

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO RODOLFO JANUÁRIO

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DINÂMICA DE UMA RECUPERADORA DE
MINÉRIO PROVOCADA PELA AÇÃO DO ESCOAMENTO DO AR**

Belo Horizonte

2024

João Rodolfo Januário

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DINÂMICA DE UMA RECUPERADORA
PROVOCADA PELA AÇÃO DO ESCOAMENTO DO AR**

**Tese apresentada à Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais como parte dos
requisitos para obtenção de título de
doutor em Engenharia Mecânica.**

Belo Horizonte

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

J35a

Januário, João Rodolfo

Avaliação da estabilidade dinâmica de uma recuperadora de minério provocada pela ação do escoamento do ar / João Rodolfo Januário. Belo Horizonte, 2024.

105 f. : il.

Orientadora: Cristiana Brasil Maia

Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

1. Máquinas de mineração. 2. Estabilidade estrutural. 3. Mecânica dos fluidos. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Turbulência. 6. Túneis aerodinâmicos. 7. Método dos elementos finitos. I. Amorim, Rogério Jorge. II. Maia, Cristiana Brasil. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 532.5

Ficha catalográfica elaborada por Fabiana Marques de Souza e Silva - CRB 6/2086

João Rodolfo Januário

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DINÂMICA DE UMA RECUPERADORA
PROVOCADA PELA AÇÃO DO ESCOAMENTO DO AR**

**Tese apresentada à Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais como parte dos
requisitos para obtenção de título de doutor
em Engenharia Mecânica.**

Prof.^a Dr.^a Cristiana Brasil Maia – PUC Minas (Orientadora)

Prof. Dr. Jânes Landre Júnior– PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Sérgio de Moraes Hanriot – PUC Minas (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Gustavo Rabello dos Anjos – UFRJ (Banca Examinadora)

Prof. Dr. José Leôncio Fonseca de Souza – CEFET MG (Banca Examinadora)

Belo Horizonte, 19 de junho 2024

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre deram apoio e força para continuar.

À minha esposa Bárbara Martins Gonçalves, por sempre estar ao meu lado.

A professora Cristiana Brasil Maia, pela orientação e todos os ensinamentos.

Ao Professor Jánes Landre Júnior, por todos os ensinamentos.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e a Vale S.A, pelo financiamento do projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade. ” (Nikola Tesla)

RESUMO

Equipamentos de movimentação de cargas atuando em campo estão sujeitos a gradientes de pressão gerados pelo escoamento do ar durante sua operação, o que pode causar o seu desequilíbrio e tombamento. As empresas brasileiras utilizam a norma NBR 6123 para o cálculo das forças geradas pelo escoamento e a norma FEM 2-131/13 como critério de parada para esses equipamentos como função da velocidade do escoamento. No entanto, diante da grande importância dos equipamentos para a logística das empresas, a adoção de um critério de parada mais eficiente e preciso é de grande interesse. Simulações numéricas surgem como uma alternativa para a análise dinâmica dos equipamentos. No presente trabalho, utiliza-se a interação fluido estrutura (FSI, do inglês fluid-structure interaction), uma análise numérica que acopla técnicas numéricas para a solução de equações da dinâmica estrutural e CFD (Dinâmica dos fluidos computacional), para simular o comportamento do equipamento quando sujeito às forças aerodinâmicas geradas pelo escoamento. Foram avaliados os campos de velocidade e pressão do ar ao redor do equipamento e seu efeito sobre os deslocamentos e deformações no equipamento. O estudo foi feito tendo-se como modelo uma recuperadora de minério da empresa Vale, instalada no Maranhão, da qual foram desenvolvidos um modelo mais complexo e detalhado e outro modelo mais simplificado. Os valores numéricos obtidos para as forças aerodinâmicas sobre o equipamento, causadas pelo escoamento de ar, foram comparados aos valores analíticos estimados pela norma FEM 2-131/13, que ficaram em média 23% maiores. Uma análise de estabilidade indicou que a recuperadora se mantém estável mesmo para velocidades superiores às consideradas como críticas pela norma FEM, sugerindo que o critério de parada utilizado pelas empresas poderia ser revisto, propiciando uma melhor utilização dos equipamentos e aumento da produtividade.

Palavras-chave: MBD. CFD. FSI. Recuperadora de minério. Análise de estabilidade.

ABSTRACT

Load handling equipment operating in the field is subject to pressure gradients caused by air flow during operation, which can lead to imbalance and tipping. Brazilian companies use the NBR 6123 standard for calculating the forces generated by airflow and the FEM 2-131/13 standard as a shutdown criterion for these devices based on the flow speed. However, given the great importance of the equipment for company logistics, adopting a more efficient and precise shutdown criterion is of significant interest. Numerical simulations emerge as an alternative for the dynamic analysis of the equipment. In this study, fluid-structure interaction (FSI), a numerical analysis that couples finite element (FEM) and computational fluid dynamics (CFD) techniques, is used to simulate the equipment's behavior when subjected to aerodynamic forces generated by airflow. The air velocity and pressure fields around the equipment and their effects on displacements and deformations were evaluated. The study used a Vale company's ore reclaimer model installed in Maranhão, for which a more complex and detailed model and a simpler model were developed. The numerical values obtained for the aerodynamic forces on the equipment, caused by air flow, were compared to the analytical values estimated by the FEM 2-131/13 standard, which were on average 23% higher. A stability analysis indicated that the reclaimer remains stable even for speeds higher than those considered critical by the FEM standard, suggesting that the shutdown criterion used by companies could be revised, allowing for better equipment utilization and increased productivity.

Keywords: MBD. MBD, CFD, FSI, Ore Reclaimer, Stability Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um resultado de volumes finitos**Erro! Indicador não definido.**

Figura 2 – Representação de um modelo de elementos finitos**Erro! Indicador não definido.**

Figura 3 – Recuperadora e empilhadeiras de minério.....	46
Figura 4 – Fluxograma da metodologia aplicada	47
Figura 5 – Diagrama de forças atuantes para estabilidade	49
Figura 6 – Área de incidência das forças aerodinâmicas em X.....	50
Figura 7 – Imagem da recuperadora real	52
Figura 8 – Modelo numérico da Recuperadora	52
Figura 9 – Dimensões do domínio.....	53
Figura 10 – Malha e condições de contorno	54
Figura 11 – Simplificação do modelo	55
Figura 12 – Malha 1,1 milhões de elementos.....	57
Figura 13 – Malha 2,3 milhões de elementos.....	58
Figura 14 – Malha 4,1 milhões de elementos.....	58
Figura 15 – Teste de convergência – Velocidade UX	59
Figura 16 – Teste de convergência – Pressão	60
Figura 17 – Teste de convergência – Pressão.....	61
Figura 18 – Pontos de instrumentação para coleta em campo	63
Figura 19 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Lança.....	63

Figura 20 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Mastro e contra peso	64
Figura 21 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Balancins de translação.....	65
Figura 22 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Balancins de translação.....	65
Figura 23 – v_K variando com a velocidade do escoamento.....	67
Figura 24 – Anemômetro no ponto 3	68
Figura 25 – Anemômetro no ponto 4	68
Figura 26 – Anemômetro no ponto 5	69
Figura 27 – Anemômetro no ponto 7	69
Figura 28 – Anemômetro no ponto 12	70
Figura 29 – Extensômetro no ponto 17.....	70
Figura 30 – Extensômetro no ponto 18.....	71
Figura 31 – Extensômetro no ponto 19.....	71
Figura 32 – Direção de instalação dos extensômetros	71
Figura 33 – Velocidade medida no ponto 3	72
Figura 34 – Velocidade medida no ponto 4	72
Figura 35 – Velocidade medida no ponto 5	73
Figura 36 – Velocidade medida no ponto 7	73
Figura 37 – Velocidade medida no ponto 12	73
Figura 38 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 19	74
Figura 39 – Tensão Von-Mises no ponto 19	75

Figura 40 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 18.....	75
Figura 41 – Tensão Von Mises no ponto 18.....	76
Figura 42 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 17	76
Figura 43 – Tensão Von Mises no ponto 17	77
Figura 44 – Pontos de velocidade medidos no modelo.....	78
Figura 45 – Linhas de corrente – Corrente livre de 2m/s	79
Figura 46 – Campo de velocidades vista lateral (m/s).....	80
Figura 47 – Campo de velocidades vista superior (m/s)	81
Figura 48 – Linhas de corrente vista lateral	82
Figura 49 – Pressões na face lateral (Pa), força (kN) e deslocamento(mm) – 36m/s	83
Figura 50 – Forças de reação na base – 36m/s.....	84
Figura 51 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 52m/s	84
Figura 52 – Forças de reação na base – 52m/s.....	85
Figura 53 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 68m/s	86
Figura 54 – Forças de reação na base – 68m/s.....	86
Figura 55 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 84m/s	87
Figura 56 – Forças de reação na base – 84m/s.....	88
Figura 57 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 100m/s ..	88
Figura 58 – Forças de reação na base – 100m/s.....	89
Figura 59 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 132m/s ..	89
Figura 60 – Forças de reação na base – 132m/s.....	90

Figura 61 – Níveis vibracionais em cada caso.....	91
Figura 62 – Pressões na face lateral (Pa).....	92
Figura 63 – Campo de velocidades vista lateral (m/s)	93
Figura 64 – Campo de velocidades vista superior (m/s)	94
Figura 65 – Linhas de corrente vista lateral	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estado da arte	30
Tabela 2 – Sensores do setup experimental	62
Tabela 3 – Valores de velocidade medidos no modelo	78

LISTA DE SÍMBOLOS

C_μ – Constante adimensional no modelo de turbulência k- ϵ
 σ_k – Constante adimensional no modelo de turbulência k- ϵ
 σ_ϵ – Constante adimensional no modelo de turbulência k- ϵ
 $C_{1\epsilon}$ – Constante adimensional no modelo de turbulência k- ϵ
 $C_{2\epsilon}$ – Constante adimensional no modelo de turbulência k- ϵ
 k - Energia cinética turbulenta (m^2/s^2)
 ϵ - Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m^3/s^3)
 P – Pressão (N/m^2)
 ρ – Massa específica (kg/m^3)
 S_{Mx} - Termo fonte nas equações de movimento X ($kg/m.s^2$)
 S_{My} - Termo fonte nas equações de movimento Y ($kg/m.s^2$)
 S_{Mz} - Termo fonte nas equações de movimento Z ($kg/m.s^2$)
 t – Tempo (s)
 u - Componente de velocidade do fluido na direção x (m/s)
 v - Componente de velocidade do fluido na direção y (m/s)
 w - Componente de velocidade do fluido na direção z (m/s)
 x - Coordenada espacial (m)
 y - Coordenada espacial (m)
 z - Coordenada espacial (m)
 μ – Viscosidade (Pa.s)
 n - Deslocamento nodal (m)
 h - Índice nodal
 N – Função de forma

LISTA DE ABREVIACÕES

CFD - Dinâmica dos Fluidos Computacional

DEM - Método dos Elementos Discretos

DNS - Simulação Numérica Direta (Direct Numerical Simulation)

FEM - Método dos Elementos Finitos

FSI - Interação Fluido-Estrutura

LES - Simulação de Grandes Vórtices (Large Eddy Simulation)

MBD - Dinâmica de Múltiplos Corpos

NBR - Norma Brasileira

RANS - Médias de Reynolds das equações de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	18
1.2 Objetivos específicos	18
1.3 Justificativa	19
1.4 Organização do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Revisão da literatura.....	21
2.2 Resumo do estado da arte	30
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
3.1 Interação fluido estrutura.....	35
3.2 Método dos volumes finitos	Erro! Indicador não definido.
3.3 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	40
3.4 Estabilidade.....	44
4 METODOLOGIA.....	46
4.1 Cálculo por norma	48
4.1.1 FEM 2-131/132	48
4.2 Caracterização do fluido e dos sólidos	50
4.3 Modelagem e Condições de contorno	51
4.4 Teste de malhas	56
4.5 Configuração experimental.....	61
5 RESULTADOS	66
5.1 Cálculo analítico de estabilidade.....	66

5.2 Resultados experimentais	67
5.2.1 <i>Posicionamento dos sensores.....</i>	67
5.2.2 <i>Dados mensurados</i>	72
5.3 Resultados FSI (Geometria mais simplificada).....	79
5.4 Resultados CFD (Geometria mais complexa)	91
6 Conclusões	97
REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, 80% do comércio mundial de produtos é feito pelo transporte marítimo, tornando portos essenciais para inclusão de um país no mercado mundial. As variações climáticas assim como fenômenos naturais que ocorrem nos oceanos fazem com que os portos estejam sujeitos a variações de vento e chuva muito mais agressivos do que em regiões distantes do litoral. Nesse contexto, as normas estabelecem limites de velocidade do vento para que o equipamento possa operar de maneira estável, a fim de assegurar que os equipamentos utilizados nos portos operem de maneira segura para otimizar a distribuição de produtos. (BECKER, 2013)

Além dos portos, equipamentos de grande porte são utilizados também na mineração, e submetidos a limites de trabalho cada vez mais restritos, devido aos altos custos de reparo em caso de acidentes. Com o crescimento dos processos de exploração de minérios, os equipamentos utilizados têm crescido tanto em tamanho quanto em complexidade, exigindo formas mais eficientes de determinar níveis seguros de operação e estabilidade. (HALL, 2003)

Os níveis de velocidade do escoamento seguros de operação para os equipamentos de grande porte são atualmente determinados por cálculos analíticos e coeficientes de segurança definidos por normas. Estudos numéricos que contemplam a utilização dos principais métodos de avaliação dos fenômenos físicos que afetam a operação desses equipamentos permitem uma avaliação mais detalhada de todo o conjunto. Esse tipo de análise permite que, ao discretizar o domínio, sejam avaliadas tanto a estabilidade global, quanto a estabilidade local em cada região do modelo.

A utilização das técnicas da dinâmica de múltiplos corpos, em conjunto com a técnica de elementos finitos e a dinâmica dos fluidos computacional permite reduzir algumas diferenças de aproximação causadas em análises nas quais as forças aerodinâmicas são aplicadas como carga estática e não se observa o deslocamento do equipamento com o efeito dessas forças. Tornando os efeitos de turbulência e de excitação dinâmica dos corpos não desprezíveis, a tendência é que efeitos antes não considerados sejam incluídos nos cálculos e uma melhor aproximação de valores experimentais seja alcançada. (CONGER, 2015)

A análise da interação fluido estrutura é capaz de detectar fenômenos oscilatórios que podem causar instabilidades como por exemplo o efeito conhecido

como *flutter*. Esse efeito provoca um aumento dos deslocamentos da estrutura excitada por um fluido, em uma determinada velocidade crítica determinada pelas características da estrutura e do fluido em questão. Esse efeito é bastante danoso a estruturas pois aumenta as amplitudes de movimento e em consequência disso os níveis de tensão e deslocamento. (lasbeck, 2019)

O presente trabalho se insere em um projeto de cátedra no qual a Vale S.A, em conjunto com a Puc Minas, iniciou uma série de estudos e desenvolvimento de metodologias para avaliação de equipamentos e processos dentro da empresa. Para o presente trabalho, estudou-se uma recuperadora de minério que tem como principal função desempilhar o material estocado em pilhas nos pátios para levar aos carregadores de navios no porto de São Luis (MA).

O equipamento analisado nesse estudo corresponde a uma recuperadora de minério instalada no porto de São Luís, no Maranhão, Brasil, possuindo em torno de 34 m de largura e 77 m de altura. Foram feitos dois modelos para o estudo, um mais complexo, onde foram simplificadas estruturas menores que 400mm, e um modelo mais simplificado, onde as curvas e estruturas menores que 2m foram modeladas como geometrias retas e simples.

1.1 Objetivos

Avaliar a eficácia dos critérios de parada estabelecidos por normas para a estabilidade de uma recuperadora de minério sob a influência de forças geradas pelo escoamento de ar, utilizando técnicas de simulação.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- a) Validar a abordagem simplificada para representar a recuperadora, verificando sua precisão em relação aos dados experimentais obtidos em campo.
- b) Utilizar a técnica FSI para avaliar a resposta dinâmica da recuperadora às forças aerodinâmicas em várias condições de vento, identificando a velocidade crítica para a estabilidade.

- c) Simular a estabilidade da recuperadora para velocidades de vento dentro e fora dos limites normativos, comparando os resultados obtidos com os critérios de parada estabelecidos pela norma.
- d) Com base nos resultados das simulações, propor ajustes aos critérios de parada para refletir mais precisamente as condições operacionais reais e minimizar períodos de inatividade desnecessários.
- e) Fornecer recomendações para a aplicação de técnicas de simulação como FSI e CFD na avaliação da estabilidade de equipamentos industriais, visando melhorar a precisão das análises e otimizar os processos operacionais.
- f) Investigar e propor métodos para simplificar modelos computacionais complexos, mantendo a precisão das simulações, para facilitar a aplicação prática em ambientes industriais.

1.3 Justificativa

A cada ano são investidos mais recursos financeiros na produção de equipamentos de grande porte utilizados na mineração, portos, setor agropecuário, entre outros. A economia global faz com que cada vez mais automação dos processos produtivos seja exigida para o aumento e transporte da produção. Com o aumento do tamanho e complexidade dos equipamentos, novas normas de segurança, manutenção e confiabilidade desses equipamentos vêm sendo desenvolvidas para impedir catástrofes que possam representar cada vez mais perdas econômicas e mortes acidentais. (DHILLON, 2008)

De acordo com Simiu e outros (1996), as forças exercidas pelo escoamento de ar variam com a forma do terreno local, perfil e incidência de vento, além de características do próprio equipamento. Os valores de força e pressão são influenciados pelo número de Reynolds, rugosidade da superfície e a proximidade com outras estruturas. Pesquisas nessa área envolvem desde a avaliação das melhores formulações analíticas que representem os fenômenos até testes em túneis de vento com diferentes níveis de intensidade e turbulência. Segundo os autores, a maior dificuldade da aplicação das equações aerodinâmicas é a incerteza da resposta dinâmica e do amortecimento estrutural.

Trabalhos como os de Huang e outros (2017), Elshaer e outros (2018), Sanyal e outros (2018), utilizaram métodos numéricos para resolver as equações de conservação e prever a atuação das forças sobre diferentes estruturas. Estes trabalhos desconsideram os efeitos que o movimento da estrutura pode causar no escoamento, em modelos nos quais a estrutura possui ligação completamente rígida com o solo. Os gradientes de pressão causados pelo escoamento têm influência na estabilidade da estrutura, que por sua vez pode alterar dinamicamente o comportamento do escoamento local.

Nenhuma investigação anterior identificada na literatura abordou a avaliação da estabilidade de equipamentos de mineração como o que foi estudado neste trabalho. Ademais, análises existentes de equipamentos de grande porte operando sob condições similares apresentam deficiências na previsão da estabilidade estrutural, uma vez que se limitam à aplicação de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) sem considerar a interação fluido-estrutura (FSI), a qual pode impactar significativamente o comportamento do escoamento em torno da estrutura.

Este estudo introduz uma avaliação pioneira sobre o impacto do escoamento de ar em uma recuperadora de minério, destacando-se como uma contribuição fundamental para o campo. Os resultados demonstram que as normas vigentes que definem os critérios de parada para este tipo de equipamento podem necessitar de revisão, visto que a estrutura mantém sua estabilidade em velocidades superiores às atualmente permitidas. Isso implica a possibilidade de uma operação mais prolongada e economicamente vantajosa, sem comprometer a segurança.

1.4 Organização do trabalho

Após uma breve introdução ao assunto do trabalho no capítulo 1, o capítulo 2 descreve os principais estudos em áreas e temas semelhantes embasando melhor o porquê dos objetivos tomados no atual trabalho. No capítulo 3 a metodologia aplicada é detalhada para que possa ser entendida e repetida por quaisquer leitores. No capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos pelo estudo e no capítulo 5 as conclusões tiradas a partir dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo são descritos trabalhos com temas semelhantes ao do presente trabalho dos quais metodologias e resultados já obtidos podem agregar conhecimento prévio e definir melhor as técnicas a serem utilizadas.

2.1 Revisão da literatura

Equipamentos de grande porte, assim como prédios e grandes construções, têm como fator preponderante na determinação de sua resistência e equilíbrio a solicitação devido às forças aerodinâmicas. As pressões resultantes do escoamento de ar, provocadas pelas flutuações de velocidade na atmosfera, demandam a utilização de geometrias e materiais específicos. Isso é necessário para prevenir falhas estruturais ou perturbações no equilíbrio desses componentes, o que poderia resultar na perda de ativos e até mesmo em acidentes com consequências humanas, como ilustrado, por exemplo, no incidente ocorrido em Bescher (1946). Nesse incidente, foi relatado o colapso de três hangares da Marinha Americana na Flórida devido a forças aerodinâmicas que excederam em mais de duas vezes e meia a carga para a qual as estruturas foram projetadas. No trabalho é mencionado que embora a agência meteorológica tenha reportado ventos com velocidade dessa magnitude ao longo dos 33 anos de monitoramento, para o projeto foram considerados magnitudes de velocidade mais comuns aos de tempo normal, pois esses ventos com valores muito superiores aos de tempo normal se tratavam de situações raras e de pouca significância.

Para o cálculo e estimativas dessas forças aerodinâmicas, Tamura e outros (1993) desenvolveram modelos equacionados para diferentes construções e também para cada região, subdividindo por exemplo as cargas no teto das edificações em diferentes alturas de acordo com a magnitude de velocidade do escoamento. A partir desse equacionamento foi possível fazer estimativas precisas de cargas para o dimensionamento de estruturas delgadas submetidas a forças aerodinâmicas. Como um exemplo de trabalho experimental nessa área, Anderssen (2013) verificou a influência dessas forças em um navio, variando com isso a disposição dos contêineres sobre o mesmo. O autor, usando um modelo em escala em um túnel de vento, conseguiu encontrar arranjos de contêineres que reduzissem o gasto de combustível,

diminuindo a influência da força aerodinâmica longitudinal sobre o navio, deixando clara a influência do arranjo geométrico na resultante de todas as forças aerodinâmicas.

Estudos numéricos têm como base a simplificação de algumas variáveis físicas com o objetivo de minimizar o custo computacional, e dessa forma é necessário que um estudo experimental seja usado para validação. O estudo de Kaaria e outros (2013), avaliou os limites operacionais de navios porta helicópteros militares, investigando principalmente o impacto aerodinâmico da geometria desses navios na esteira produzida por eles e em consequência disso nas forças geradas nos helicópteros por elas. As modificações propostas pelos autores reduziram de 25% a 50% as principais forças que atuavam sobre os veículos aéreos durante o processo de pouso. Com esse estudo foi possível observar a eficácia da utilização de métodos numéricos no processo de determinação do comportamento e das forças aerodinâmicas, possibilitando uma visão localizada e distribuída ao longo de equipamento de grande porte.

Aplicando uma abordagem semelhante em edificações, Huang e outros (2017) estudaram variações dimensionais de parapeitos em construções de acordo com as forças aerodinâmicas, utilizando um túnel de vento para observar o comportamento das correntes de ar com a variação da configuração desses parapeitos, variando principalmente a altura deles. Curvas de resposta em frequência foram utilizadas como parâmetro de comparação entre os testes. Os resultados mostraram que parapeitos menores aumentam os efeitos dinâmicos e a frequência da incidência dos gradientes de pressão sobre as construções, enquanto parapeitos mais altos diminuem esse mesmo efeito (frequências mais baixas), com a consequência de aumentar a força na parte superior da construção, ou seja, a resultante é mais concentrada em parapeitos maiores.

Os principais métodos numéricos com relevância significativa para modelar o fenômeno abordado pelo presente trabalho são o CFD (Dinâmica dos fluidos computacional), para avaliar o comportamento dinâmico das massas de ar, o MBD (Dinâmica de múltiplos corpos), para avaliar a dinâmica de movimentação dos equipamentos e estruturas ao serem solicitados pelo escoamento, e também o FEM (Método dos elementos finitos), que pode determinar a amplificação dos deslocamentos modais e também as tensões e deformações provocadas pelas cargas dinâmicas.

Um dos estudos que apresenta o acoplamento dessas técnicas foi o de Rachid e outros (1998), que abordou a falha estrutural de tubulações sujeitas a gradientes transientes de pressão. Os autores utilizaram dois modelos para comparação: Um utilizando o acoplamento FSI que aplica a carga de pressão do CFD na malha de elementos finitos, e então os deslocamentos da malha de elementos finitos influenciam no domínio do CFD (acoplamento conhecido como *two-way coupling*), e um segundo método utilizando apenas as pressões calculadas analiticamente (acoplamento conhecido como *one-way coupling*). Os autores verificaram que a simulação sem o acoplamento resultou em uma degradação maior na tubulação em relação ao modelo FSI, o qual se aproximou mais dos resultados experimentais utilizados para validação.

Um estudo que avaliou as diferenças entre os métodos de acoplamento FSI foi o de Zhang e outros (2004), avaliando para isso parâmetros como custo computacional, a flexibilidade entre os solvers (facilidade de convergência de resultados ao interagir duas malhas distintas), além da própria convergência do resultado. Os autores concluíram que cada método de acoplamento FSI pode ser adequado de acordo com o problema do qual se quer resolver. Os métodos chamados de acoplamento “forte” são mais adequados quando o comportamento do fluido e do sólido são altamente dependentes (o problema não convergiria sem essa interação), e quando a área de interface entre ambos é constante. Os métodos chamados WCS, de acoplamento fraco, são adequados para problemas nos quais os limites do volume de controle não são bem determinados ou conhecidos. Em casos em que a dependência entre fluido e sólido é baixa (o comportamento em ambos os domínios seria bem semelhante sem o acoplamento) os métodos de acoplamento fraco chamados CWCS mostraram resultados melhores. Os autores identificaram que fatores de relaxamento são fundamentais para estabilizar a resposta estrutural em um acoplamento FSI, e deixaram como proposta de trabalhos futuros a determinação dos fatores mais adequados para cada caso.

Um estudo aplicando não linearidade geométrica, de material e das forças aerodinâmicas geradas pelos gradientes de pressão foi o de Boonyapinyo e outros (2006). Os autores fizeram com que essas forças fossem dependentes do deslocamento do objeto de estudo, no caso uma ponte suspensa, variando direção e sentido de acordo com o ângulo de ataque do escoamento. A matriz de rigidez e de massa da ponte fez com que fosse possível determinar os principais modos de flexão,

torsão e flexo-torsão da estrutura, podendo dessa forma determinar a estabilidade da ponte frente as diferentes forças aerodinâmicas. Os resultados mostraram que a velocidade crítica do escoamento para o modo de maior instabilidade encontrado é menor do que a que coincide com a velocidade de *flutter* da ponte, ou seja, o equilíbrio é afetado em magnitudes de velocidades menores do que as suficientes para fazer com que a estrutura falhe por efeito *flutter*.

Liu e outros (2011) utilizaram o método CFD acoplado a dinâmica de partículas para estudar o comportamento de escoamentos de ar de até 10m/s em dunas de areia. Os resultados foram validados a partir de modelos em escala experimentais feitos em túnel de vento, e mostraram que os vórtices gerados pela camada limite que é formada provoca a criação de novas dunas, além de deslocar as que já existiam antes do escoamento de ar, criando formações semelhantes tanto no túnel de vento quanto na simulação. Esse trabalho mostra que a interação entre os métodos numéricos gera resultados que podem ser validados pela maioria dos métodos experimentais já utilizados.

