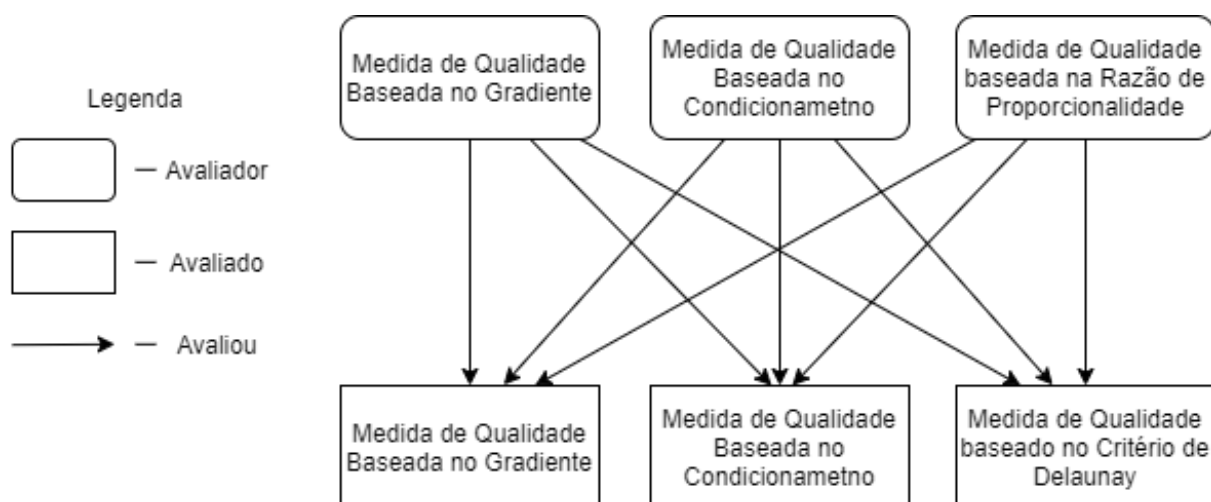


Fonte: O Autor (2021).

Em cada simulação a troca de aresta foi determinada utilizando as medidas de qualidade de interpolação baseada em gradiente e condicionamento de Schewchuk e o critério de Delaunay.

As três medidas de qualidade citadas foram avaliadas da seguinte maneira, primeiro foi escolhido um elemento referência que teria sua qualidade avaliada por três diferentes critérios, segundo as medidas baseadas em gradiente e condicionamento de Schewchuk e a terceira que é razão de proporcionalidade. Essa metodologia pode ser observada em formato de fluxograma no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 - Troca de arestas (Edge Swap).



Fonte: O Autor (2021).

A razão de proporcionalidade é definida na Equação 57, essa razão pode variar de 0 a 1. Quanto maior o valor da razão, melhor é a qualidade do elemento, ou seja,

quanto mais a área do triângulo se aproxima de 0, a razão também se aproxima de 0, e para um triângulo equilátero Figura 15, o valor da razão é 1.

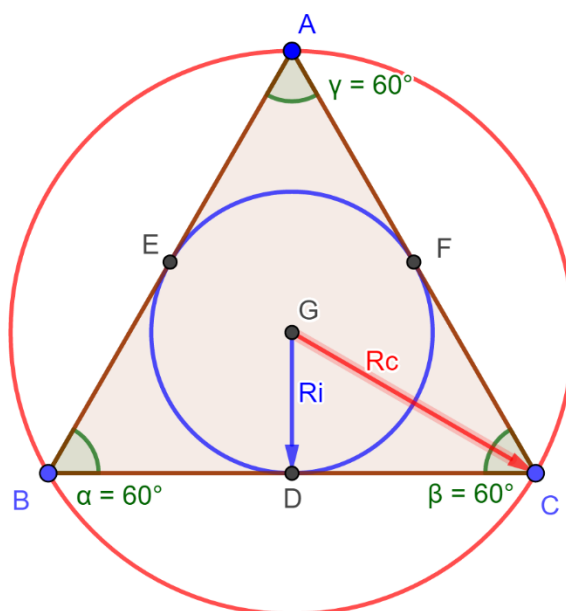
$$RP = \frac{2R_i}{R_c} \quad (57)$$

onde

R_i - raio da circunferência inscrito no triângulo

R_c - raio da circunferência circunscrita no triângulo

Figura 15 - Critério de razão de proporcionalidade.



Fonte: O Autor (2021).

As medidas de qualidade obtidas para um triângulo equilátero com a dimensão de aresta unitária, encontram-se na Tabela 1:

Tabela 1 - Medidas de qualidade para um triângulo equilátero.		
Baseada em Gradiente	Baseada em Condicionamento	Razão de proporcionalidade
0,2596	0,1443	1,00

Fonte: O Autor (2021).

A qualidade dos dois elementos que compartilhavam a aresta foi medida a cada iteração. Foram obtidas as razões, Equação (58), entre as medidas de qualidade máxima e mínima dos dois elementos ao longo das simulações e a medida de

referência da Tabela 1, essas razões foram plotadas nos gráficos que se encontram nas Figuras do ANEXO A.

Além disso, os valores máximos e mínimos dessas razões de qualidade alcançados por cada elemento podem ser vistos nas Tabela 2 e Tabela 3.

$$\text{Qualidade} = \frac{\text{Qualidade do Elemento}}{\text{Qualidade de Referência}} \quad (58)$$

Tabela 2 - Qualidade do elemento 1

Método/Qualidade	Qgsi-máx	Qgsi-mín	Qcsi-máx	Qcsi-mín	Qar-máx	Qar-mín
1 - Qgsi	0,99852	0,85339	0,99082	0,50137	0,99995	0,74602
2 - Qcsi	0,99852	0,85339	0,99082	0,50137	0,99995	0,74602
3 - Qmd	0,99852	0,85339	0,99082	0,50137	0,99995	0,74602
Método com melhor qualidade	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 3 - Qualidade do elemento 2

CrITÉrio/Avaliador	Qgsi-máx	Qgsi-mín	Qcsi-máx	Qcsi-mín	Qar-máx	Qar-mín
1 - Qgsi	0,99902	0,84603	0,99277	0,49422	0,99997	0,76345
2 - Qcsi	0,99902	0,84132	0,99277	0,49422	0,99997	0,76345
3 - Qmd	0,99902	0,84603	0,99277	0,49515	0,99997	0,76345
CrITÉrio com melhor qualidade	1,2,3	1,3	1,2,3	3	1,2,3	1,2,3

Fonte: O Autor (2021).

Através dos dados apresentados, conclui-se que o critério para a troca de arestas que manteve os elementos com maiores valores de qualidade, tanto máximo quanto mínimo, foi o critério de Delaunay.

5.4 Aeroelasticidade

Na engenharia civil, certos tipos de estruturas após serem influenciadas por forças de inércia, elásticas e aerodinâmicas, sofrem deslocamentos e deformações como flexões, torções ou uma combinação destas (HODGES; PIERCE, 2011). Esses deslocamentos e deformações, por sua vez, afetam como a estrutura será influenciada pelas forças aerodinâmicas, podendo assim, levar à maiores deslocamentos e deformações. A este comportamento de movimento auto excitado da estrutura dá-se o nome de Aeroelástico.

Para descrever a interação entre forças aerodinâmicas e deslocamentos estruturais é necessário resolver as equações de movimento que descrevem o

escoamento do fluido, com condições de contorno, dependentes do tempo, impostas pela estrutura móvel. Mesmo que tenha havido progresso na solução numérica de alguns problemas aeroelásticos, para corpos rombudos imersos em escoamentos turbulentos, a descrição dos efeitos aeroelásticos ainda depende principalmente de testes feitos em laboratório e modelagem empírica. No entanto, para estruturas modeladas cuidadosamente, imersas em escoamento laminar, normalmente é possível se obter resultados que condizem com a realidade (SIMIU; YEO, 2019).

Os fenômenos aeroelásticos de relevância em edifícios para a engenharia civil e analisados neste trabalho, são:

- Vibrações Induzidas por Vórtices (*lock-in*)
- Instabilidade Aerodinâmica (*flutter*)

Esses fenômenos serão mais bem descritos a seguir.

5.4.1 Instabilidade Aerodinâmica

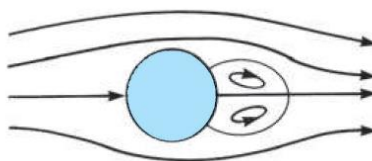
A instabilidade aerodinâmica é um fenômeno que ocorre em corpos flexíveis e que possua a forma relativamente plana, como asas de aviões ou tabuleiros de pontes (DOWELL, 2015). É caracterizado por oscilações causadas pela ação do vento, em que ocorre o acoplamento entre os modos de vibração de torção e flexão da estrutura. As amplitudes dessas oscilações crescem à medida que o vento continua a fornecer energia para o movimento da estrutura, se a estrutura não conseguir dissipar a energia na mesma proporção em que é fornecida pelo vento, ela pode vir a colapsar.

5.4.2 Vibrações Induzidas por Vórtices

O vórtice é definido como uma região rotacional de um fluido, como por exemplo, um tornado ou redemoinho (SIMIU; YEO, 2019). A formação de vórtices em um escoamento com um corpo imerso, depende de sua geometria e rugosidade do corpo, além disso, outros fatores como velocidade e viscosidade do fluido também tem papel fundamental na formação destes vórtices.

De forma sucinta, a formação dos vórtices ocorre devido à existência de um gradiente de velocidade do escoamento na região chamada de camada limite, por causa da geometria do corpo imerso, há um descolamento dessa camada limite, gerando assim uma região de baixa pressão localizada na parte posterior (com relação ao sentido do escoamento) do corpo, nesta região são formados os vórtices, como pode ser observado na Figura 16.

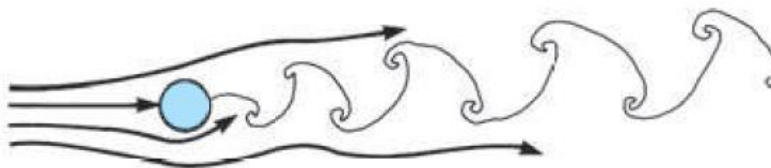
Figura 16 - Formação de vórtices na parte posterior de um corpo imerso em um escoamento.



Fonte: Anderson Jr (2016).

Com o aumento da velocidade do escoamento e consequentemente do número de Reynolds, o escoamento atrás do corpo se torna instável, assim iniciando o processo de desprendimento dos vórtices de forma regular (Figura 17), ou seja, eles se desprendem numa frequência proporcional à velocidade do escoamento.

Figura 17 - Desprendimento de vórtices.



Fonte: Anderson Jr (2016).

A Equação 59 apresenta a relação entre a velocidade do escoamento e a frequência de desprendimento.

$$f_D = \frac{U \cdot St}{D}, \quad (59)$$

Onde

U - Velocidade média do escoamento

St - Número de Strouhal, depende da geometria e do número de Reynolds

D - Dimensão característica do corpo

f_D - Frequência de desprendimento de vórtices

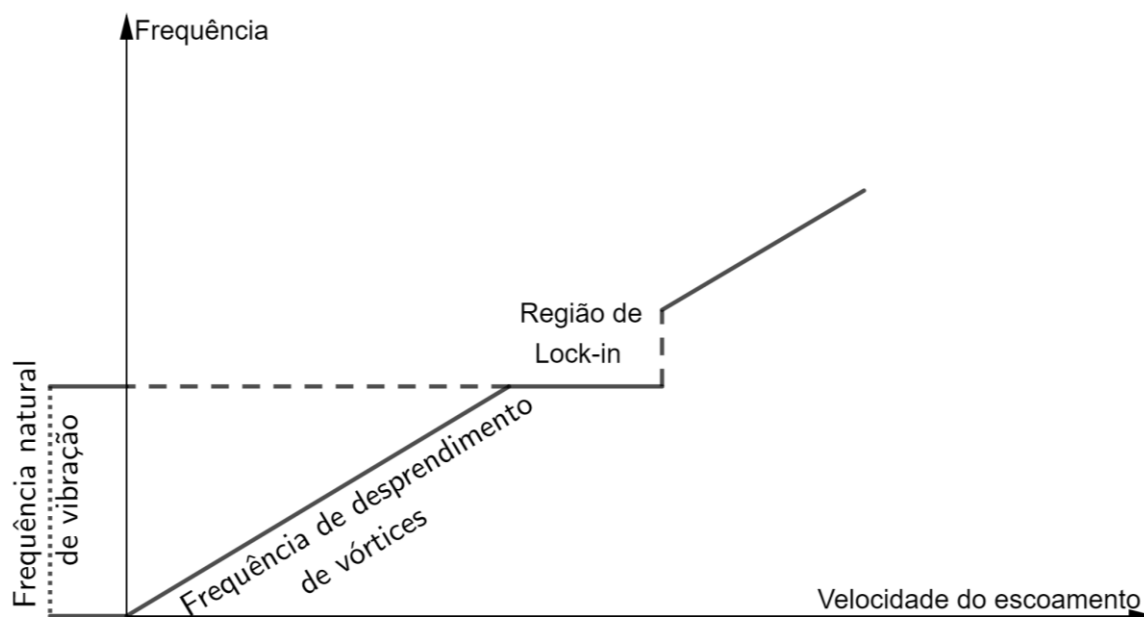
Esse desprendimento gera forças de sustentação e arrasto no corpo e se este for flexível ou possuir suportes elásticos, irá sofrer deslocamentos devido aos esforços aerodinâmicos.

5.4.2.1 Sincronização do desprendimento de vórtices (*Lock-in*)

Se a frequência de desprendimento de vórtices f_D for igual a frequência natural de vibração do corpo ω_n , então poderá ocorrer uma amplificação dos deslocamentos

sofridos pelo corpo. Dentro de um intervalo a frequência de desprendimento de vórtices não mais atende a Equação 59, em vez disso, ela sincroniza com a frequência de vibração do corpo, Gráfico 2.

Gráfico 2 - Frequência do desprendimento de vórtices em função da velocidade do escoamento.



Fonte: O Autor (2021).

5.5 Design of Experiments (DOE)

Tendo em vista o objetivo principal da otimização do problema estrutural, ou seja, minimizar o deslocamento através do posicionamento de uma segunda estrutura na região posterior com relação ao sentido do escoamento. Torna-se imperativa a realização de um levantamento dos fatores envolvidos, bem como da influência de tais fatores sobre a resposta do problema. Para tal tarefa, pode ser feito um estudo paramétrico, analisando um fator por vez, porém, essa metodologia não leva em consideração a combinação dos efeitos.

Muitos experimentos envolvem o estudo dos efeitos causados por dois ou mais fatores. Em geral, o Planejamento de Experimentos, *Design of Experiments (DOE)* em inglês, é a maneira mais eficiente de planejar tais experimentos (Montgomery, 2017). Através de medidas estatísticas o DOE determina a influência dos fatores sobre a resposta final, como também a influência das combinações entre tais fatores.

A influência de um fator é definida como sendo a mudança causada no resultado produzida por uma mudança no nível do mesmo fator. Isto é chamado de um efeito principal pois refere-se aos fatores primários de interesse no experimento.

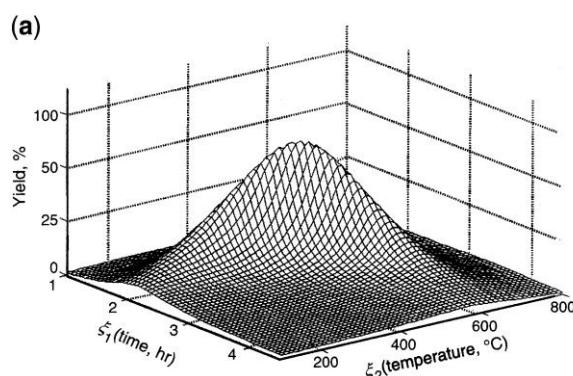
A utilização da metodologia DOE antes de uma otimização é útil para eliminar variáveis cujas influências não terão impactos relevantes sobre a resposta final, o que aumenta a velocidade do processo de otimização de um problema, pois o número de variáveis avaliadas será menor.

5.5.1 Metodologia de Superfície de Resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas utilizado para a modelagem e análise de problemas nos quais o resultado de interesse é influenciado por diversas variáveis, e no qual o objetivo é otimizar esse resultado. Na prática, a metodologia tem importantes aplicações no planejamento, desenvolvimento e formulação de novos produtos, bem como no aprimoramento de produtos existentes. A maior parcela de aplicações da MSR se encontra no setor industrial, particularmente em situações nas quais algumas variáveis influenciam o desempenho ou qualidade de produtos ou processos. Essas medidas de desempenho e qualidade são chamadas de **resposta**. As variáveis de entrada são chamadas de **variáveis independentes** ou **fatores** e são de escolha do engenheiro ou cientista.

A Figura 18 mostra graficamente a relação entre a variável resposta (y) e duas variáveis independentes em um processo químico, tempo de reação (hr) e a temperatura da reação ($^{\circ}\text{C}$). Observa-se que para cada par de valores (hr, $^{\circ}\text{C}$) existe um valor de resposta correspondente. O nome MSR é devido a essa perspectiva gráfica do problema em questão.

Figura 18 – Gráfico representando o valor da resposta y para cada par de valores (hr, $^{\circ}\text{C}$).



Fonte: Montgomery (2017).

Na maioria dos problemas de MSR, a forma da relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Dessa forma, o primeiro passo no MSR é encontrar uma aproximação adequada para a verdadeira relação entre o resultado ou resposta y e o conjunto de variáveis independentes. Normalmente, um polinômio de baixa ordem é empregado em uma região escolhida das variáveis independentes. Se a resposta é bem modelada por uma função linear de variáveis independentes, então a função aproximada, é o modelo de primeira ordem ou modelo de efeitos principais apresentado na Equação (60).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon, \quad (60)$$

Se existe interações entre os efeitos principais, deve-se acrescentar a parcela referente às interações à Equação (60), como é possível ver na Equação (61).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (61)$$

Se existe uma curvatura no sistema, então um polinômio de maior grau deverá ser empregado, como por exemplo, um modelo de segunda ordem, como o apresentado na Equação (62).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (62)$$

Quase todos os problemas de MSR utilizam um ou ambos os modelos apresentados nas Equações (61) e (62).

O modelo de segunda ordem é amplamente utilizado na MSR devido aos seguintes motivos:

1. O modelo de segunda ordem é bastante flexível. Pode tomar uma grande variedade de formas, de maneira a ser uma boa aproximação da verdadeira superfície de resposta na grande maioria dos casos.
2. É possível estimar os parâmetros β com relativa facilidade nos modelos de segunda ordem. O método dos mínimos quadrados, pode ser utilizado para obtenção dos parâmetros.
3. Existe uma considerável experiência prática indicando que modelos de segunda ordem funcionam bem na resolução de problemas reais de superfície de resposta.

5.5.2 Objetivos e Aplicações da MSR

A MSR é útil na solução de muitos tipos de problemas industriais. Normalmente, esses problemas são categorizados como:

1. Mapear uma Superfície de Resposta sobre uma região de interesse.
2. Otimização da Resposta.
3. Selecionar as Condições de Operação para Alcançar Especificações ou Necessidades do Cliente.

5.5.3 Planejamento Fatorial

Planejamentos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos envolvendo vários fatores onde é necessário investigar efeitos conjuntos da variável resposta. Por efeitos conjuntos deve-se entender efeitos principais e interações. Um caso especial do planejamento fatorial é no qual para cada um dos k fatores em interesse existem somente dois níveis, por níveis entende-se valores extremos que um fator pode assumir. Devido a cada conjunto de planejamentos deste tipo ter exatamente 2^k experimentações, são normalmente chamados de **2^k planejamento fatorial**. Estes planejamentos são muito importantes nos trabalhos de superfície de resposta, especificamente, são aplicados em três áreas:

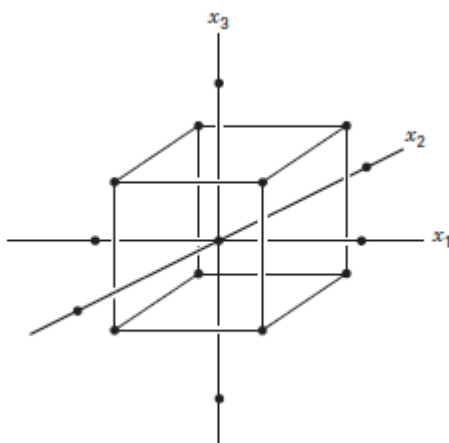
1. Um planejamento 2^k é útil no início de um estudo de superfície de resposta, onde os experimentos de triagem devem ser realizados para identificar o processo importante ou variáveis de sistema.
2. Um planejamento 2^k é frequentemente usado para ajustar um modelo de superfície de resposta de primeira ordem e para gerar as estimativas de efeito de fator necessárias para realizar o método de subida mais íngreme.
3. O planejamento 2^k é um bloco de construção básico usado para criar outros planejamentos de superfície de resposta, como por exemplo o planejamento composto central que será comentado no item a seguir.

5.5.4 Ajuste de um Modelo de Segunda Ordem

Muitas aplicações da MSR envolvem o ajuste e a verificação da adequação de um modelo de segunda ordem. Para tal, pode-se utilizar o planejamento composto central, muito utilizado no ajuste de modelos de segunda ordem de superfície de resposta. Esse planejamento consiste em 2^k experimentos, mais um número n_c de

experimentos centrais e por fim, mais $2 \cdot k$ experimentos axiais. Esse tipo de planejamento pode ser observado graficamente na Figura 19.

Figura 19 – Planejamento Composto Central de três fatores, simbolizado por um cubo, utilizado para modelar um modelo de segunda ordem.

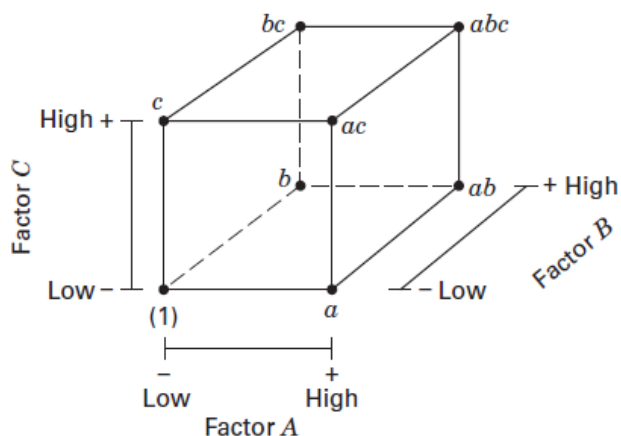


Fonte: Montgomery (2017).

5.5.5 O Planejamento 2^3

Suponha que três fatores, A, B e C, cada um com dois níveis, são avaliados. Então o planejamento é chamado de Planejamento Fatorial 2^3 e oito combinações de experimentos podem ser representadas graficamente como um cubo, como pode ser visto na Figura 20. Usando a notação “+” e “-” para representar os níveis alto e baixo respectivamente de cada fator, é possível listar oito experimentos na forma tabular como no Quadro 2, esta pode ser chamada de Matriz de Planejamento.

Figura 20 – Planejamento Fatorial 2^3 .



Fonte: Montgomery (2017).

Quadro 2 – Experimentos e os respectivos fatores e níveis.

Experimento	Fator		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: O Autor (2021).

Neste caso para oito experimentações existem sete graus de liberdade, Figura 20, no planejamento 2^3 . Três graus de liberdade estão associados com os efeitos principais A, B e C. Quatro graus de liberdade estão associados com as interações: AB, AC e BC, e por fim um com a interação ABC.

Considere por exemplo, estimar os efeitos principais. Primeiro, estima-se o efeito de A. A estimativa deste efeito pode ser expressa como um contraste entre as quatro combinações na face direita do cubo na Figura 21.a (onde A possui maior valor) e as quatro combinações na face esquerda (onde A possui o menor valor). Isto significa que o efeito de A é a média das quatro experimentações onde A se encontra no maior valor ($\bar{y}_{A^+}$) menos a média das quatro experimentações onde A se encontra com o menor valor ($\bar{y}_{A^-}$), como pode ser visto na Equação (63):

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} = \frac{a + ab + ac + abc}{4n} - \frac{(1) + b + c + bc}{4n}. \quad (63)$$

A Equação (63) pode ser reescrita na forma da Equação (64):

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc], \quad (64)$$

De maneira similar, o efeito de B e C é a diferença média entre as combinações dos quatro experimentos na face frontal e posterior do cubo. Assim tem-se os efeitos B e C nas Equações (65) e (66) respectivamente:

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac], \quad (65)$$

$$C = \bar{y}_{C^+} - \bar{y}_{C^-} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]. \quad (66)$$

Os efeitos de interações entre dois fatores são obtidos a seguir. A medida para a interação AB é a diferença entre a média dos efeitos de A nos dois níveis de B. Isso pode ser expresso como apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Interação entre dois fatores.