Trabalhos utilizando técnicas CFD obtêm como resultados campos de pressão e velocidade, além da caracterização do escoamento. Porém para avaliação completa de uma estrutura ou equipamento é necessário o acoplamento com técnicas de análise estrutural, seja aplicando os carregamentos de pressão obtidos em um modelo analítico ou em um modelo numérico. Belver e outros (2012) analisaram uma chaminé de 90 metros de altura sob uma corrente de ar. Com escoamentos de 9 m/s (condição crítica encontrada por eles) os autores utilizaram um acoplamento FSI para resolver numericamente o escoamento (CFD) e aplicar as pressões na estrutura, fazendo também com que as deformações calculadas criassem uma mudança no volume de controle na malha CFD, criando assim um acoplamento *two-way*. Com isso os autores conseguiram encontrar as principais frequências excitadas pelo escoamento, com maior amplificação dos deslocamentos em relação ao modelo *one-way*, onde as pressões são aplicadas no modelo de elementos finitos após serem totalmente resolvidas pelo CFD.

Aplicando ainda as técnicas de CFD para a determinação dos campos de pressão e velocidade, Nozu e outros (2015) avaliaram a incidência de gradientes de pressão com maiores magnitudes que os comumente aplicados por normas em prédios. Utilizando como ferramenta o Openfoam, os autores conseguiram validar os resultados com modelos experimentais em escala, possibilitando dessa forma avaliar

condições não previstas durante o projeto dessas estruturas. Os autores identificaram regiões mais suscetíveis à falha devido a esse tipo de carregamento e também possíveis instabilidades causadas por cargas não previstas em projeto, principalmente de natureza dinâmica.

No trabalho de Fintelman e outros (2015) foi avaliado o comportamento do escoamento ao passar por um ciclista, com variação dos ângulos de incidência da corrente de ar. Foi utilizado apenas o CFD (utilizando o Openfoam) nesse caso para comparar os resultados a um estudo experimental em túnel de vento. As diferenças entre os resultados dos modelos numéricos em relação aos experimentais foi de no máximo 20% ao se aplicar o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Utilizando também o método CFD, dessa vez com o software Ansys, Mou e outros (2017) estudaram o comportamento do escoamento sobre uma estrutura predial. Foi observado um gradiente de pressão elevado em prédios mais largos, enquanto em prédios mais curtos as pressões na superfície principal possuíam maiores magnitudes, levando a concluir que devido à essa diferença dimensional os prédios mais curtos sofrem maiores cargas a partir da mesma corrente de ar.

Outro trabalho na mesma linha foi o dos autores Zhu e Zhigang (2015), no qual foram avaliados os campos de pressão exercidos em um veículo por uma corrente de ar. Os autores utilizaram para esse trabalho um acoplamento *two-way*, calculando ao mesmo tempo as pressões e atualizando os deslocamentos da malha no modelo. Os autores avaliaram a condição de estabilidade do automóvel de acordo com as forças aerodinâmicas que incidem sobre ele, e concluíram que com escoamentos a partir de 10m/s o equilíbrio é afetado, fazendo com que um dos lados do veículo descole dos apoios no solo. O modelo foi devidamente validado com dados experimentais.

A aplicação de técnicas FSI também se estende ao estudo da estabilidade dinâmica, como por exemplo em turbinas giratórias feito por Hubner e outros (2016), onde os autores avaliaram os efeitos dinâmicos da passagem de água por uma turbina Francis. Foi analisada a mudança das propriedades de amortecimento devido ao fluxo hidráulico, além de avaliarem o comprometimento estrutural e a segurança operacional da turbina. No trabalho os autores simularam o fluxo de água partindo de uma pequena tubulação e chegando até a turbina submersa, e observaram três fenômenos como resultados principais: Os efeitos de amortecimento induzidos pelo fluxo de água foram muito dependentes da condição de operação e do modo de vibração acionado pela direção da força aplicada; observaram também uma divisão

dos modos naturais da turbina pelo fato dela estar submersa; e por último eles concluíram que a técnica FSI é aplicável para identificar instabilidades causadas pelo fluxo de água em estruturas elásticas submersas, identificando nesse caso uma condição clara de instabilidade que poderia comprometer a segurança do equipamento causando falha por fadiga.

Avaliando ainda instabilidades causadas em estruturas imersas em meio fluido, HASAMA e outros (2017) estudaram a estabilidade de construções nas quais incidem forças aerodinâmicas. Foi utilizada a análise FSI utilizando um modelo de turbulência de larga escala (LES) para tornar possível a avaliação de grandes estruturas, comparando os resultados com experimentos em túnel de vento (onde os autores utilizaram o modelo em escala 1/600). Foram produzidos resultados de deslocamento ao longo da frequência, onde os resultados da simulação FSI corresponderam aos experimentais nos dois primeiros modos de vibração acionados, além de também representar bem a amplitude de deslocamento no topo da construção. Os autores também observaram o efeito *flutter* no modo torsional da construção, utilizando para isso o solver do software OpenFOAM que possui equacionamento necessário para captar esse efeito, porém no estudo experimental esse efeito não foi observado.

Vários autores utilizaram o acoplamento das técnicas dos elementos finitos e CFD para interações FSI, aplicando um acoplamento dos dois métodos distintos. Outros como Cardiff e outros (2018) desenvolveram um software em que as técnicas CFD, FEM e MBD são baseadas na biblioteca de volumes finitos do software Openfoam. Dessa forma o acoplamento FSI também utiliza a mesma plataforma para solução de problemas multidisciplinares. Os autores compararam sete testes simples de acoplamento com softwares já validados no mercado, como Abaqus e Comsol, com diferenças menores que 1% nas análises. O solver chamado “solids4Foam” é capaz de solucionar problemas lineares e também não lineares, como o caso do uso de contato, deformações plásticas (não linearidade de material) e também não linearidades geométricas. O software desenvolvido pelos autores também é citado em Tuković e outros (2018) e Cardiff e outros (2014).

A técnica FSI pode ser utilizada tanto no sentido de calcular as tensões e deformações para um modelo em elementos finitos, como também para cálculo de aceleração e movimento utilizando um modelo MBD (multi body dynamics), técnicas que quando acopladas são chamadas de corpos flexíveis (FEM-MDB). Al-Jelawy (2018) utilizou de um acoplamento FSI aplicando em conjunto MBD e FEM, para

avaliar as forças aerodinâmicas geradas em um impacto de dois veículos. Foram modelados dois veículos, um parado e o outro se movendo com velocidade constante, dados dos quais os autores compararam com estudos experimentais para validação. Em um acoplamento *two-way* e um modelo de turbulência complexo (DES – Detached eddy simulation) devido a separação brusca da camada limite, os autores conseguiram como resultado as forças transientes geradas nas carcaças dos veículos após o impacto, as quais são fatores predominantes para futuros projetos, pois as estruturas devem proteger os ocupantes do veículo nessas situações. Os resultados do cálculo foram bem próximos dos resultados experimentais consultados na literatura.

Utilizando a técnica FSI para avaliar campos de tensão e deformação, Elsherif e outros (2019) estudaram três principais fatores que influenciam na distribuição das tensões geradas em uma pá de turbina eólica horizontal, sendo eles a seção transversal da pá, o ângulo de *twist* e o material da turbina. Os autores enfatizam no estudo a importância do estudo multidisciplinar (envolvendo mecânica dos fluidos, mecânica dos sólidos e materiais) para alcançar os resultados obtidos por eles. Os autores avaliaram sete diferentes perfis aerodinâmicos, contemplando as diferenças dos três fatores citados. Os resultados mostraram que o ângulo de *twist* não foi fator preponderante pois a máxima e a mínima tensão encontradas foram em pás com o mesmo ângulo. O perfil aerodinâmico (seção transversal) foi o fator mais influente na análise, na qual o perfil com maior massa obteve a máxima tensão von-mises, enquanto o perfil mais otimizado atingiu os menores níveis de tensão.

No grupo de pesquisa em que o trabalho se insere já foi desenvolvido um trabalho na mesma linha. Gouvea (2019) avaliou a recuperadora aqui em estudo também com o intuito de avaliar a estabilidade da recuperadora estudada no atual trabalho. O autor obteve como resultados os principais campos de pressão e velocidade distribuídos ao longo da geometria e dessa forma podendo avaliar se o campo de pressão poderia gerar uma força resultante para desestabilizar a estrutura. O trabalho desenvolvido difere do presente trabalho por não utilizar o acoplamento FSI considerando a movimentação dos corpos e as deformações da malha estrutural.

Um estudo envolvendo máquinas aerodinâmicas foi feito por Qazi e outros (2020), no qual os autores avaliaram a influência das instabilidades das correntes de ar em grandes altitudes em turbinas de vento. Os autores utilizaram as técnicas de CFD em conjunto com a malha móvel, podendo analisar dessa forma as instabilidades

geradas na turbina pelas correntes de ar, fazendo com que os gradientes de pressão gerados pelo escoamento pudessem mover a turbina e esses movimentos influenciassem a análise CFD, utilizando um acoplamento *two-way*. Nos resultados foram comparadas as eficiências de acordo com cada força aerodinâmica aplicada, com desvios de no máximo 4% em relação à dados experimentais. Os autores observaram que as instabilidades causadas com o escoamento na direção do ângulo de ataque dos convergedores geraram ao menos 10,7% mais potência que nas outras duas avaliadas.

Ainda avaliando equipamentos que sofrem sob ação de forças aerodinâmicas, Pantua e outros (2020) estudaram os efeitos dessas forças causadas por tufões em painéis solares instalados no topo de construções, os quais sofrem muitos danos a partir desse fenômeno natural. Os autores utilizaram um acoplamento *one-way*. Com a parte CFD da análise os autores avaliaram as pressões para alimentar a análise em elementos finitos, que por sua vez foi utilizada para calcular as tensões e deformações sobre a estrutura. Ainda nesse estudo, foi aplicada uma análise de otimização, onde os painéis foram alterados de posição encontrando dessa forma o menor dano causado pelo escoamento. Nesse trabalho concluiu-se que no ângulo de 90 graus em relação ao vento, utilizando a velocidade do tufão (61m/s), é a posição em que há mais falhas estruturais no caso da ocorrência do fenômeno natural, enquanto posicionando os painéis a 26° os autores encontraram a menor ocorrência de falhas estruturais. Além disso, o estudo também concluiu que os painéis devem ser posicionados sempre mais ao centro das construções, onde os danos estruturais também diminuem.

Em estudos interdisciplinares como na biomecânica por exemplo, pesquisadores abordam a importância da utilização do FSI para simulação de transporte de lipídios (gorduras) no interior dos vasos sanguíneos, onde a deformação na parede deles pode fazer com que existam zonas de acumulação de lipídeos ou de recirculação de sangue, causando problemas como infarto. Nos trabalhos de Chen e outros (2021) e também o de Patel e outros (2021), os primeiros autores avaliaram o acúmulo de lipídios de diferentes características na parede da artéria coronária e no segundo trabalho foi avaliado o nível de tensão de cisalhamento causado pelo acúmulo de lipídios, provocando doenças como a aterosclerose.

Patel e outros (2021) concluíram que o estudo FSI teve como resultado tensões de cisalhamento muito menores do que no CFD, além de uma heterogeneidade muito

maior também, encontrando as zonas de concentração dessas tensões que podem chegar a romper com o vaso sanguíneo, mostrando que o estudo FSI é muito mais preciso para esse tipo de avaliação. Chen e outros (2021) demonstraram que a elasticidade dos vasos sanguíneos diminui a complexidade do escoamento, diminuindo a turbulência. Os autores verificaram que nas paredes de artéria mais espessas a formação de lipídios é menor, pois a elasticidade influencia menos no escoamento.

Khayer e outros (2022) tiveram uma abordagem baseada em métodos de partículas que é destacada como uma perspectiva promissora para solvers de FSI. O artigo enfatiza a robustez potencial desses solvers Lagrangianos sem malha na reprodução de eventos extremos de FSI e destaca a necessidade de reproduzir respostas estruturais abrangentes, incluindo viscoelásticas e danos progressivos, enquanto sugere extensões do modelo estrutural em um quadro variacional consistente. Além disso, apresenta resultados numéricos preliminares sobre viscoelasticidade estrutural. Por outro lado, Lee e outros (2024) se concentram na investigação de um acidente de naufrágio, explorando simulações de colisão de navios. Utiliza o sistema para realizar simulações em escala real, considerando cenários de colisão entre o ferry Sewol (Navio que naufragou em 2014) e objetos subaquáticos, como submarinos. No entanto, os resultados das simulações não apontam para uma influência significativa dessas colisões no naufrágio do ferry Sewol. Este estudo se destaca pela aplicação das técnicas avançadas de FSI no contexto de investigações de acidentes marítimos.

Por fim, Delaissé (2023) aborda a simulação da interação fluido-estrutura em uma abordagem particionada, destacando a importância de estabilizar e acelerar as iterações entre os solucionadores de fluxo e estrutura. Ele reformula várias técnicas de no contexto de Broyden generalizado e revisa técnicas de acoplamento relacionadas. O artigo fornece uma comparação de desempenho entre essas técnicas, destacando sua relevância para problemas comuns, como fluidos incompressíveis e altas massas adicionadas. Em resumo, esses artigos abrangem diferentes aspectos de FSI, desde a aplicação de métodos de partículas até simulações de acidentes marítimos e técnicas de acoplamento em simulações FSI.

2.2 Resumo do estado da arte

Com base na revisão bibliográfica desenvolvida, a Tabela 1 mostra um resumo dos principais autores e as diferentes metodologias adotadas.

Tabela 1 – Estado da arte

Metodologia aplicada	Principais conclusões	Referências
Modelos Empíricos	O autor utilizou de um modelo de navio em escala num túnel de vento para variar a disposição dos containers em cima do navio, fazendo com que o escoamento fosse favorável e o veículo economizasse combustível.	Anderssen (2013)
Modelos Empíricos	Os autores propuseram mudanças geométricas em navios porta helicópteros militares para modificar a esteira produzida no escoamento de ar pelo navio, reduzindo de 25% a 50% as forças geradas nos veículos aéreos durante o pouso.	Kaaria et al (2013)
Modelos Empíricos	Os autores estudaram em túnel de vento a influência da altura do parapeito dos prédios em relação às forças aerodinâmicas, chegando à conclusão que parapeitos menores aumentam a frequência mas provocam uma melhor distribuição da carga, enquanto parapeitos maiores causam o efeito contrário.	Huang et al (2017)
Modelos Numéricos - FSI	Os autores avaliaram a adequação de cada tipo de <i>solver</i> FSI para cada tipo de fenômeno físico. Os autores verificaram que os chamados acoplamentos “fortes” se adequam a simulações onde o	Zhang et al. (2004)

	comportamento de sólido e fluido são significativamente afetados um pelo outro, enquanto os acoplamentos chamados “fracos” se adequam a problemas com volume de controle indefinido. Os autores ainda identificaram fatores de relaxamento que melhoram muito a convergência para vários métodos FSI.	
Modelos Numéricos - FSI	Os autores compararam as diferenças entre resolver uma análise de forças aerodinâmicas sobre uma chaminé utilizando acoplamento <i>one-way</i> e <i>two-way</i> . Os autores concluíram que os resultados do acoplamento <i>two-way</i> apresentaram maiores deformações, se aproximando melhor dos valores de referência.	Belver et al. (2012)
Modelos Numéricos - FSI	Os autores avaliaram a estabilidade de um veículo sob gradientes de pressão laterais. Utilizando um acoplamento <i>two-way</i> , os autores avaliaram que com escoamentos a partir de 10m/s as rodas de uma das laterais do carro começam a perder o apoio no solo, deslocando a carga para o outro lado do veículo.	Zhu e Zhigang (2015)
Modelos Numéricos – CFD	Os autores avaliaram a influência das forças aerodinâmicas sobre estruturas prediais de diferentes larguras, concluindo que devido ao gradiente de pressão gerado sobre a geometria, prédios mais curtos sofrem mais com as mesmas condições do escoamento.	Mou et al. (2017)

Modelos Numéricos – FSI	Os autores simularam o escoamento de ar sobre estruturas prediais, comparando os resultados com modelos em escala no túnel de vento. Os resultados foram validados para os dois primeiros modos de vibração, e os autores encontraram um efeito <i>flutter</i> em conjunto com o modo de torsão, porém esse resultado não foi reproduzido pelo modelo experimental.	HASAMA et al. (2017)
Modelos Numéricos – FSI	Os autores utilizaram de modelos de turbulência complexos (DES) para simular o impacto de dois veículos, e comparar os resultados com estudos experimentais da literatura. Os resultados obtidos captaram a brusca ruptura da camada limite e as forças transientes geradas nos veículos durante o impacto, que são importantes para projeto e dimensionamento deles.	Al-Jelawy (2018)
Desenvolvimento de software de acoplamento FSI	Os autores desenvolveram um software em que as técnicas CFD, FEM e MBD são baseadas na biblioteca de volumes finitos do software Openfoam, chamado solids4Foam, que foi utilizado para as simulações desse trabalho.	Cardiff e outros (2018)
Modelos Numéricos – FSI	Os autores fizeram a simulação do fluxo de ar nas pás de uma turbina eólica, com a intenção de avaliar os campos de tensão e deformação em diferentes perfis aerodinâmicos. Os autores concluíram que dentro dos perfis estudados por eles, a massa foi o fator mais preponderante para que a tensão gerada pelo gradiente de pressão fosse aumentada.	Elsherif (2019)

Modelos Numéricos – FSI	Os autores aplicaram as técnicas FSI para simular a variação da potência produzida por uma turbina eólica em situações de instabilidade estrutural (vibrações em excesso) causadas por escoamentos em grandes altitudes. Os autores identificaram que houveram perdas de potência em duas das três direções avaliadas, mas na direção do ângulo de ataque dos convergedores a potência gerada foi maior.	Qazi et al. (2020)
Modelos Numéricos – FSI	Os autores avaliaram a atuação de forças aerodinâmicas causadas por tufões em painéis solares. Com um acoplamento <i>one-way</i> , os autores simularam o fluxo do ar em painéis no topo dos prédios. Após analisar os níveis de tensão, os autores variaram a posição dos painéis sobre o prédio, e encontraram uma posição otimizada para reduzir os danos nos painéis, onde observaram uma melhor distribuição da carga durante o evento simulado.	Pantua et al (2020)
Modelos Numéricos – FSI	O estudo mostrou que as tensões de cisalhamento são menores do que no CFD em relação ao FSI, além de uma heterogeneidade muito maior também, mostrando que o estudo FSI foi mais preciso para encontrar regiões de rompimento de vasos sanguíneos.	Patel et al. (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor

A comparação detalhada entre a pesquisa em questão e os desenvolvimentos recentes apresentados na revisão do estado da arte revela uma conexão com as

tendências atuais em modelagem de interação fluido-estrutura (FSI). A pesquisa, centrada no uso de FSI para analisar as forças aerodinâmicas em equipamentos de movimentação de cargas, reflete uma abordagem integrada que é crítica em muitas das pesquisas mencionadas. Por exemplo, a aplicação do FSI na determinação das forças aerodinâmicas em estruturas prediais, conforme investigado por Boonyapinyo e outros (2006), e os estudos de instabilidade dinâmica em turbinas giratórias por Hubner e outros (2016), mostram a eficácia dessa técnica para entender os comportamentos complexos sob condições variáveis de escoamento.

Os estudos citados, como o de Rachid e outros (1998) e Zhang e outros (2004), que exploraram diferentes métodos de acoplamento FSI, são particularmente relevantes para a pesquisa em análise. Rachid e outros (1998) demonstraram a superioridade do acoplamento two-way em capturar a interação dinâmica entre a estrutura e o escoamento, o que é crucial na análise da resistência de equipamentos de carga a forças de vento inesperadamente altas. Além disso, os estudos de Kaaria e outros (2013), que avaliaram a influência da geometria de navios em helicópteros, destacam a importância de considerar as forças aerodinâmicas em decisões de design e segurança, alinhando-se com o foco da pesquisa na otimização do design para evitar falhas estruturais.

No contexto desta pesquisa, essas pesquisas sublinham a importância de utilizar simulações numéricas para superar as limitações das abordagens analíticas convencionais, permitindo uma compreensão mais detalhada e precisa dos desafios aerodinâmicos enfrentados por estruturas grandes e complexas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são abordados os conceitos fundamentais utilizados no estudo e as modelagens utilizadas.

As técnicas numéricas como CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional), FEM (Método dos Elementos Finitos), FSI (Interação Fluido-Estrutura) e MBD (Dinâmica de Múltiplos Corpos) são fundamentais para resolver as equações que descrevem problemas físicos reais em diversas aplicações de engenharia.

- O CFD é uma forma computacional de resolver as equações de Navier-Stokes e da energia, utilizadas para analisar e simular o escoamento de fluidos e transferência de calor em ambientes virtuais.
- O FEM é uma técnica numérica que resolve equações diferenciais parciais, discretizando uma região complexa em elementos menores. Ele é amplamente aplicado para resolver problemas estruturais e dinâmicos, utilizando a segunda lei de Newton para análises em engenharias civil, mecânica, aeroespacial, entre outras.
- O FSI combina CFD e FEM para avaliar a resposta de estruturas submetidas a cargas fluidas, crucial para entender o comportamento dinâmico onde fluidos e estruturas interagem.

Juntas, estas técnicas proporcionam uma compreensão integrada e avançada dos sistemas físicos em simulações computacionais.

3.1 Interação fluido-estrutura

Por muito tempo, análises estruturais têm sido linearizadas e representadas em regime permanente quando submetidas a pressões aerodinâmicas enquanto modelos mais complexos de CFD têm sido desenvolvidos para prever fenômenos físicos influenciados pela resposta dinâmica das estruturas. Uma solução preparada para as duas técnicas é composta por dois tipos de cálculo: uma parte do cálculo das forças aerodinâmicas ao longo do tempo e uma parte do cálculo das deformações em consequência dessas forças, em um acoplamento de duplo sentido, mudando significativamente o resultado de ambas as simulações dos fenômenos físicos distintos. (HAASE, 2013)

Os passos para o acoplamento FSI segundo Axisa e outros (2006) são:

1. Deslocamento do corpo sólido, considerando que o mesmo está em contato com o fluido e não há penetração do fluido no corpo;
2. Com o movimento do fluido, flutuações de pressão são geradas, impondo flutuações de força na superfície do sólido, modificando o movimento do sólido.
3. O movimento do corpo sólido provoca gradientes de pressão no interior do fluido, modificando os movimentos dele.

Para a interação entre os domínios fluido e sólido é necessário o uso de algoritmos de movimentação da malha. Quando há deslocamento do corpo sólido, o domínio fluido é alterado, diminuindo ou ampliando o espaço que ele ocupa. De acordo com Li e outros (2002), cada vez mais são utilizados algoritmos de malhas deformáveis, aplicando a transformação das coordenadas. Os autores citam que a técnica mais geral para solução da equação de Navier-Stokes em domínios móveis é chamada de ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian), a qual faz com que o domínio no qual são resolvidas as equações diferenciais seja modificado em cada passo de tempo.

O acoplamento FSI pode ser classificado pelo grau de acoplamento entre o *solver* CFD e o *solver* FEM/MBD, os tipos de acoplamento são (Zhang e outros, 2004):

- Fraco: Sólido e fluido se comportam de forma independente, e o resultado da simulação em elementos finitos ou CFD não tem alterações significativas devido a interação entre fluido e estrutura. (Exemplo: Escoamento de ar com baixa velocidade e estrutura rígida sem graus de liberdade).
- Forte: Parte dos domínios sólido ou fluido são dependentes do comportamento um do outro. (Exemplo: Sólido imerso parte em água e parte em ar com baixas velocidades).
- Muito forte: Comportamento entre sólido e fluido totalmente dependente, o resultado não possui significado físico sem o acoplamento FSI. (Exemplo: Efeito *flutter*, só ocorre se houver interação fluido estrutura).
- *One-way coupling*: Sólido e fluido se comportam de forma independente, nesse tipo de acoplamento a análise CFD é utilizada para calcular os gradientes de velocidade e pressão sobre uma estrutura que não possui resposta durante essa simulação. Logo depois os resultados dessa simulação são aplicados a uma simulação em elementos finitos ou MBD para que então se obtenha a resposta estrutural.

- *Two-way coupling*: Os resultados das simulações CFD e de elementos finitos se retroalimentam a cada passo de tempo da simulação, dessa forma os campos de pressão e velocidade são aplicados na malha de elementos finitos ou na estrutura MBD, e então a resposta estrutural deforma a malha modificando o volume de controle e alterando o comportamento do fluido.

Os acoplamentos devem ser selecionados de acordo com o problema a ser resolvido, assim como a capacidade computacional disponível. Para esse trabalho o modelo *two-way coupling* foi selecionado devido às altas velocidades do escoamento e a influência dos deslocamentos do equipamento no campo de pressão.

3.2 Fluidodinâmica computacional

O método dos volumes finitos é uma ferramenta essencial na engenharia e na física, especialmente no estudo de fluidos, pois permite a resolução eficiente de equações diferenciais que governam balanços de massa, energia e quantidade de movimento. Este método utiliza de uma divisão do domínio de estudo em uma rede de volumes de controle, simplificando o domínio contínuo em uma representação discreta. Em cada um desses subvolumes, as equações diferenciais são aproximadas numericamente, permitindo a aplicação de condições de contorno específicas. Esta abordagem facilita a análise detalhada das variações dos atributos físicos em todos os nós da malha, culminando em uma representação precisa do comportamento do fluido após múltiplas iterações computacionais. (Veersteg, Malalasekera, 2007).

As equações que regem a dinâmica dos fluidos são as leis fundamentais de conservação. A primeira delas, a conservação da massa, é essencial para garantir que a massa não seja criada nem destruída dentro do sistema. A equação de continuidade para um fluido é expressa matematicamente pela equação (1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (1)$$

Onde ρ representa a massa específica do fluido, t representa a variação temporal; u, v e w representam as componentes de velocidade nas direções x, y e z , que por sua vez representam as coordenadas espaciais.

As equações de Navier-Stokes, derivadas da segunda lei de Newton, modelam o movimento e as forças em fluidos viscosos. Essas equações não apenas

consideram a velocidade e a pressão do fluido, mas também incluem termos para a viscosidade e outras forças externas, como a gravidade. Elas podem ser expressas na forma de coordenadas cartesianas(2), (3) e (4) para um fluido Newtoniano:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho wu) = \frac{-\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho wv) = \frac{-\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = \frac{-\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} \quad (4)$$

A letra grega μ representa a viscosidade, P representa a pressão que atua sobre o volume de controle. Os termos S_m representam os termos fonte em cada direção, e são calculados como as forças de campo que atuam sobre um volume fluido. Neste trabalho, apenas força gravitacional foi considerada.

Além disso, o tratamento da turbulência nos fluidos é abordado pela decomposição de Reynolds, que afirma que as propriedades podem ser dadas como a soma de uma componente média e de uma flutuação. As equações RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) são desenvolvidas para capturar o efeito médio das flutuações turbulentas no escoamento. Estas equações são essenciais para projetar e analisar sistemas em condições onde a turbulência desempenha um papel significativo, como por exemplo em grandes corpos de água ou em escoamento de ar em alta velocidade em torno de estruturas aerodinâmicas. Esta abordagem envolve a média temporal das equações de Navier-Stokes, simplificando o tratamento da turbulência ao focar nas médias das propriedades ao longo do tempo, em vez de suas instantâneas. Em RANS, os termos resultantes do produto das flutuações são cruciais, pois representam as tensões de Reynolds, que não são diretamente calculáveis e devem ser modeladas. Cada modelo de turbulência, como o k-epsilon ou o k-omega, propõe uma formulação distinta para esses termos, ajustando-se às características específicas do escoamento estudado e às exigências de precisão e complexidade computacional desejadas.

As equações (5), (6) e (7) representam a inserção das flutuações nas equações de Navier-Stokes de acordo com as RANS. (WHITE, 2011)

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \left[\frac{\partial \overline{\rho u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial z} \right] + S_{Mx} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{v}\bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}\bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{v}\bar{w}}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} - \left[\frac{\partial \overline{\rho u'v'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho v'w'}}{\partial z} \right] + S_{My} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{w}\bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{w}\bar{v}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}\bar{w}}{\partial z} \right) \\ = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} - \left[\frac{\partial \overline{\rho u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\rho w'^2}}{\partial z} \right] + S_{Mz} \end{aligned} \quad (7)$$

Onde $\bar{u}$, $\bar{v}$ e $\bar{w}$ representam a média das velocidades em cada direção no espaço, e, analogamente, u' , v' e w' representam suas flutuações.

A modelagem de turbulência proposta por Reynolds apresenta um problema em que o número de variáveis aumenta e o número de equações para resolvê-las não é suficiente. Para tanto, técnicas numéricas são utilizadas para resolver essas equações, enquanto métodos iterativos também são aplicados. (BEJAN, 2013)

Dentre os modelos baseados em RANS, existem ainda diversas ramificações de modelos de turbulência. Alguns utilizam como parâmetro a energia cinética turbulenta, representada pela letra k , e equações de dissipação desta energia, como o modelo de Wilcox, $k-\omega$, onde ω é frequência de dissipação dessa energia, e o modelo $k-\epsilon$, onde ϵ representa esta dissipação de energia. (WARSI, 2006)

O modelo $k-\epsilon$ aumenta duas variáveis e duas equações diferenciais (9) e (10) de transporte para cálculo da turbulência. Além disso, é implementado o conceito de viscosidade turbulenta (8), que depende de k e ϵ . (Veersteg, Malalasekera, 2007) A viscosidade turbulenta é adicionada às equações de transporte em um modelo CFD, acrescentando essas duas equações para solução completa do problema. Este foi o modelo utilizado no presente trabalho.

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho k v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho k w) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial x}(k) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial y}(k) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial z}(k) \right] + 2\mu_t S_{xy} \cdot S_{xy} \\ + 2\mu_t S_{yz} \cdot S_{yz} + 2\mu_t S_{zx} \cdot S_{zx} - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \epsilon u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \epsilon v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \epsilon w) \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{xy} \cdot S_{xy} \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{yz} \cdot S_{yz} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{zx} \cdot S_{zx} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (10)$$

C_μ , σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ e $C_{2\epsilon}$ são constantes adimensionais, no modelo k- ϵ possuem os valores de 0,09; 1,00; 1,3; 1,44 e 1,92 respectivamente (Veersteg, Malalasekera, 2007).

As vantagens desse modelo de turbulência são:

- Modelo muito validado na literatura;
- Adiciona apenas duas equações de transporte.

Ainda segundo Veersteg e Malalasekera (2007), esse modelo apresenta limitação no caso de escoamentos confinados ou taxa de deformação muito alta, e também na previsão da separação do escoamento em condições adversas de gradiente de pressão, pois em ambos os casos ele suaviza o comportamento do fluido.

3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (FEM) é uma técnica numérica utilizada para aproximar soluções para equações diferenciais parciais, comumente utilizado em engenharia mecânica, civil e aeroespacial, bem como em outras áreas da física e engenharia. O método consiste em dividir um problema complexo em subproblemas mais simples e gerenciáveis, conhecidos como "elementos", que podem ser resolvidos

individualmente e depois combinados para obter uma solução geral para o problema original.

O método dos elementos finitos fornece uma formulação que pode utilizar a automação computacional para analisar sistemas irregulares. Para tanto, o método refere-se a uma estrutura complexa como um conjunto de elementos finitos, onde cada elemento faz parte de um elemento estrutural contínuo. Ao exigir que os deslocamentos sejam compatíveis e que as forças internas sejam equilibradas em determinados pontos (pontos chamados nós) compartilhados pelos vários elementos, todo o conjunto é forçado a atuar como uma entidade única.

Por meio dessa técnica, arranjos físicos, traduzidos em modelos matemáticos, podem ser estudados em termos de seu comportamento, dado por suas respostas quando submetidos a esforços externos e/ou internos. Portanto, eles podem ser classificados como estáticos ou dinâmicos, e em ambos, podem ser classificados como lineares ou não lineares. (Avelino, 2018)

O Método dos Elementos Finitos (FEM) começa com a discretização do domínio do problema em elementos finitos. Para cada elemento, as variáveis do problema, como deslocamentos e temperaturas, são aproximadas utilizando funções de forma. Essas funções, geralmente polinômios, são escolhidas para satisfazer certas propriedades de compatibilidade e continuidade nos nós, garantindo que os valores calculados sejam física e matematicamente razoáveis.

Cabe ressaltar que o método aplicado para análise estrutural determina principalmente as deformações dos elementos a partir dos deslocamentos dos nós, não calculando corretamente o deslocamento de um corpo rígido ou que não sofreu deformações, como acontece por exemplo utilizando o método de múltiplos corpos.

A aplicação do método em uma análise estrutural ou dinâmica segue as seguintes etapas:

- Discretizar o domínio do problema, dividindo-o em subregiões conhecidas como elementos finitos.
- Escolher uma função de interpolação para aproximar as soluções dentro de cada elemento.
- Formular as equações de equilíbrio estrutural, de compatibilidade e de condições de contorno para o problema.
- Resolver o sistema de equações obtido para obter as soluções aproximadas.

Algumas das equações fundamentais utilizadas no FEM incluem equações de compatibilidade e funções de forma (Zienkiewicz e outros, 2005):

Equações de compatibilidade (11): Estas equações garantem que as soluções obtidas em cada elemento sejam continuamente relacionadas entre si.

$$\mathbf{u}_i(h_i) = \mathbf{u}_j(h_j) \text{ (nos nós compartilhados } i \text{ e } j) \quad (11)$$

Onde $\mathbf{u}$ representa o valor do deslocamento no nó (i ou j) e h representa o nó (i ou j).

O sistema global de equações para análise estrutural e dinâmica são resolvidas como matrizes locais de cada elemento, aplicando as condições de contorno e as forças externas. Para problemas dinâmicos, o sistema de equações diferencial pode ser expresso como (12):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}(t) \quad (12)$$

onde $\mathbf{u}$ representa o vetor de deslocamentos nodais, $\ddot{\mathbf{u}}$ e $\dot{\mathbf{u}}$ são as acelerações e velocidades nodais, e $\mathbf{F}(t)$ é o vetor de forças externas variáveis no tempo.

Cada função de forma (13) $N_i(\mathbf{u})$ é associada a um nó específico e define como as variáveis são interpoladas dentro do elemento. Para um elemento linear, por exemplo, as funções de forma podem ser lineares ou quadráticas, dependendo da precisão desejada.

$$\mathbf{u}(h) = \sum N_i(h) \mathbf{u}_i \text{ (equação de interpolação de Lagrange)} \quad (13)$$

onde N é a função de forma, i é o índice do nó, e h é o valor desconhecido no nó i .

No contexto de análise estrutural pelo FEM, são frequentemente utilizados elementos 3D, que podem ser tetraédricos, hexaédricos, prismáticos ou piramidais, dependendo da complexidade e dos requisitos de precisão do problema. As funções de forma aplicadas em cada elemento são polinômios que variam em grau conforme a necessidade da análise:

- Elementos Tetraédricos 3D: Utilizam funções de forma lineares ou quadráticas.
- Elementos Hexaédricos 3D: Podem utilizar funções de forma de grau superior, como cúbicas, para maior precisão.

- Elementos Prismáticos e Piramidais 3D: São utilizados em regiões onde a geometria complexa requer uma representação mais detalhada e precisa.

Essas escolhas de elementos e funções de forma garantem que a discretização do domínio e a subsequente solução das equações proporcionem uma representação precisa e eficaz do comportamento estrutural sob diversas condições de carregamento.

3.4 Estabilidade

Equipamentos de grande porte que executam funções na produtividade e transporte da produção são essenciais para a movimentação de uma maior quantidade de produtos. O dimensionamento assim como a montagem desses equipamentos é determinado por esforços estáticos e dinâmicos, de característica permanente ou variável.

O objetivo principal na determinação de um projeto de um equipamento de grande porte para movimentação de cargas é a avaliação dos deslocamentos ao longo do tempo, quando este está submetido a forças variáveis. São essenciais como condições de contorno nesse tipo de análise os graus de liberdade e as restrições de movimento do equipamento. (NAEIM, 1999)

Equipamentos mecânicos em geral apresentam também sistemas que exigem contato como rolagem ou deslizamento. As principais formulações utilizadas para representar estes fenômenos são técnicas Newtonianas, Lagrangianas e Hamiltonianas. Os modelos consistem na utilização de um coeficiente de restituição, uma rigidez de contato e amortecimento, para o caso de contato normal, e coeficiente de atrito para contato tangencial. (RAHNEJAT, 2004)

A base para estabilidade estrutural de qualquer equipamento que possui graus de liberdade é o equilíbrio das forças que atuam sobre ele quando em movimento ou não (Hibbeler, 2005). Desta forma, para garantir a estabilidade de um equipamento de movimentação, deve-se ter bem definidos os centros de gravidade de cada componente móvel e os limites dentre os quais ele pode se movimentar para que o equilíbrio de forças no equipamento seja mantido.

A estabilidade de uma recuperadora de minério pode ser avaliada considerando-se as forças de reação nos apoios que conectam a parte superior à parte inferior da máquina. Essas forças são indicativas do equilíbrio dinâmico e estático do sistema, refletindo como as cargas operacionais e ambientais são distribuídas ao longo da estrutura. Para realizar essa análise, primeiramente, é necessário modelar a recuperadora como um sistema de corpos rígidos ou flexíveis, utilizando princípios de mecânica clássica e dinâmica estrutural. As reações de apoio são influenciadas por diversos fatores, incluindo o peso do material manipulado, a velocidade e a aceleração da máquina, bem como as condições ambientais como vento e variações térmicas.

Para quantificar as reações nos apoios, modelos computacionais podem ser desenvolvidos utilizando métodos de elementos finitos (FEM), que permitem uma simulação detalhada das respostas estruturais sob diferentes condições operacionais. Nesses modelos, cada apoio é considerado como um ponto de interface onde forças e momentos são transmitidos entre as seções superior e inferior da recuperadora. A análise de estabilidade é conduzida verificando-se os valores e direções dessas forças de reação, buscando identificar qualquer desequilíbrio ou excesso de carga que possa comprometer a integridade estrutural ou operacional da máquina. Esses dados são essenciais para otimizar o design e garantir a segurança e eficiência operacional da recuperadora de minério.

4 METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo o estudo da estabilidade de equipamentos de grande porte. O estudo de caso foi feito com uma recuperadora de minério da empresa Vale S.A. O equipamento está instalado na cidade de São Luís (MA), com dimensões físicas de 34 m de largura e 77 m de altura e 40 m de profundidade. Uma imagem da recuperadora é mostrada na Figura 1 (na parte central, próxima a outras recuperadoras e localizada no pátio de deposição de material). O equipamento pode ser subdividido em 6 componentes principais: a roda de caçambas (círculo vermelho), que fica na ponta da lança (círculo amarelo), que por sua vez está conectada ao mastro (círculo azul) que sustenta também o contrapeso (círculo verde), está apoiado na mesa de giro ou pórtico de translação (círculo roxo) que se apoia aos trilhos através de um conjunto de balancins (círculo cinza).

Figura 1 – Recuperadora e empilhadeiras de minério



Fonte: Gouvea (2019)

Na primeira fase do estudo, realizou-se a análise conforme as diretrizes estabelecidas pelas normas relevantes para determinar a velocidade máxima de vento na qual o equipamento poderia operar mantendo a estabilidade estrutural. Esses cálculos preliminares são descritos na seção 4.1. Paralelamente, procedeu-se com a coleta de dados experimentais que objetivavam mensurar as velocidades de vento reais a que o equipamento está sujeito durante a operação. Essa etapa experimental

foi essencial para fornecer uma base de dados realista para posterior comparação com as previsões das simulações.

Subsequentemente, empregaram-se simulações de Interação Fluido-Estrutura (FSI) para avaliar a resposta do equipamento sob as condições de vento observadas experimentalmente. As simulações FSI foram cruciais para entender até que ponto as especificações normativas são conservadoras ou adequadas. O foco dessas simulações estava em verificar se os limites de velocidade de vento estabelecidos pelas normas poderiam ser ajustados com base na interação dinâmica entre as cargas de vento e a resposta estrutural do equipamento. Esta análise comparativa entre os dados experimentais e os resultados das simulações FSI proporcionou uma avaliação aprofundada da capacidade do equipamento de sustentar operações seguras em condições de vento mais severas do que as previamente estabelecidas.

O cálculo por norma é a atual referência para operação ou parada desse tipo de equipamento de acordo com as forças produzidas pelo escoamento de ar que ocorrem aleatoriamente. Dessa forma, esse cálculo visa demonstrar qual o limite atual da operação para que posteriormente seja possível comparar o limite atual com o limite determinado no modelo numérico.

A modelagem do equipamento foi feita inicialmente em CAD 3D no SolidWorks através dos projetos CAD 2D do equipamento. A partir do CAD 3D, foram simplificadas as estruturas mais complexas e foi feita uma malha tetraédrica ao longo de todo o equipamento para representar a parte estrutural, e subtraindo esse modelo do domínio fluido, foi feita a malha CFD em torno do equipamento.

O modelo simplificado foi feito a partir da necessidade de melhorar a qualidade dos elementos e diminuir sua quantidade, tornando possível rodar o modelo FSI. Para essa simplificação, foram reproduzidas as dimensões principais, assim como a área frontal, o centro de massa e a densidade foi ajustada para que a massa fosse a mesma também.

Na Figura 2, um fluxograma resume a metodologia e os principais pontos deste estudo.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia aplicada



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Cálculo por norma

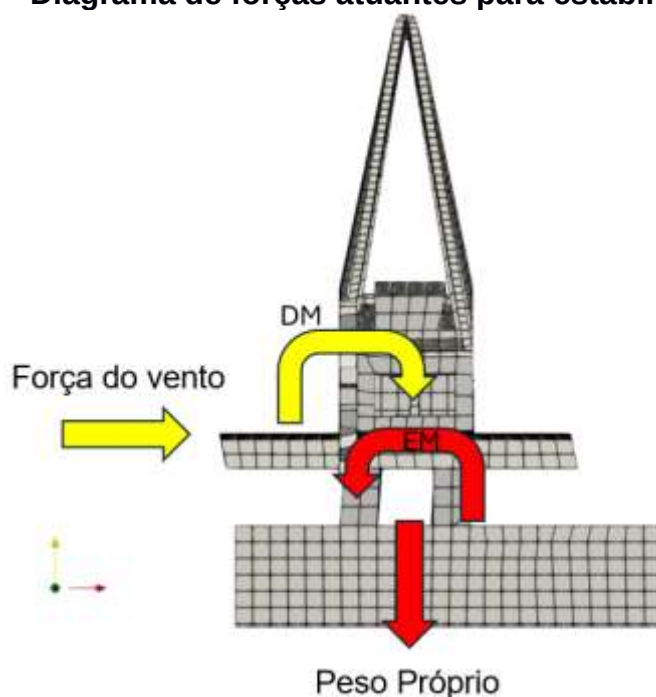
A norma FEM 2-131/132 foi utilizada para determinação analítica das forças aerodinâmicas e estabilidade da recuperadora de minério.

4.1.1 FEM 2-131/132

A norma FEM 2-131/132 possui critérios que definem níveis seguros de operação de acordo com a velocidade do escoamento de ar ao longo do equipamento, avaliando para isso a estabilidade do equipamento frente à pressão gerada pelo escoamento.

A Figura 3 apresenta o diagrama de corpo livre da recuperadora, no qual as principais forças podem ser classificadas como forças de vento e forças de resistência. As forças de vento têm o potencial de causar a queda da parte superior do equipamento sobre a parte inferior, gerando um momento desestabilizador (DM). Já as forças de resistência são responsáveis por conferir estabilidade à estrutura, atuando em um momento que vai contra o movimento de tombamento da recuperadora (EM).

Figura 3 – Diagrama de forças atuantes para estabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Os momentos desestabilizadores (D_m) e estabilizadores (E_m) são determinados com base na velocidade do vento e na massa do equipamento, conforme as equações (14) e (15).

$$D_m = \left(\frac{\rho \times V^2}{2} \right) \times A \times r_y \quad (14)$$

Onde ρ é a densidade do ar, V é a velocidade do vento, A é a área de incidência do vento e r_y é a distância entre o centro de carga do vento e o ponto de apoio.

$$E_m = (M \times g) \times r_x \quad (15)$$

Onde M é a massa da parte superior da recuperadora, g é a aceleração da gravidade e r_x é a distância entre o centro de massa e o ponto de apoio.

A relação entre esses momentos determina os níveis de segurança operacional. De acordo com a norma FEM 2-131/13, definida pela Federação Europeia de Manuseio de Materiais (FEM), um momento estabilizador que seja inferior a 1,5 vezes o momento desestabilizador pode resultar na queda da estrutura. Quando esta razão é menor que 1, indica que os momentos desestabilizadores são maiores que os

momentos estabilizadores, aumentando o risco de colapso da estrutura sob condições adversas de vento.

A Figura 4 mostra na cor cinza a área de incidência considerada no cálculo analítico para o escoamento de ar na direção x (eixo vermelho). O valor para esta área, calculado pelo software solidWorks, foi de 524m². O escoamento gera forças que criam momentos em torno de Y e Z, nos quais os momentos em torno do eixo Y podem ser desprezados devido à proximidade com a coordenada Y centro de massa do equipamento.

Figura 4 – Área de incidência das forças aerodinâmicas em cinza



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Caracterização do fluido e dos sólidos

O fluido utilizado na simulação é ar (considerado como fluido incompressível) nas condições de temperatura de 27°C e de pressão 1 atm, com massa específica de 1,2kg/m³ e viscosidade dinâmica de $1,8 \times 10^{-5}$ Pa.s.

O escoamento de ar produz forças em superfícies sólidas devido a interações entre o fluido e a superfície, que são explicadas pelas leis da física, particularmente pela dinâmica dos fluidos. Quando o ar em movimento encontra uma superfície sólida, ocorre uma alteração na distribuição de velocidade do fluido próximo à superfície, devido à condição de não deslizamento que impõe velocidade zero na interface sólido-fluido. Esta mudança na velocidade gera variações no campo de pressão ao redor da superfície. Esses gradientes de pressão são os principais responsáveis pela geração

de forças de arrasto e sustentação. O arrasto é predominantemente causado pela diferença de pressão entre a parte frontal e posterior do objeto, enquanto a sustentação resulta de diferenças de pressão lateral devido à curvatura e ao ângulo da superfície em relação ao escoamento. Além disso, a separação da camada limite do ar, que é uma região de escoamento turbulento e rotativo que se forma na retaguarda do objeto, pode intensificar a complexidade dessas interações, influenciando significativamente a magnitude das forças exercidas pelo escoamento sobre as superfícies sólidas.

A modelagem do equipamento vai depender ainda das especificações técnicas dos materiais utilizados na construção do mesmo. As principais propriedades que serão utilizadas são do aço, material empregado nas principais estruturas do equipamento, especificados nos desenhos técnicos do equipamento.

- Massa específica: 7850 kg/m^3 ;
- Módulo de elasticidade: 200 GPa ;
- Coeficiente de Poisson: 0,3;

A determinação dos centros de massa e momentos de inércia do corpo sólido é feita pela densidade e geometria dos elementos sólidos da malha do equipamento. Ainda para o modelo foi utilizada também a condição de contato, aplicada entre as rodas do equipamento e o trilho (tanto o trilho no solo como o trilho na mesa de giro do equipamento). Para isso as propriedades utilizadas do contato aço-aço são:

- Coeficiente de atrito 0,2;
- Rigidez de contato: 1000 N/mm
- Amortecimento/restituição: 0,6;

4.3 Modelagem e Condições de contorno

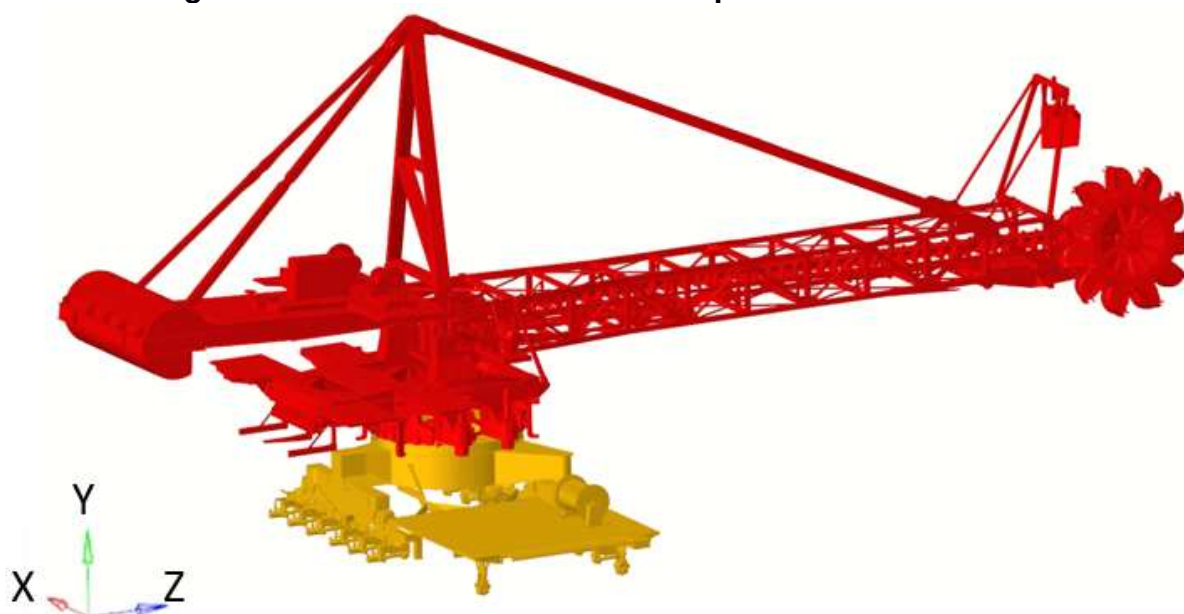
Para o estudo proposto, o volume de controle foi definido em torno do equipamento mostrado na Figura 5, e para a malha estrutural do mesmo foi utilizada para isso uma malha de elementos sólidos (Figura 6).

Figura 5 – Imagem da recuperadora real



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 6 – Modelo numérico da Recuperadora



Fonte: Elaborado pelo autor

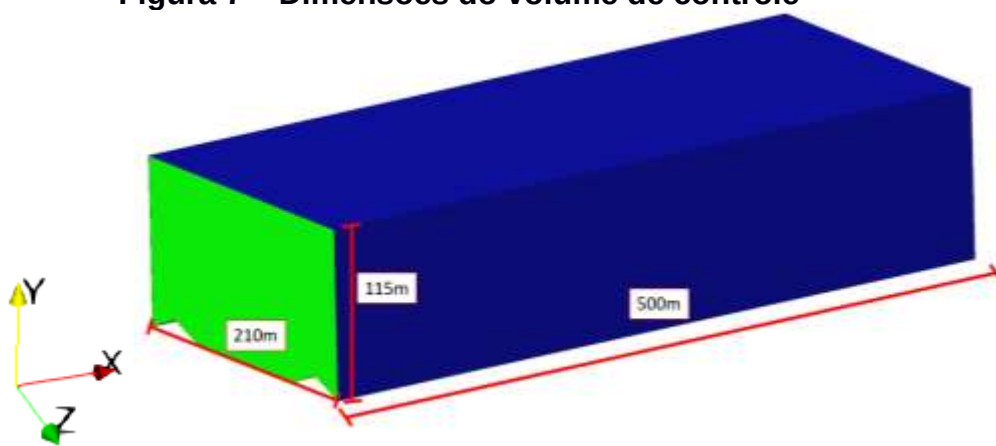
As dimensões do domínio fluido estão de acordo com o comportamento dinâmico do ar ao entrar e sair do volume de controle. O ar deve chegar aos limites do domínio com o comportamento o mais estável possível, fazendo com que esses limites representem o escoamento e ar livre e afastado das paredes tanto do solo quanto do equipamento.

Para tanto, foi utilizado como referência o trabalho de Rahman e outros, 2010, no qual a dimensão longitudinal do domínio pode se estender de 10 a 15 vezes a

maior dimensão do mesmo perpendicular ao escoamento. Da mesma forma, foram selecionadas as melhores respostas das condições de contorno em comparação com resultados experimentais. Foram aplicadas as condições de parede sem atrito e pressão atmosférica para as regiões onde há o escoamento livre.

Dessa forma, com o vento na direção X (da entrada até a saída mostradas na Figura 8), a maior dimensão da recuperadora é de 40m, o que faz necessário um domínio de 400m a 600m. O domínio utilizado possui 500m de comprimento. Nas outras duas direções, o domínio possui 115m de altura e 210m de largura, que é a distância entre duas pilhas de material na planta (Figura 7).