B	Média do Efeito A
Nível (+)	$\frac{(abc - bc) + (ab - b)}{2n}$
Nível (-)	$\frac{(ac - c) + [a - (1)]}{2n}$
Diferença	$\frac{abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)}{2n}$

Fonte: O Autor (2021).

Devido a interação AB ser uma metade para essa diferença, tem-se a Equação (67):

$$AB = \frac{[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)]}{4n}. \quad (67)$$

A Equação (67) pode ser reescrita na forma da Equação (68):

$$AB = \frac{abc + ab + c + (1)}{4n} - \frac{bc + b + ac + a}{4n}. \quad (68)$$

Fica visível a representação da interação AB pelos dois planos diagonais que podem ser vistos na Figura 21.b. De maneira similar as interações AC e BC são apresentadas nas Equações (69) e (70).

$$AC = \frac{[abc - bc + ac - c - ab + b - a + (1)]}{4n}, \quad (69)$$

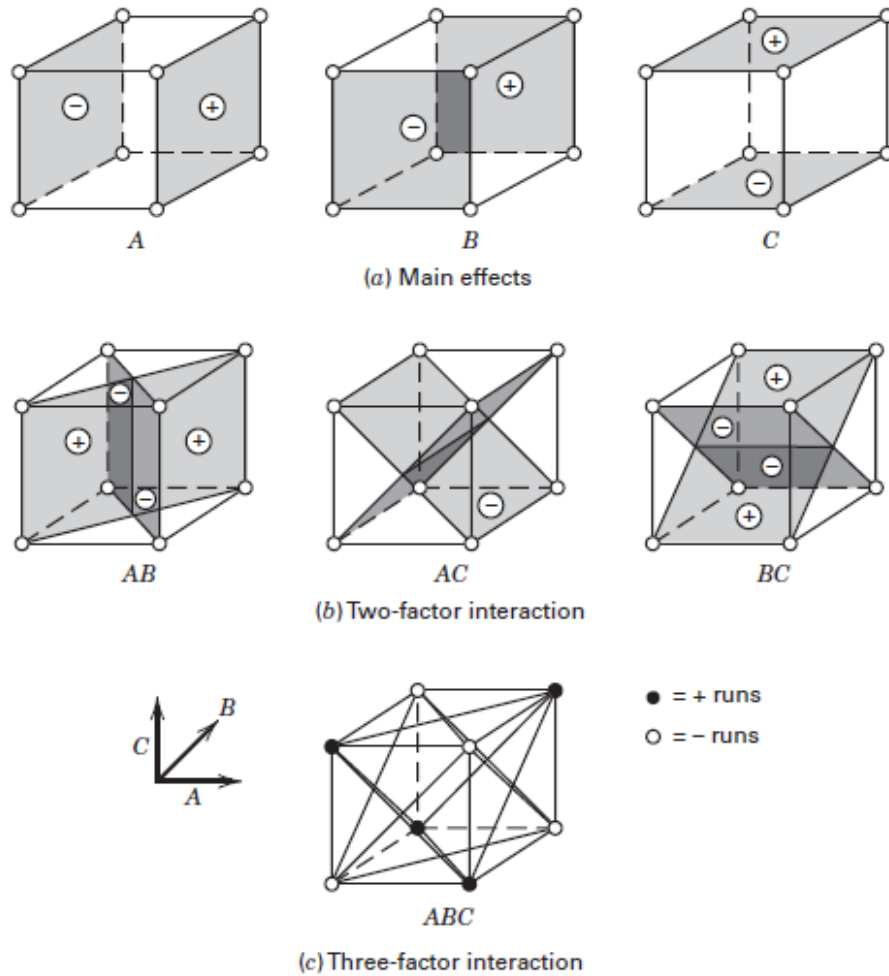
$$BC = \frac{[abc + bc - ac - c - ab - b + a + (1)]}{4n}.$$

(70)

A interação ABC é definida como a diferença média entre a interação AB para os dois níveis de C. Assim temos na Equação (71):

$$ABC = \frac{\{[abc - bc] - [ac - c] - [ab - b] + [a - (1)]\}}{4n}. \quad (71)$$

Figura 21 – Representação geométrica dos efeitos principais e das interações no planejamento 2^3 .



Fonte: Montgomery (2017).

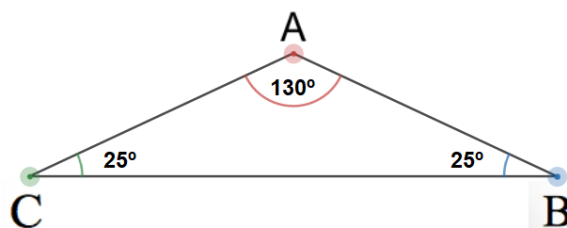
5.6 Comparativo Entre Metodologias de Movimentação de Malha

No presente tópico é abordada a comparação entre a metodologia de movimentação de malha empregada neste trabalho e a metodologia empregada no trabalho de Antunes et al. (2015).

Para realizar a comparação foi utilizado novamente o exemplo do tópico 5.2.2, ou seja, o deslocamento máximo do cilindro utilizando os parâmetros escolhidos pelo operador do algoritmo. O cilindro desloca da direita para à esquerda de acordo com um movimento de translação prescrito até que algum elemento da malha se deteriore ao ponto de alcançar uma medida de qualidade mínima pré-estabelecida, ou seja,

igual a 0,175 relativo a um elemento de referência, considerado como sendo o elemento distorcido.

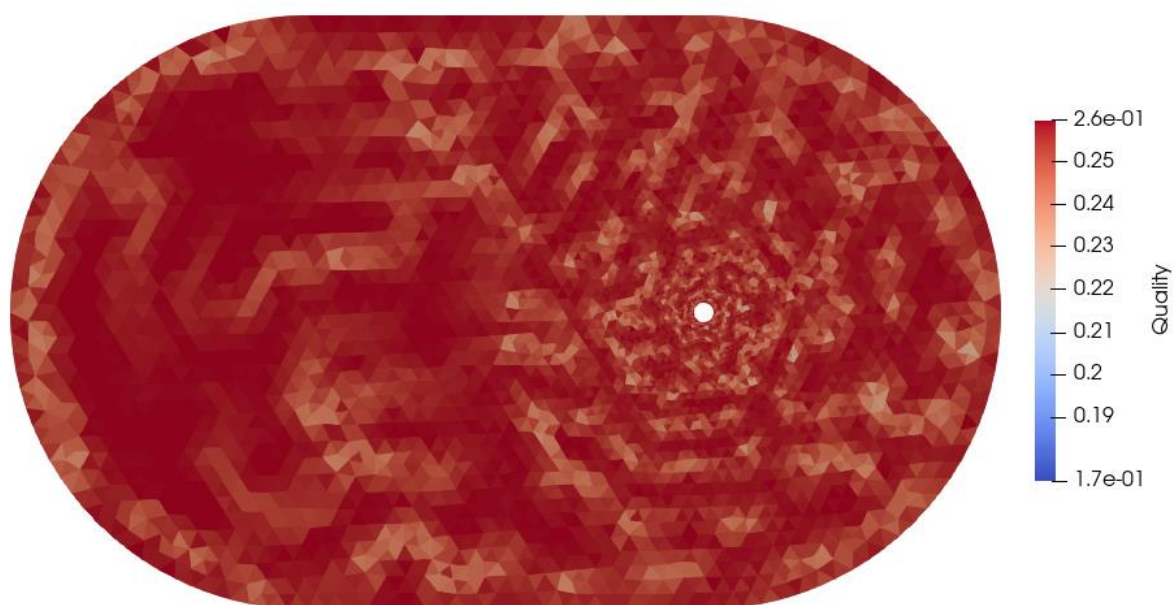
Figura 22 - Elemento distorcido de referência, qualidade igual a 0,175.



Fonte: O Autor (2021).

A Figura 23 ilustra a condição inicial da malha, em que ainda não houve deslocamento do cilindro e todos os elementos estão com suas medidas de qualidade relativamente altas como é possível observar através da legenda de cores.

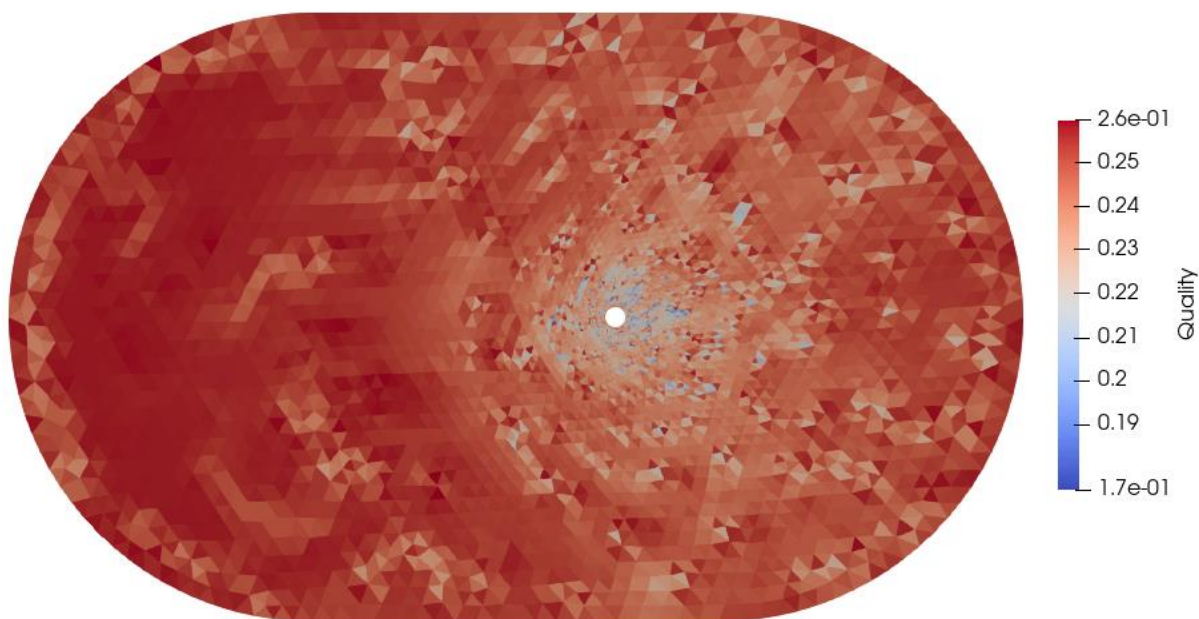
Figura 23 - Malha na configuração inicial onde as cores representam a qualidade dos elementos. Não houve deslocamento do cilindro.



Fonte: O Autor (2021).

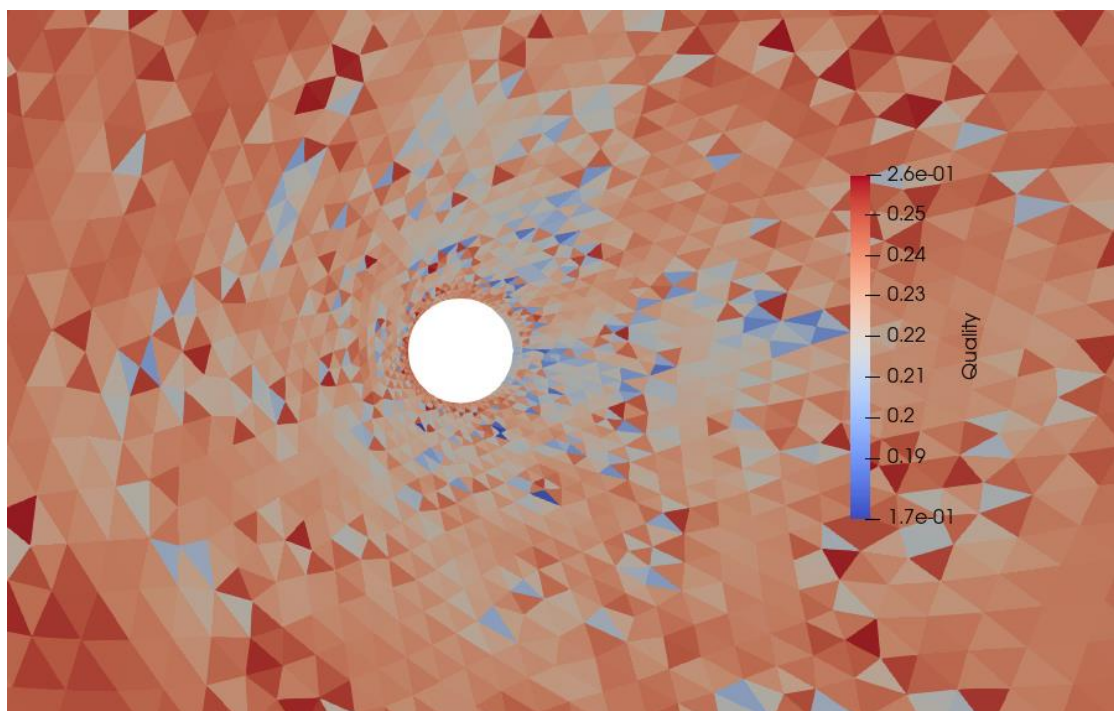
No primeiro caso, da metodologia de Antunes et al. (2015), observa-se através da Figura 24 e Figura 25, o estado final da malha e das qualidades dos seus elementos. No Gráfico 3, observa-se o valor da posição na direção x que o cilindro se encontra no momento que a qualidade de algum elemento da malha alcança o valor mínimo estabelecido.

Figura 24 - Malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia de Antunes et al. (2015).



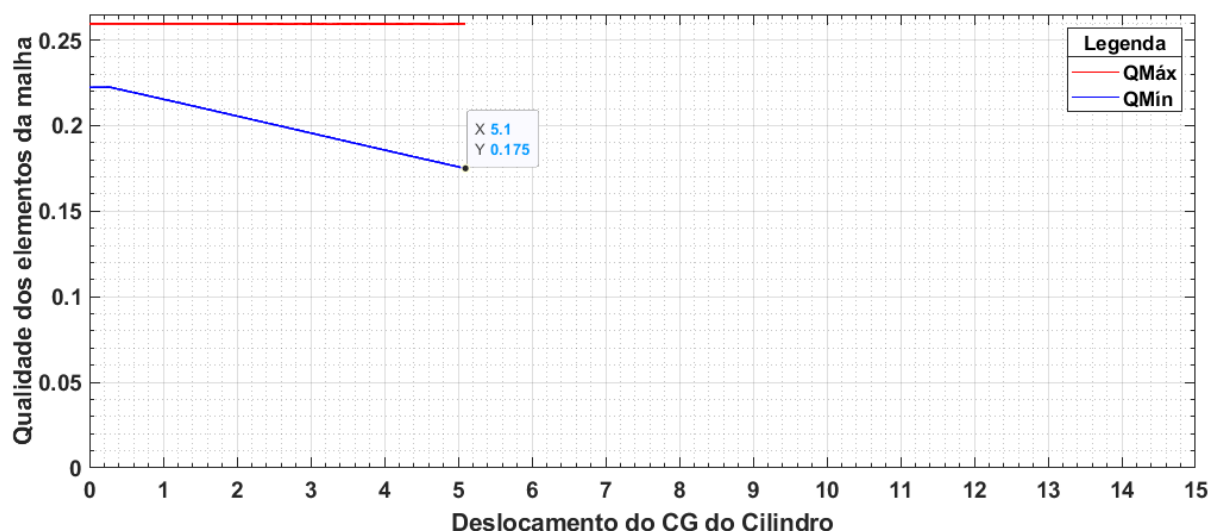
Fonte: O Autor (2021).

Figura 25 – Detalhe da malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia de Antunes et al. (2015).



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 3 - Gráfico Deslocamento x Qualidade dos elementos, metodologia de Antunes et al. (2015).

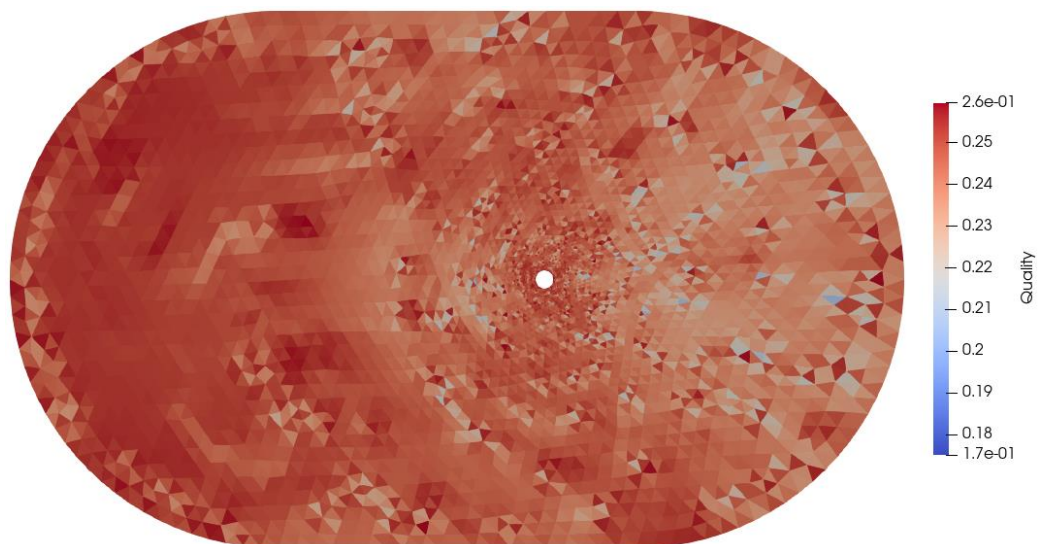


Fonte: O Autor (2021).

Já no segundo caso, no qual é utilizada a metodologia apresentada neste trabalho, através da Figura 26 e Figura 27 é possível ver o estado da malha no momento que o cilindro se encontra na mesma posição máxima que a metodologia anterior permite alcançar. Na Figura 28 e Figura 29, observa-se o estado final da malha e das qualidades dos seus elementos. No Gráfico 4, é apresentado o valor da posição na direção x que o cilindro se encontra no momento que a qualidade de algum elemento da malha alcança o valor mínimo estabelecido.

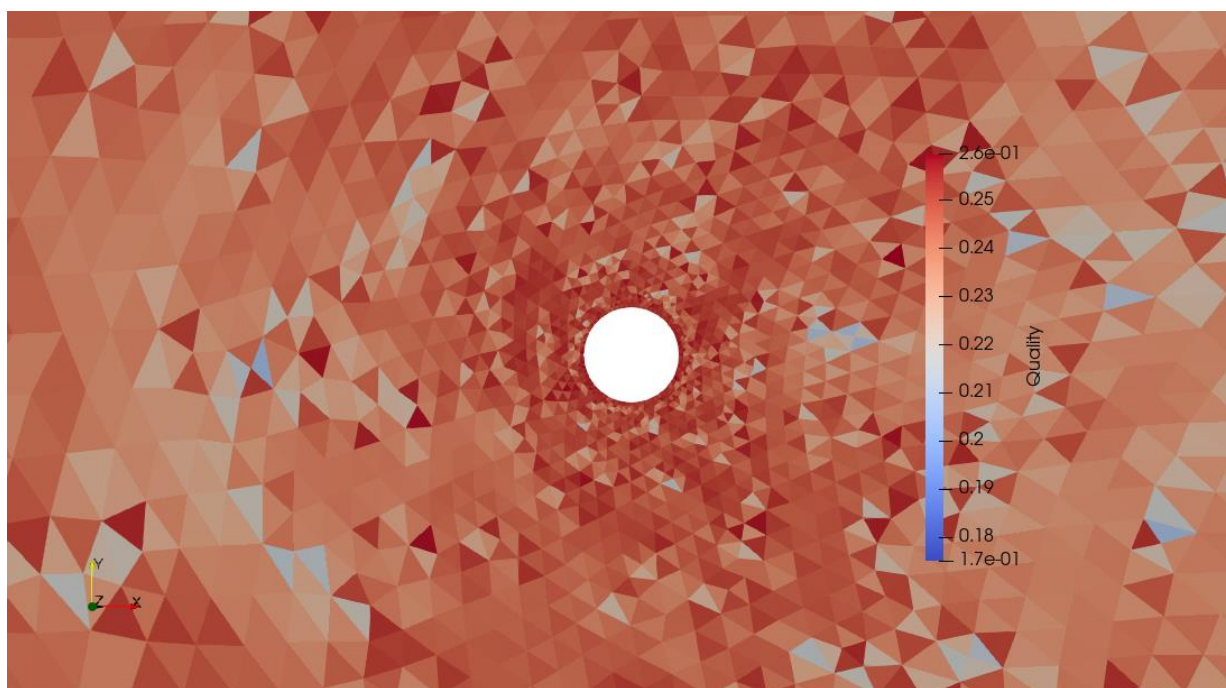
Aqui fica claro a vantagem da utilização desta metodologia na movimentação de malha frente à implementada por Antunes et al. (2015)

Figura 26 – Malha em que é utilizada a metodologia empregada neste trabalho no momento que alcança o deslocamento da malha que é utilizada a metodologia de Antunes et al. (2015).



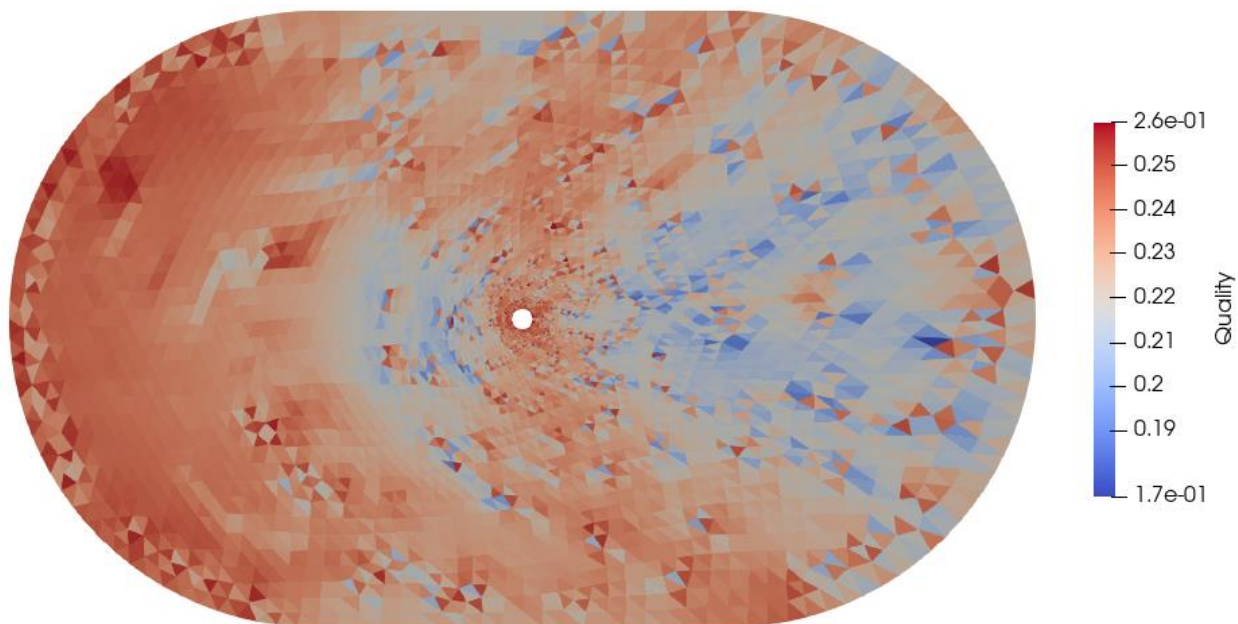
Fonte: O Autor (2021).

Figura 27 – Detalhe da malha em que é utilizada a metodologia empregada neste trabalho no momento que alcança o deslocamento da malha que é utilizada a metodologia de Antunes et al. (2015).