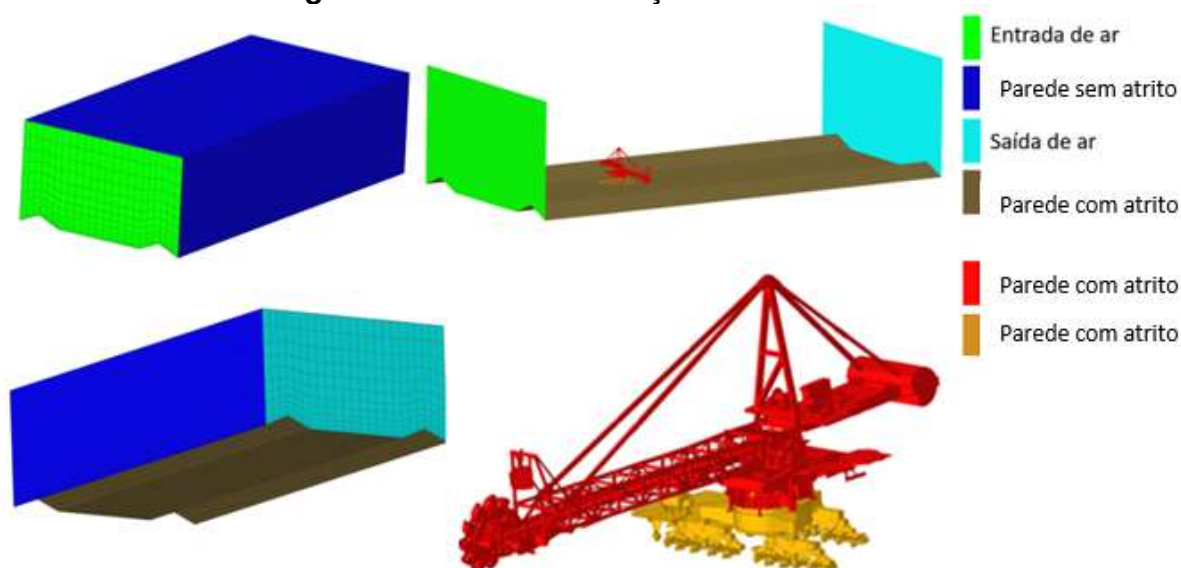
Figura 7 – Dimensões do volume de controle



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 8 são apresentadas em cores as principais condições de contorno aplicadas ao domínio fluido e também algumas aplicadas ao domínio FEM. Em verde é representada a entrada de ar, para a qual é aplicada a condição de contorno de velocidade prescrita. O valor da velocidade variou entre 2 m/s (medido experimentalmente), 36 m/s (limite da norma FEM 2-131/13) e até 132m/s para avaliar a estabilidade do equipamento para velocidades do vento superiores às estabelecidas em norma. O modelo de turbulência utilizado foi o k-epsilon, baseado nas equações RANS.

Figura 8 – Malha e condições de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor

As paredes em azul escuro representam o escoamento de ar livre, longe das paredes, como já descrito nos parágrafos anteriores. A condição de contorno adotada foi utilizar as paredes sem atrito, fazendo com que as velocidades não sejam alteradas pelo contato com essas paredes e seja facilitado o cálculo do equilíbrio da massa dentro do volume de controle, visto que o escoamento tem uma direção principal.

Em azul claro foi implementada a condição de saída de ar, onde a pressão foi fixada no valor da pressão atmosférica. Em marrom, a condição de não deslizamento foi aplicada ao solo, na qual a velocidade do escoamento é nula em todas as direções. Foram feitas representações das pilhas como na Figura 1 para que também tenham influência no escoamento de ar.

Nas cores vermelho e laranja está o equipamento em estudo, em que será aplicada também a condição de não deslizamento (velocidade zero nas paredes). Além disso, essas malhas possuem liberdade de movimento, pois um acoplamento *two-way* foi utilizado para acoplamento dos solvers CFD e FEM, utilizando para isso a biblioteca *solids4Foam* desenvolvida por Cardiff e outros (2018), a partir do código do OpenFOAM. Dessa forma se o gradiente de pressão for suficiente para deslocar o equipamento, a movimentação da malha vai modificar internamente o volume de controle, alterando o campo de pressões e velocidades.

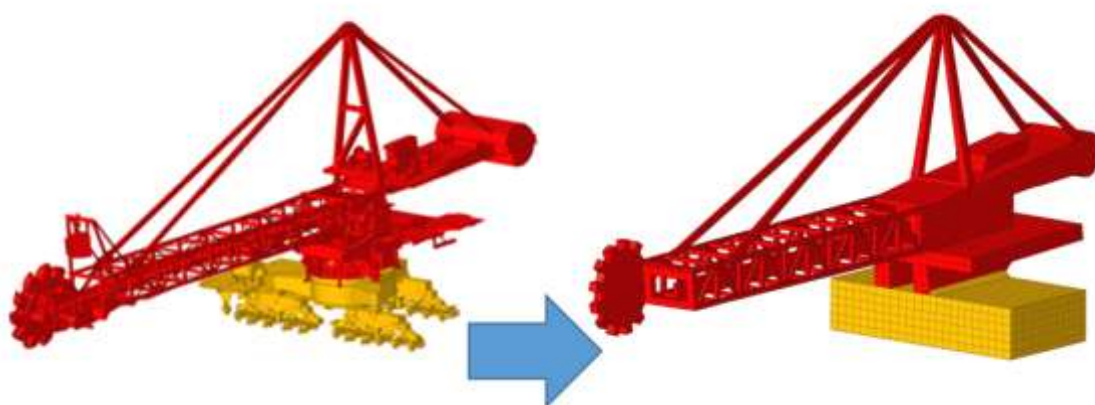
Devido ao acoplamento FSI utilizado o único tipo de malha permitido para simulação era malha 3D, pois é a mesma malha utilizada para leitura dos campos de pressão e deformação do domínio fluido a partir da resposta estrutural. Dessa forma,

a geometria foi simplificada para representar as principais superfícies de impacto do escoamento e também para reduzir o tamanho da malha, pois uma malha com elementos 3D possui um número de elementos superior à malhas com simplificações 2D e 1D.

Para o modelo FEM foram aplicadas as condições de contato das rodas do equipamento com o solo, as juntas coladas entre cada parte do equipamento representado pelas mesmas cores, e a condição de contato entre a parte vermelha e a parte laranja, sendo aplicado nas rodas da parte superior apoiadas na mesa de giro da parte inferior.

Para solução do problema o software utilizado é o solids4Foam, desenvolvido por Cardiff e outros (2018), baseado no OpenFoam e no Foam-extend, ambos códigos abertos e disponíveis nas bibliotecas do Github. A malha utilizada é tridimensional, tanto na parte de elementos finitos quanto na parte CFD. A máquina utilizada para rodar a simulação possui um processador Xeon 3.6Ghz com 64gb de RAM de 2400Mhz. As simulações CFD do modelo de geometria mais complexa levou cerca de 6 meses pra rodar 1s de análise. As simulações FSI do modelo de geometria mais simplificada levou cerca de 2 meses pra rodar 2s de análise.

Figura 9 – Simplificação do modelo



Fonte: Elaborado pelo autor

No campo da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), a seleção e otimização das configurações de malha são cruciais para garantir a precisão e eficiência das simulações. Em um estudo comparativo realizado utilizando a plataforma OpenFOAM, foram analisadas duas configurações de malha distintas: uma malha simplificada, que reduziu a quantidade de elementos em aproximadamente

cinquenta vezes, e uma malha complexa com elementos de qualidade inferior. O modelo simplificado apresentou um *aspect ratio* máximo de 15.54, um *skewness* que não excedeu 1.02, e uma não-ortogonalidade máxima de 74.45 °, indicando apenas uma dúzia de faces com problemas severos de não-ortogonalidade (acima de 70 graus). Em contrapartida, o modelo complexo revelou parâmetros mais elevados, como um *aspect ratio* que alcançou 38.34, *skewness* máxima de 1.96, e não-ortogonalidade máxima de 81.13 °, com 418 faces apresentando sérios problemas de não-ortogonalidade.

Essa comparação destaca os compromissos inerentes entre a complexidade da malha e a qualidade dos elementos, enfatizando o impacto das características da malha, como obliquidade, razão de aspecto, e não-ortogonalidade, na fidelidade e demandas computacionais das simulações de fluidos. Enquanto a malha simplificada oferece maior eficiência computacional com uma precisão aceitável para muitas aplicações, a malha complexa, apesar de sua maior resolução, pode aumentar a demanda computacional devido à necessidade de correções mais complexas e a uma convergência mais lenta. Portanto, a escolha da configuração de malha deve ser cuidadosamente balanceada para atender às exigências específicas de cada simulação de CFD.

A estratégia utilizada para a análise FSI foi rodar a análise CFD inicialmente, para que o escoamento chegasse ao ponto de completamente desenvolvido e após isso a análise FSI pudesse ser iniciada. Porém devido ao alto custo computacional, não foi possível rodar a análise FSI do modelo completo representando o dispositivo real, visto que a malha ficou em torno de 43 milhões de elementos. Para isso, foi feito um modelo com a geometria mais simplificada, representando as principais geometrias da máquina e representando exatamente a mesma área frontal, distância dos apoios e centro de massa do equipamento real, como mostra a Figura 9. A malha mais simplificada chegou a 1,1 milhão de elementos. Dessa forma, com o modelo mais complexo foi possível rodar análises CFD, enquanto que FSI só foi rodado com o modelo mais simples.

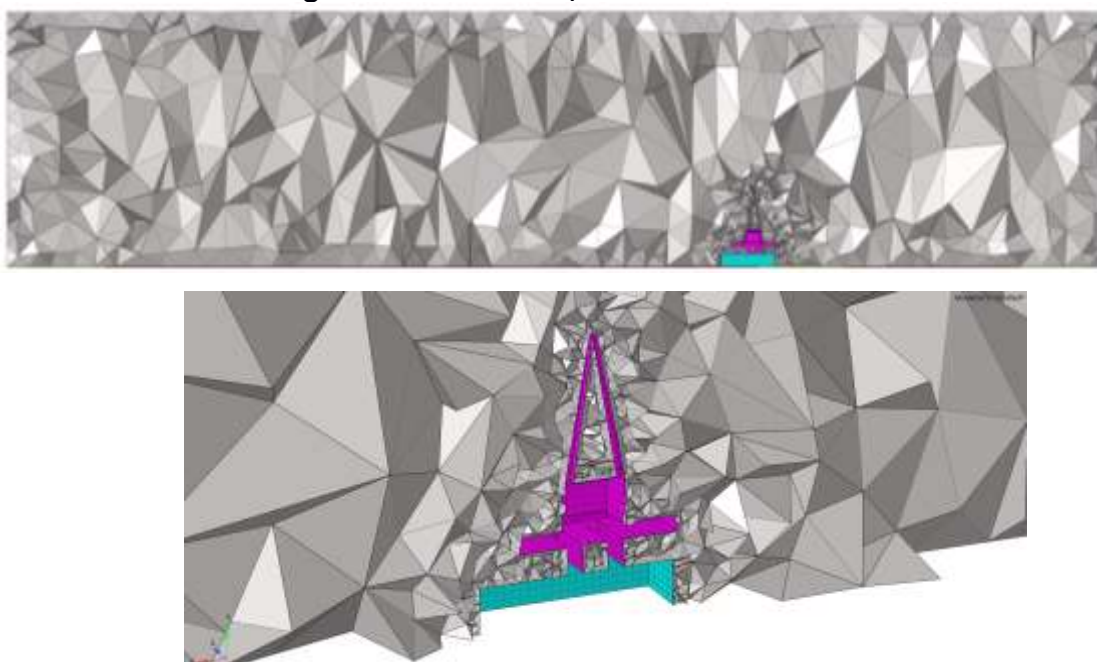
4.4 Teste de malhas

No processo de validação e otimização de modelos computacionais, um teste de malha foi realizado para avaliar a adequação e precisão do modelo mais

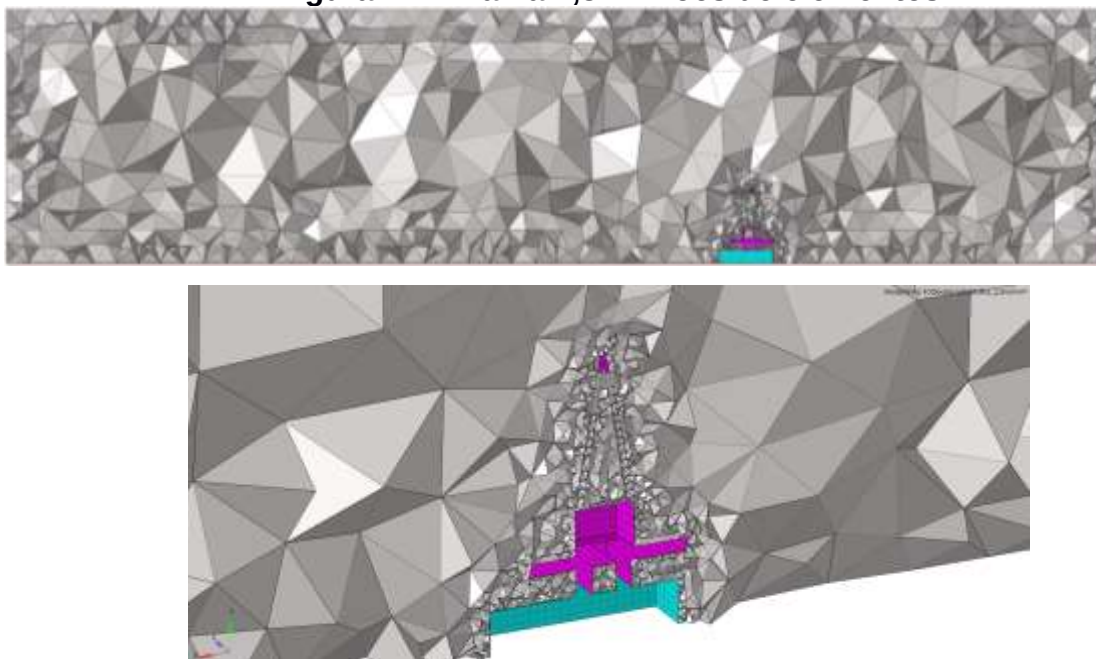
simplificado. Durante o teste, três diferentes configurações de malha foram examinadas, com o objetivo de identificar qual delas oferece um equilíbrio maior entre precisão dos resultados e eficiência computacional. As malhas variaram em densidade e refinamento, permitindo uma análise comparativa sobre como cada configuração influencia a convergência da solução e a captura de detalhes físicos essenciais do modelo.

Na análise de interação fluido-estrutura (FSI), foram utilizadas três malhas distintas para avaliar a influência da malha na acurácia dos resultados. A malha simplificada empregada na análise possuía 1,1 milhões de elementos. Além disso foram feitas duas malhas mais refinadas que continham, respectivamente, 2,3 milhões e 4,1 milhões de elementos. Este estudo visou determinar a configuração ótima de malha que equilibra precisão computacional e custo de processamento, com as comparações dos resultados sendo ilustradas na Figura 10, Figura 11 e na Figura 12 para cada uma das configurações de malha.

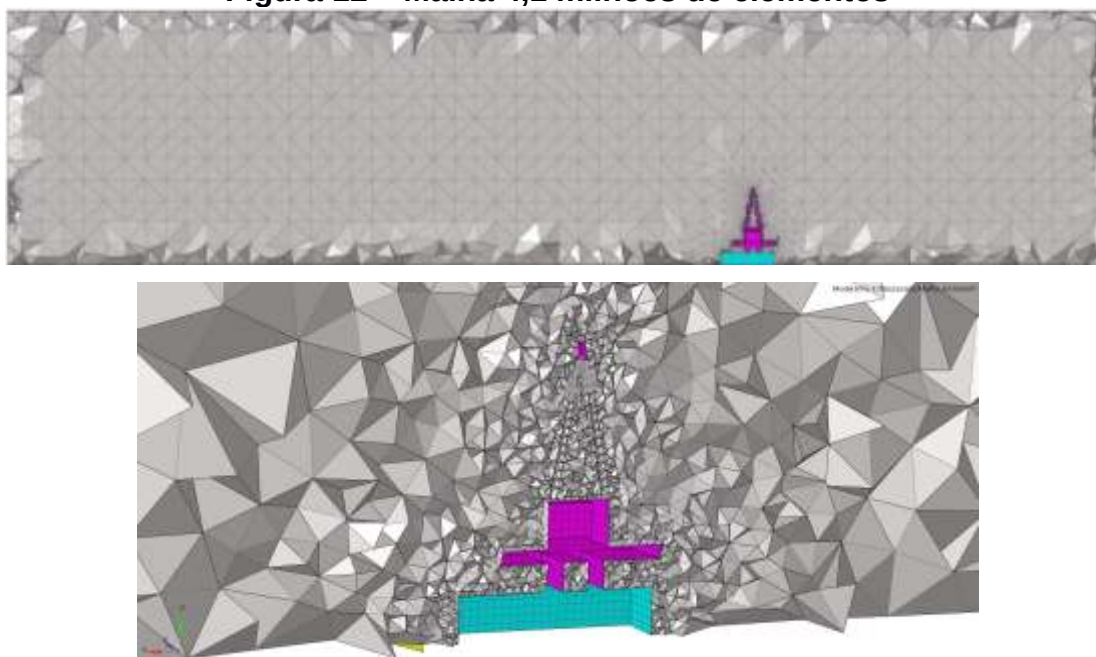
Figura 10 – Malha 1,1 milhões de elementos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11 – Malha 2,3 milhões de elementos

Fonte: Elaborado pelo autor

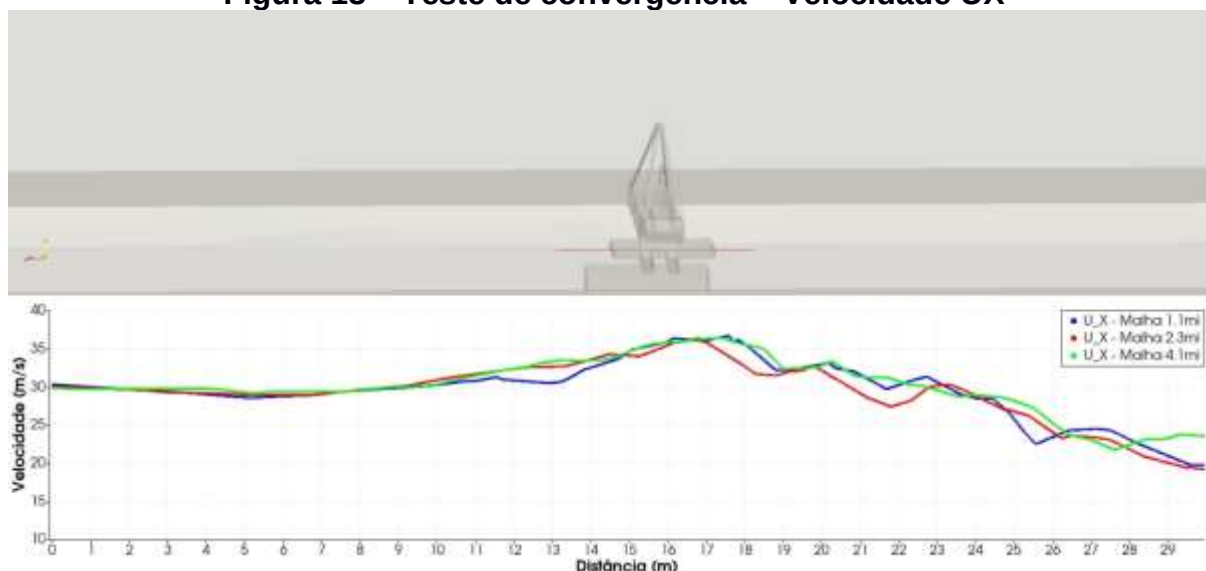
Figura 12 – Malha 4,1 milhões de elementos

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 13 ilustra a comparação dos resultados de velocidade ao longo de uma linha transversal à recuperadora, na direção do escoamento, obtidos a partir de simulações usando três malhas distintas em uma análise de interação fluido-estrutura (FSI). A linha azul representa a malha com 1,1 milhões de elementos, a linha vermelha indica a malha com 2,3 milhões de elementos, e a linha verde denota a malha com

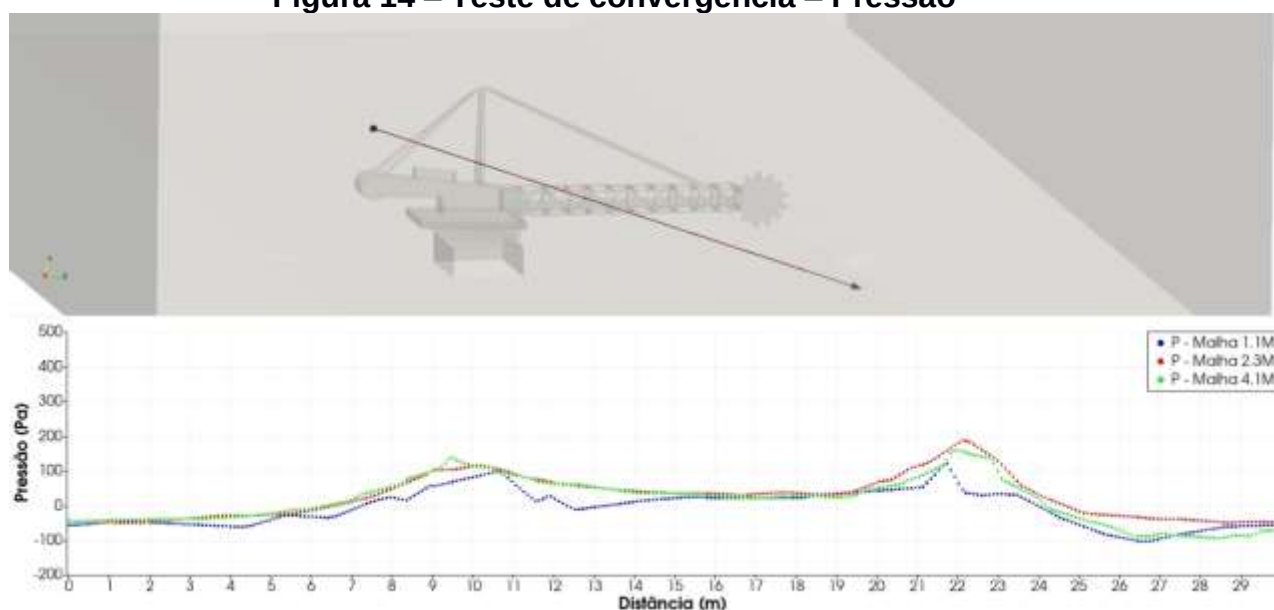
4,1 milhões de elementos. A convergência das curvas entre 0 e 29 m sugere que, apesar do aumento no número de elementos, as diferenças significativas na velocidade não são minimizadas, indicando que uma malha mais densa não resulta em benefícios proporcionais quanto à precisão dos dados obtidos. Essa análise sugere uma possível otimização na escolha da malha, equilibrando custo computacional e precisão dos resultados. A maior diferença foi detectada mais ao final da linha em que a malha mais densa resultou em uma velocidade de 24m/s e a malha menos densa em torno de 21m/s, uma diferença de 16% em 2 nós da malha, porém correspondem a um total de 5% da quantidade de nós avaliados nesse caso.

Figura 13 – Teste de convergência – Velocidade UX



Fonte: Elaborado pelo autor

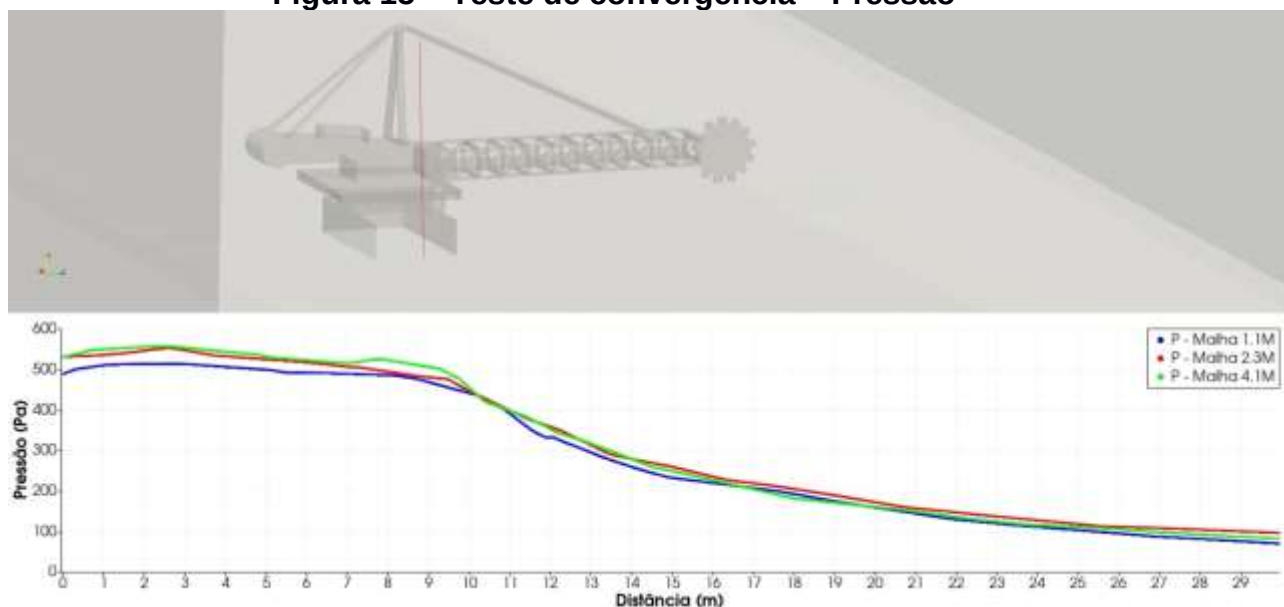
A Figura 14 exibe os resultados de pressão ao longo da reta vermelha mostrada na parte superior da imagem para três configurações de malha em uma análise de interação fluido-estrutura. Nota-se que há um pico de pressão em torno de 22 m, onde as curvas apresentam variações de até 28% (130 Pa a 180 Pa) da malha menos densa para a malha mais densa, com a malha intermediária em 160Pa, indicando que a densidade da malha tem uma influência em menos que 5% dos elementos avaliados nos resultados. Em linha com esse resultado, em outras áreas, as curvas tendem a ser ainda mais próximas, sugerindo que aumentos substanciais na densidade da malha não necessariamente traduzem em melhorias significativas na previsão de pressão ao longo de toda a reta analisada.

Figura 14 – Teste de convergência – Pressão

Fonte: Elaborado pelo autor

A representação gráfica na Figura 15 ilustra a variação da pressão ao longo de uma linha (em vermelho na parte superior da imagem) com o uso de três diferentes densidades de malhas. A comparação mostra que as curvas são alinhadas ao longo de toda a extensão analisada, indicando uma uniformidade nos resultados de pressão que sugere que o aumento na densidade das malhas não contribui de maneira significativa para a precisão dos dados. A maior diferença detectada nesse resultado foi entre 9m e 10m, com valores entre 520 e 490 Pa. No início das curvas as diferenças são mais significativas, mas elas reduzem com a proximidade do equipamento.

Figura 15 – Teste de convergência – Pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

Na seleção da malha para o modelo de simulação, optou-se pela configuração com 1,1 milhões de elementos após uma análise detalhada das diferenças nos resultados fornecidos pelas três malhas testadas. Constatou-se que as discrepâncias entre os resultados obtidos com a malha de 1,1 milhões de elementos e as malhas mais densas não foram significativas, indicando que o aumento na densidade da malha não contribuiu substancialmente para a precisão dos resultados. Essa escolha permitiu equilibrar eficazmente a precisão dos cálculos com a eficiência computacional, garantindo uma simulação robusta sem o consumo excessivo de recursos computacionais. A decisão apoiou-se no princípio de que um aumento moderado no número de elementos é suficiente para capturar as características essenciais do fenômeno modelado, sem a necessidade de uma malha extremamente refinada que poderia levar a um gasto computacional desnecessário.

4.5 Configuração experimental

Para a validação dos dados da simulação numérica, foi desenvolvida uma configuração experimental na qual foram utilizados anemômetros, com o objetivo de determinar a velocidade do vento em distintos pontos da máquina, e extensômetros, para determinar a deformação induzida pela carga de vento medida. Dessa forma, seria possível aplicar uma carga de vento semelhante no modelo e medir as deformações causadas.

A coleta de dados experimentais proposta para esse trabalho, e os pontos de coleta foram determinados pelo trabalho de Gouvea (2019) de acordo com a Tabela 2 e ilustrados da Figura 16 até a Figura 20.

Tabela 2 – Sensores do setup experimental

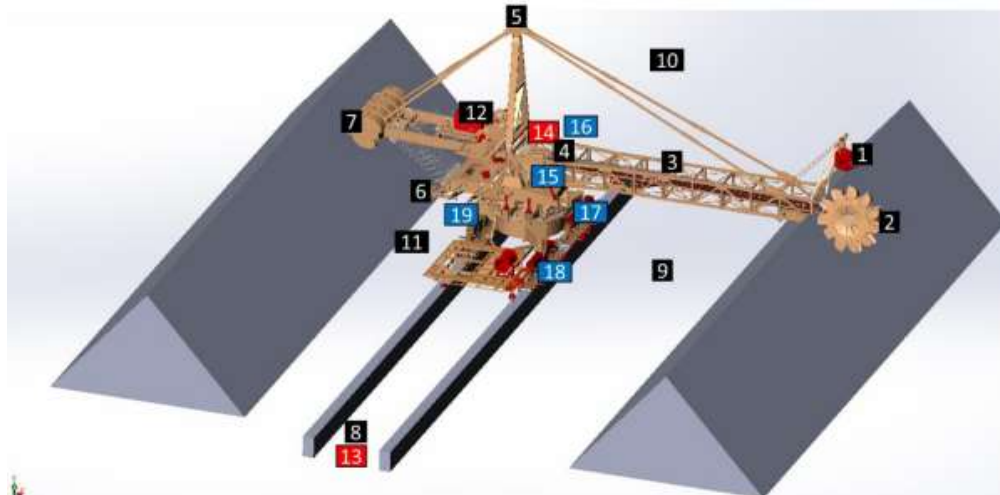
SENSOR	TIPO	POSIÇÃO	REFERÊNCIA
Sensor 3	ANEMÔMETRO	Instalação fixada na parede superior da lança	Meio da lança
Sensor 4	ANEMÔMETRO	Fixado na base da lança parte superior	Encontro da lança com o centro de giro
Sensor 5	ANEMÔMETRO	Instalação no topo da torre	Parte mais alta da recuperadora
Sensor 7	ANEMÔMETRO	Instalação no conjunto do enrolador de cabos, parte contrária a lança	Parte mais à esquerda da recuperadora
Sensor 12	ANEMÔMETRO	Instalação no patamar entre o enrolador de cabos e a torre	Próximo a caixa do motor
Sensor 17	EXTENSÔMETRO	BALANCIM PRIMARIO 1 - Instalação na estrutura do balancim da recuperadora, lado lança, balancim da esquerda, posicionamento lado contrário ao do motor	Base da recuperadora, balancim que age como viga bi-apoiada, balancim lado contrário ao enrolador de cabos elétricos da plataforma
Sensor 18	EXTENSÔMETRO	BALANCIM PRIMARIO 2 - Instalação na estrutura do balancim da recuperadora, lado lança, balancim da direita, posicionamento lado contrário ao do motor	Base da recuperadora, balancim que age como viga bi-apoiada, balancim do mesmo lado do enrolador de cabos elétricos da plataforma
Sensor 19	EXTENSÔMETRO	BALANCIM PRIMARIO 3 - Instalação na estrutura do balancim da recuperadora, lado contra lança, posicionamento lado contrário ao do motor	Base da recuperadora, balancim que age como viga bi-apoiada, lado contra lança

Fonte: Gouvea (2019)

A Figura 16 mostra de um modo mais geral os pontos de instalação dos sensores para a avaliação experimental. Os anemômetros estão representados na cor preta e os extensômetros em azul. Há mais sensores representados na imagem do que os que foram medidos na realidade, devido à problemas em campo durante a instalação dos sensores, dessa forma, foram medidos menos sensores do que os que foram planejados. O posicionamento dos sensores foi definido pelo trabalho de Gouvea (2019) pois ele teve como objetivo também a avaliação numérica desse equipamento,

porém avaliando apenas o escoamento sobre o equipamento e sem os graus de liberdade entre as partes superior e inferior.

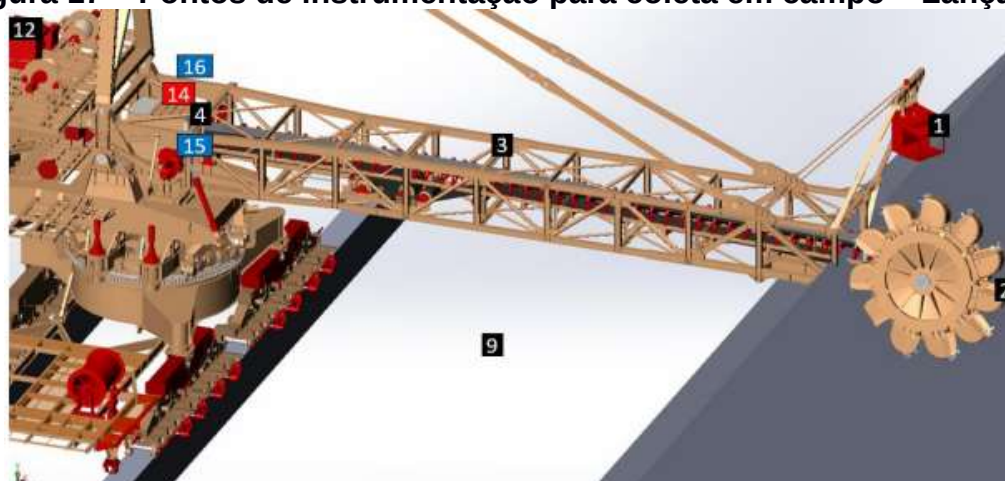
Figura 16 – Pontos de instrumentação para coleta em campo



Fonte: Gouvea (2019)

A Figura 17 tem como objetivo mostrar com mais clareza os pontos na região da lança, com foco nos pontos 3 e 4 que foram medidos.

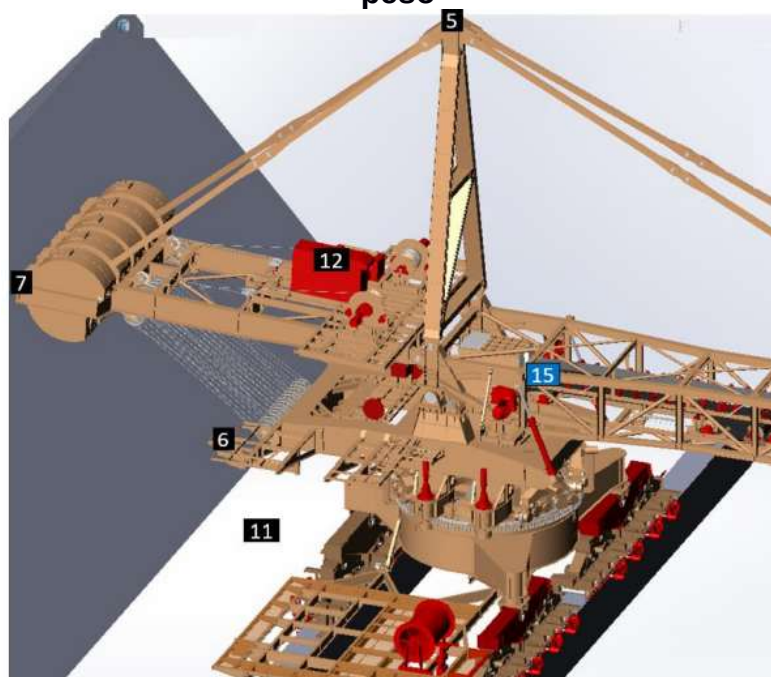
Figura 17 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Lança



Fonte: Gouvea (2019)

Na Figura 18 são mostrados os sensores posicionados ao longo do mastro e contra-peso do equipamento. O anemômetro 7 completa a faixa horizontal do equipamento, podendo dessa forma avaliar as velocidades entre as duas extremidades nessa direção. O anemômetro 5 mede as velocidades no ponto mais alto do equipamento, mais próximo do escoamento livre, e o anemômetro 12 mede as velocidades na parte central do equipamento.

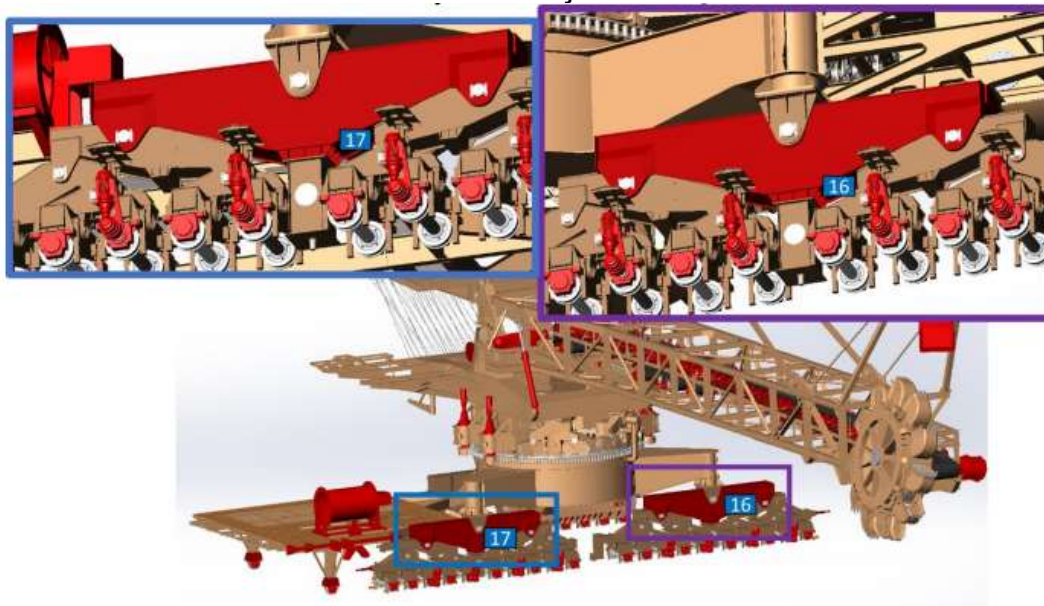
Figura 18 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Mastro e contra peso



Fonte: Gouvea (2019)

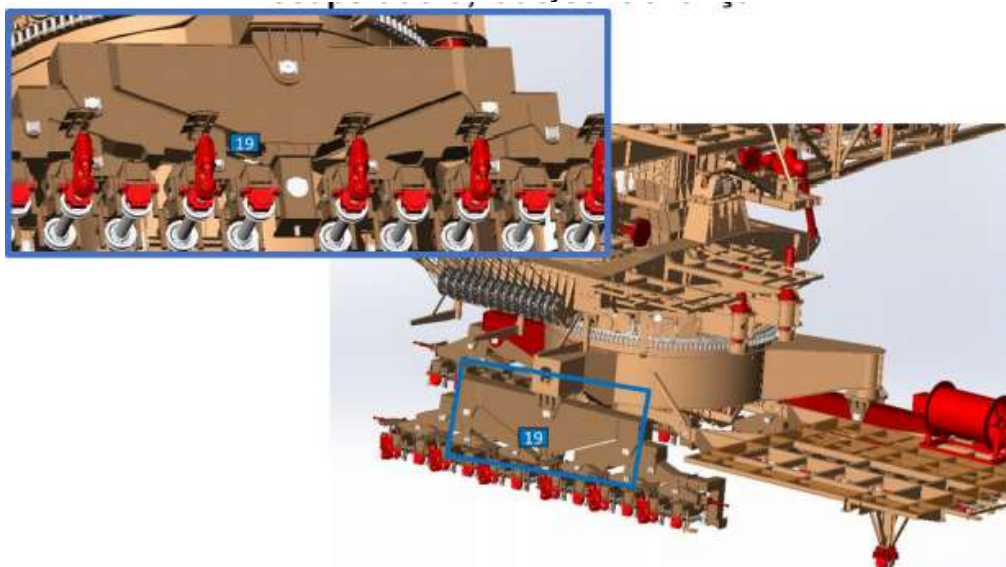
Nas figuras 19 e 20 são evidenciados os sensores na parte inferior do equipamento, onde estão os truques e balancins de translação. O objetivo principal dos extensômetros nessas regiões é avaliar a variação das deformações nos balancins principais de apoio do equipamento, podendo dessa forma medir uma possível falta de estabilidade caso o desequilíbrio entre as forças verticais dos apoios seja muito alto.

Figura 19 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Balancins de translação



Fonte: Gouvea (2019)

Figura 20 – Pontos de instrumentação para coleta em campo – Balancins de translação



Fonte: Gouvea (2019)

5 RESULTADOS

Os resultados estão divididos entre resultados analíticos, numéricos e experimentais.

5.1 Cálculo analítico de estabilidade

Considera-se como cálculo analítico a determinação do coeficiente de segurança como estabelecido pela norma FEM 2-131/132, que avalia a relação entre os momentos estabilizante e desestabilizante, gerados respectivamente pelo peso próprio da estrutura e a carga de vento.

Dados de entrada:

Massa da parte superior do equipamento: 491,4 ton (Calculado pelo SolidWorks através do CAD 3D).

- Aceleração da gravidade: valor padrão ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- Distância entre o centro de massa do equipamento e o centro de giro em relação a Z: 4,8 m
- Pressão dinâmica causada pelo escoamento a 36 m/s: 777,6 Pa

Área de incidência dos gradientes de pressão da parte superior do equipamento: 524,4 m² (Calculado pelo SolidWorks através do CAD 3D).

- Distância entre o centro das forças aerodinâmicas e o centro de giro em relação a Z: 8,3 m

A estrutura pode falhar para estabilidade quando o momento desestabilizador for superior ao momento estabilizador. A norma FEM 2-131/13 considera um fator de segurança ν_k de 1,5, o que significa que quando a razão E_m/D_m atinge esse valor, a estrutura perde a estabilidade. Para uma área frontal de 524 m² e uma massa de 491,4 toneladas, a velocidade de 36 m/s resulta em uma pressão do vento de 777,6 Pa, o que produz uma força de 407,8 kN e consequentemente um momento desestabilizador de 3,4 MN.m. O momento estabilizador é de 24 MN.m, levando a uma condição na qual a recuperadora não falharia, um ν_k de 7,05. De acordo com a norma, a condição de falha ocorreria a uma velocidade do vento de 68 m/s. Nesta condição, a razão entre os momentos desestabilizador e estabilizador ainda está abaixo de 1,5. A velocidade na qual essa razão cai abaixo de 1 é de 83 m/s, ou seja, o momento

desestabilizador é maior que o momento estabilizador. Por essa razão, o modelo foi simulado para velocidades do vento de 36, 68 e 84 m/s. Para avaliar o comportamento da estrutura em velocidades mais altas, também foram simuladas velocidades do vento de 100 e 132 m/s. Os valores de v_k de acordo com as velocidades de vento são mostrados na Figura 21.

Figura 21 – v_k variando com a velocidade do escoamento



Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Resultados experimentais

Foi feito um ensaio, pela empresa Vale S.A, para determinação das velocidades e deformações do equipamento no dia 15/03/2020. A medição efetiva iniciou às 10 horas da manhã, e durou até aproximadamente as 15:30 (5 horas e 30 minutos de coleta). A instalação completa dos sensores foi prejudicada devido as chuvas que ocorreram em São Luís.

A direção principal da incidência dos gradientes de pressão foi na direção x (85%), com 2% do gradiente na direção z e 13% entre x e z.

5.2.1 Posicionamento dos sensores

Os anemômetros que puderam ser instalados foram os referentes aos pontos 3 (Figura 22), 4(Figura 23), 5(Figura 24), 7(Figura 25) e 12(Figura 26) conforme plano de instrumentação.

Figura 22 – Anemômetro no ponto 3



Fonte: Vale, 2020

Figura 23 – Anemômetro no ponto 4



Fonte: Vale, 2020

Figura 24 – Anemômetro no ponto 5



Fonte: Vale, 2020

Figura 25 – Anemômetro no ponto 7

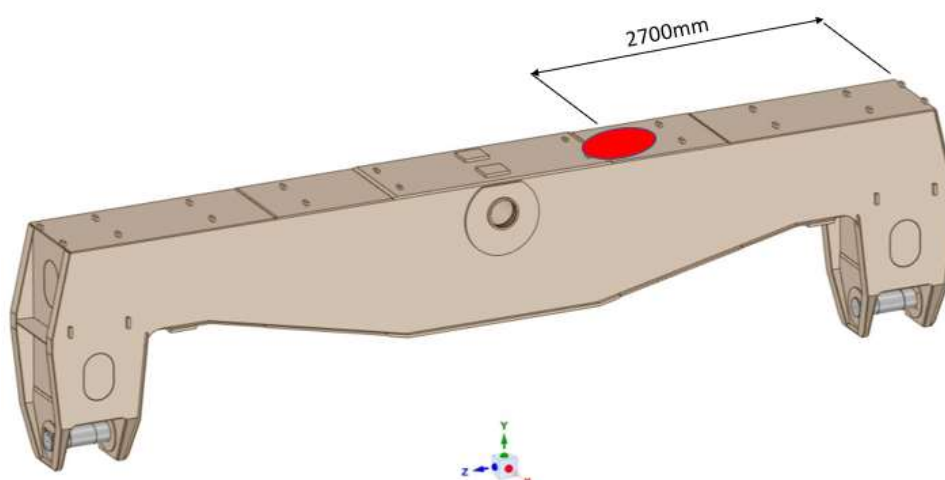


Fonte: Vale, 2020

Figura 26 – Anemômetro no ponto 12

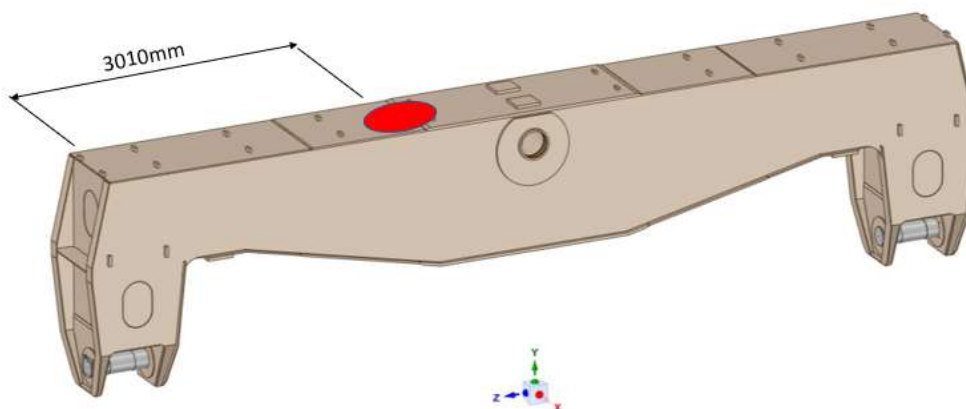
Fonte: Vale, 2020

Os extensômetros que puderam ser instalados foram os referentes aos pontos 17(Figura 27), 18(Figura 28) e 19(Figura 29) conforme plano de instrumentação. A Figura 30 mostra um esquemático das posições de cada eixo dos extensômetros instalados.

Figura 27 – Extensômetro no ponto 17

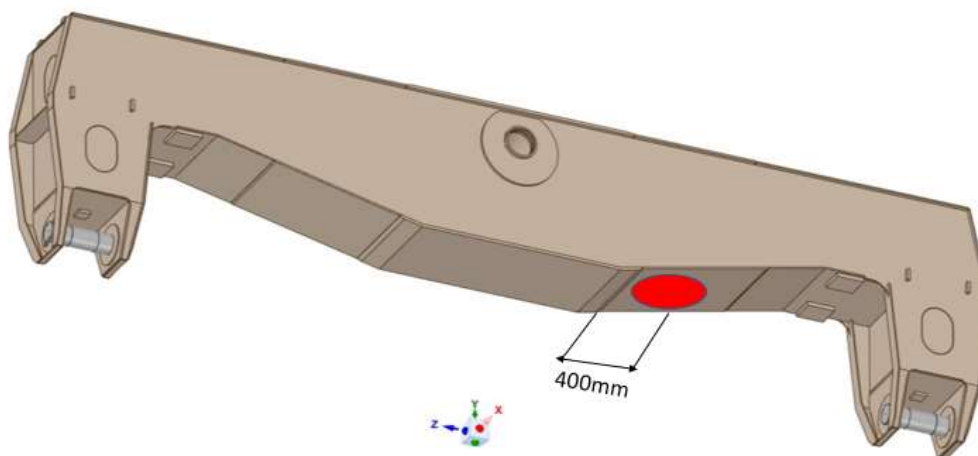
Fonte: Vale, 2020

Figura 28 – Extensômetro no ponto 18



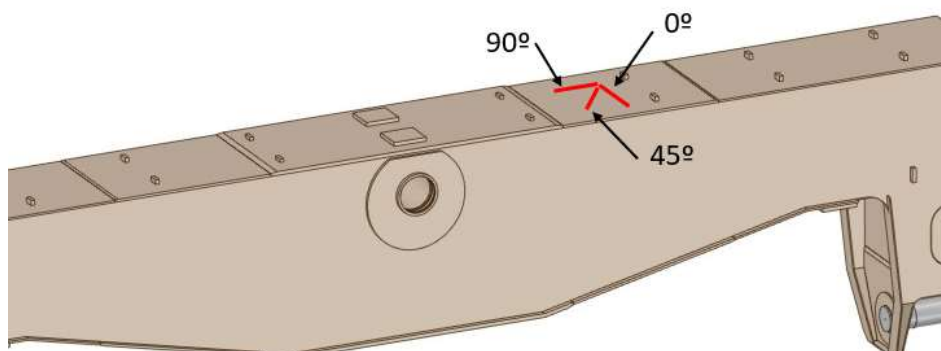
Fonte: Vale, 2020

Figura 29 – Extensômetro no ponto 19



Fonte: Vale, 2020

Figura 30 – Direção de instalação dos extensômetros

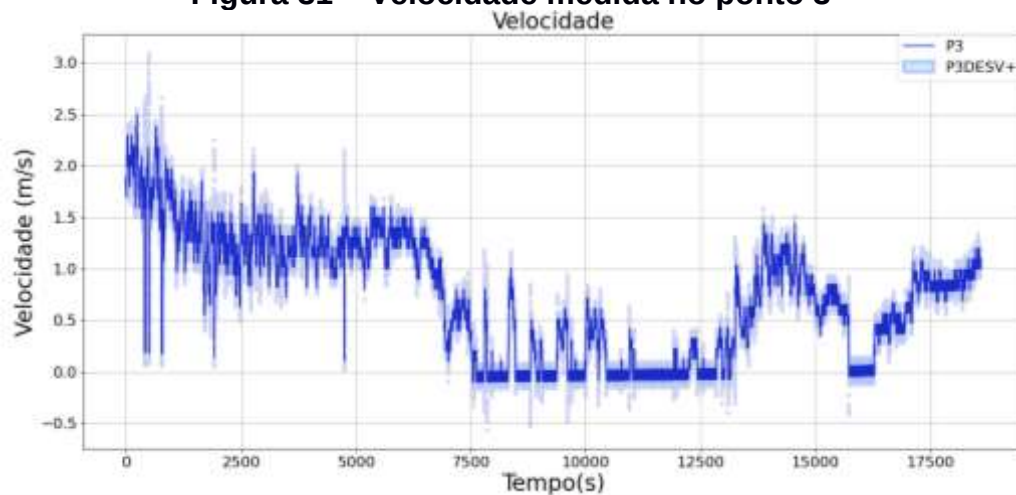


Fonte: Vale, 2020

5.2.2 Dados mensurados

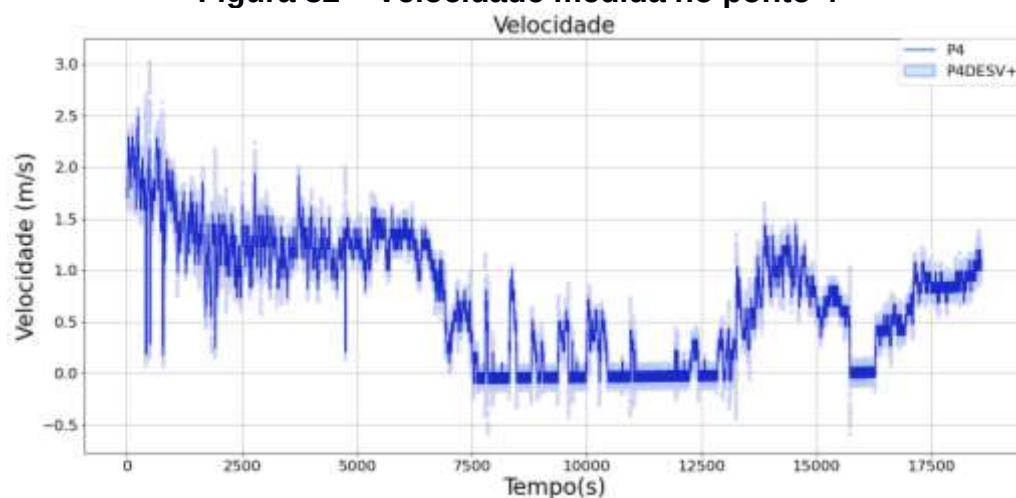
As magnitudes de velocidade do escoamento capturadas pelos anemômetros (figuras 31 a 35) tiveram um comportamento semelhante, com valor máximo obtido de até 2,5m/s. A curva em azul representa o valor medido e a área em azul claro representa o desvio padrão calculado. O ponto 5 (Figura 33) representa o escoamento livre de atrito, na parte superior da recuperadora. A curva em azul escuro são os valores medidos pelos sensores e em azul claro o desvio padrão calculado em relação a média. Não foi possível determinar a incerteza pois a empresa não forneceu acesso aos dados metrológicos dos equipamentos utilizados nessa coleta.