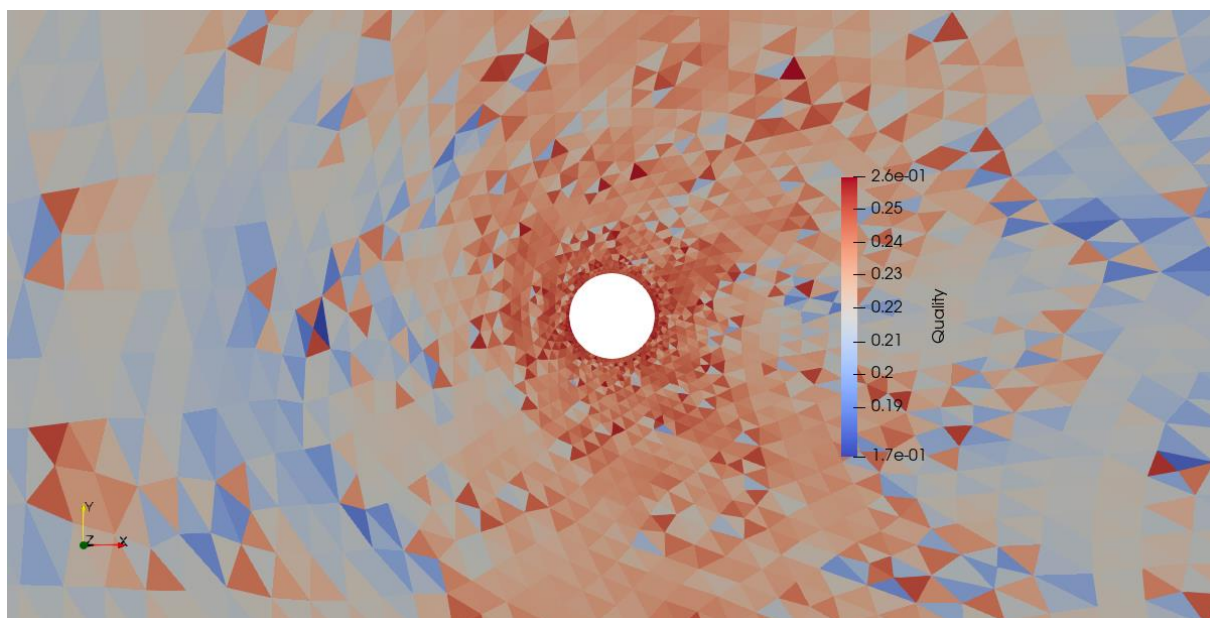
Fonte: O Autor (2021).

Figura 28 - Malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia empregada neste trabalho.



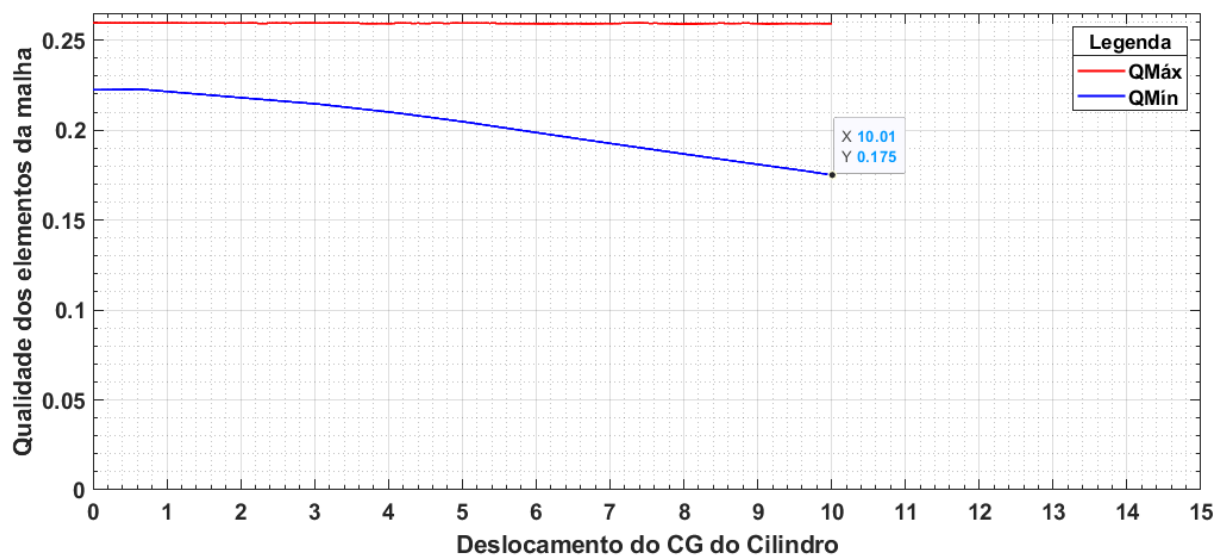
Fonte: O Autor (2021).

Figura 29 – Detalhe da malha na configuração em que algum elemento alcançou a qualidade mínima, utilizando a metodologia empregada neste trabalho.



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 4 - Gráfico Deslocamento x Qualidade dos elementos, metodologia empregada neste trabalho.



Fonte: O Autor (2021).

Tabela 4 - Comparativo entre metodologias apresentadas obtendo-se o deslocamento máximo por metodologia.

Análise	Este trabalho	ANTUNES et al. (2015)
Tempo necessário por <i>loop</i> (s)	3,13	0,64
Tempo total de todas as funções na simulação (s)	1215,27	132,80
Tempo total da função referente a movimentação de malha (s)	1080,87	55,26
Distância máxima alcançada pelo cilindro antes do fim da simulação (Unidades de comprimento característico)	10,01	5,1
Nº de total de iterações	1000	510

Fonte: O Autor (2021)

Tabela 5 - Comparativo entre metodologias apresentadas para se obter o mesmo deslocamento.

Análise	Este trabalho	ANTUNES et al. (2015)
Tempo necessário por <i>loop</i> (s)	3,13	0,64
Tempo total de todas as funções na simulação (s)	619,79	132,80
Tempo total da função referente a movimentação de malha (s)	551,24	55,26
Distância máxima alcançada pelo cilindro antes do fim da simulação (Unidades de comprimento característico)	5,1	5,1
Nº de total de iterações	1000	510

Fonte: Autor (2021)

Após inspecionar a Tabela 4 e Tabela 5 observa-se que o tempo de execução das funções referentes às metodologias implementadas neste trabalho são maiores que as utilizadas por Antunes et al. (2015). Com a vantagem de permitir maiores deformações da malha antes de se tornar necessário realizar o procedimento de remalhamento. O computador utilizado para realização deste comparativo possui as seguintes especificações:

1. Processador: AMD FX 8320e
2. Memória Ram: 8 GB DDR3 1866 Mhz
3. Armazenamento: 240 GB SSD Sata 3; 1 TB HDD WD 7200 rpm
4. Placa de vídeo: AMD Radeon RX 570 XXX Edition 8GB

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são apresentadas as simulações de problemas de IFE bidimensionais.

De maneira a manter a organização do trabalho, a seguir são enumeradas as simulações realizadas de escoamentos sobre:

1. NACA0012 – Rotação do perfil aerodinâmico
2. Cilindro – Efeito de *Lock-in*
3. Edifício River Place
 - a. Maior dimensão perpendicular ao escoamento
 - b. Maior dimensão paralela ao escoamento
 - c. Posição real
 - d. Problema de Otimização: Reduzir deslocamento máximo da estrutura na direção y

O ambiente de implementação do algoritmo é o software MATLAB®, com arquivo saída no formato compatível com o Paraview®, software de análise e visualização científica de dados. Todas as simulações foram realizadas em computadores pessoais com as seguintes configurações:

1. Notebook
 - a. Processador: Intel i7 7700hq
 - b. Memória Ram: 16 GB DDR4 2400 Mhz
 - c. Armazenamento: 256 GB SSD Nvme M.2; 1 TB HDD WD 5400 rpm
 - d. Placa de vídeo: Nvidia GTX 1050Ti 4GB
2. Desktop
 - a. Processador: AMD FX 8320e
 - b. Memória Ram: 8 GB DDR3 1866 Mhz
 - c. Armazenamento: 240 GB SSD Sata 3; 1 TB HDD WD 7200 rpm
 - d. Placa de vídeo: AMD Radeon RX 570 XXX Edition 8GB

As seguintes versões dos softwares utilizados neste trabalho foram:

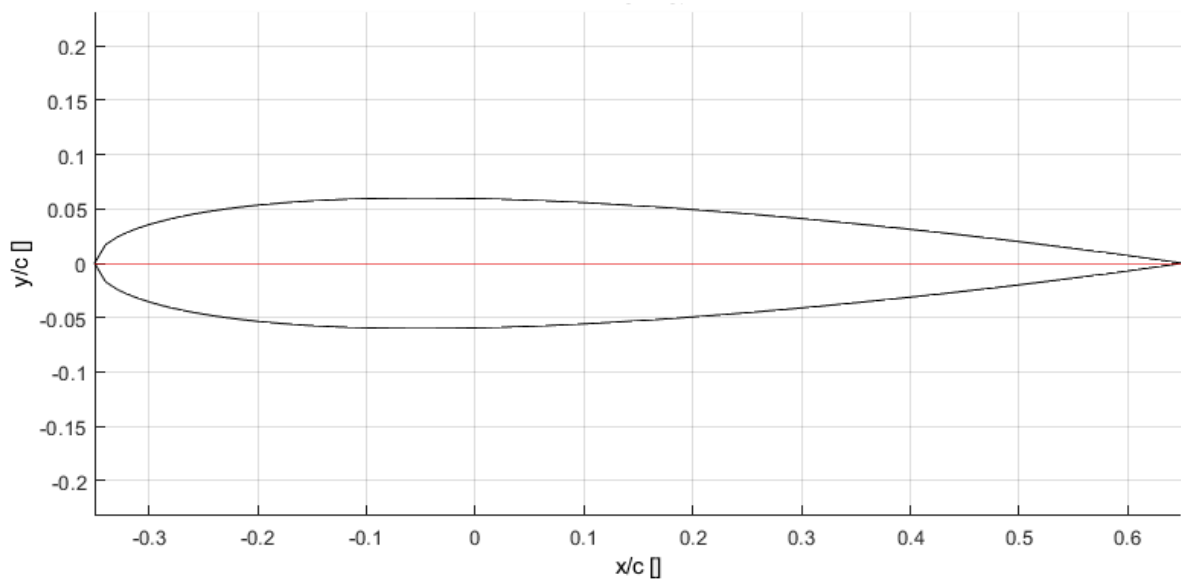
1. MATLAB R2020a
2. Paraview 5.8.0
3. gmsh 4.5.6

6.1 Perfil Aerodinâmico NACA0012

A simulação descrita no tópico a seguir foi realizada utilizando um algoritmo gerador de pontos no MATLAB para criar os pontos referentes a seção transversal do perfil aerodinâmico NACA0012, esses pontos foram introduzidos no programa de computador GMSH, responsável por gerar as malhas de elementos finitos utilizadas neste trabalho.

O comprimento de corda do perfil foi considerado como sendo unitário, esse comprimento por sua vez define o comprimento característico (CC) do problema.

Figura 30 - Gráfico gerado a partir de um algoritmo escrito no MATLAB, representando um perfil NACA0012 com o seu eixo longitudinal paralelo ao eixo x.



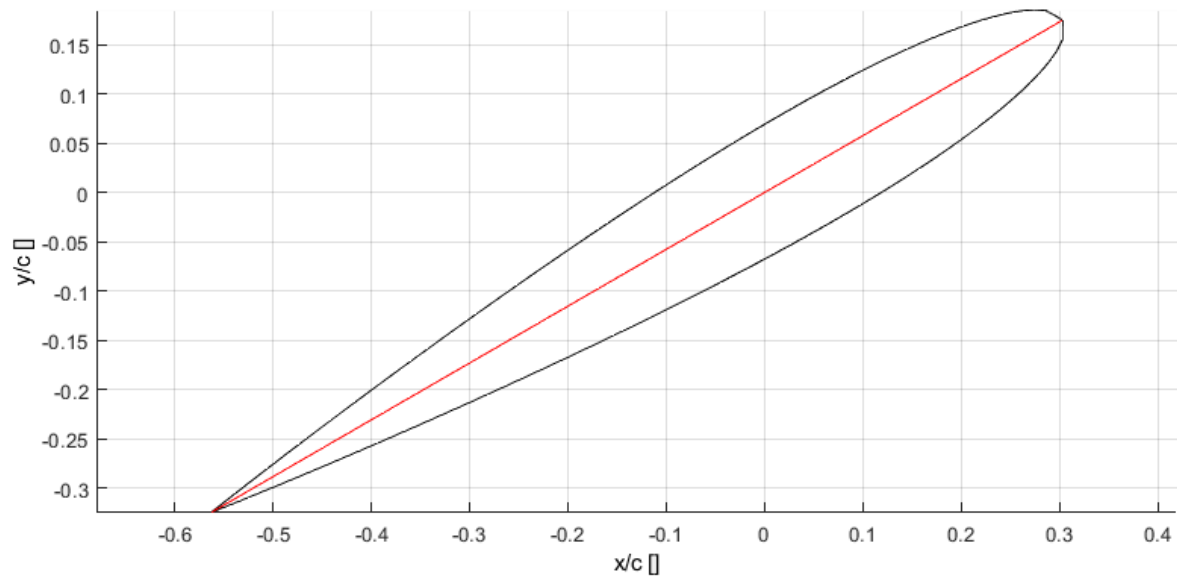
Fonte: O Autor (2021).

A configuração inicial consiste na seção transversal do perfil NACA0012 com um ângulo de ataque de 150° no sentido horário, com relação a direção do escoamento como pode ser visto na Figura 31. Nesta simulação numérica, foi gerada uma malha de elementos finitos triangulares, com um total de 5945 elementos (Figura 32 e Figura 33). O fluido definido na simulação possui as seguintes propriedades físicas, apresentadas na Equação 72, o que resulta em um número de Reynolds calculado na Equação 73.

$$\begin{cases} u = 1.0 \\ L = CL = 1 \\ \nu = 0.01 \end{cases} \quad (72)$$

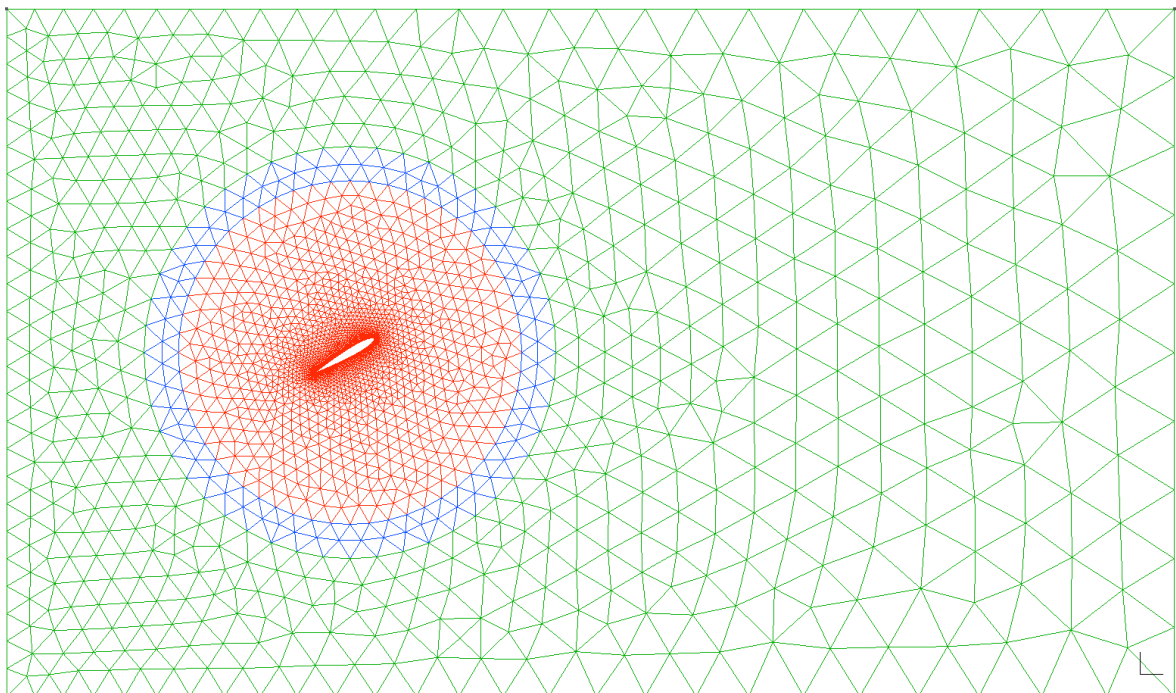
$$\text{Re} = \frac{\mu L}{\nu} = \frac{1.0 * 1.0}{0.01} = 100. \quad (73)$$

Figura 31 - Gráfico de 100 pontos gerados a partir de um algoritmo representando um perfil NACA0012 com o seu eixo longitudinal rotacionado 150° no sentido horário com relação ao eixo x.



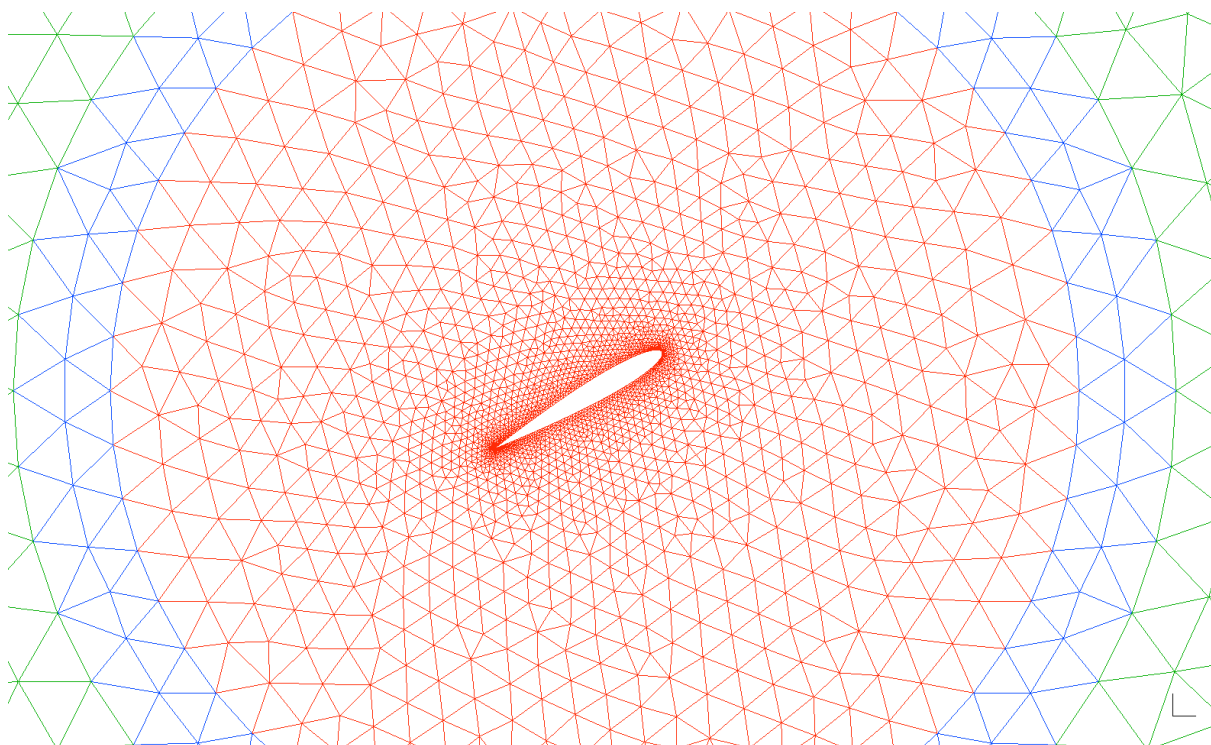
Fonte: O Autor (2021).

Figura 32 - Malha de elementos triangulares com o perfil NACA0012 posicionado com um ângulo de ataque de 150° com relação ao escoamento, com a região fixa (verde) e móveis, onde ocorrem a rotação dos elementos juntamente com a estrutura (vermelho) e a troca de arestas (azul).



Fonte: O Autor (2021)

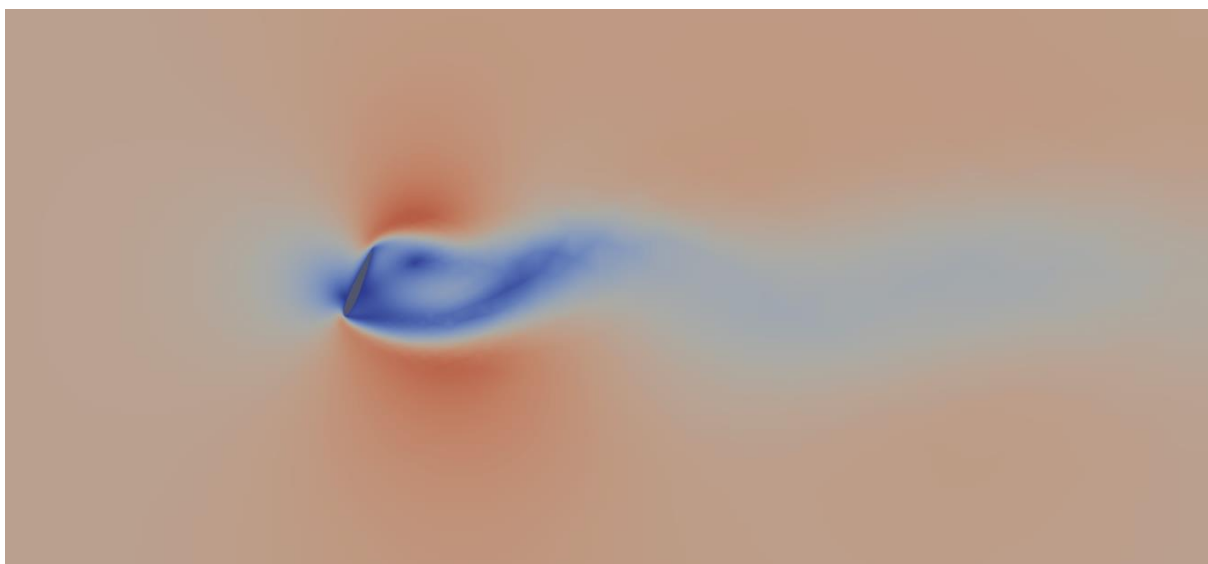
Figura 33 – Detalhe da malha de elementos triangulares com o perfil NACA0012 posicionado com um ângulo de ataque de 150° com relação ao escoamento, com a região fixa (verde) e móveis, onde ocorrem a rotação dos elementos juntamente com a estrutura (vermelho) e a troca de arestas (azul).



Fonte: O Autor (2021).

Na Figura 34, tem-se o campo de velocidades (magnitude) do fluido em um momento que a estrutura ainda está rotacionando, gerando assim perturbações no escoamento.

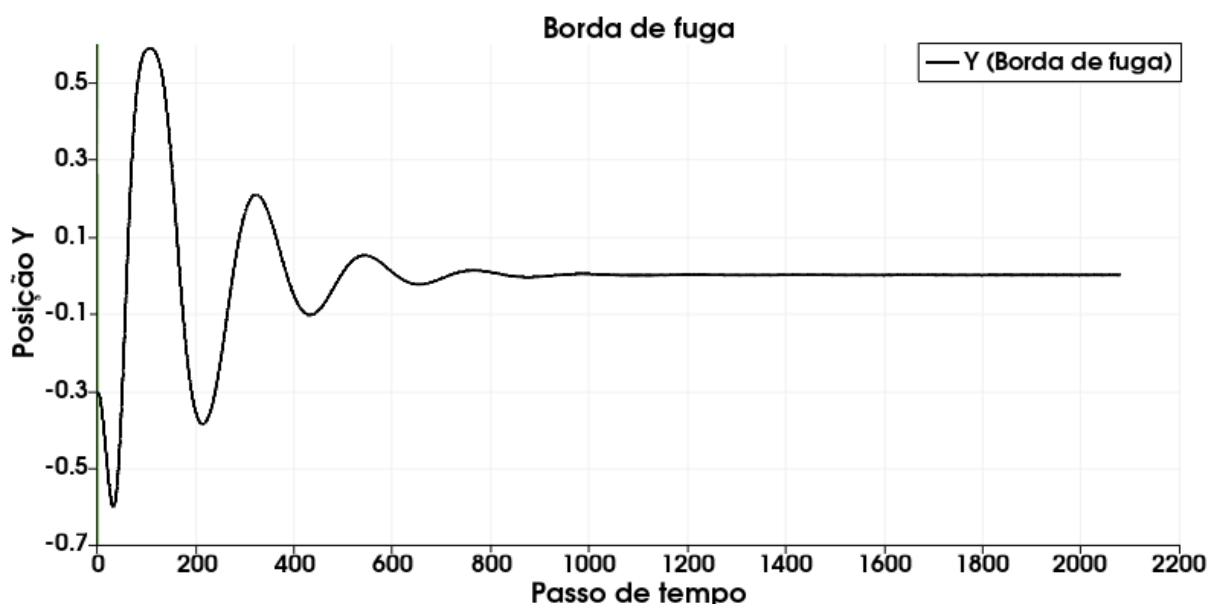
Figura 34 - Campo de velocidade (magnitude) do escoamento ao redor do perfil NACA0012.