Figura 31 – Velocidade medida no ponto 3

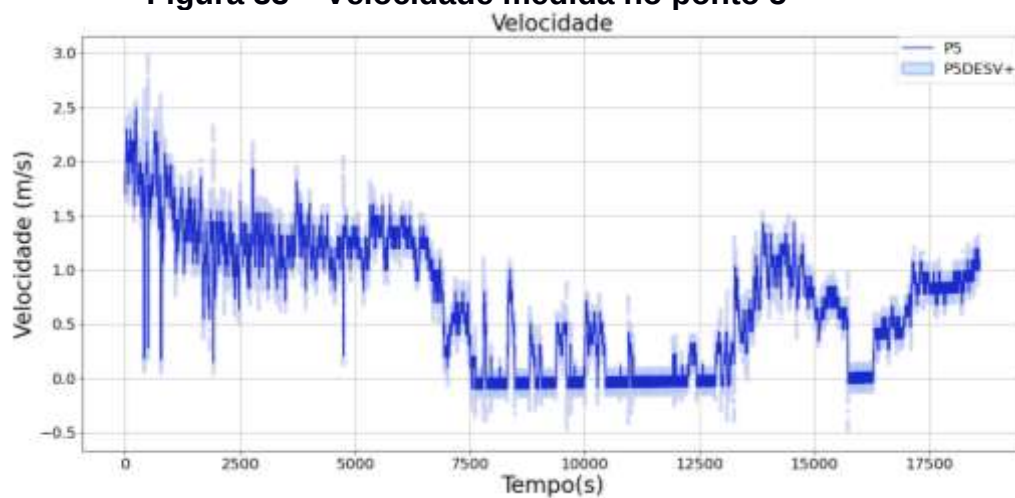


Fonte: Elaborado pelo autor

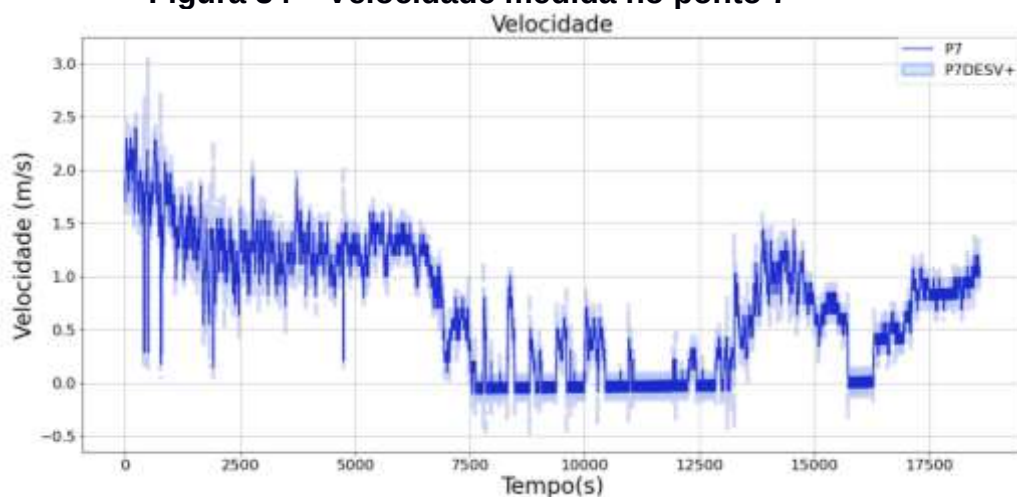
Figura 32 – Velocidade medida no ponto 4



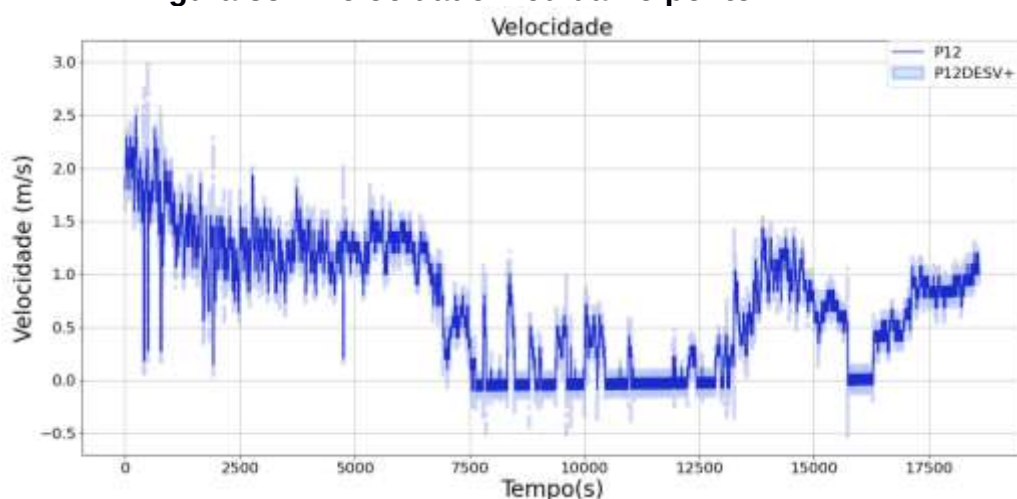
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Velocidade medida no ponto 5

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 34 – Velocidade medida no ponto 7

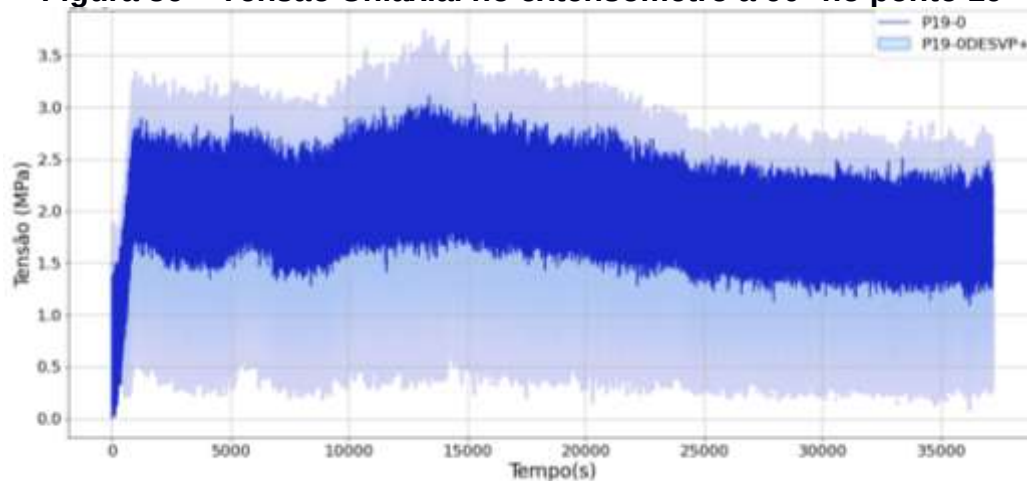
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Velocidade medida no ponto 12

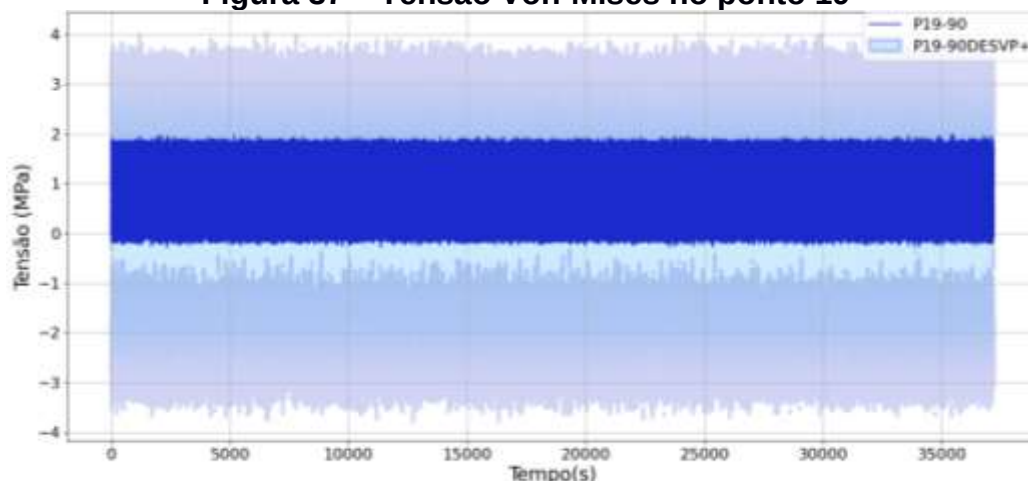
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados de deformação coletados pelos extensômetros, foram calculadas as tensões multiplicando pelo módulo de elasticidade do material ($E=200$ GPa). Para o caso de rosetas (três extensômetros angulados de 45°) foi possível determinar ainda a tensão equivalente de Von-Mises, atualmente o critério mais utilizado para comparar com o limite de escoamento do aço. Nas tensões geradas pelas forças aerodinâmicas os desvios padrões calculados foram mais significativos, em alguns casos maiores que os valores medidos. Os sensores no ponto 19 indicaram um comportamento de tração na parte superior do balancim na direção de 90° (Figura 36), indicando momento fletor sobre o balancim, causado por uma força de compressão sobre ele. Como esse sensor está na parte traseira do equipamento em relação ao escoamento, indica momento em relação a Z causado pelo gradiente de pressão em X do equipamento sobre os balancins da translação. As tensões segundo o critério de Von-Mises (Figura 37) não indicaram alterações.

Figura 36 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 19

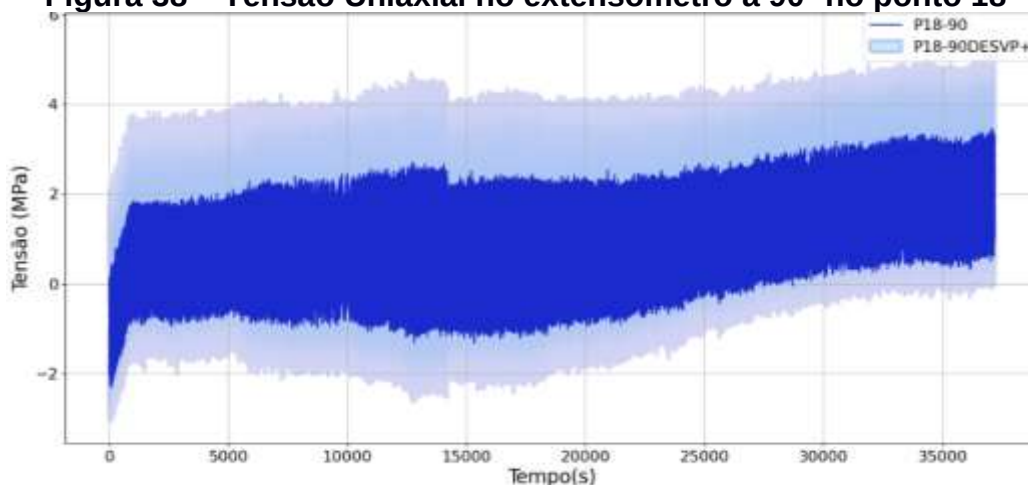


Fonte: Elaborado pelo autor

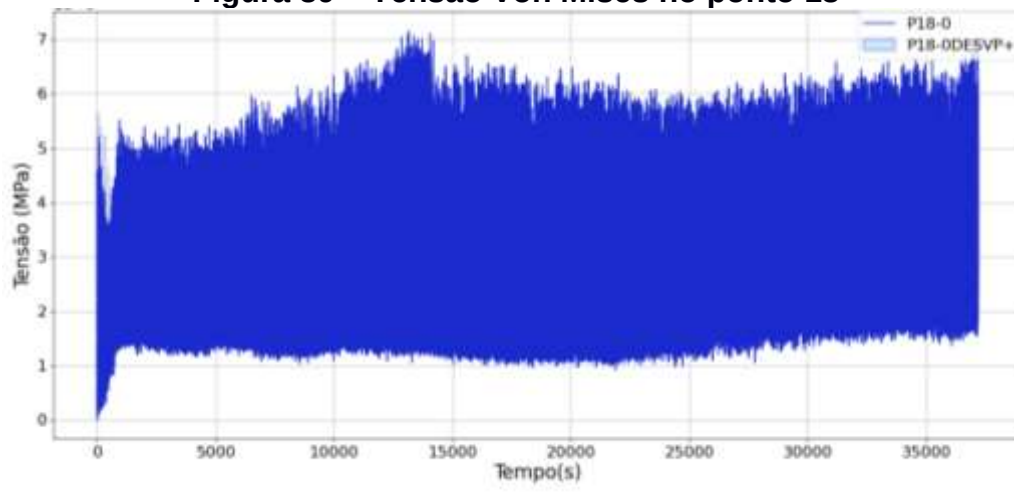
Figura 37 – Tensão Von-Mises no ponto 19

Fonte: Elaborado pelo autor

O sensor no ponto 18 também indicou comportamento de tração (Figura 38), pois valores positivos de tensão são gerados ao tracionar o extensômetro enquanto que valores negativos são gerados ao comprimir os extensômetros. Esse comportamento se deu na parte superior do balancim, o que indica alívio da compressão vertical sobre ele. Como esse balancim está na parte frontal do equipamento, isso evidencia ainda mais o momento em relação a Z, pois está comprimindo o balancim traseiro e aliviando carga sobre o balancim frontal. A tensão Von-Mises avaliada (Figura 39) indicou uma variabilidade em frequências mais altas, entre valores de 1MPa e 7MPa.

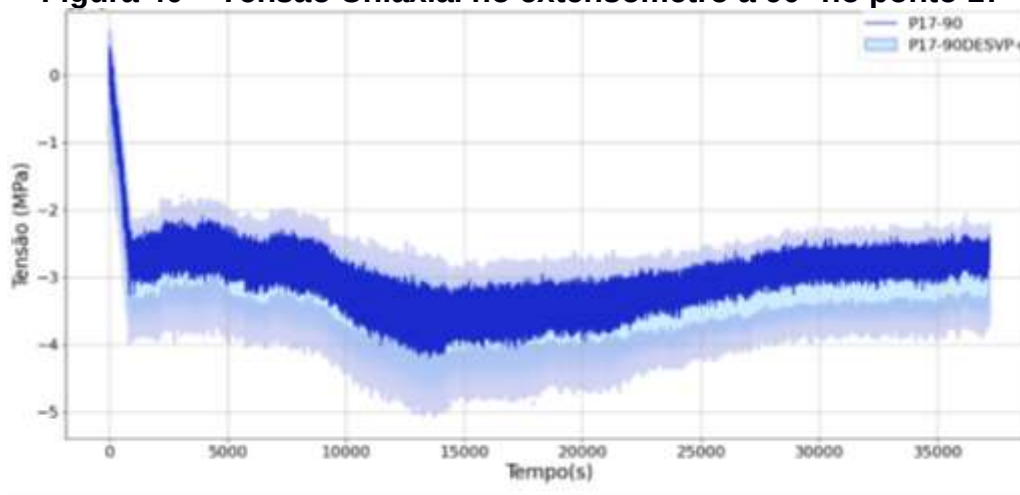
Figura 38 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 18

Fonte: Elaborado pelo autor

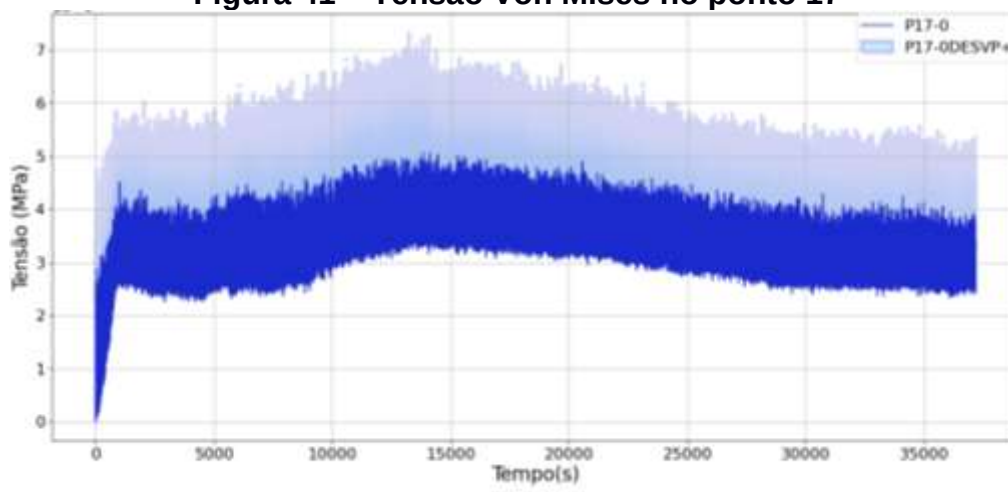
Figura 39 – Tensão Von Mises no ponto 18

Fonte: Elaborado pelo autor

No ponto 17, corroborando para evidenciar o momento em torno de Z para a gradientes de pressão em X, o extensômetro a 90° na parte superior do balancim traseiro indica compressão (Figura 40), mostrando que o balancim está fletindo em resposta a carga de compressão que aumentou sobre ele. As tensões pelo critério de Von-Mises variaram entre 3MPa e 7MPa.

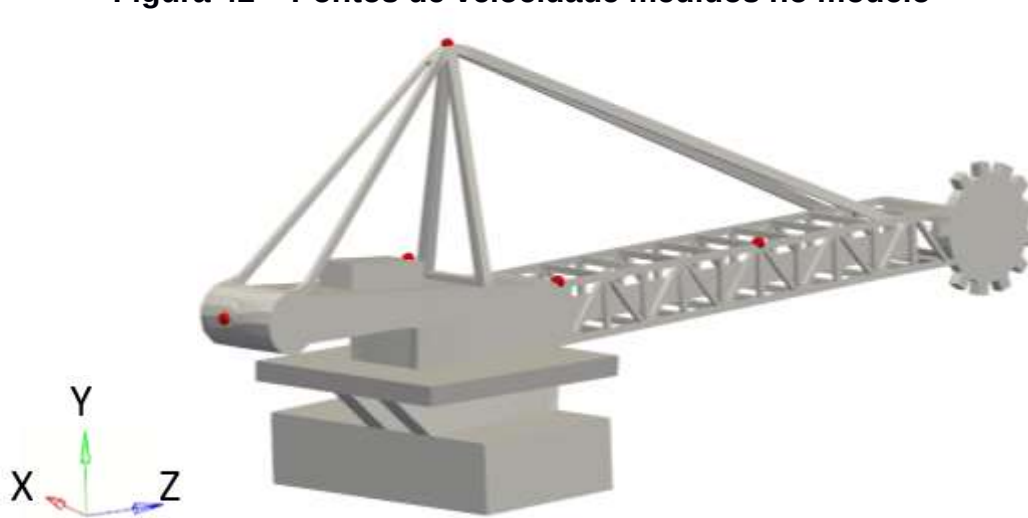
Figura 40 – Tensão Uniaxial no extensômetro a 90° no ponto 17

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 – Tensão Von Mises no ponto 17

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos tanto no campo quanto no modelo de simulação computacional CFD evidenciam uma uniformidade na velocidade do ar nos pontos analisados, indicando uma consistência entre as condições experimentais e a modelagem. No contexto experimental, apesar da ausência de um sensor para medir diretamente a velocidade da corrente livre, observou-se que os valores de velocidade nos pontos selecionados (3, 4, 5, 7 e 12, mostrados na Figura 42 em vermelho) foram uniformemente distribuídos, não apresentando diferenças significativas entre eles. Esta uniformidade pode ser atribuída à baixa velocidade do vento durante o período de medição e a insuficiente formação de gradientes de velocidade devido à camada limite nas paredes da estrutura analisada.

Figura 42 – Pontos de velocidade medidos no modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

No modelo CFD, as simulações corroboram a tendência observada em campo, com as velocidades nos pontos correspondentes variando de 1,63m/s a 1,77m/s (Tabela 3). Esta variação de velocidade, que se situa dentro de um intervalo máximo de 8% (entre 500 s e 600 s), reflete uma pequena flutuação que pode ser considerada como uma margem de erro aceitável na simulação de fenômenos fluidodinâmicos em condições controladas. Tal congruência entre os dados experimentais e simulados reforça a validade do modelo CFD utilizado, sugerindo que a configuração e as condições de contorno aplicadas são adequadas para replicar as condições reais com fidelidade.

Tabela 3 – Valores de velocidade medidos no modelo

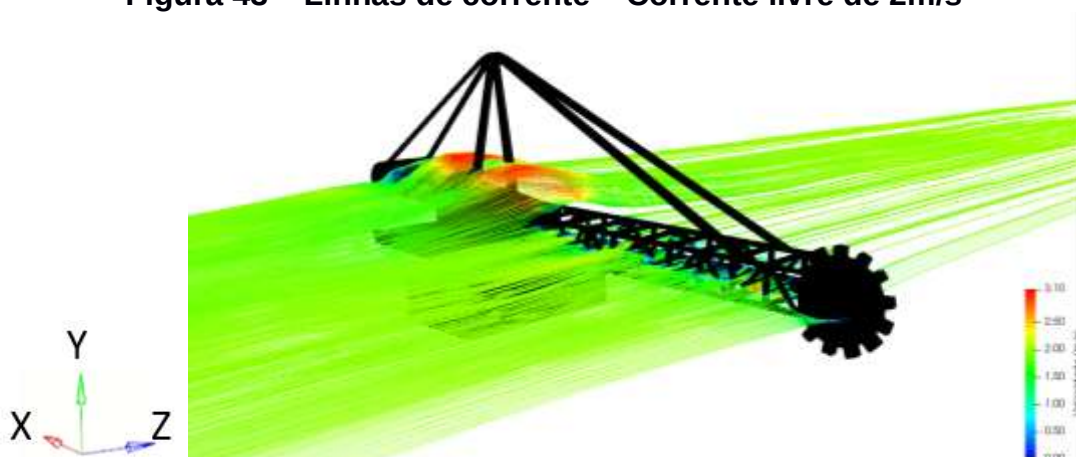
Ponto	Velocidade do vento experimental	Velocidade medida no modelo
3	1,7	1,68
4	1,7	1,71
5	1,7	1,77
7	1,8	1,73
12	1,7	1,63

Fonte: Elaborado pelo autor

Adicionalmente, a análise das linhas de corrente obtidas pelo modelo CFD fornece uma visão mais detalhada do comportamento do escoamento de ar ao atravessar a recuperadora, corroborando os resultados previamente discutidos. As

linhas de corrente indicam uma variação máxima na velocidade do ar de até 3,1m/s (Figura 43), evidenciando um aumento pontual da velocidade devido às interações do fluxo com a geometria da recuperadora. Esta variação dentro da estrutura é compatível com o comportamento esperado em situações de escoamento perturbado por obstáculos, mas ainda assim se mantém alinhada com a uniformidade observada nos pontos de medição externos.

Figura 43 – Linhas de corrente – Corrente livre de 2m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

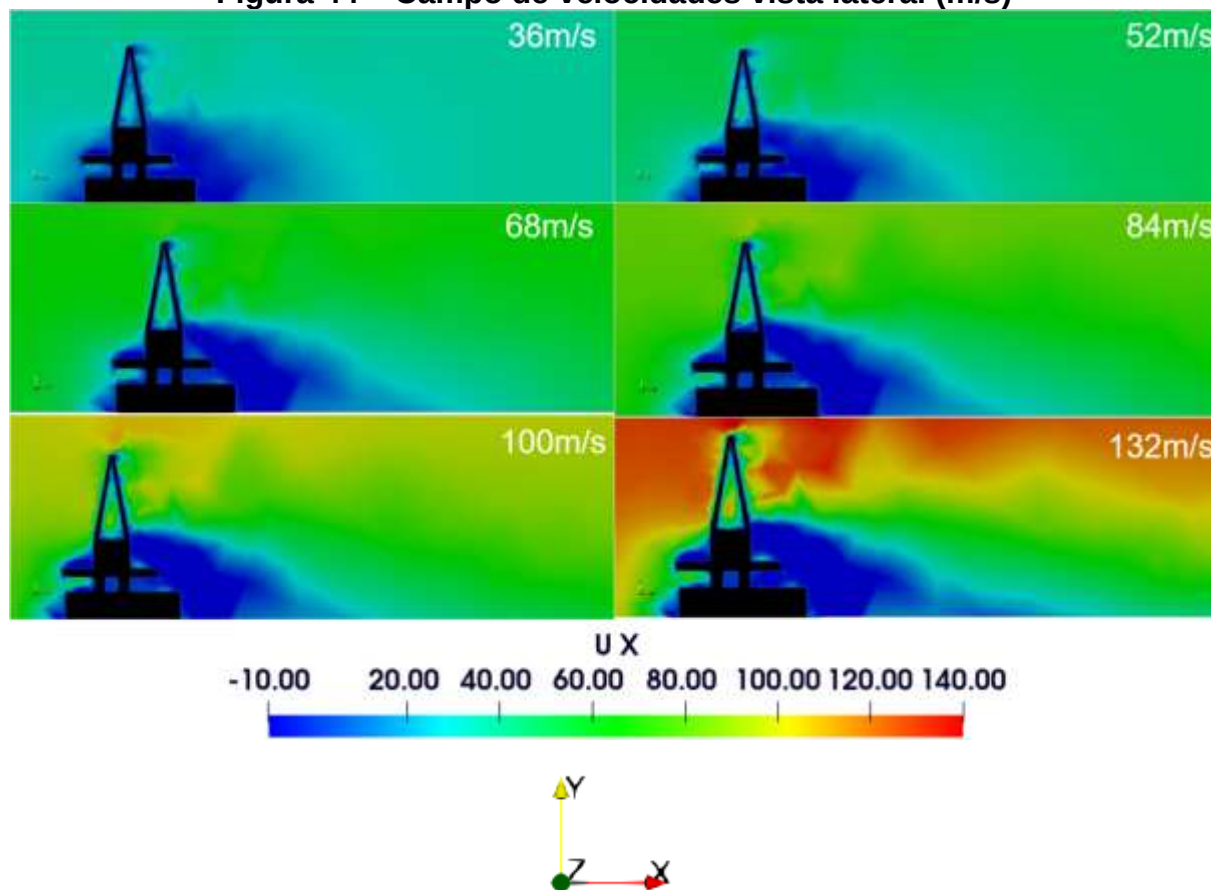
5.3 Resultados FSI (Geometria mais simplificada)

No estudo realizado, procedeu-se à simulação da interação fluido-estrutura (FSI), contudo, em virtude da complexidade inerente à malha, o modelo numérico adotado representa uma simplificação da geometria real. A adequação e a precisão do modelo foram rigorosamente avaliadas através de um teste de malha e subsequente validação experimental. Os resultados destas avaliações indicam que, apesar das simplificações geométricas, o modelo é capaz de capturar adequadamente as características essenciais do escoamento. Portanto, conclui-se que os resultados obtidos na simulação são representativos do comportamento do escoamento real, fornecendo uma base sólida para análises e tomadas de decisão baseadas em dados numéricos confiáveis.

Em todas as simulações, o escoamento de ar não foi considerado completamente desenvolvido devido aos modos de vibração estrutural. A Figura 44 apresenta os campos de velocidade para velocidades de vento de 36 m/s a 132 m/s. A zona de vorticidade e recirculação formada após o equipamento aumenta com as

velocidades do vento, indicando uma maior perturbação do escoamento com maiores velocidades. Os deslocamentos da recuperadora foram mais significativos com velocidades de vento mais altas, causando mais perturbação ao escoamento.