Fonte: O Autor (2021).

De um total de 2100 iterações, foram necessárias 1100 até que a estrutura em questão, ou seja, a seção transversal do Perfil NACA0012 atingisse o equilíbrio, como mostra o Gráfico 5.

Gráfico 5 - Posição na direção Y do ponto da borda de fuga ao longo do tempo.



Fonte: O Autor (2021).

O equilíbrio é alcançado quando a corda do perfil, ou seja, a linha que une a borda de ataque com a borda de fuga, fica alinhada com a direção do escoamento.

6.2 Seção Transversal de um Cilindro

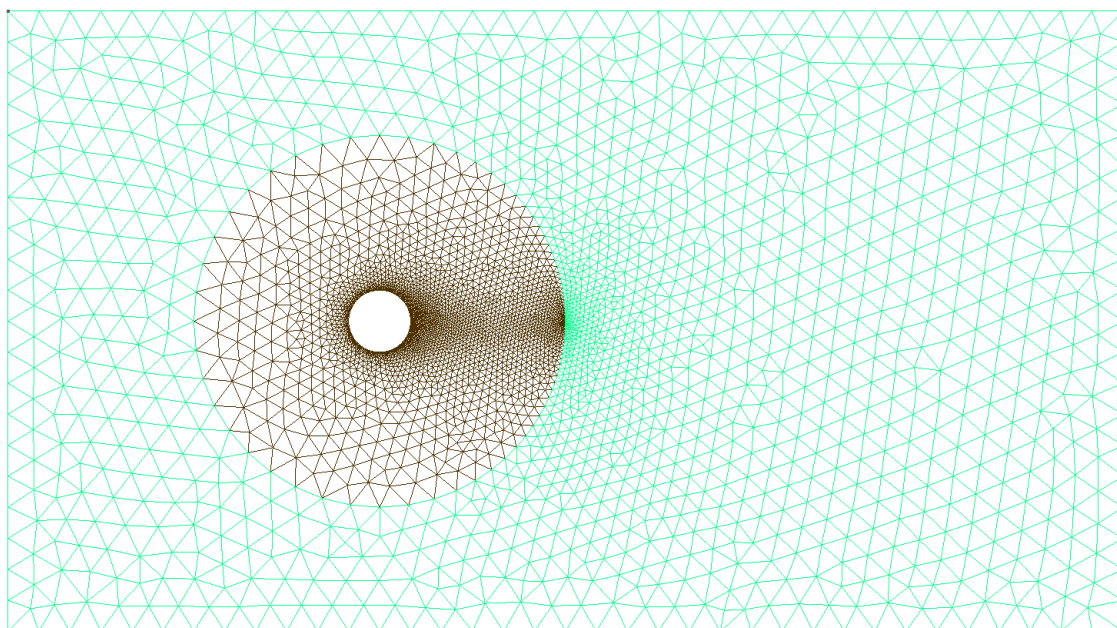
No presente caso, é apresentado a situação do cilindro imerso no escoamento em que ocorre o efeito de *Lock-in* mencionado na seção 5.4.2.1.

Foi gerada uma malha contendo 4044 nós e 7842 elementos triangulares (Figura 35 e Figura 36). O diâmetro do cilindro (CC), tem valor unitário.

Através da

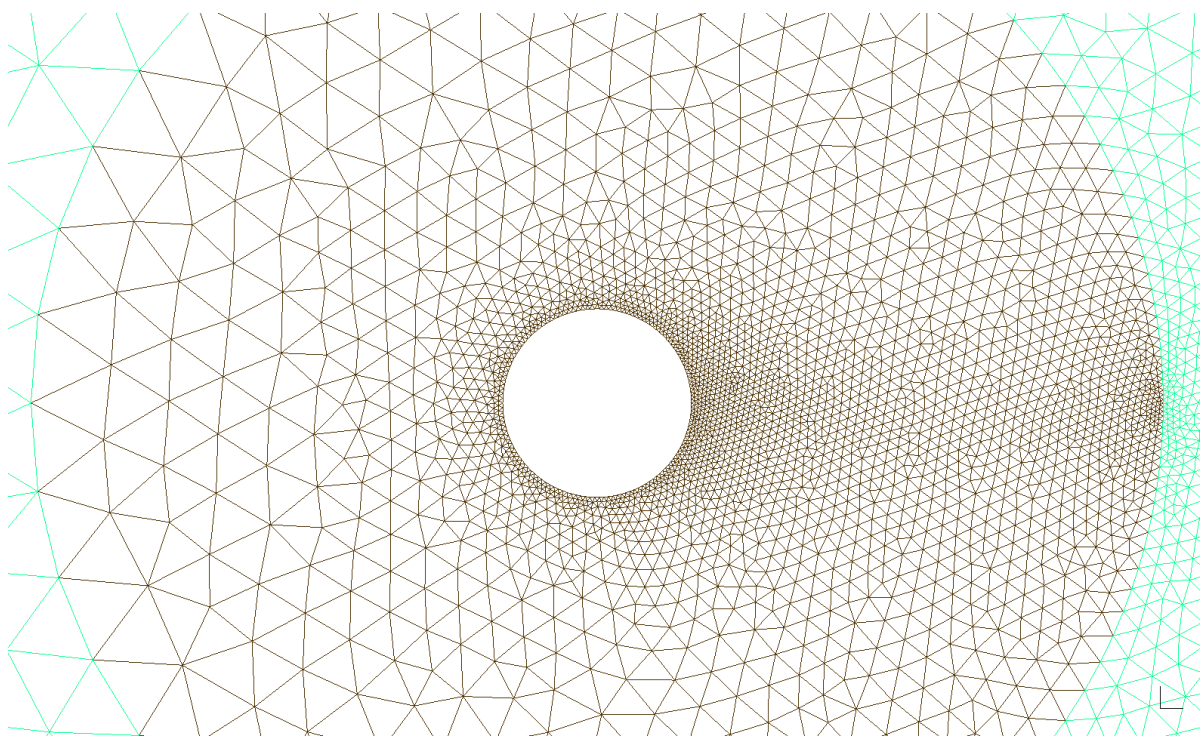
Figura 37 e da Figura 38, é possível identificar a formação da esteira de vórtices na região do escoamento posterior ao cilindro. O Gráfico 6 em conjunto com o Gráfico 7, comprova, através da superposição de ondas, o efeito de *lock-in*, no qual a frequência do deslocamento estrutural na vertical se iguala a frequência de desprendimento de vórtices.

Figura 35 - Malha de elementos triangulares com o cilindro posicionado no centro da região ALE (preto), com a região fixa (verde).



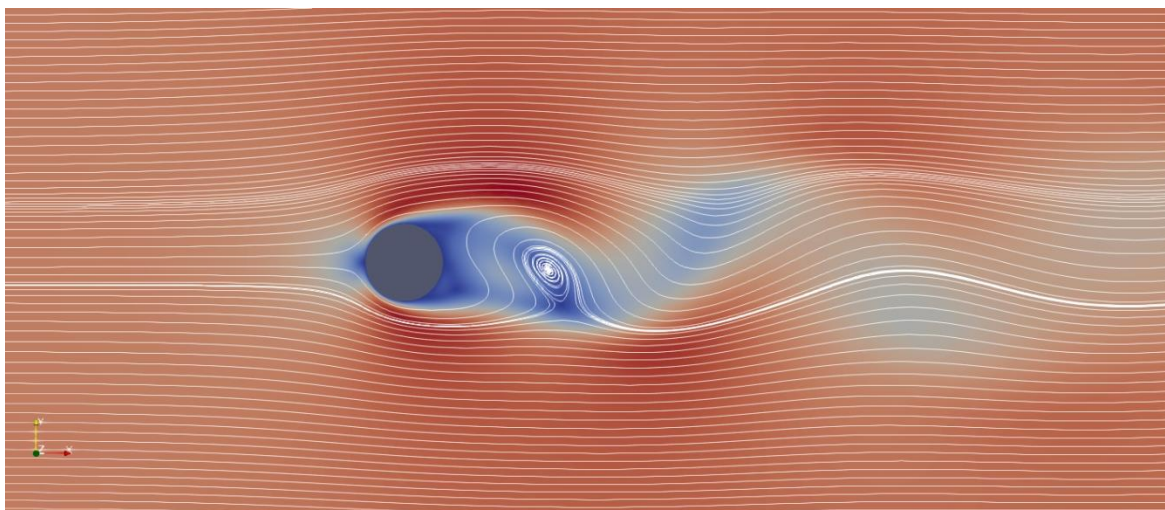
Fonte: O Autor (2021)

Figura 36 – Detalhe da malha de elementos triangulares com o cilindro posicionado no centro da região ALE (preto), com a região fixa (verde).



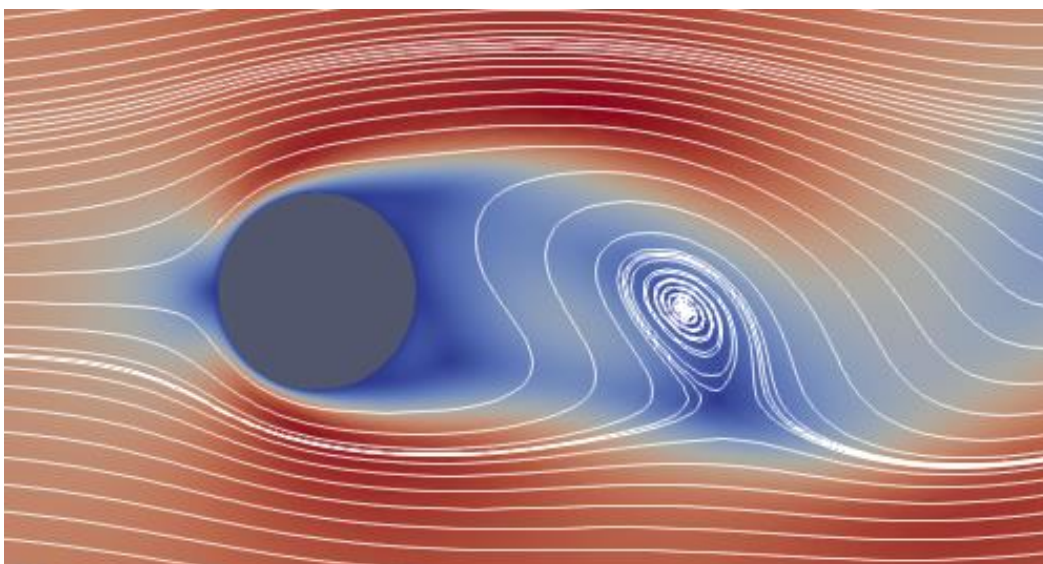
Fonte: O Autor (2021)

Figura 37 - Campo de velocidade (magnitude) e linhas de fluxo do escoamento ao redor do cilindro.



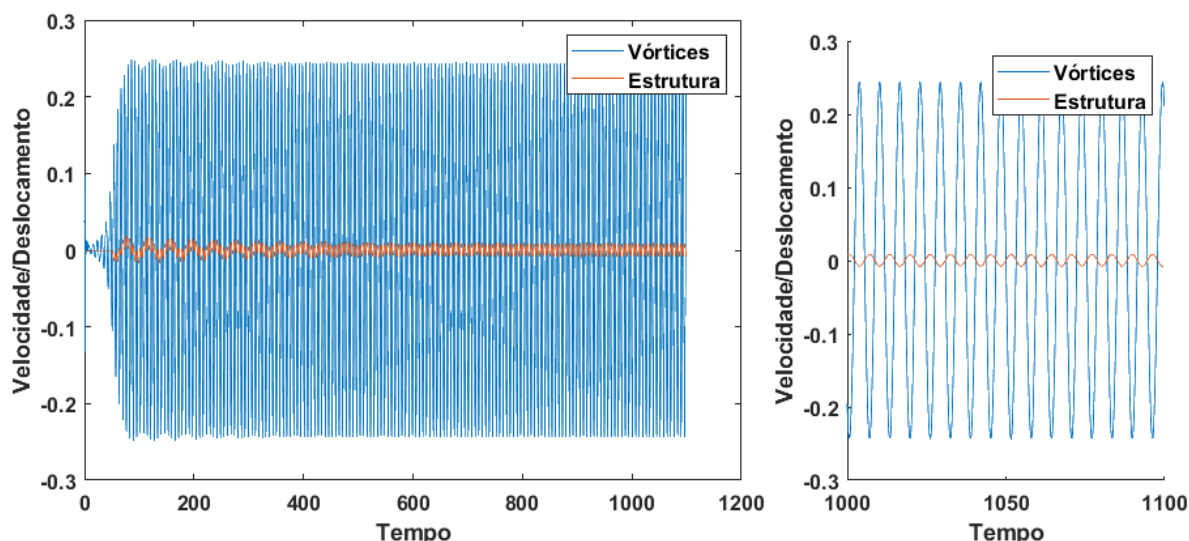
Fonte: O Autor (2021).

Figura 38 - Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo do escoamento ao redor do cilindro, atentar para a formação de vórtices na região posterior ao cilindro.



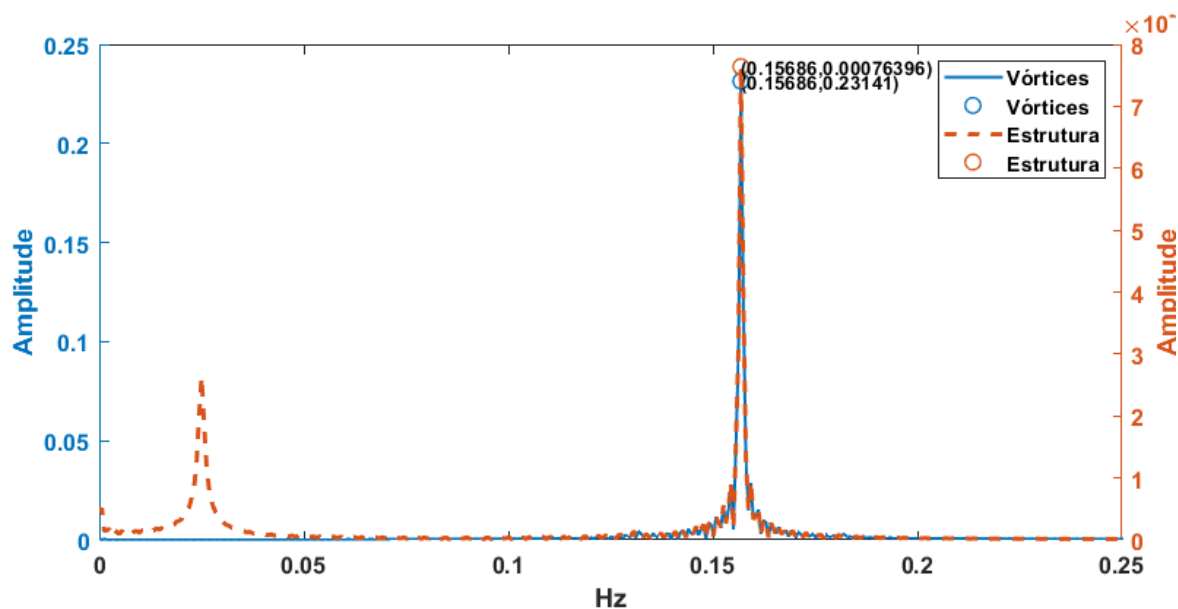
Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 6 - Gráficos Tempo x Velocidade (à esquerda) e detalhe de uma região do gráfico (à direita).



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 7 - Gráfico contendo a frequência de liberação dos vórtices (azul) e oscilação da estrutura na direção vertical (laranja), evidenciando a ocorrência do efeito de lock-in.



Fonte: O Autor (2021).

6.3 Edifício River Place

O edifício River Place, que fica localizado na Av. Rodrigues de Abreu, no bairro Mauricio de Nassau na cidade de Caruaru, Pernambuco (Figura 39). Conta com 29 pavimentos tipo, e mais 5 pavimentos de uso comum (semienterrado, térreo, mais 2 pavimento e cobertura).

Figura 39 - Localização do Edifício River Place relativo a outros pontos próximos.



Fonte: O Autor (2021).

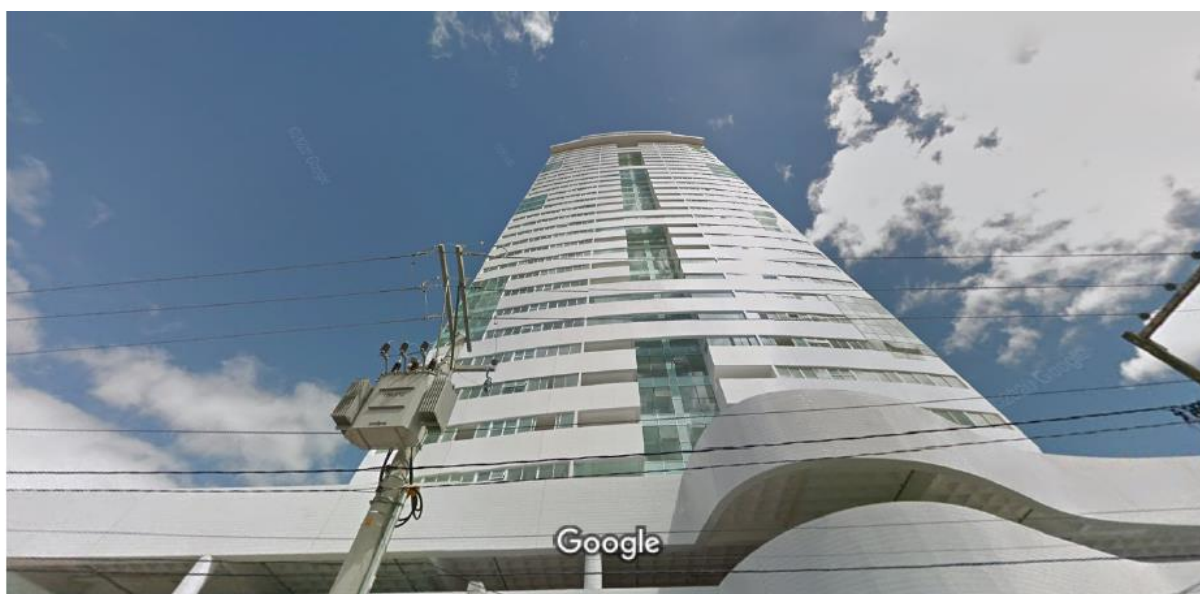
O projeto arquitetônico ficou por conta do arquiteto Ângelo Porto, enquanto a construção do mesmo foi realizada pela construtora local CP Construções. O empreendimento, com conceito inicial mostrado na Figura 40 foi anunciado em julho de 2011, teve suas obras iniciadas mais tarde no mesmo ano e concluídas em 2018. São apresentadas outras imagens mais atuais, com vista da fachada da edificação na Fotografia 1 e vista da lateral na Fotografia 2.

Figura 40 - Perspectiva frontal de um modelo tridimensional do edifício River Place.



Fonte: CP Construções (2020).

Fotografia 1 - Fachada do Edifício River Place ao nível da rua.



Fonte: Google Street View (2020).

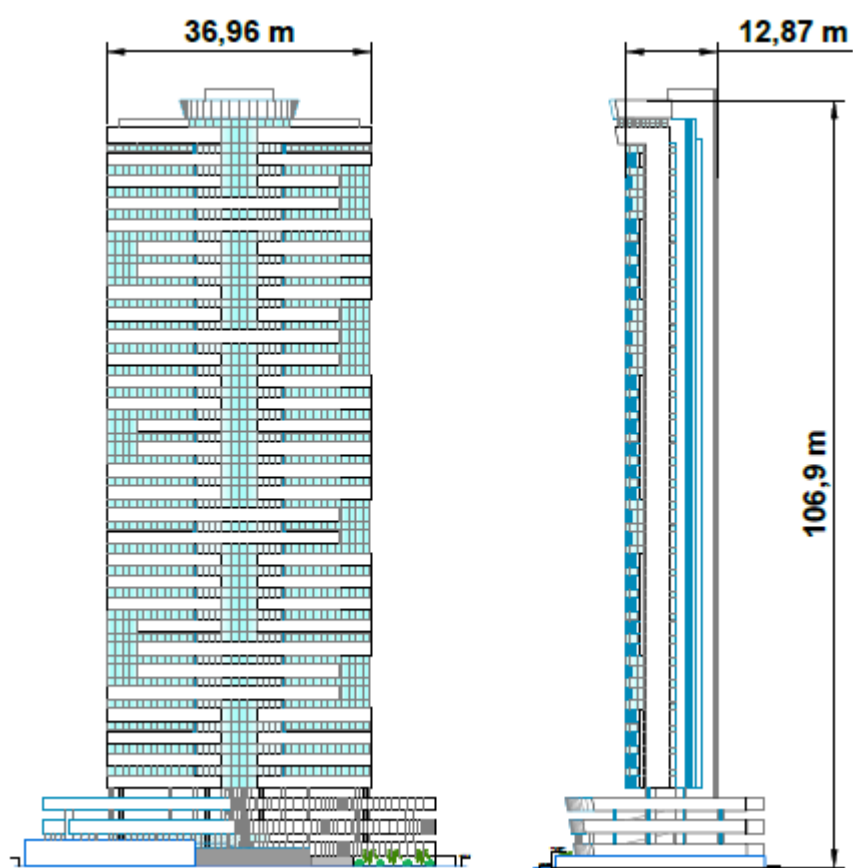
Fotografia 2 - Vista lateral do edifício River Place ao nível da rua.



Fonte: Google Street View (2020).

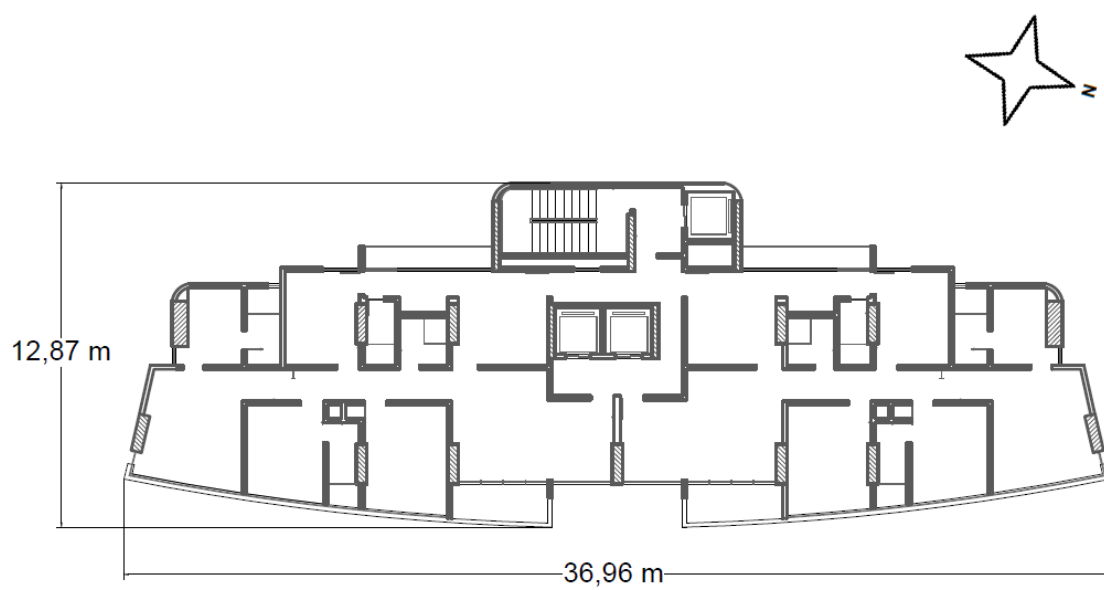
A seguir temos as plantas da fachada com vista frontal e lateral (Planta 1), com as medidas de largura, comprimento e altura da edificação, e a planta baixa do pavimento tipo com as dimensões largura e comprimento, como é possível inspecionar na Fonte: CP Construções (2020).

Planta 1 - Vista frontal e lateral da edificação com medidas.



Fonte: CP Construções (2020).