Figura 44 – Campo de velocidades vista lateral (m/s)

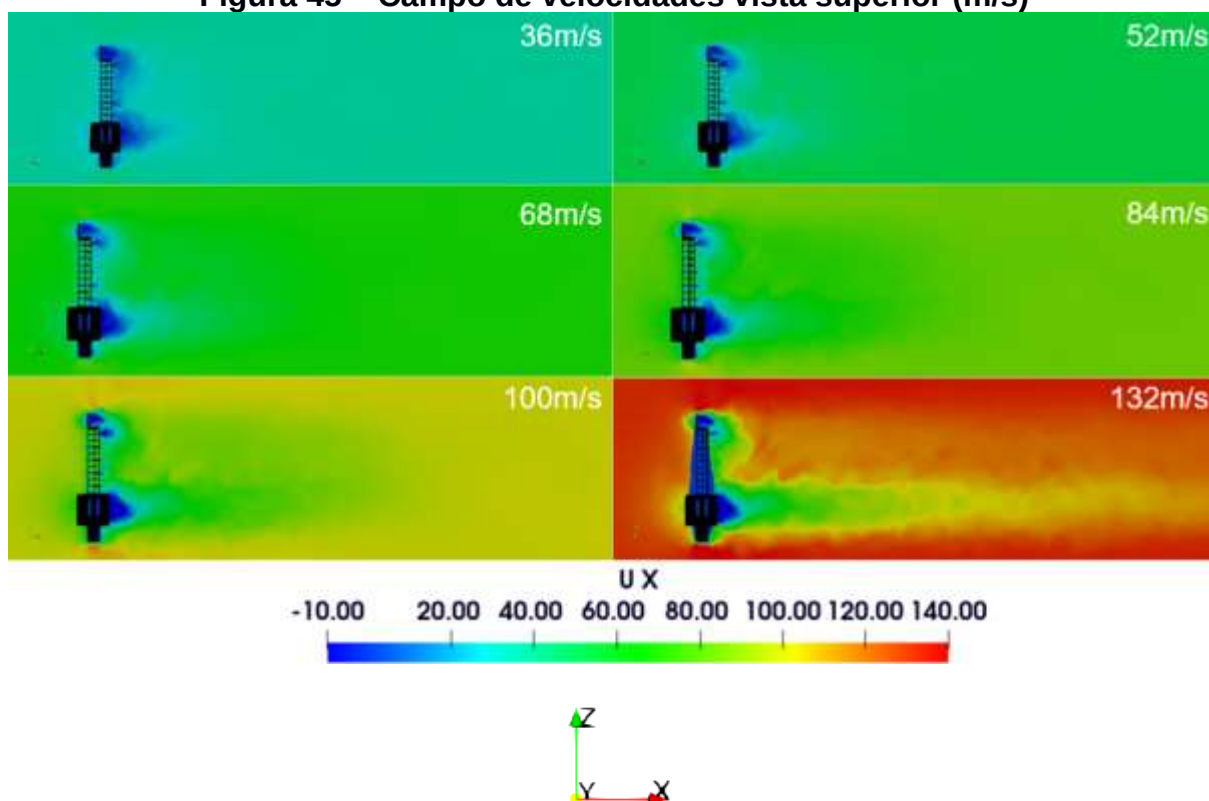


Fonte: Elaborado pelo autor

. A Figura 45 apresenta uma visualização do campo de velocidades na região superior da recuperadora. Pode-se notar que o mastro desempenha um papel mais importante na formação da esteira de velocidade do que a lança, pois, mesmo com áreas semelhantes, a velocidade na lança é mais próxima do valor do escoamento livre. O tamanho da zona de recirculação e as magnitudes de velocidade na vista lateral foram semelhantes para todas as velocidades avaliadas. Na análise das simulações de escoamento apresentadas, observa-se que as variações na velocidade do escoamento geram impactos distintos na distribuição de velocidades ao redor da estrutura analisada. Em velocidades mais baixas, de 36 m/s a 52 m/s, o escoamento mostra-se mais uniforme e suave. À medida que a velocidade aumenta para 68 m/s a 84 m/s, notam-se alterações mais pronunciadas na distribuição de velocidade, com o

surgimento de gradientes mais acentuados e possíveis fenômenos de separação de escoamento. Nas velocidades mais altas, entre 100 m/s e 132 m/s, a intensificação dos gradientes de velocidade é evidente, com a ocorrência de turbulência significativa, indicando regiões de alta velocidade e complexas formações de vórtices e recirculação.

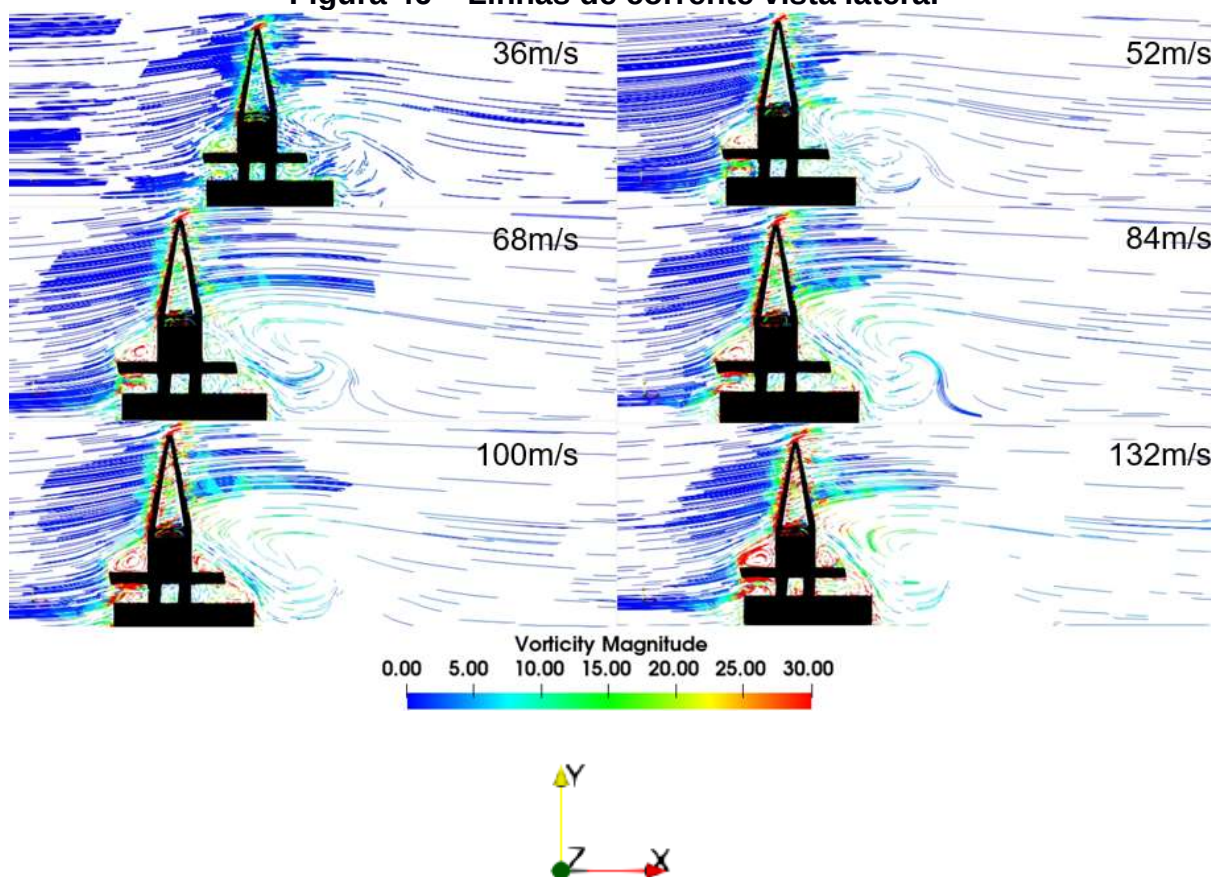
Figura 45 – Campo de velocidades vista superior (m/s)



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 46 mostra as linhas de corrente em um plano transversal (YZ). Os padrões de recirculação observados também podem ser vistos com as linhas de corrente e o mapa de cores de vorticidade, com vermelho quando a recirculação é maior e azul quando é menor. Vale ressaltar que devido à redução da área de escoamento de ar, o ar chega à recuperadora com velocidades superiores à corrente livre, o que pode aumentar o gradiente de pressão e as forças aerodinâmicas, aumentando a probabilidade de falha de estabilidade. Os resultados mostraram vorticidade mais intensa em velocidades de vento mais altas, causadas por um aumento no deslocamento da recuperadora e pelo aumento dos gradientes de velocidade na camada limite próxima a recuperadora. O formato e tamanho dos vórtices após a recuperadora foram de magnitudes e tamanhos distintos.

Figura 46 – Linhas de corrente vista lateral

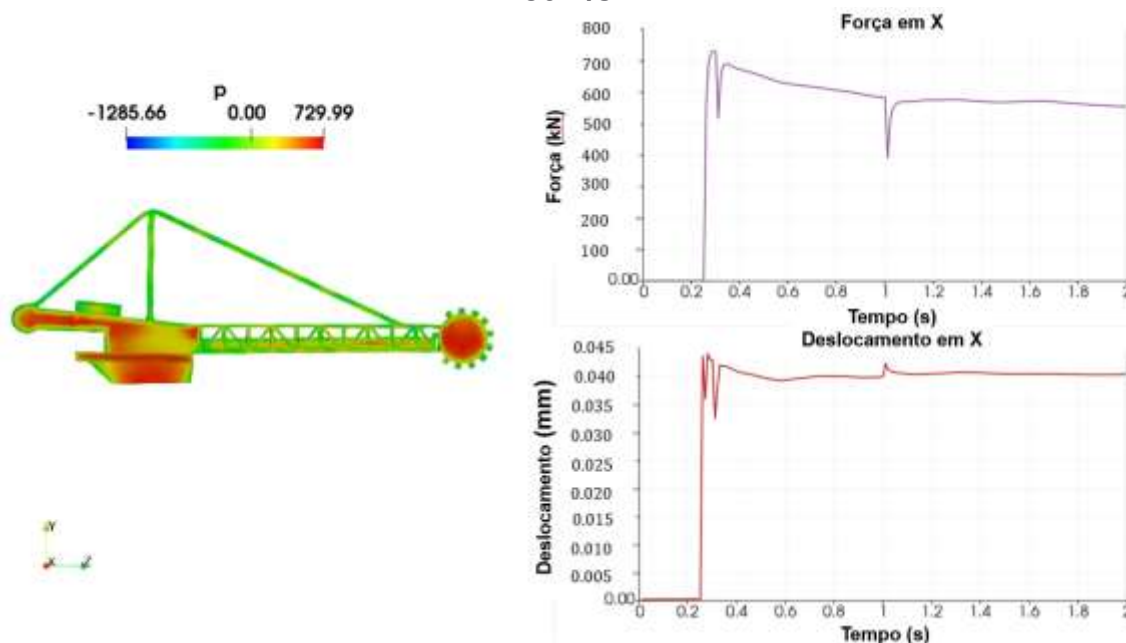


Fonte: Elaborado pelo autor

A pressão imposta pelo escoamento é mostrada da Figura 47 até a Figura 57 para velocidades de 36m/s até 132m/s. Os valores máximos variaram de cerca de 0,98 a 10 kPa considerando todas as velocidades de vento avaliadas. As forças e deslocamentos na direção X foram plotados para serem comparados com a força calculada pela norma. Para um valor prescrito de velocidade do vento de 36 m/s (Figura 47), o modelo analítico previu uma força de arrasto de 407,8 kN. Os resultados numéricos previram um valor inicial entre 700 e 800 kN, diminuindo até 560 kN quando a força passa a ficar constante. Para todas velocidades avaliadas, o comportamento transitório geral foi semelhante, aumentando apenas a magnitude das forças com o aumento da velocidade. Deslocamentos positivos foram observados em todas as velocidades de vento avaliadas, causados pela força X, esses deslocamentos foram analisados para o centro de massa do equipamento, o que demonstra uma média de deslocamento geral do equipamento. Para uma velocidade do vento de 36 m/s, o máximo deslocamento em X foi de cerca de 0,04mm. Vale ressaltar que os resultados

só são apresentados após 0,25 s, pois a simulação antes de 0,25 s foi executada com velocidade do vento de 0 m/s para acomodação das partes sólidas em meio fluido.

Figura 47 – Pressões na face lateral (Pa), força (kN) e deslocamento(mm) – 36m/s

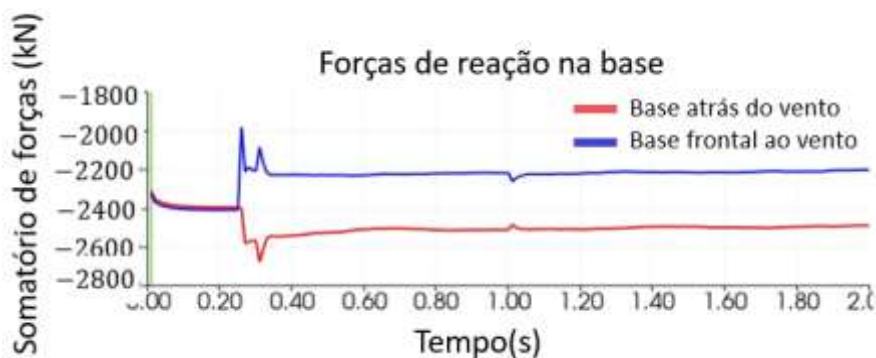


Fonte: Elaborado pelo autor

A falha de estabilidade foi definida pela determinação das forças de reação na base da recuperadora. O momento na direção Z é causado pelas forças do vento desalinhadas em relação centro de giro da estrutura. A parte frontal recebe a pressão dinâmica antes da parte traseira. Nos resultados numéricos as forças de vento foram mais altas do que no modelo analítico, gerando momentos desestabilizadores maiores e aumentando a probabilidade de falha de estabilidade. No entanto, as forças encontradas na análise numérica não foram suficientes para causar falha na estabilidade, conforme mostrado na análise de força de reação apresentada na

Figura **48**. As forças na base frontal (-2200 kN) apresentaram valores bem próximos aos valores na base traseira (-2500 kN), o que indica uma proximidade da condição de equilíbrio.

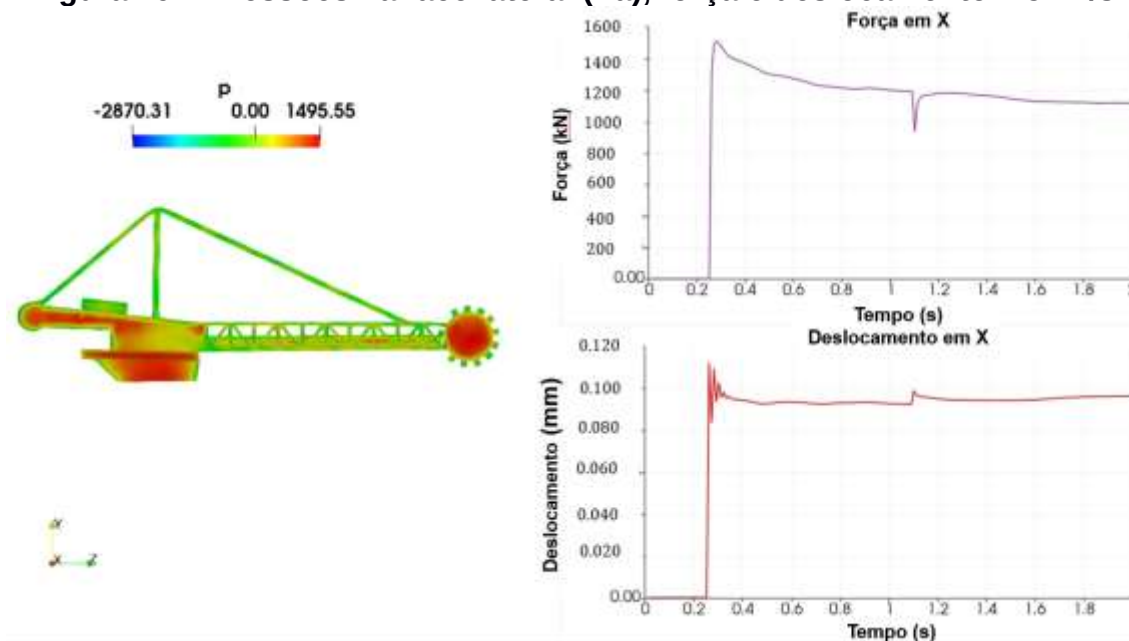
Figura 48 – Forças de reação na base – 36m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma velocidade do vento de 52m/s (Figura 49), a força X atingiu 1100kN, 23% superior à força calculada analiticamente (850kN), replicando o comportamento da análise de 36m/s. Os gráficos à direita detalham a resposta da estrutura a cargas dinâmicas ao longo do tempo. O gráfico superior mostra a força em x, alcançando um pico inicial seguido por uma rápida queda, o que pode indicar uma resposta ao impacto ou uma carga repentina aplicada à estrutura. O gráfico inferior mostra o deslocamento em x, que exibe um pico acentuado de aproximadamente 0.1 mm em um intervalo de tempo curto, seguido por uma estabilização.

Figura 49 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 52m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 50 ($V=52$ m/s) observa-se que a força de reação na base frontal ao vento exibe uma oscilação acentuada no início do intervalo de tempo, indicando um impacto inicial significativo do vento, que rapidamente se estabiliza. Este comportamento contrasta com a força no sentido contrário na base atrás do vento, sugerindo que a estrutura experimenta um desequilíbrio inicial devido à pressão dinâmica do vento que incide primeiro na parte frontal. Este padrão de forças reativas é consistente com a hipótese de que momentos desestabilizadores são induzidos pela distribuição desigual das pressões de vento, com a parte frontal absorvendo o impacto mais direto e imediato. Os resultados numéricos, que mostram forças de vento mais altas do que as previstas no modelo analítico, indicam uma maior magnitude de momentos desestabilizadores, porém, conforme análises anteriores, essas forças não foram suficientes para causar uma falha de estabilidade nessa velocidade, apesar do aumento da diferença entre as forças na base frontal e na base traseira aumentaram de 300 kN para 500kN.

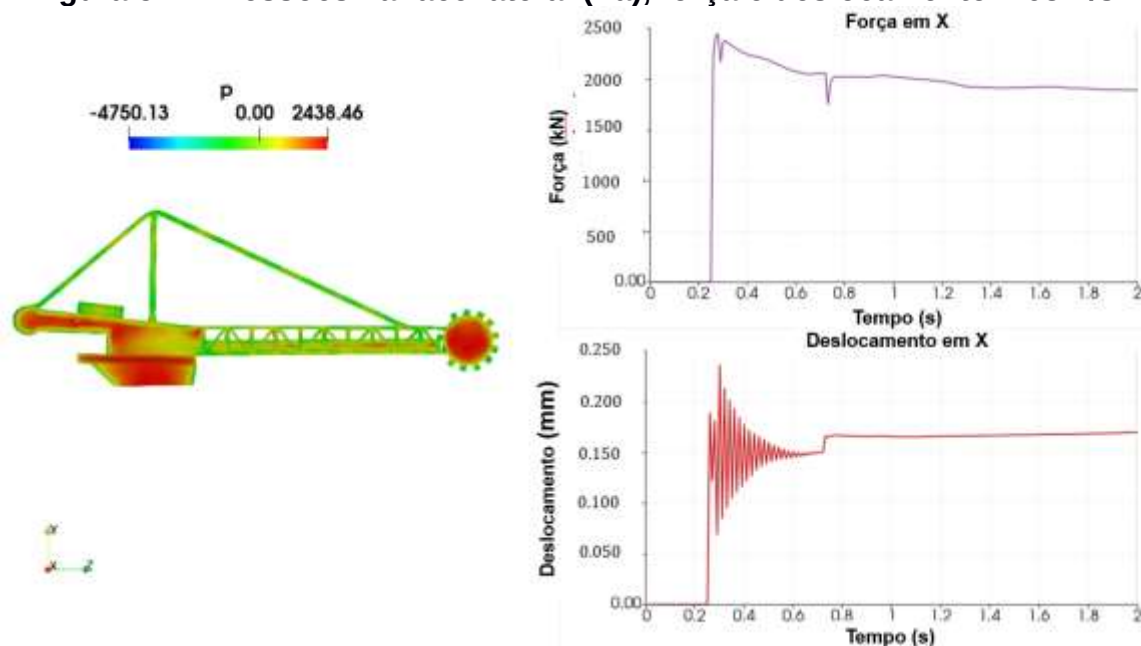
Figura 50 – Forças de reação na base – 52m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Semelhante às velocidades anteriores, as forças previstas pelo modelo numérico foram maiores que as forças previstas pelo modelo analítico de 1450kN, a força calculada numericamente após a estabilização foi de cerca de 1900kN (Figura 51), causando um deslocamento máximo de 0,17mm. A parte transiente do deslocamento também mostra que com os ventos de maior velocidade, aumenta a instabilidade dinâmica no início da análise, pois após o impacto do vento, o corpo oscila em torno de um ponto central em 0,15mm, com amplitude de 0,075mm até 0,225mm, a partir do início do vento em 0,25s até se estabilizar por volta de 0,6s.

Figura 51 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 68m/s

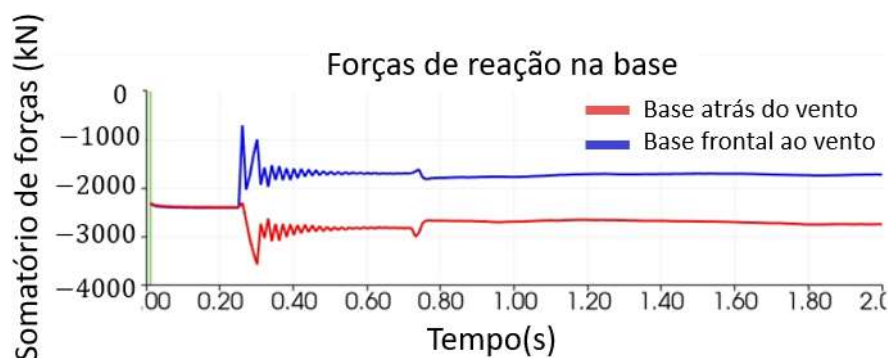


Fonte: Elaborado pelo autor

A velocidade do vento de 68 m/s foi considerada crítica no modelo analítico pois a razão dos momentos E_m/D_m foi inferior a 1,5, como mostrado no gráfico da Figura 21. Com o aumento da velocidade de vento, é observado também um aumento na diferença entre as forças de reação, onde as forças na parte frontal ao vento tendem a diminuir ao mesmo tempo que as forças na parte traseira aumentam, evidenciando a atuação cada vez mais significativa do momento desestabilizador (

Figura 52). Apesar de a norma indicar risco para essa velocidade de vento, o que limitaria sua operação em campo, o modelo mostra que ainda não há falha de estabilidade, apesar do aumento da diferença entre as forças na base frontal e na base traseira, de 500 kN para 1000 kN.

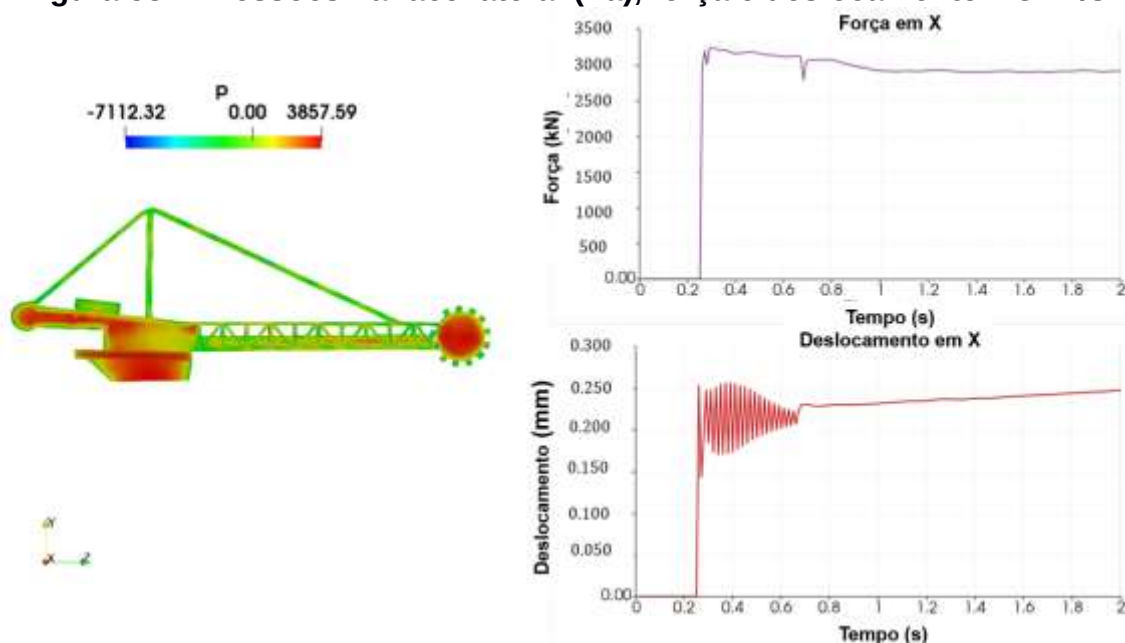
Figura 52 – Forças de reação na base – 68m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma velocidade do vento de 84 m/s, o valor numérico calculado para a força foi de cerca de 2900kN (Figura 53), 23% superior ao valor analítico previsto. No entanto, foram encontrados maiores deslocamentos e uma maior variação transitória nos deslocamentos. Dessa forma, nessa velocidade a instabilidade dinâmica demorou mais tempo para estabilizar (de 0,25s até 0,65s), apesar da menor amplitude, que foi de 0,175mm a 0,25mm.

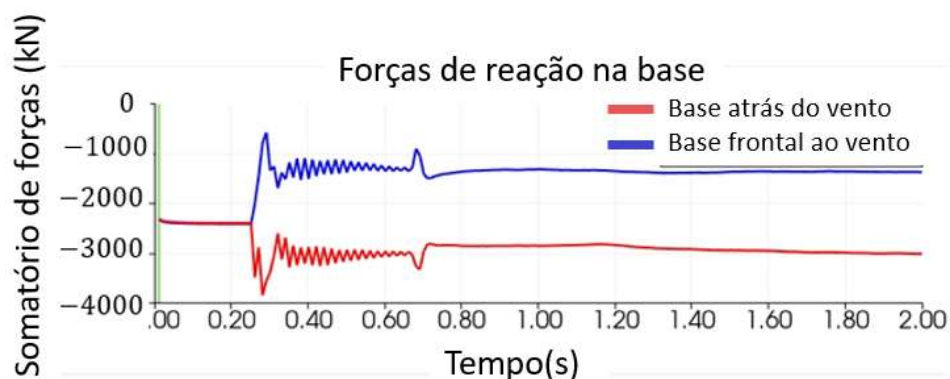
Figura 53 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 84m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Embora o momento desestabilizador tenha sido maior que o momento de estabilização de acordo com o cálculo analítico (fator ν_k menor que 1 na Figura 21), a estabilidade foi mantida no modelo numérico, como mostram as forças de reação na base do equipamento (

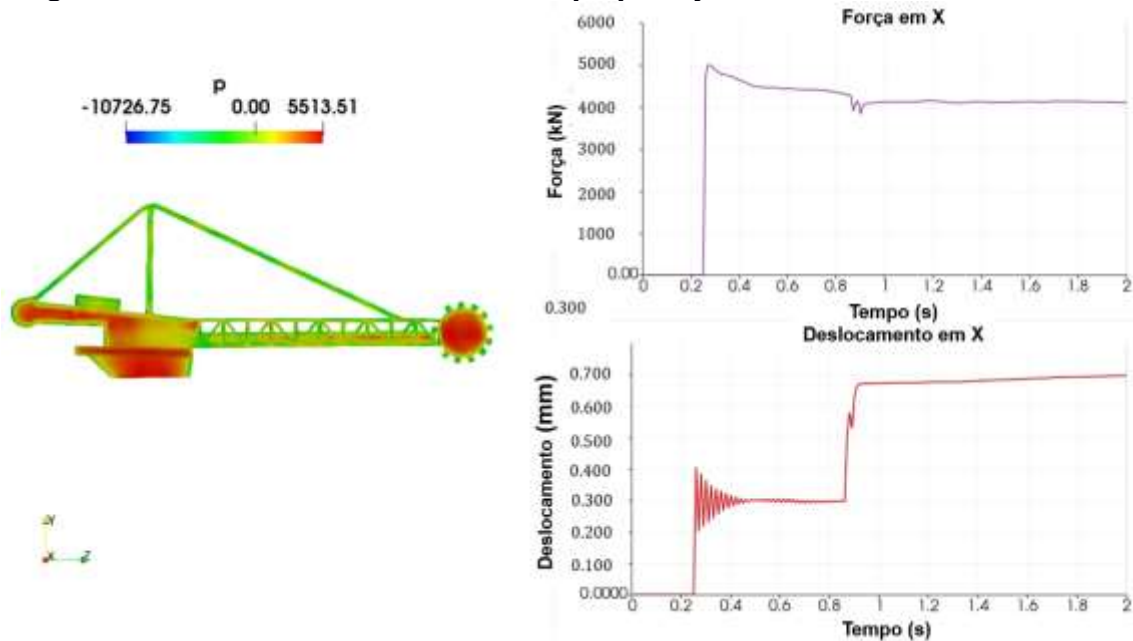
Figura 54). A diferença entre as forças na base frontal e na base traseira aumentaram de 1000 kN para 1800 kN, mas ainda não foram suficientes para zerar o somatório de forças na base frontal, o que indicaria falha por estabilidade.