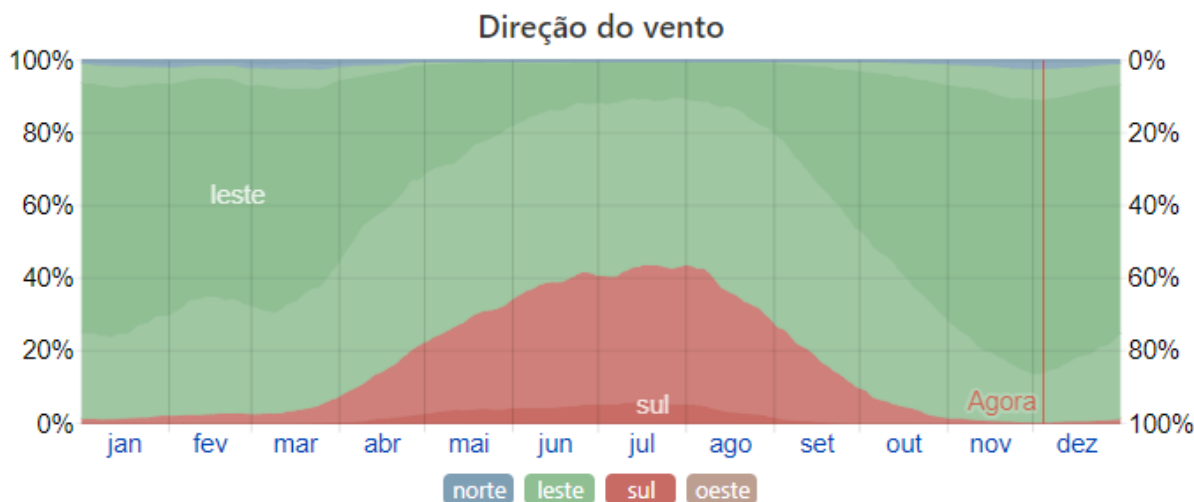
Planta 2 - Planta baixa do Edifício River Place (Pavimento Tipo).



Fonte: CP Construções (2020)

Por fim, tem-se a informação da direção média dos ventos na cidade de Caruaru (Figura 41). A direção predominante durante todo o ano é do Leste, ou seja, o vento sopra no sentido partindo do Leste para o Oeste.

Figura 41 - Direção média dos ventos na cidade de Caruaru.



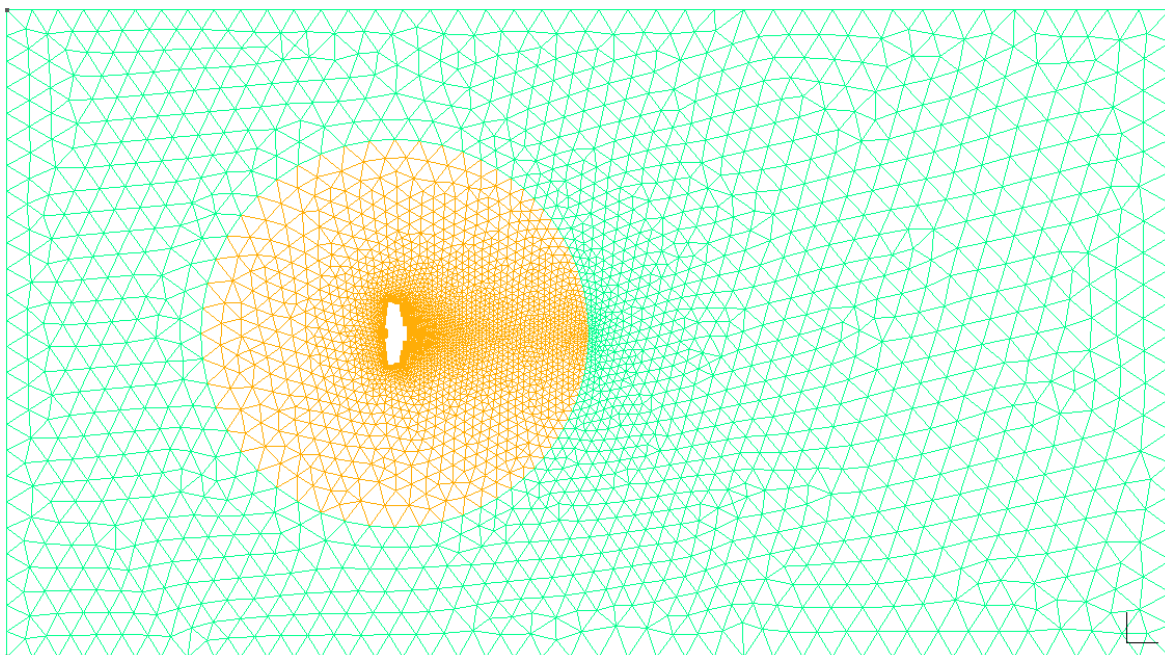
Fonte: Weather Spark (2020).

A seguir são apresentadas 4 situações. Nas duas primeiras são analisados casos hipotéticos, nos quais a edificação está posicionada de maneira que a maior dimensão desta esteja perpendicular à direção do escoamento do fluido (ar) e paralela a direção do escoamento, respectivamente. No terceiro caso a estrutura está posicionada de maneira a simular a situação real, em que o escoamento incide com uma certa angulação na fachada da edificação. Por fim, é feito um estudo paramétrico visando otimizar a edificação, diminuindo o seu deslocamento, através do posicionamento de uma segunda edificação na região posterior da primeira, relativo ao escoamento.

6.3.1 Maior Dimensão Perpendicular ao Escoamento

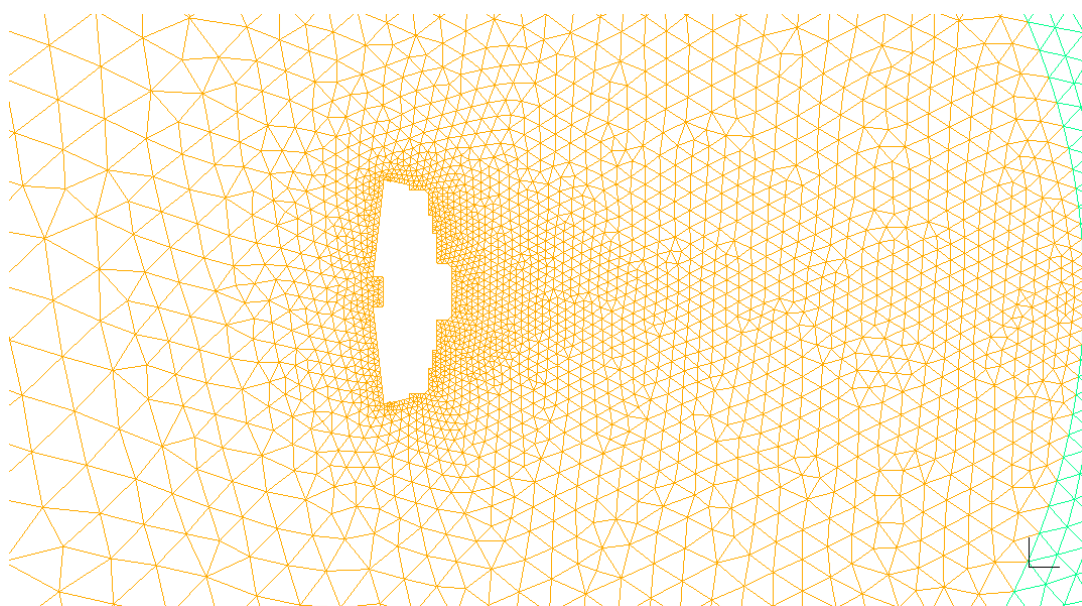
No presente caso foi gerada uma malha contendo 7340 elementos triangulares. Na Figura 42 e Figura 43 é possível inspecionar a malha obtida. A malha se divide numa região Euleriana (verde) e região ALE (amarelo).

Figura 42 - Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado com a maior dimensão perpendicular ao escoamento, com as regiões fixas (verde) e móveis (amarelo).



Fonte: O Autor (2021)

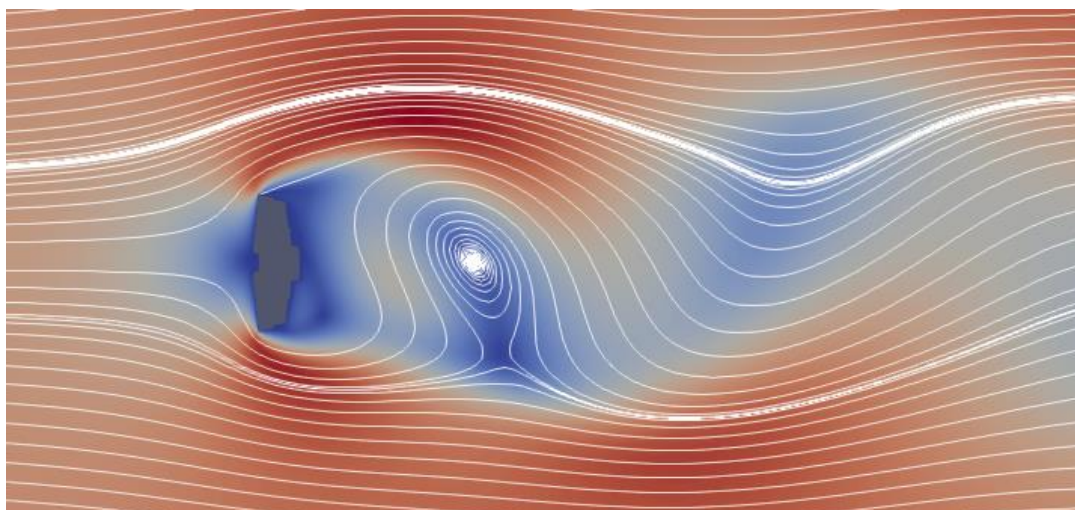
Figura 43 – Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão perpendicular ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.



Fonte: O Autor (2021).

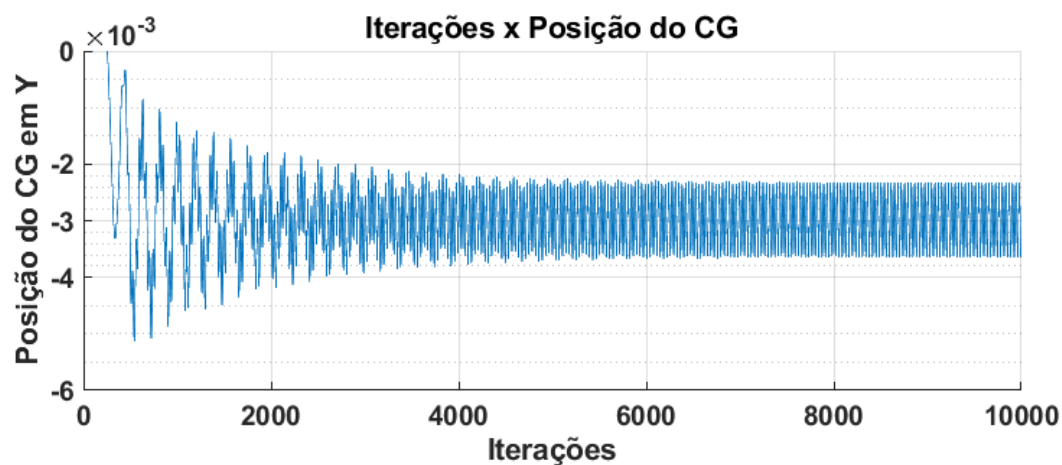
É possível observar, na Figura 44 a formação da esteira de vórtices a jusante da edificação, causando assim, instabilidades e oscilações. Essa análise é confirmada através do Gráfico 8, que mostra o deslocamento do edifício na direção Y ao longo do tempo.

Figura 44 - Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 8 - Posição do CG do edifício na direção y ao longo do tempo.

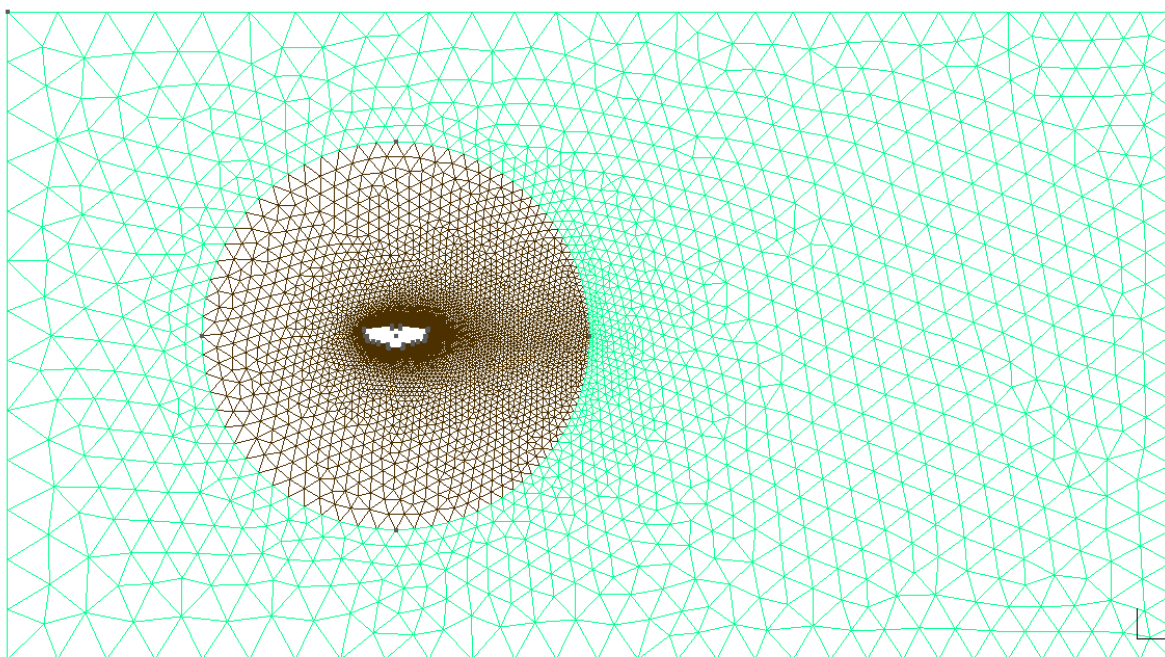


Fonte: O Autor (2021).

6.3.2 Maior Dimensão Paralela ao Escoamento

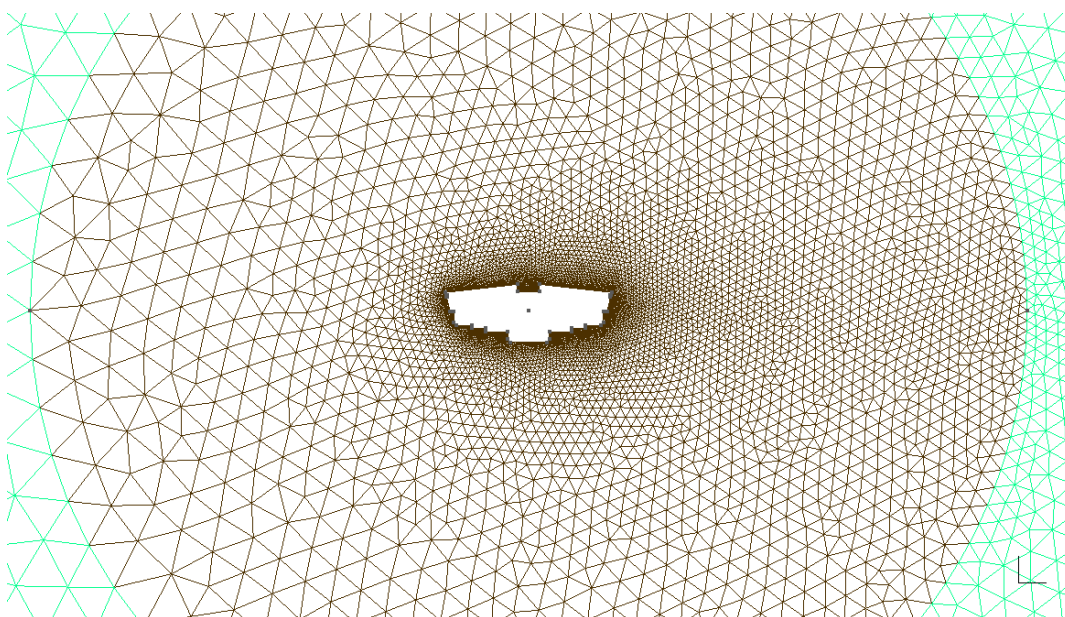
No presente caso foi gerada uma malha contendo 13517 elementos triangulares. Na Figura 42 e Figura 43 é possível inspecionar a malha obtida. A malha se divide numa região Euleriana (preto) e região ALE (amarelo).

Figura 45 - Malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão paralela ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.



Fonte: O Autor (2021)

Figura 46 - Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado com a maior dimensão paralela ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.

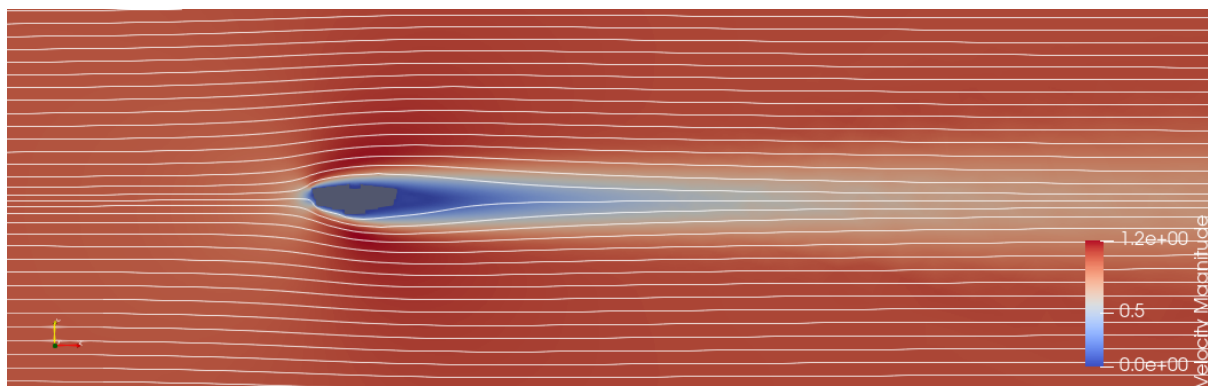


Fonte: O Autor (2021).

A simulação conta com os mesmos parâmetros da seção 6.1 para o fluido, ou seja, com um número de Reynolds igual a 100. No Gráfico 9 observa-se o

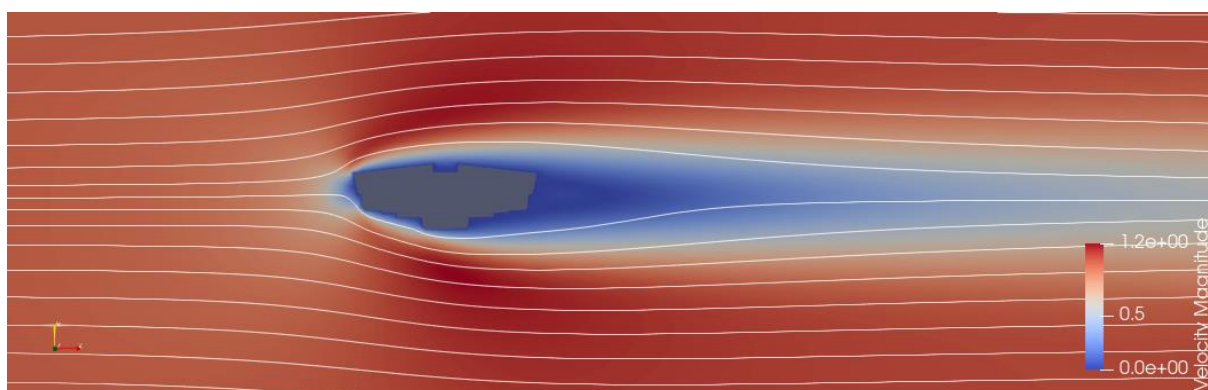
deslocamento da estrutura ao longo do tempo. Ao início da simulação a edificação encontra-se em repouso na coordenada $y = 0$, a partir da interação da edificação com o escoamento ao seu redor, ela é tirada do repouso e oscila até encontrar um novo ponto de equilíbrio $y = 0,3318$.

Figura 47 - Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.



Fonte: Autor (2021).

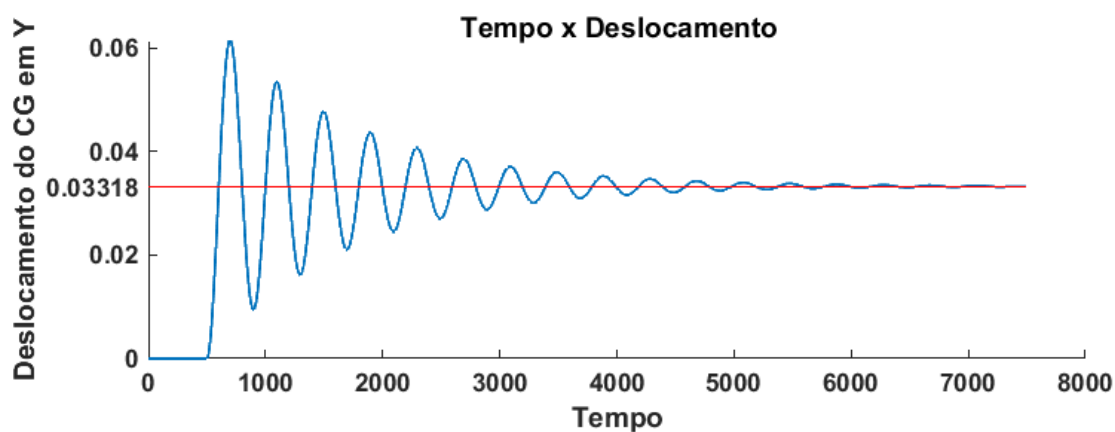
Figura 48 – Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.



Fonte: Autor (2021).

Através de inspeção, nota-se que, diferentemente do caso apresentado no tópico 6.3.1, aqui não ocorre a formação da esteira de vórtices devido ao formato quase que aerodinâmico do edifício somado a baixa velocidade do escoamento.

Gráfico 9 - Posição do CG do edifício na direção y ao longo do tempo.

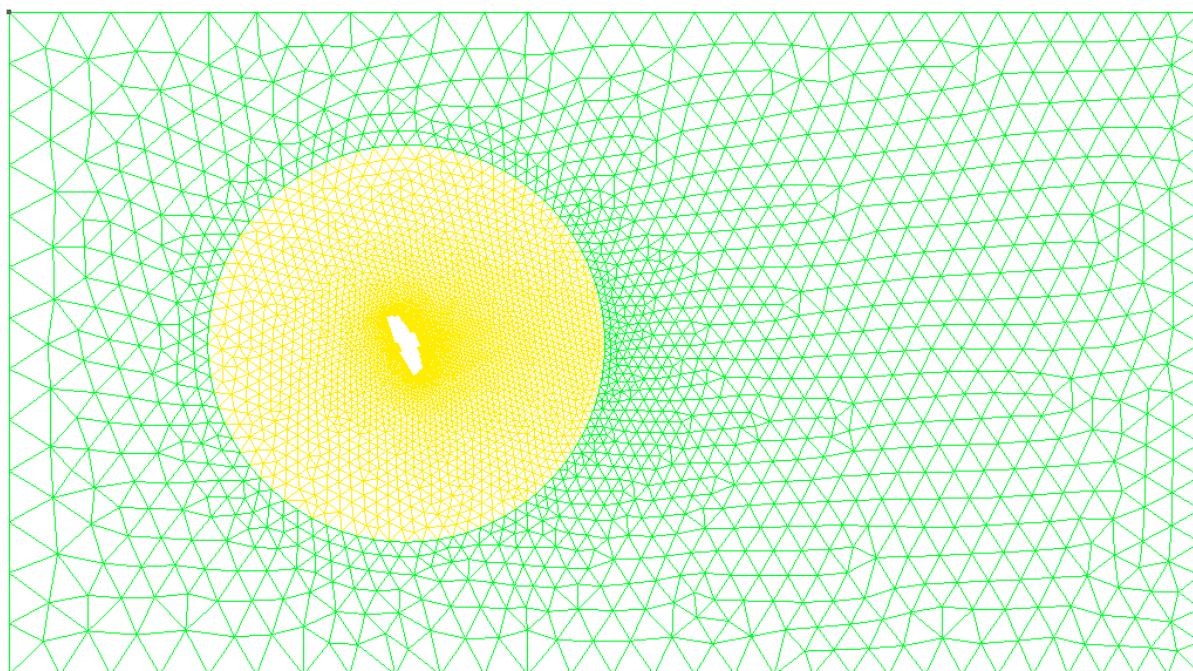


Fonte: O Autor (2021).

6.3.3 Posição Real da Estrutura com Relação ao Escoamento

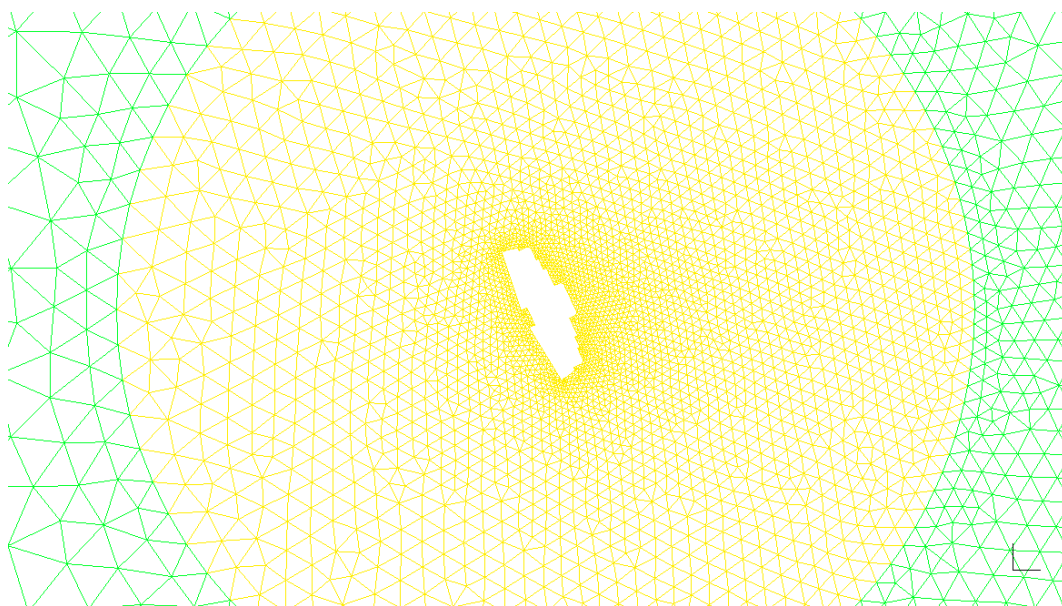
Para o caso em que é simulado a posição real do edifício com relação a incidência do vento, foi gerada uma malha contendo 8692 elementos triangulares. A malha pode ser vista na Figura 49 com detalhe na Figura 50.

Figura 49 - Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 50 – Detalhe da malha de elementos triangulares com a seção transversal do Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento, com as regiões Euleriana em verde e ALE em amarelo.

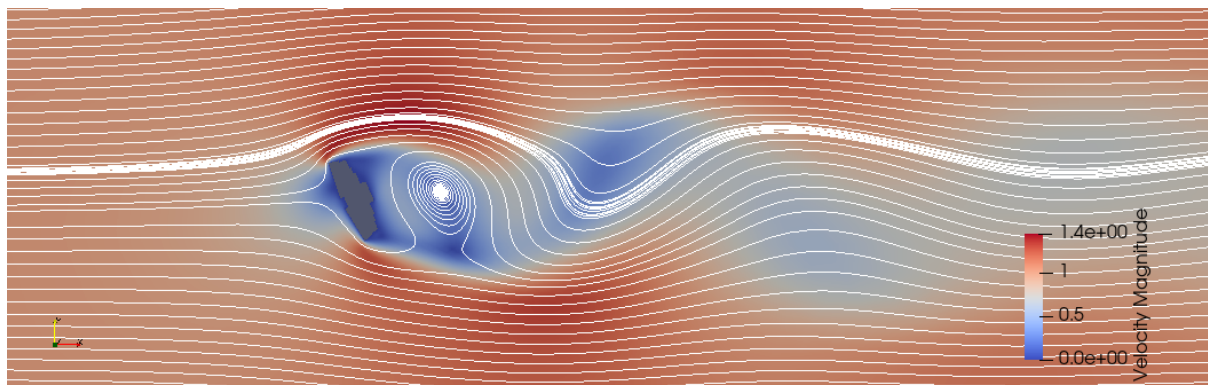


Fonte: O Autor (2021).

Neste caso também houve a formação da esteira de vórtices à jusante da edificação, como é possível observar na Figura 51, causando assim instabilidade nesta, e conseqüentemente, a sua oscilação. À princípio, os maiores deslocamentos da estrutura ocorrem devido aos esforços causados pelo escoamento. Esses deslocamentos iniciais vão cessando à medida que a estrutura vai dissipando a energia de movimento através de mecanismos internos e externos, fazendo com que esta encontre um novo ponto de equilíbrio. Após a estrutura ter um novo ponto de equilíbrio causado pelo escoamento, ela continua a oscilar em torno deste ponto, dessa vez devido ao desprendimento dos vórtices.

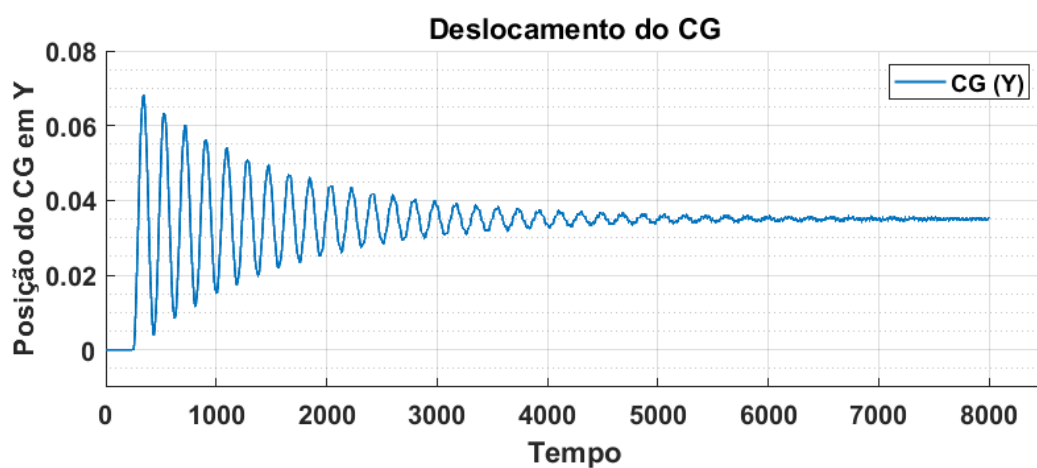
Essa análise é confirmada através do Gráfico 10 e Gráfico 11, que mostra o deslocamento do edifício na direção Y ao longo do tempo devido à esteira de vórtices.

Figura 51 - Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo para o edifício posicionado de acordo com a posição real.



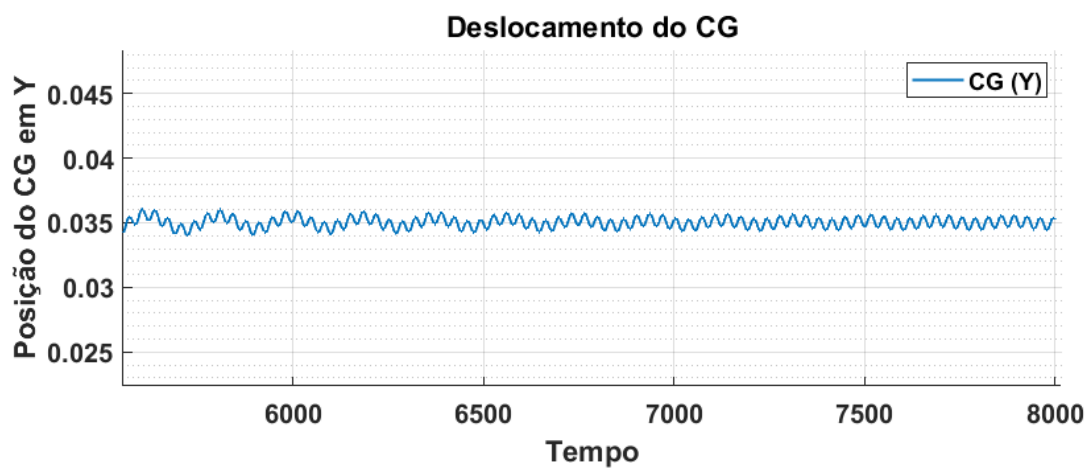
Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 10 - Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.



Fonte: O Autor (2021).

Gráfico 11 - Detalhe do gráfico: Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.



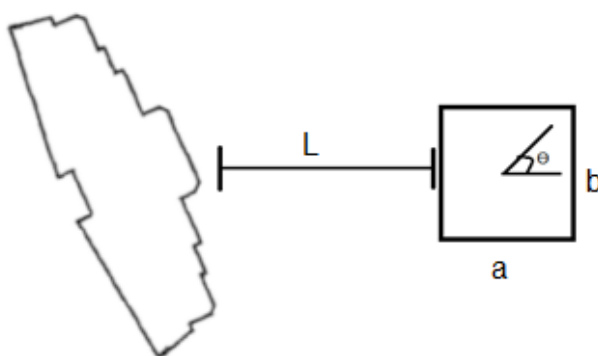
Fonte: O Autor (2021).

6.3.4 Problema de Otimização: Reduzir Deslocamento Máximo da Estrutura na Direção y

Limitar o deslocamento lateral é um aspecto preponderante no planejamento e construção de edifícios de elevada altura. Uma das causas mais comuns desses deslocamentos são as vibrações induzidas por ventos, os quais a edificação está sujeita. Dentre os diversos tipos de movimentações que o escoamento do ar pode causar na estrutura, aqui será analisado o caso de desprendimentos de vórtices.

Busca-se limitar esse tipo de movimento levando em consideração as tensões induzidas na estrutura e o conforto daqueles que irão habitá-la, principalmente nos andares mais altos. A solução adotada aqui para reduzir os deslocamentos foi introduzir uma segunda estrutura localizada posteriormente à primeira, relativo ao sentido do escoamento como pode ser observado na Figura 52.

Figura 52 – Representação do problema analisado.



Fonte: O Autor (2021).

Foi realizado um estudo paramétrico utilizando a MSR, descrita na seção 5.5, para a obtenção das características da segunda estrutura que resultassem no menor deslocamento possível da primeira estrutura, além disso, também se utilizou o software Minitab 19 para tratamento estatístico dos dados. O modelo de regressão utilizado foi o modelo quadrático completo da Equação 74, ou seja, com os termos lineares, a interação entre os termos lineares e os termos quadráticos. Os fatores escolhidos para a obtenção da Superfície de Resposta e seus respectivos níveis utilizados constam na Tabela 6.

$$y(x_1, x_2, x_3) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 \quad (74)$$

Na Tabela 7 e Tabela 8 é apresentado o conjunto de experimentos realizados, um total de 15 experimentos, sendo 8 experimentos de 2^3 fatorial, 1 ponto central e 6 pontos axiais.

Tabela 6 - Fatores dos experimentos e respectivos níveis utilizados.

Níveis	Nível Baixo (-)	Nível Central (0)	Nível Alto (+)
Distância entre estruturas (L)	0.5*CC	1.0*CC	1.5*CC
Razão de aspecto	a=b	a=2*b	a=3*b
Ângulo	0°	45°	90°

Fonte: O Autor (2021).

Tabela 7 – Matriz de planejamento.

Experimento	Distância entre as estruturas (L)	Razão de Aspecto (AR)	Ângulo da estrutura (θ)	Deslocamento Máximo da Estrutura na direção y
Fatorial	1	-	-	0.03171
	2	+	-	0.02809
	3	-	+	0.03000
	4	+	+	0.03178
	5	-	-	0.03171
	6	+	-	0.02809
	7	-	+	0.02827
	8	+	+	0.02880
Ponto central	9	0	0	0.03159
Pontos axiais	10	-	0	0.02642
	11	+	0	0.02498
	12	0	-	0.03028
	13	0	+	0.02980
	14	0	0	0.03020
	15	0	0	0.03050

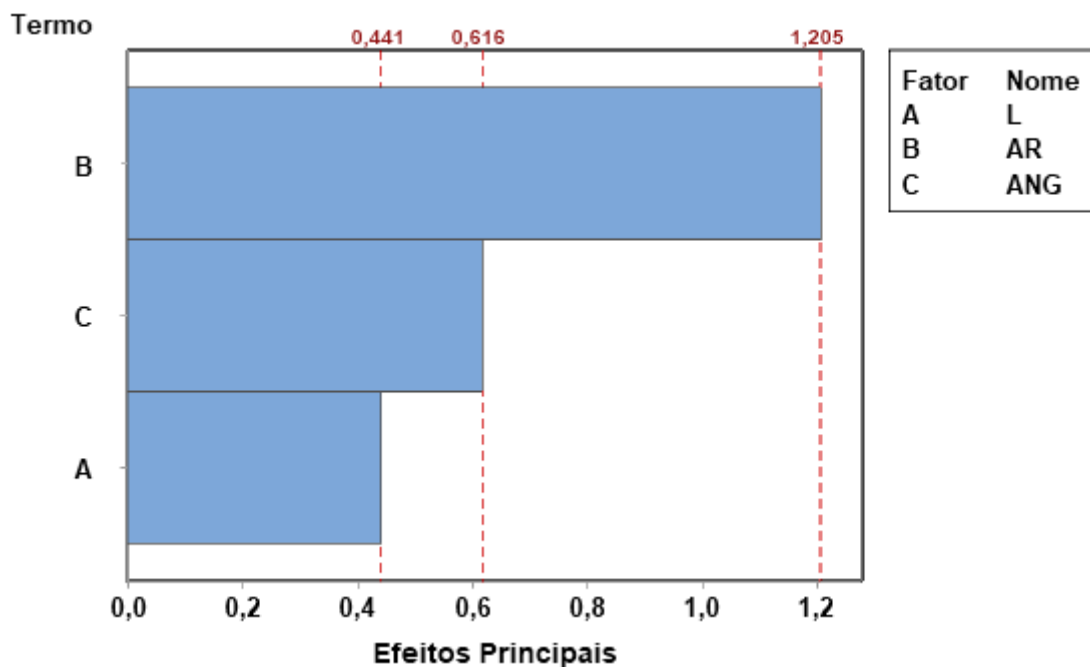
Fonte: O Autor (2021).

Na Tabela 7 e Tabela 8 é possível observar os experimentos realizados, constando os respectivos níveis e suas influências nas respostas, ou seja, no deslocamento da estrutura. Nesta tabela, os sinais “–” e “+” são os níveis baixos e altos, respectivamente, e os números zeros correspondem ao nível central, são apresentados na Tabela 6. Cada experimento produz uma resposta, cujo valor é útil para definir o grau de importância dos fatores. Vale ressaltar que os valores numéricos dos níveis definidos na Tabela 6 são de menor importância, pois a análise dos experimentos é baseada na função resposta e nos níveis que definiram tal resposta, ou seja, os níveis alto, baixo e central correspondentes.

O Gráfico 12 mostra a influência dos efeitos principais, observa-se que o fator que mais influencia a função resposta (deslocamento do edifício) é a razão de aspecto da segunda edificação.

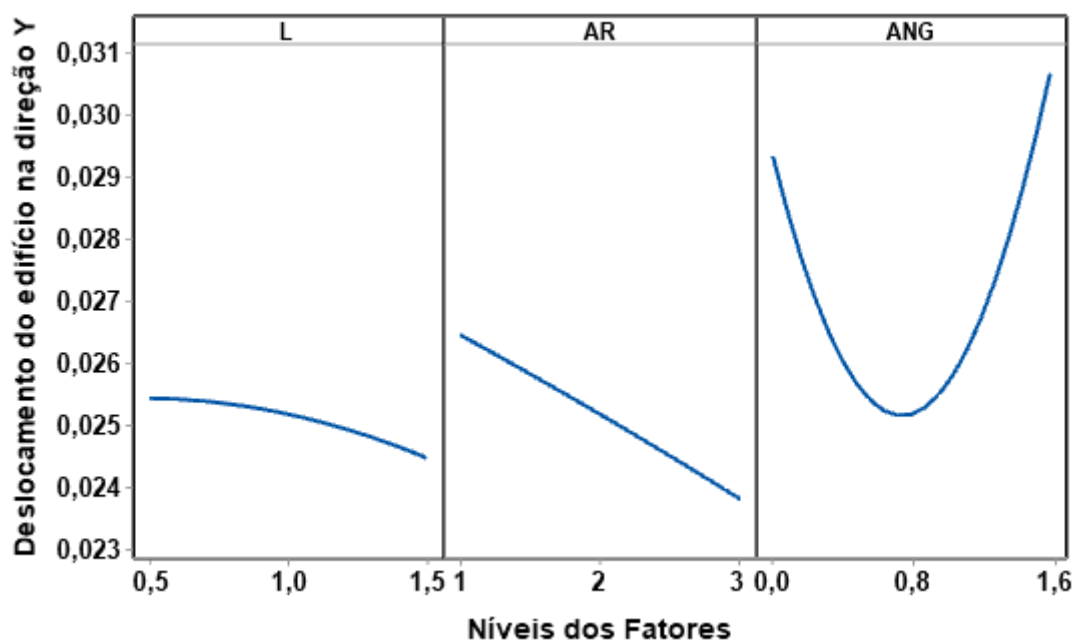
No Gráfico 13 são apresentados os fatores analisados, a interpolação dos seus respectivos níveis e como estes alteram o comportamento médio da função resposta (deslocamento).

Gráfico 12 - Estimativas dos efeitos principais.



Fonte: O Autor (2021).

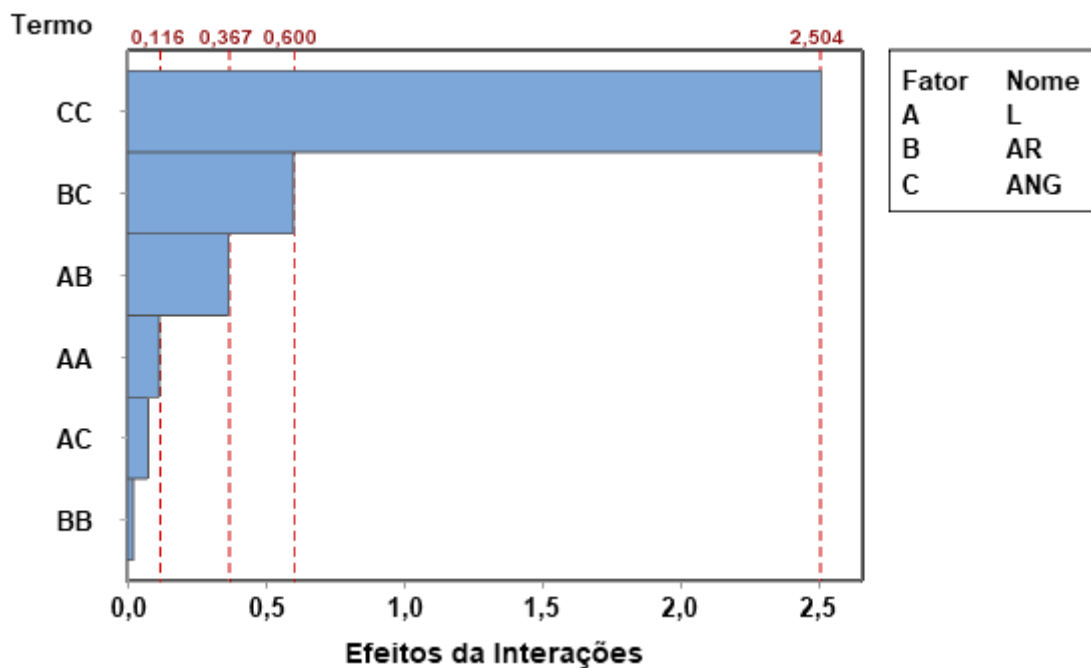
Gráfico 13 - Influência dos efeitos principais no deslocamento da estrutura.



Fonte: Autor (2021).

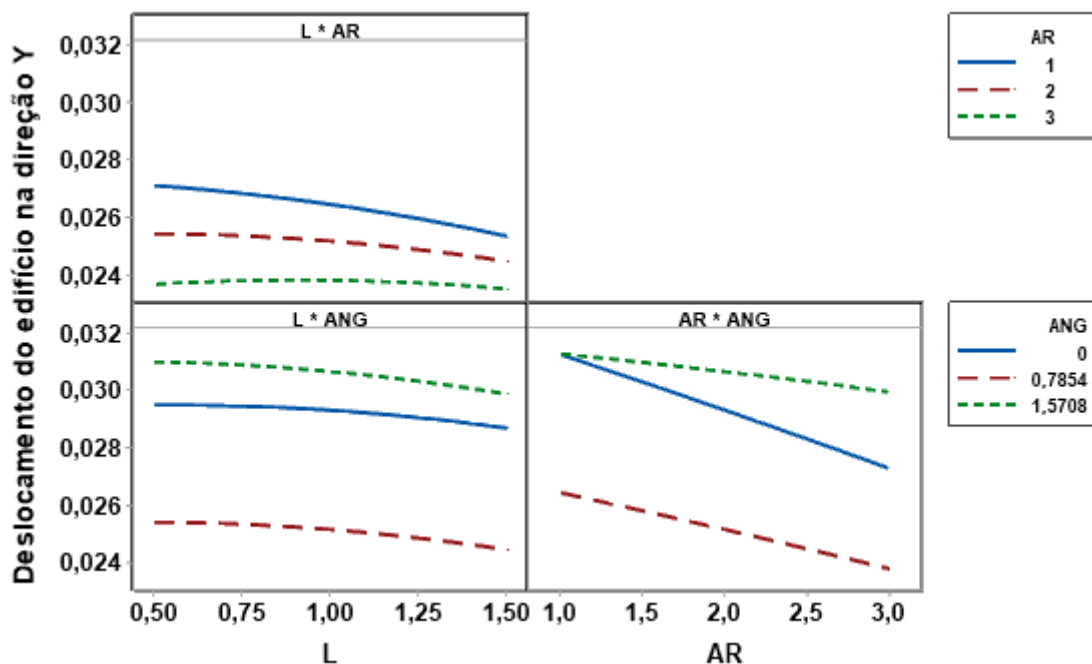
Outra métrica importante é definida pelos efeitos de interação entre parâmetros. Como é possível ver no Gráfico 14 e Gráfico 15, estes efeitos são considerados de segunda ordem, pois envolvem a interação entre os parâmetros dois a dois.

Gráfico 14 - Estimativas dos efeitos das Interações.



Fonte: O Autor (2021).

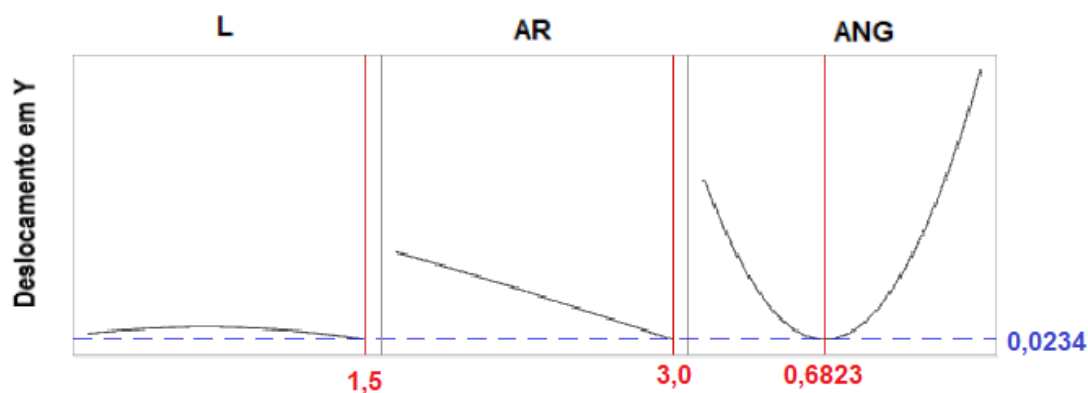
Gráfico 15 - Influência dos Efeitos das Interações de segunda ordem no deslocamento da estrutura.



Fonte: O Autor (2021).

Através da metodologia DOE é possível otimizar a função resposta, neste caso o deslocamento da edificação na direção y. Busca-se aqui minimizar o deslocamento, assim foi obtido através de um processo de interpolação dos dados obtidos com os experimentos anteriores, os valores necessários que os fatores devem assumir para obter tal resposta. No Gráfico 16 são mostrados os valores.

Gráfico 16 - Otimização dos fatores para obtenção do menor deslocamento da estrutura.



Fonte: O Autor (2021).

A malha de elementos finitos triangulares gerada a partir dos valores listados na Tabela 8 pode ser vista na Figura 53. A simulação do problema, em um passo de tempo mais avançado em que existe a estabilidade de deslocamento da edificação,

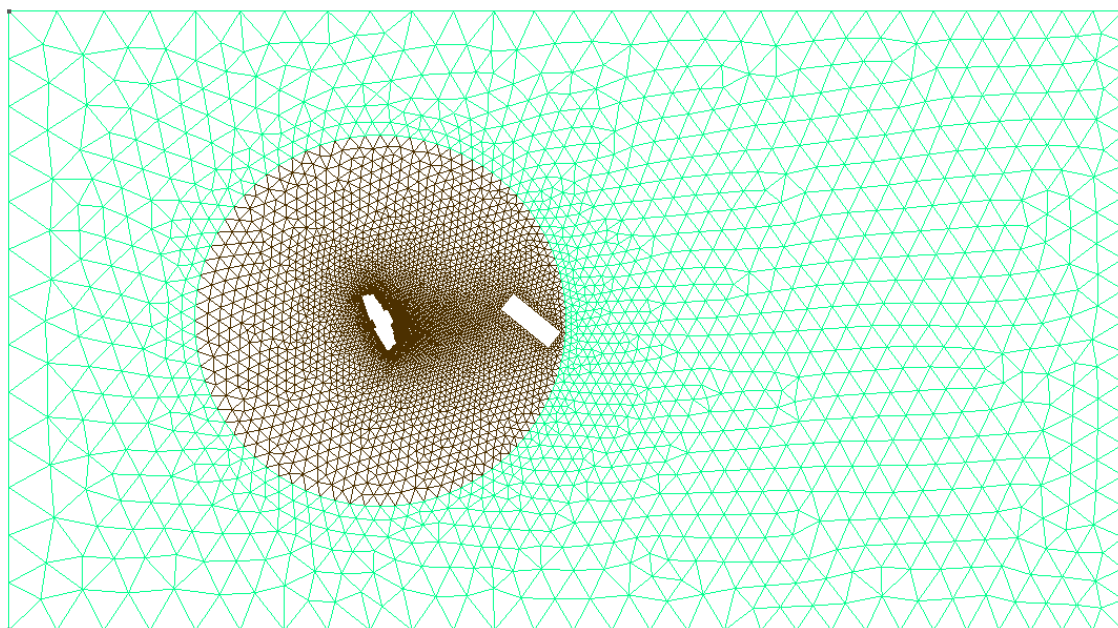
pode ser visto na Figura 54 e Figura 55. Pode se observar a formação de vórtices, os quais não se desprendem e assim não geram maiores deslocamentos.

Tabela 8 - Valores que os fatores devem assumir para minimizar o deslocamento.

Otimização do problema				
	Distância entre edificações (L)	Razão de aspecto (AR)	Ângulo de rotação (θ)	Deslocamento Máximo Previsto na dir. Y
Valores	1,5	3,0	39,093°	0,0234

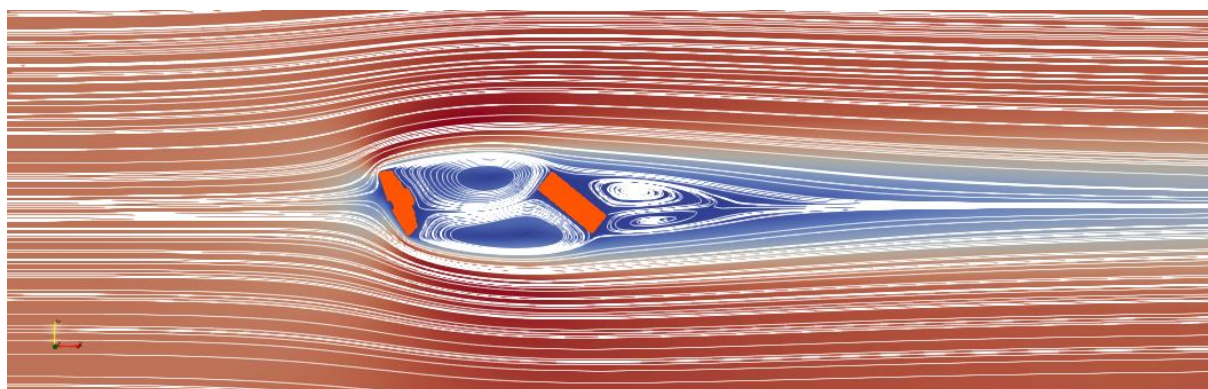
Fonte: O Autor (2021).

Figura 53 - Malha de elementos triangulares com o Edifício River Place posicionado similarmente a posição real com relação ao escoamento para a análise do problema de otimização e a segunda estrutura posicionada a jusante da primeira, com as regiões Euleriana em verde e ALE em preto.



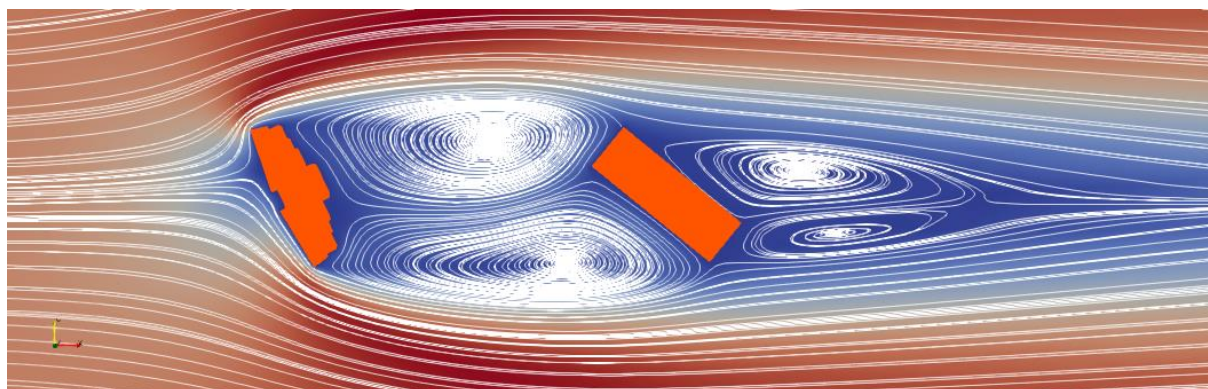
Fonte: O Autor (2021).

Figura 54 - Campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.



Fonte: O Autor (2021).

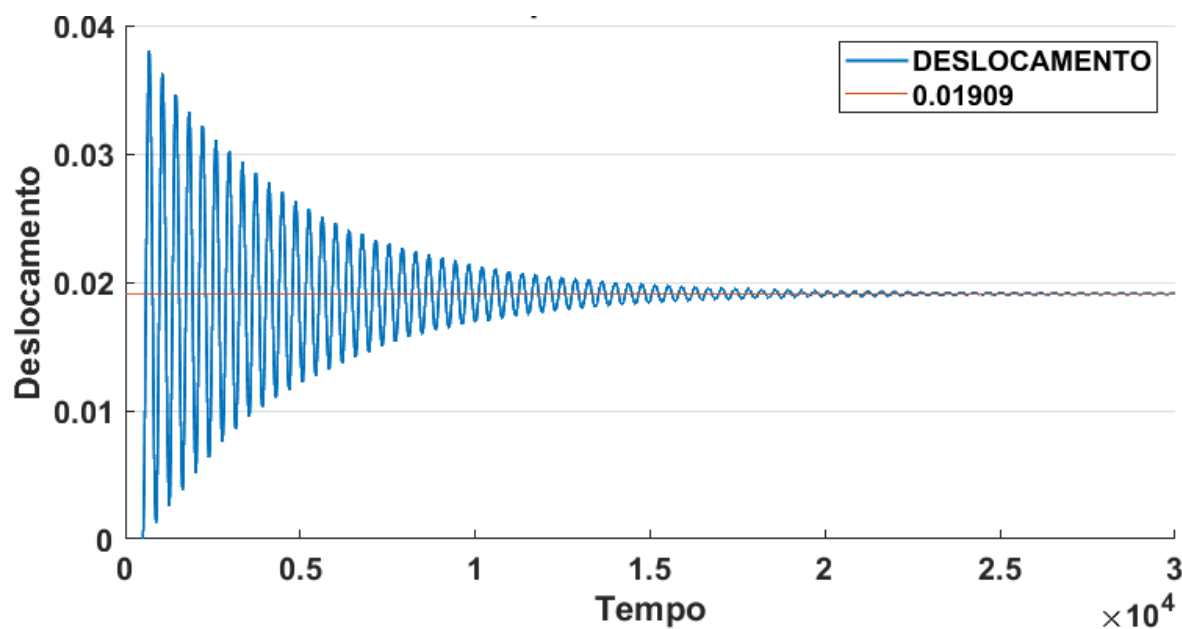
Figura 55 - Detalhe do campo de velocidades (magnitude) e linhas de fluxo.



Fonte: O Autor (2021).

Por fim a análise do gráfico Tempo x Deslocamento no Gráfico 17 confirma a minimização do deslocamento da estrutura, que foi possível através da metodologia DOE e utilizando os valores que esta forneceu, com uma variação já prevista devido ao emprego de interpolação.

Gráfico 17 - Posição do edifício na direção y ao longo do tempo.



Fonte: O Autor (2021).

7 CONCLUSÕES

No presente trabalho, o principal objetivo foi o de implementar técnicas de movimentação de malha de elementos finitos em um algoritmo utilizado para resolução de problemas IFE. A primeira técnica, de analogia elástica para elementos finitos, baseia-se na teoria da elasticidade linear, que designa a característica que um material possui de sofrer deformações reversíveis causadas por esforços externos. A segunda técnica, de troca de arestas, consiste na mudança topológica de mudar a posição da aresta que é comum a dois elementos de maneira a atender um critério específico.

Toda a implementação foi feita na linguagem MATLAB e inserida como uma função no algoritmo de resolução de problemas IFE. Toda a função referente a movimentação de malha (analogia elástica e troca de arestas) conta com 365 linhas de código. O tempo necessário para a execução dessa função representa 32% do tempo total do *loop* principal, por iteração.

Foram realizados experimentos utilizando seções transversais comuns neste tipo de estudo (cilindro e perfil aerodinâmico NACA 0012), com o objetivo de validar as metodologias. Por fim foi obtida a planta baixa de uma edificação real existente na cidade de Caruaru, Pernambuco, para expor a possibilidade da utilização de tais ferramentas na análise de construções reais em situações também reais bem como hipotéticas. Para as situações hipotéticas, foi utilizada a metodologia DOE, que abrange ferramentas estatísticas para a resolução de problemas de otimização. Tais análises podem servir como critério para tomada de decisões, confirmando a vantagem do uso de simulações numéricas na indústria da construção civil.

Conclui-se que a implementação das metodologias supracitadas foi satisfatória. Permitindo maiores deformações na malha de elementos finitos antes do procedimento de remalhamento ser necessário. Há, porém, a necessidade de que os algoritmos, referentes as metodologias, sejam otimizados para que se tornem mais eficientes, requerendo assim menor tempo de execução.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aperfeiçoar o código dos algoritmos referentes às metodologias de movimentação de malha implementadas, diminuindo assim o tempo de execução;

- Implementar metodologias para resolução de casos tridimensionais;
- Implementar metodologias para casos em que a estrutura seja deformável.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON JR, John David. **Fundamentals of aerodynamics**. McGraw-Hill Education, 2016.
- ANDERSON, J. C.; NAEIM, F. **Basic structural dynamics**. John Wiley & Sons, 2012.
- ANTUNES, A. R. E. et al. **An implicit monolithic formulation based on finite element formulation for incompressible Navier–Stokes equations**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 37, n. 1, p. 199-210, 2015.
- ANTUNES, A. R. E.; LYRA, P. R. M.; WILLMERSDORF, R. B. **A methodology and computational system for the simulation of fluid-structure interaction problem**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 27, n. 3, p. 255-265, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6123**: forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- BATINA, John T. **Unsteady Euler airfoil solutions using unstructured dynamic meshes**. AIAA journal, v. 28, n. 8, p. 1381-1388, 1990.
- BAZILEVS, Y. et al. **Novel structural modeling and mesh moving techniques for advanced fluid–structure interaction simulation of wind turbines**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 102, n. 3-4, p. 766-783, 2015.
- BAZILEVS, Y.; HUGHES, T. J. R. **NURBS-based isogeometric analysis for the computation of flows about rotating components**. Computational Mechanics, v. 43, n. 1, p. 143-150, 2008.
- BAZILEVS, Y.; TAKIZAWA, K.; TEZDUYAR, T. E. **Computational fluid-structure interaction**: methods and applications. John Wiley & Sons, 2013.
- CAVAGNA, Luca; QUARANTA, Giuseppe; MANTEGAZZA, Paolo. **Application of Navier–Stokes simulations for aeroelastic stability assessment in transonic regime**. Computers & Structures, v. 85, n. 11-14, p. 818-832, 2007.

CHACÓN, M. F.; DE LA LLERA, J. C.; HUBE, M. H. **Epistemic uncertainty of Finite Element models to predict the seismic response of RC free-plan buildings**. 2017.

Condições meteorológicas médias de Caruaru. **Weather Spark**. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31343/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Caruaru-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 02 de dez. de 2020.

CP Construções, 2021. Página Inicial. Disponível em: <<http://www.cpconstrucao.com.br/>>. Acesso em: 15 de jan. de 2021.

DARRIGOL, Olivier. **Worlds of flow: A history of hydrodynamics from the Bernoullis to Prandtl**. Oxford University Press, 2005.

DE KEMPIS, Tomas. **Imitação de Cristo**. Jandira-SP: Principis, 2019.

DEGAND, Christoph; FARHAT, Charbel. **A three-dimensional torsional spring analogy method for unstructured dynamic meshes**. Computers & structures, v. 80, n. 3-4, p. 305-316, 2002.

DOWELL, Earl H. **A Modern Course in Aeroelasticity**. Springer, 2015.

DWIGHT, R. P. **Robust mesh deformation using the linear elasticity equations**. In: Computational fluid dynamics 2006. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 401-406, 2009.

FARHAT, C.; GEUZAIN, P.; GRANDMONT, C. **The discrete geometric conservation law and the nonlinear stability of ALE schemes for the solution of flow problems on moving grids**. Journal of Computational Physics, v. 174, n. 2, p. 669-694, 2001.

FERNÁNDEZ, M. A. **Coupling schemes for incompressible fluid-structure interaction: implicit, semi-implicit and explicit**. SeMA Journal, v. 55, n. 1, p. 59-108, 2011.

GEORGE, P. L. **Automatic mesh generation and finite element computation**. Handbook of numerical analysis, v. 4, p. 69-190, 1996.

GUZMÁN, J.; SALGADO, A. J.; SAYAS, F.-J. **A note on the Ladyženskaja-Babuška-Brezzi condition**. Journal of Scientific Computing, v. 56, n. 2, p. 219-229, 2013.

HARRIS, C. L. **Influence of neighboring structures on the wind pressure on tall buildings**. Bulletin, n. 43, 1933.

HEIL, M.; HAZEL, A. L. **An Object-Oriented Multi-Physics Finite-Element Library**. In: Fluid-structure interaction. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 19-49, 2006.

HICKEN, J. E.; ZINGG, D. W. **Aerodynamic optimization algorithm with integrated geometry parameterization and mesh movement**. AIAA journal, v. 48, n. 2, p. 400-413, 2010.

HODGES, Dewey H.; PIERCE, G. Alvin. **Introduction to structural dynamics and aeroelasticity**. Cambridge University Press, 2011.

HOUSNER, G. W. **Earthquake pressures on fluid containers**. California Institute of Technology, 1954.

HSU, M.-C.; BAZILEVS, Y. **Fluid–structure interaction modeling of wind turbines: simulating the full machine**. Computational Mechanics, v. 50, n. 6, p. 821-833, 2012.

HUANG, Weizhang; RUSSELL, Robert D. **Adaptive moving mesh methods**. Springer Science & Business Media, 2010.

HUGHES, T. J. R. **Recent developments in computer methods for structural analysis**. Nuclear Engineering and Design, v. 57, n. 2, p. 427-439, 1980.

HUGHES, T. J. R. **The Finite Element Method**. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Prentice-Hall, 2000.

HUGHES, T. J. R.; JANSEN, K. **Finite element methods in wind engineering**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 46, p. 297-313, 1993.

ISOLA, Dario; GUARDONE, Alberto; QUARANTA, Giuseppe. An ALE Scheme without interpolation for moving domain with adaptive grids. **Aerotecnica Missili & Spazio**, v. 88, n. 3, p. 71-81, 2016.

JAYANTI, S. **Computational Fluid Dynamics for Engineers and Scientists**. Springer, 2018.

JO, J. C. **Fluid-Structure Interactions**. Korea Institute of Nuclear Safety, Republic of Korea, 2004.

JOHNSON, Andrew A.; TEZDUYAR, Tayfun E. **Mesh update strategies in parallel finite element computations of flow problems with moving boundaries and interfaces**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 119, n. 1-2, p. 73-94, 1994.

KNUPP, P. **Remarks on Mesh Quality**. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2007.

LAUG, P.; BOROUCHAKI, H. **Metric tensor recovery for adaptive meshing**. Mathematics and Computers in Simulation, v. 139, p. 54-66, 2017.

LI, X.; HUANG, W. **An anisotropic mesh adaptation method for the finite element solution of heterogeneous anisotropic diffusion problems**. Journal of Computational Physics, v. 229, n. 21, p. 8072-8094, 2010.

LÖHNER, R. et al. **Extending the range and applicability of the loose coupling approach for FSI simulations**. In: Fluid-structure interaction. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 82-100, 2006.

LÖHNER, R. **Mesh adaptation in fluid mechanics**. Engineering Fracture Mechanics, v. 50, n. 5-6, p. 819-847, 1995.

LÖHNER, R. **Three-dimensional fluid-structure interaction using a finite element solver and adaptive remeshing**. Computing Systems in Engineering, v. 1, n. 2-4, p. 257-272, 1990.

LÖHNER, Rainald. Adaptive remeshing for transient problems. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 75, n. 1-3, p. 195-214, 1989.

LOSEILLE, A.; LOHNER, R. Anisotropic adaptive simulations in aerodynamics. In: **48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition**. 2010. p. 169.

MANGAL, L.; IDICHANDY, V. G.; GANAPATHY, C. Structural monitoring of offshore platforms using impulse and relaxation response. **Ocean Engineering**, v. 28, n. 6, p. 689-705, 2001.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. John Wiley & sons, 2017.

OSHIMA, M. et al. Finite element simulation of blood flow in the cerebral artery. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 191, n. 6-7, p. 661-671, 2001.

PAZ, M.; KIM, Y. H. **Structural Dynamics: Theory and Computation**. Springer, 2018.

RAO, S. S. **The Finite Element Method in Engineering**. Elsevier, 2010.

ROBBIANO, L. **Álgebra Linear**: para todos. Springer Science & Business Media, 2011.

SHABANA, A. A. **Computational continuum mechanics**. John Wiley & Sons, 2018.

SHEWCHUK, Jonathan. **What is a good linear finite element? interpolation, conditioning, anisotropy, and quality measures**. University of California at Berkeley, v. 73, p. 137, 2002.

SIMIU, Emil; YEO, DongHun. **Wind effects on structures: Modern structural design for wind**. John Wiley & Sons, 2019.

SORIANO, H. L. **Introdução à dinâmica das estruturas**. Elsevier, 2014.

STEIN, K.; TEZDUYAR, T.; BENNEY, R. **Mesh moving techniques for fluid-structure interactions with large displacements**. J. Appl. Mech, v. 70, n. 1, p. 58-63, 2003.

SUBBARAJ, K.; DOKAINISH, M. A. **A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics—II. Implicit methods**. Computers & Structures, v. 32, n. 6, p. 1387-1401, 1989.

TAKASHI, N.; HUGHES, T. J. R. **An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 95, n. 1, p. 115-138, 1992.

TAKIZAWA, K.; TEZDUYAR, T. E. **New directions in space-time computational methods**. In: Advances in Computational Fluid-Structure Interaction and Flow Simulation. Birkhäuser, Cham, p. 159-178, 2016.

TEZDUYAR, T. E. **CFD methods for three-dimensional computation of complex flow problems**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 81, n. 1-3, p. 97-116, 1999.

TEZDUYAR, T. E. et al. **A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces—the deforming-spatial-domain/space-time procedure: I. The concept and the preliminar numerical tests**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 94, n. 3, p. 339-351, 1992a.

TEZDUYAR, T. E. et al. **A new strategy for finite element computations involving moving boundaries and interfaces—the deforming-spatial-domain/space-time procedure: II. Computation of free-surface flows, two-liquid flows, and flows with drifting cylinders**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 94, n. 3, p. 353-371, 1992b.

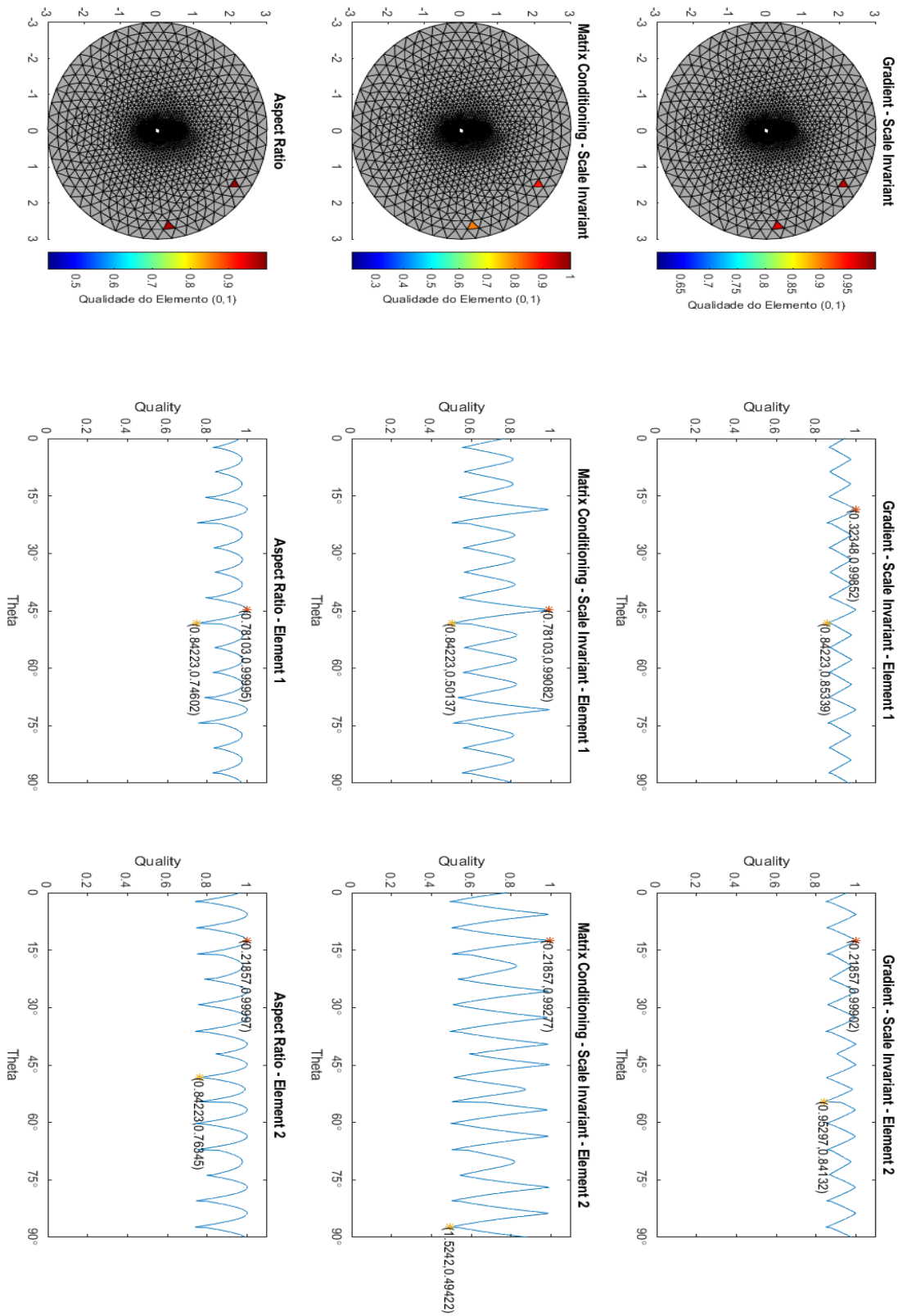
TEZDUYAR, T. E. **Finite Element Methods for Flow Problems with Moving Boundaries and Interfaces**. Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 83-130, 2001.

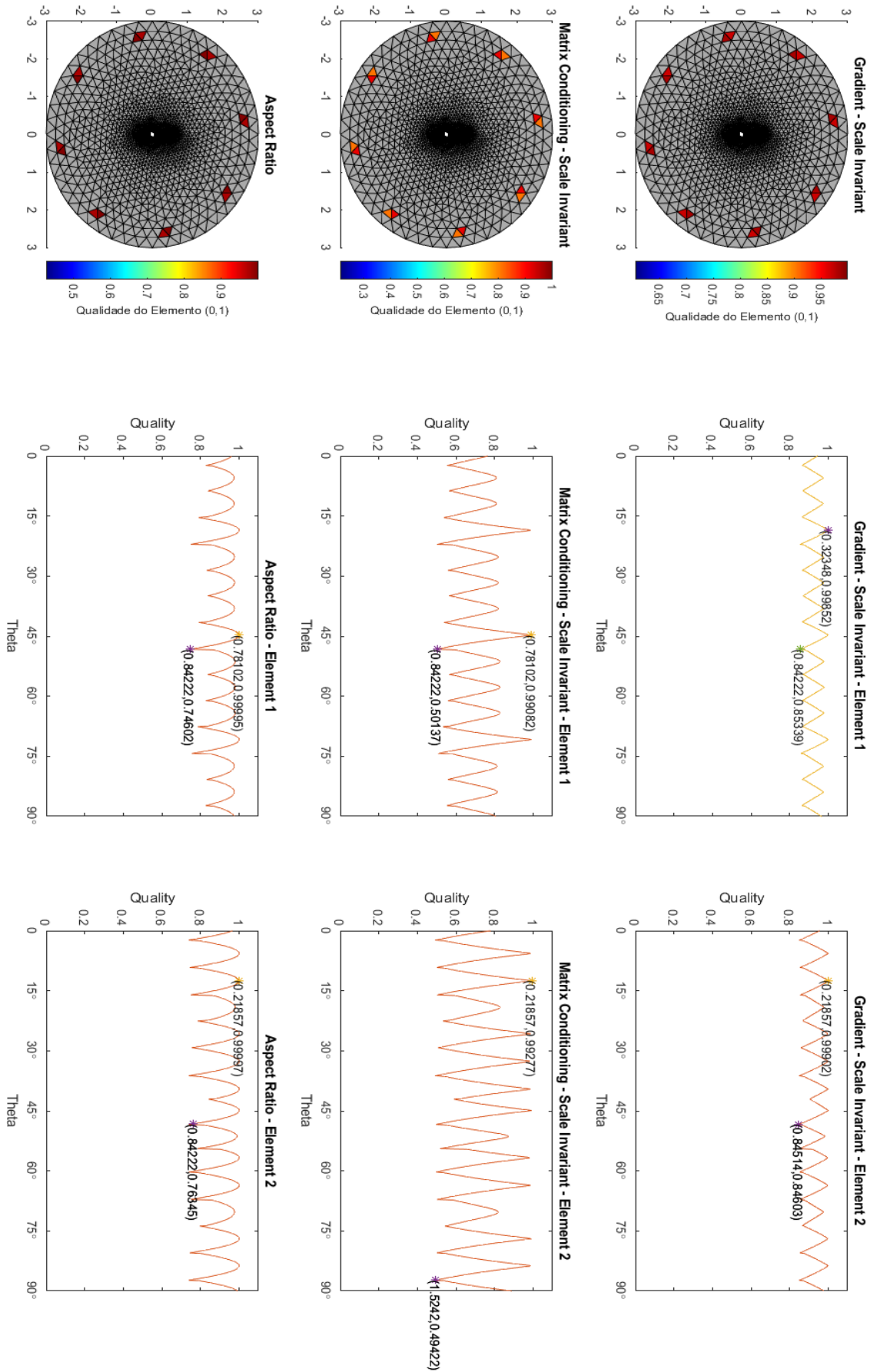
TEZDUYAR, T.; OSAWA, Y. **Methods for parallel computation of complex flow problems**. Parallel Computing, v. 25, n. 13-14, p. 2039-2066, 1999.

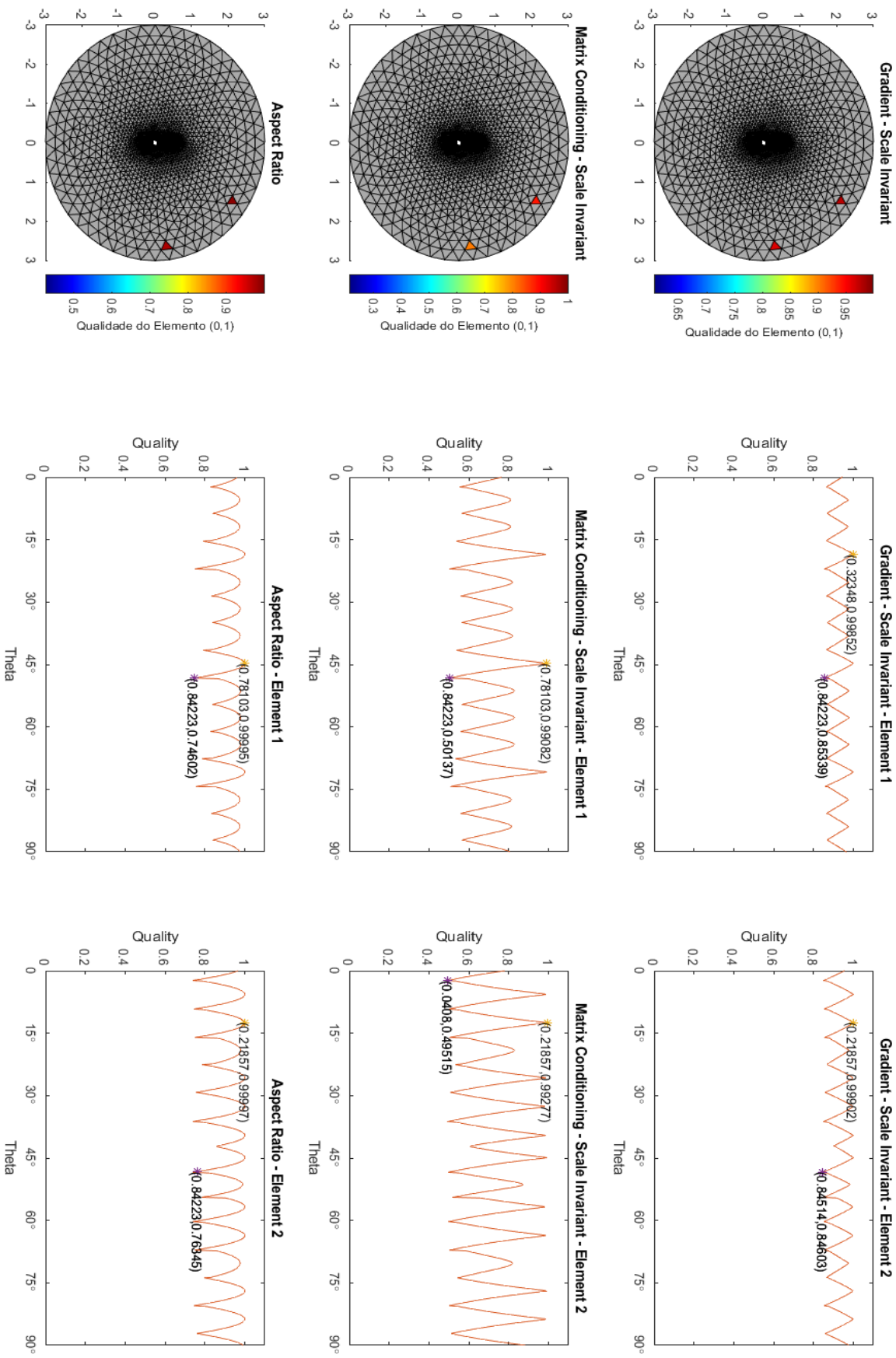
WALL, W. A.; GERSTENBERGER, A.; GAMNITZER, P. **Large Deformation Fluid-Structure Interaction** - Advances in ALE Methods and New Fixed Grid Approaches. Em: BUNGARTZ, H.-J.; SCHÄFER, M.. Fluid-Structure Interaction: Modelling, Simulation, Optimisation. Berlin, Heidelberg: Springer, v. 53, p. 195-232, 2006.

WESTERGAARD, H. M. **Water pressures on dams during earthquakes**. Trans. ASCE, v. 95, p. 418-433, 1933.

ANEXO A – FIGURAS DA ESCOLHA DO CRITÉRIO DE QUALIDADE ADOTADO

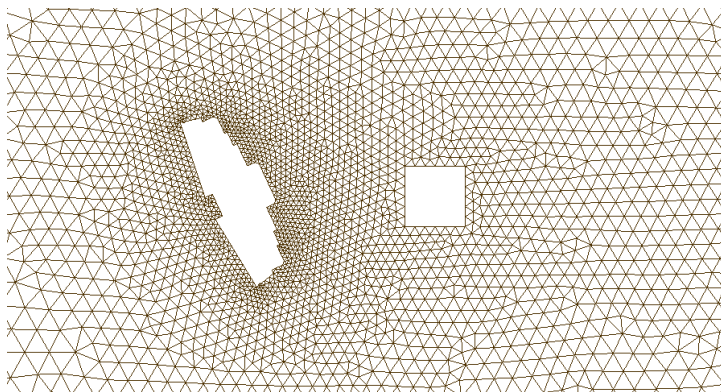






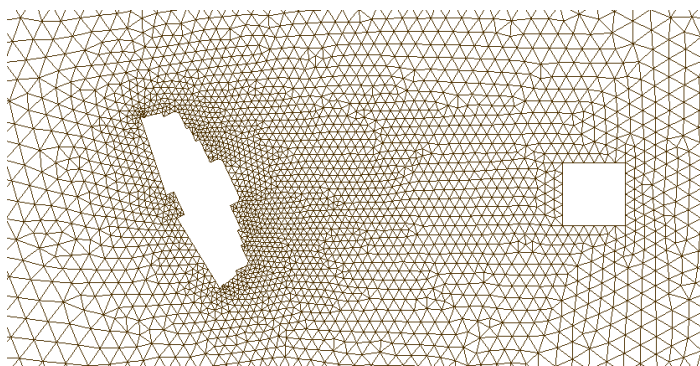
ANEXO B – MALHAS UTILIZADAS NO EXPERIMENTO PARAMÉTRICO

Figura 56 - Experimento 1.



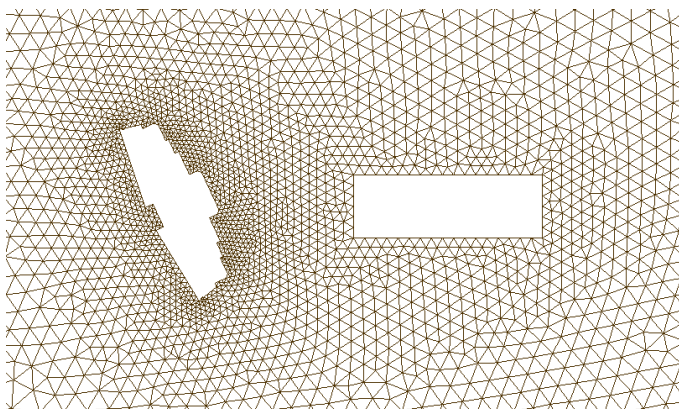
Fonte: O Autor (2021).

Figura 57 - Experimento 2.



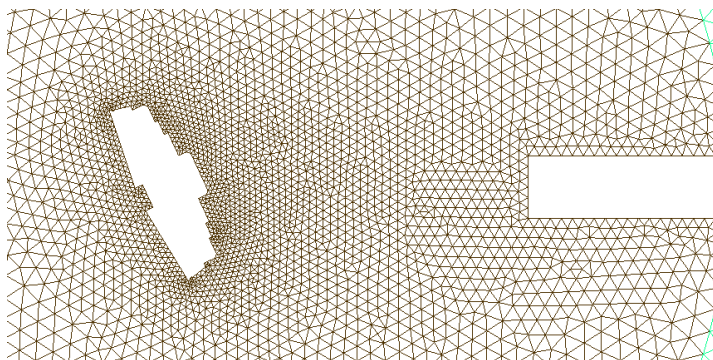
Fonte: O Autor (2021).

Figura 58 - Experimento 3.



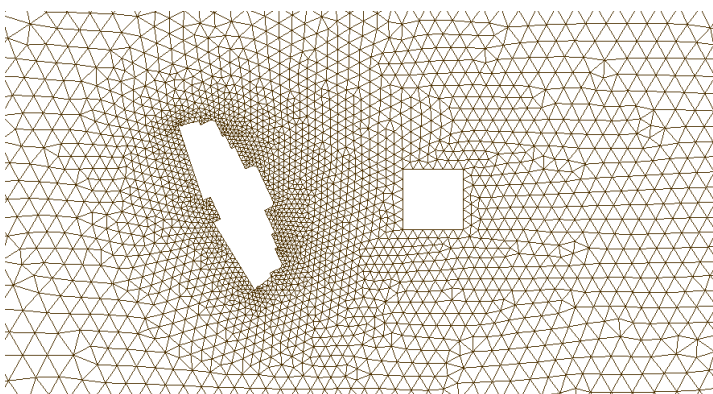
Fonte: O Autor (2021).

Figura 59 - Experimento 4.



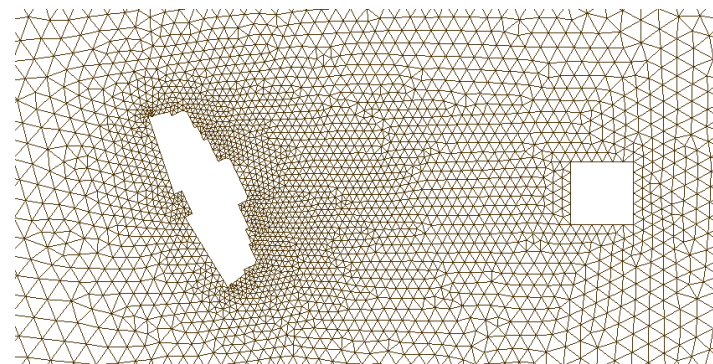
Fonte: O Autor (2021).

Figura 60 - Experimento 5.



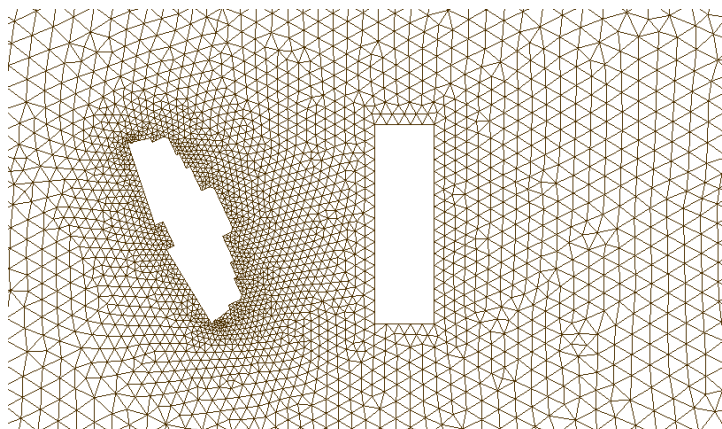
Fonte: O Autor (2021).

Figura 61 - Experimento 6.



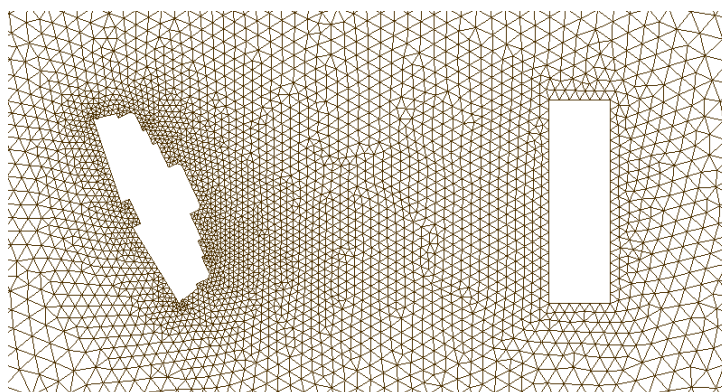
Fonte: O Autor (2021).

Figura 62 - Experimento 7.



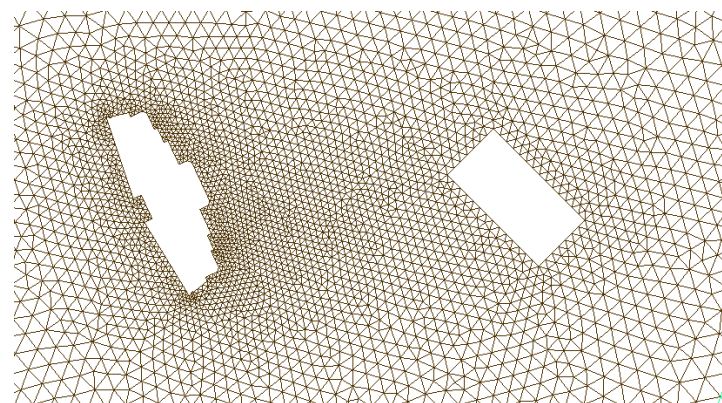
Fonte: O Autor (2021).

Figura 63 - Experimento 8.



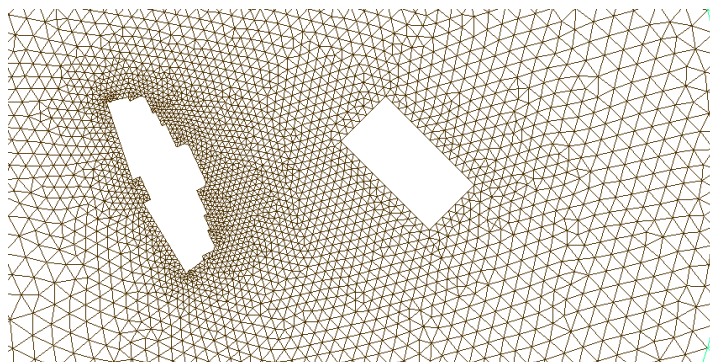
Fonte: O Autor (2021).

Figura 64 - Experimento 9.



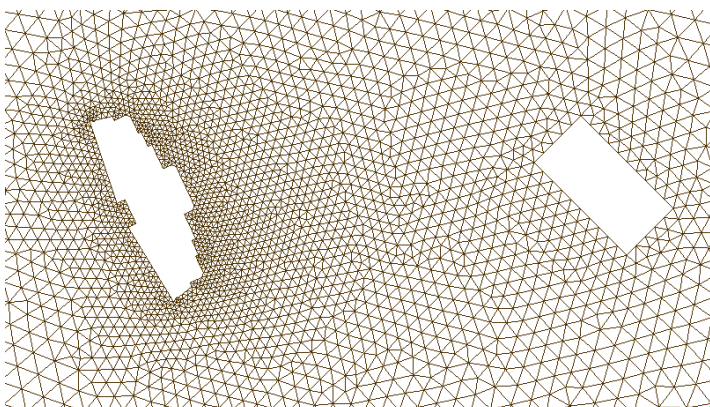
Fonte: O Autor (2021).

Figura 65 - Experimento 10.



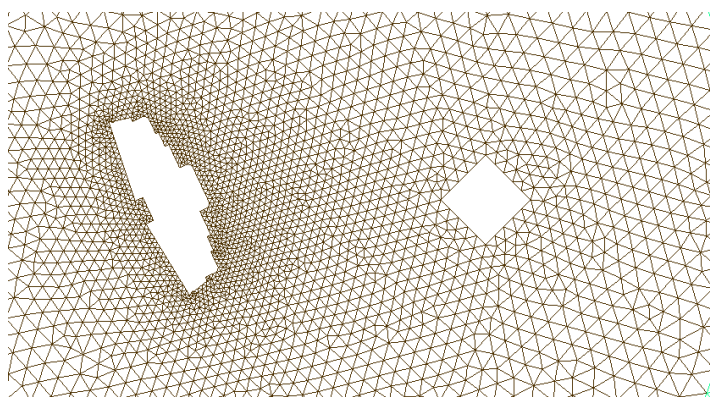
Fonte: O Autor (2021).

Figura 66 - Experimento 11.



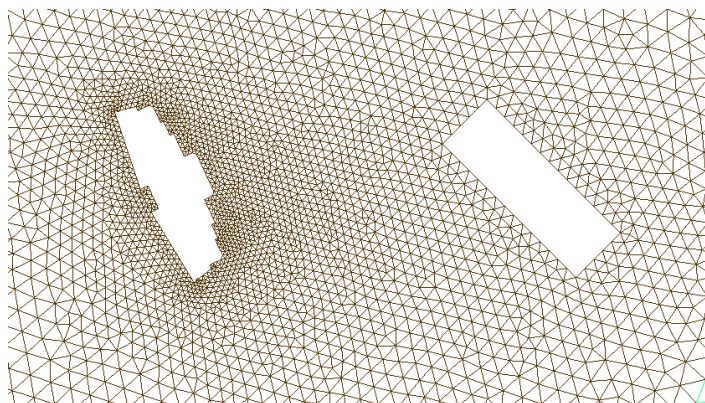
Fonte: O Autor (2021).

Figura 67 - Experimento 12.



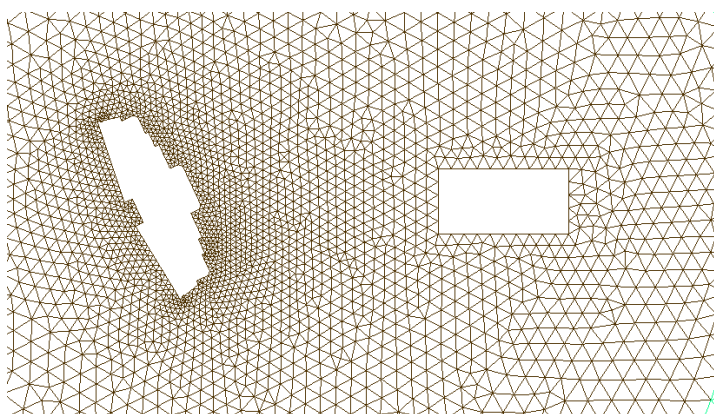
Fonte: O Autor (2021).

Figura 68 - Experimento 13.



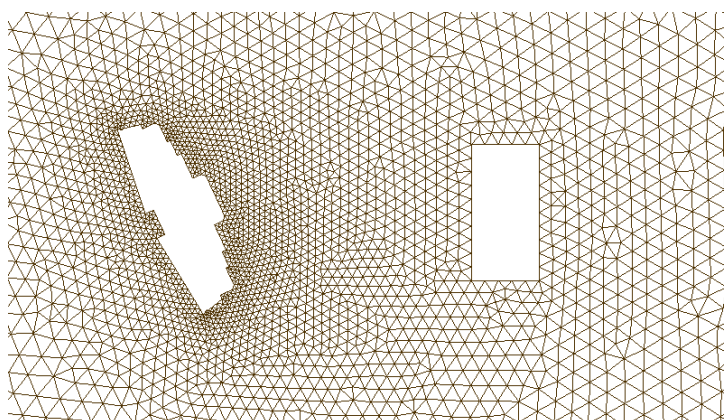
Fonte: O Autor (2021).

Figura 69 - Experimento 14.



Fonte: O Autor (2021).

Figura 70 - Experimento 15.



Fonte: O Autor (2021).

ANEXO C – PERMISSÃO PARA USO DE INFORMAÇÕES DO EDIFÍCIO RIVER PLACE



Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil e Ambiental

PERMISSÃO PARA USO DE INFORMAÇÕES

Eu, **Angelo Antônio Porto**, portador da Cédula de Identidade nº **2138533**, inscrito no CPF sob nº **440.784.044-72**, representando a empresa C.P. CONSTRUÇÃO E INCORPORAÇÃO LTDA com CNPJ de nº 12.581.161/0001-03, localizada na cidade de CARUARU, AUTORIZO o uso de informações (plantas, dimensões, fotos e nome) do Edifício River Place localizado na Av. Rodrigues de Abreu, bairro Maurício de Nassau em Caruaru-PE sem finalidade comercial, para serem utilizadas de forma exclusiva na dissertação de mestrado de Nicolas Henrique Santana de Carvalho, portador do documento de identificação CPF 082.622.434-20, estudante de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAAM) na Universidade Federal de Pernambuco, Campus do Agreste (UFPE-CAA).

A presente autorização é concedida a título gratuito e exclusivo, abrangendo o uso das informações acima mencionadas. Declaro que autorizo o uso acima descrito sem que nada haja a ser reclamado a título de direitos conexos à imagem do edifício em questão.

Caruaru, 3 de dezembro de 2020.

Assinatura: Angelo Antônio Porto