Figura 54 – Forças de reação na base – 84m/s

Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma velocidade do vento de 100m/s (Figura 55), observou-se o mesmo comportamento geral dos resultados anteriores, com forças numéricas 23% superiores às forças analíticas. Pode-se observar que, após aproximadamente 1 s de simulação, um maior deslocamento foi alcançado. Esse deslocamento se deve a um arrasto que a estrutura sofreu ao mesmo tempo que as forças tiveram uma variação dinâmica durante o processo de estabilização, ou seja, esse deslocamento não foi acompanhado da rotação do equipamento.

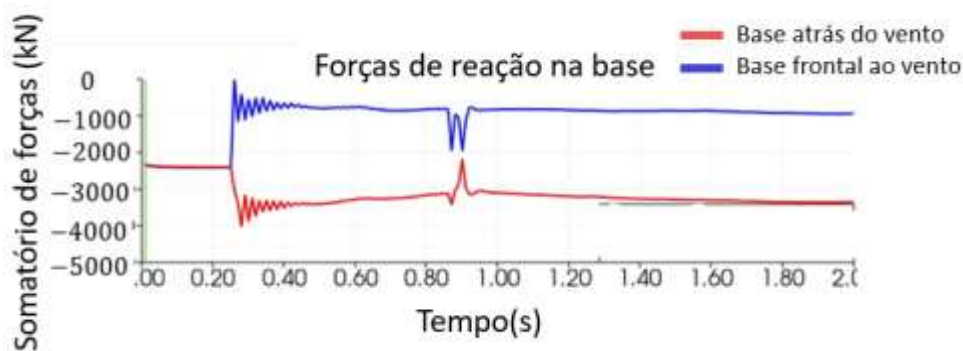
Figura 55 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 100m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado das forças de reação para a velocidade de vento de 100m/s mostrou ainda uma estabilidade da máquina mesmo com a força de reação na base frontal chegando a -900 kN, com uma diferença com a base traseira de 2300kN. Observa-se também um pequeno pico no meio da análise coincidente com o arrasto de 0,4mm analisado na figura anterior.

Figura 56 – Forças de reação na base – 100m/s

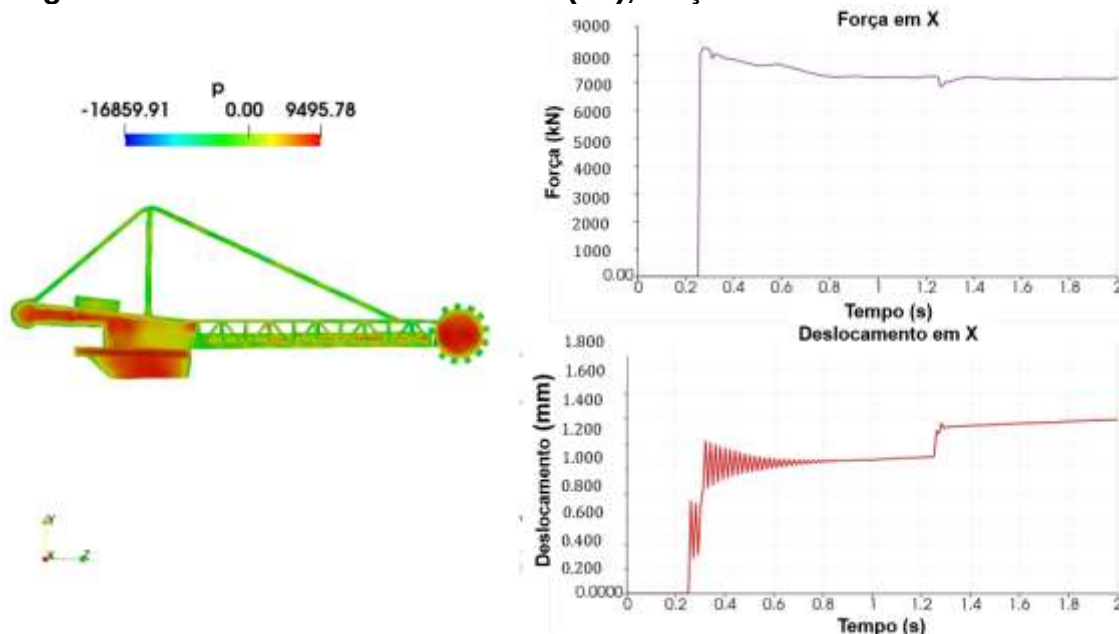


Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma velocidade do vento de 132m/s, a força média na direção X foi de cerca de 7000kN, 22% superior ao valor calculado analiticamente. Neste caso, o valor de deslocamento máximo foi de cerca de 1,4mm, com tendência ao crescimento como mostrado no gráfico da Figura 57. As instabilidades dinâmicas após a aplicação do

vento, a partir dos 0,25s, foram as mais longas em relação às outras velocidades analisadas, durando cerca de 0,7s, com uma amplitude inicial de 0,4mm.

Figura 57 – Pressões na face lateral (Pa), força e deslocamento – 132m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

A estabilidade falha quando a força de reação sobre um dos suportes atinge 0N, fazendo com que a sustentação esteja em apenas um lado da máquina. A limitação do solver de elementos finitos utilizado era de pequenos deslocamentos, o que impossibilitou o cálculo do restante da movimentação de queda do equipamento para esse caso de falha, onde apenas pequenos deslocamentos foram calculados. O somatório de forças na base frontal do equipamento chegou a 0N já no início da análise, chegando a ter valores negativos de força até 1,2s e voltando a ficar com 0N próximo desse tempo, indicando que não há contato entre a base frontal da parte de cima da recuperadora e a parte inferior do equipamento.

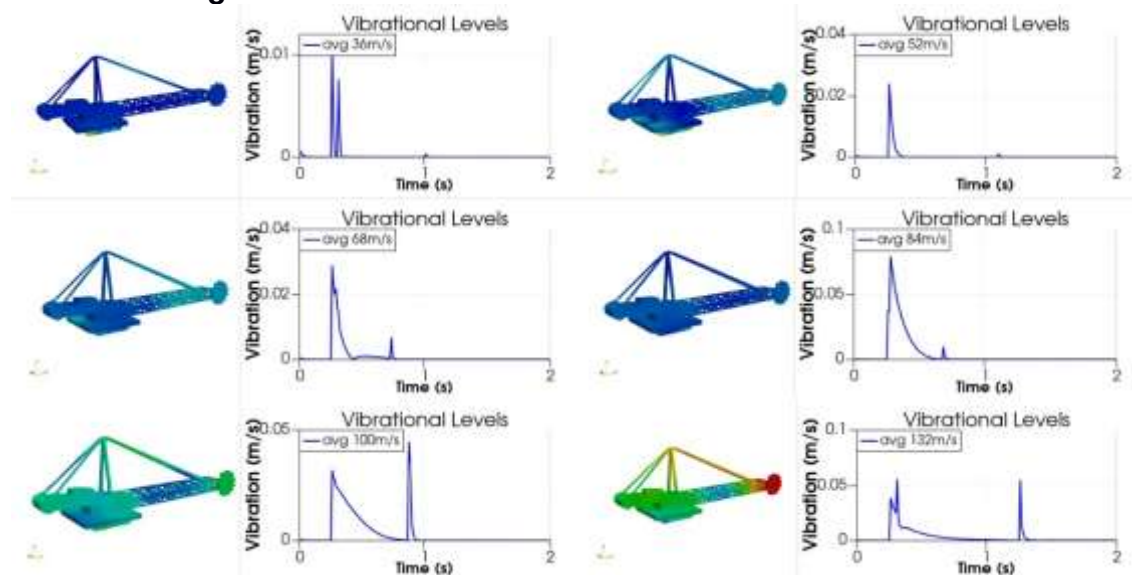
Figura 58 – Forças de reação na base – 132m/s



Fonte: Elaborado pelo autor

Para avaliar o comportamento dinâmico da recuperadora, os níveis de vibração são mostrados na Figura 59. Observa-se que os níveis de vibração mais elevados são encontrados nos instantes iniciais do escoamento de ar sobre a estrutura, devido ao impacto inicial do vento aplicado após os 0,25s. Os níveis de vibração diminuíram ao longo do tempo que a estrutura estabilizou. Após esse primeiro pico de velocidade, algumas análises também tiveram um segundo pico menor, resultado de instabilidades dinâmicas durante o equilíbrio. O maior deles foi encontrado no caso com a velocidade de vento de 100m/s, atribuído ao deslizamento ocorrido no meio da análise. Para o caso de 132m/s, o segundo pico indica a segunda vez que a base frontal da recuperadora remove o apoio da parte inferior.

Figura 59 – Níveis vibracionais em cada caso



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Resultados CFD (Geometria mais complexa)

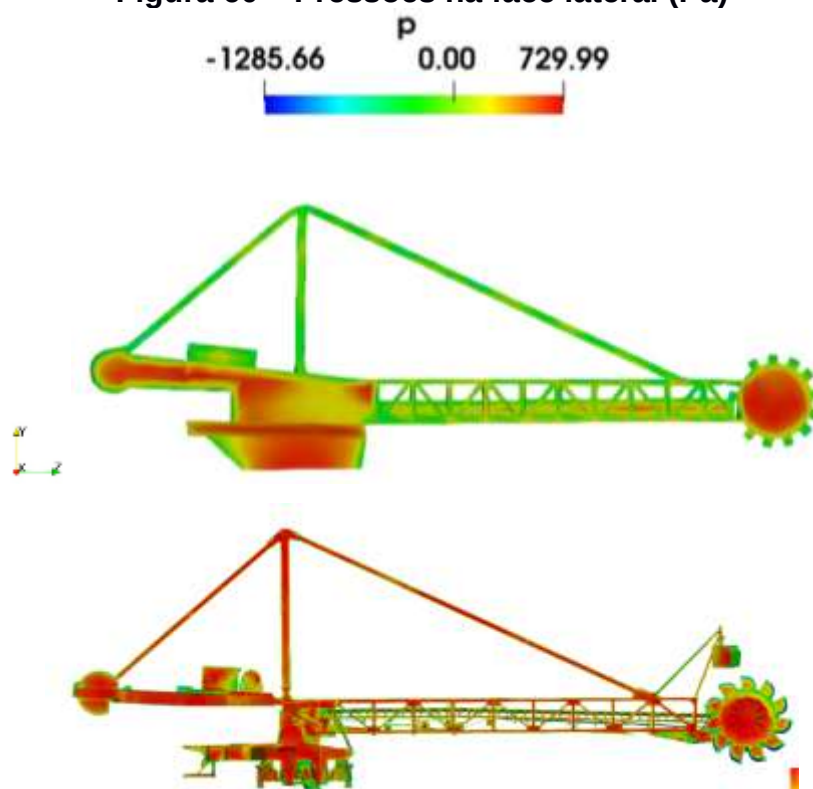
A malha com aproximadamente 43 milhões de elementos foi avaliada por um solver apenas CFD, com os mesmos critérios e modelos de turbulência utilizados para a análise FSI. O objetivo dessa análise, já que o alto custo computacional inviabilizou rodar essa malha num solver FSI, foi a de comparar e validar os resultados com o modelo simplificado.

A análise comparativa entre os modelos complexo e simplificado da recuperadora, baseada nas imagens da Figura 60 até a Figura 63, destaca as distinções entre as simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e Interação Fluido-Estrutura (FSI) sob as condições testadas. O modelo complexo, com uma malha de 40 a 50 milhões de elementos, foi analisado utilizando apenas CFD e foi submetido a uma velocidade de vento de 36 m/s. No entanto, as restrições de tempo da simulação limitam a análise a fenômenos transientes iniciais.

Por outro lado, o modelo simplificado, com uma malha entre 1 e 2 milhões de elementos, empregou uma abordagem de FSI, integrando a interação entre o escoamento do ar e a resposta estrutural da recuperadora. Essa abordagem proporciona um entendimento mais abrangente do comportamento do sistema ao considerar a flexibilidade da estrutura e as deflexões resultantes que podem afetar os padrões do escoamento. Apesar do detalhamento geométrico reduzido, o modelo simplificado facilita um período de simulação mais longo e permite a análise do comportamento em estado estacionário sob várias condições de velocidade do vento, expandindo além da única condição examinada no modelo complexo.

Os resultados do modelo simplificado foram apresentados na parte superior e do modelo complexo na parte inferior da Figura 60. Em ambos os modelos, as regiões de maior e menor pressão parecem estar distribuídas de maneira comparável, com áreas de alta pressão localizadas principalmente na extremidade do equipamento e áreas de baixa pressão mais próximas ao centro. Isso implica que, independentemente da complexidade do modelo, as características essenciais da distribuição de pressão são mantidas, permitindo que ambos os modelos proporcionem valores válidos sobre as tendências gerais de pressão na recuperadora.

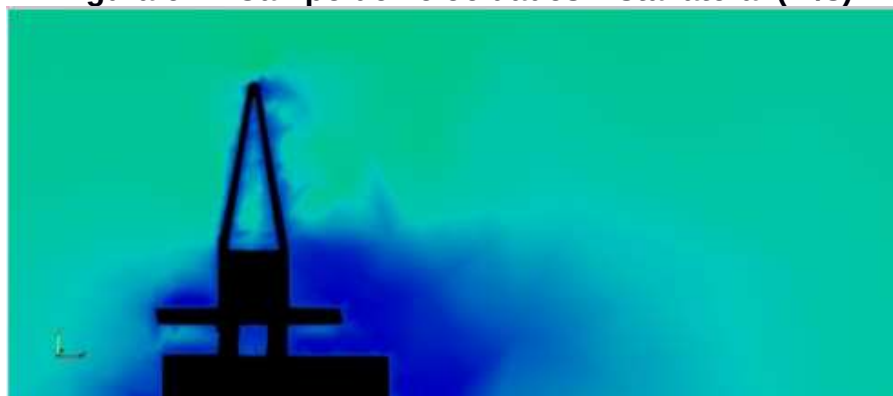
Figura 60 – Pressões na face lateral (Pa)

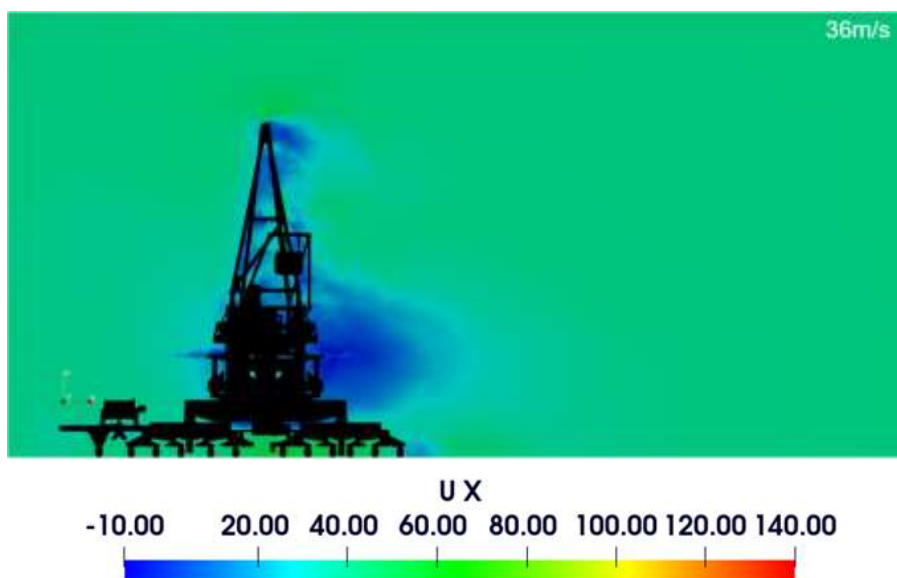


Fonte: Elaborado pelo autor

Dos primeiros dos seis resultados para o modelo simplificado, para a velocidade do vento de 36 m/s, é possível ver uma diferença no formato da região de esteira quando comparado ao modelo complexo (Figura 61), apesar da semelhança nos formatos das esteiras formadas. Isso pode ser atribuído aos efeitos de FSI e à capacidade do modelo de contabilizar deformações estruturais, que não são consideradas na abordagem apenas CFD do modelo complexo. Porém os valores de velocidade do escoamento foram muito próximos, com variações de até 14%.

Figura 61 – Campo de velocidades vista lateral (m/s)

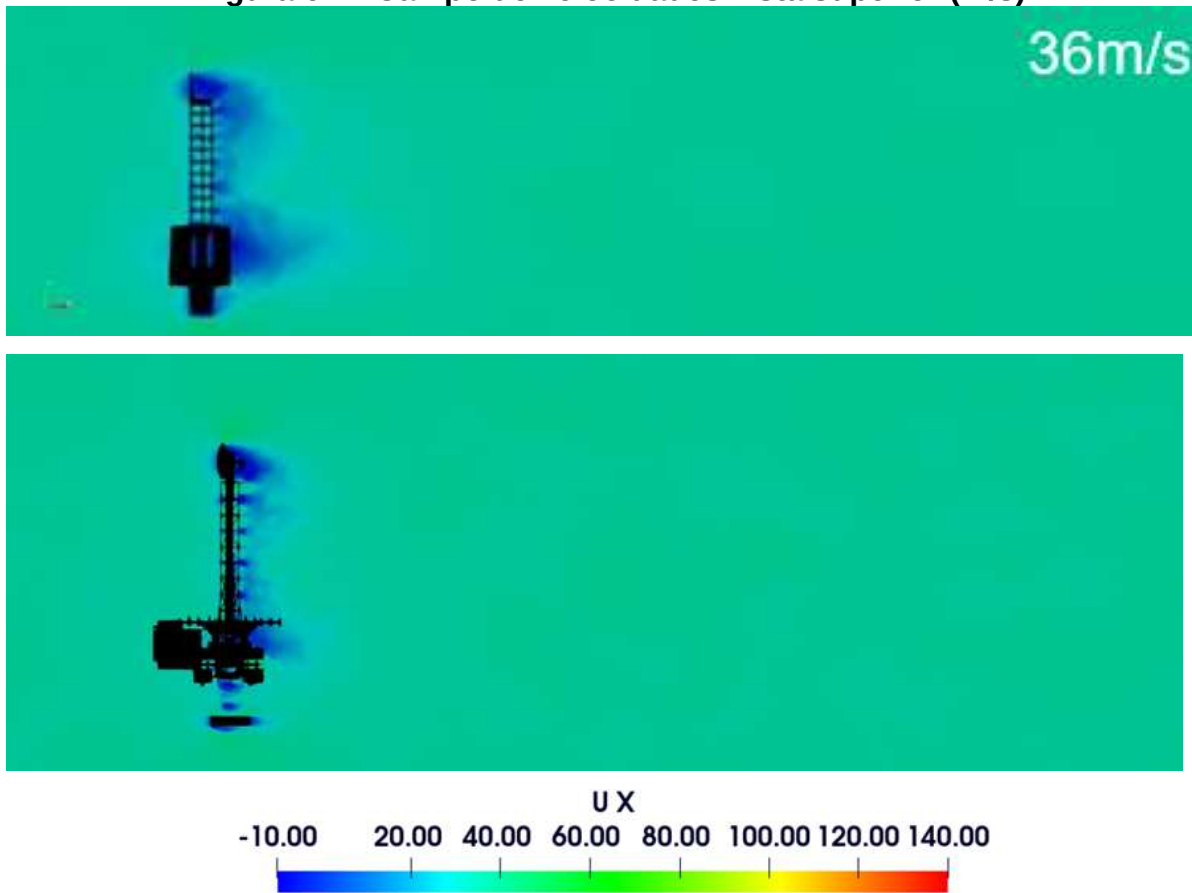




Fonte: Elaborado pelo autor

Ao examinar os resultados dos modelos complexo e simplificado da recuperadora, a partir das vistas superior (Figura 62) e lateral (Figura 61), podem-se fazer observações distintas sobre as características do escoamento e as interações estruturais. Para o modelo complexo, que foi analisado exclusivamente sob a ótica da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) a uma velocidade de vento de 36 m/s, os resultados visuais indicam padrões de escoamento com gradientes em locais menores devido à estruturas muito pequenas com recirculações também de menor tamanho. A vista superior mostra particularmente a estrutura intrincada da região de esteira e como o vento interage com as características geométricas finas, não presentes no modelo simplificado.

O modelo simplificado, avaliado usando análise de interação fluido-estrutura (FSI), exibe um padrão de escoamento mais generalizado. Isso é esperado devido aos detalhes geométricos reduzidos. Comparando o primeiro resultado do modelo simplificado à mesma velocidade de vento de 36 m/s com o modelo complexo, observa-se que, enquanto o modelo complexo mostra recirculações mais localizadas, as tendências gerais da distribuição de pressão permanecem consistentes entre os dois modelos. O modelo simplificado, devido à melhor qualidade dos elementos, provavelmente oferece previsões mais confiáveis sobre o comportamento estrutural geral, apesar de um menor refinamento nos detalhes do escoamento.

Figura 62 – Campo de velocidades vista superior (m/s)

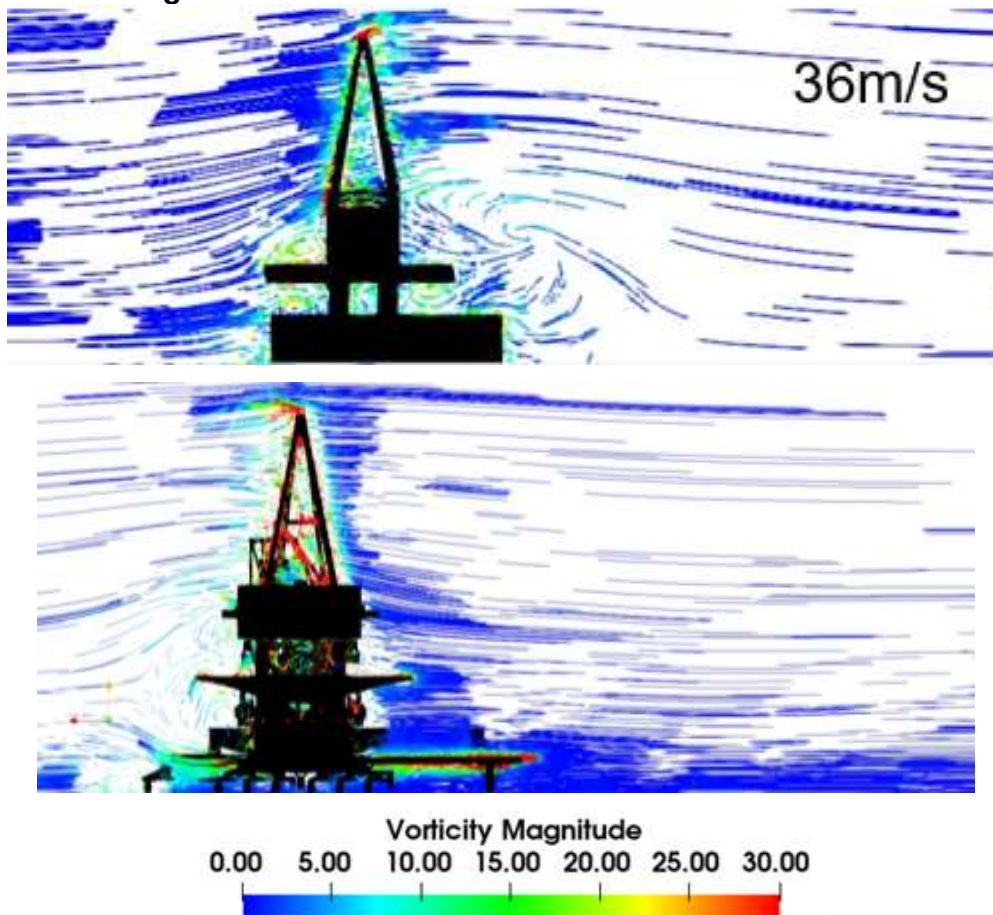
Fonte: Elaborado pelo autor

As duas imagens na Figura 63 representam a distribuição da vorticidade ao redor de uma estrutura em análises de CFD a uma velocidade de escoamento de 36 m/s. A vorticidade, representada nas imagens através de linhas de corrente coloridas, mostra regiões de alta recirculação, particularmente onde as linhas são mais densas e intensamente coloridas, indicando maiores magnitudes de vorticidade.

No modelo mais simplificado, as áreas com alta vorticidade são mais amplas e aparentes. Isso se deve ao fato de que a simplificação da geometria da estrutura gera menos obstruções detalhadas, resultando em um padrão de escoamento com recirculações mais extensas e menos interrupções finas. Essa característica indica que, embora o modelo simplificado possa não capturar pequenas flutuações de vorticidade devido à sua menor complexidade geométrica, ele ainda efetivamente identifica as regiões de maior interesse onde a vorticidade é significativamente elevada. O modelo mais complexo revela como a vorticidade se comporta em uma estrutura detalhada, com várias regiões de alta recirculação visíveis nas interfaces e contornos complexos da estrutura. A granularidade fina da modelagem contribui para

a captura detalhada das interações fluido-estrutura, especialmente nas áreas de transição onde o escoamento encontra superfícies com geometrias variadas.

Figura 63 – Linhas de corrente vista lateral



Fonte: Elaborado pelo autor

Na avaliação da estabilidade de equipamentos de movimentação de cargas em campo, a implementação de simulações numéricas, particularmente através da interação fluido-estrutura (FSI), revela-se como uma alternativa avançada e precisa em comparação aos métodos convencionais baseados unicamente em normas técnicas. Neste contexto, as análises realizadas utilizando apenas a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) podem ser conduzidas de maneira mais rápida, fornecendo estimativas preliminares úteis sobre as condições de escoamento e as forças aerodinâmicas atuantes. No entanto, esses resultados tendem a ser menos abrangentes, pois o método CFD, isoladamente, não contempla as respostas estruturais do equipamento às cargas aplicadas.

6 CONCLUSÕES

Atualmente, a avaliação da estabilidade de equipamentos de grande porte, principalmente que transportam cargas, é feita de maneira analítica, baseando-se em normas gerais. Essas normas estabelecem critérios de parada para os equipamentos como função da velocidade do escoamento ao seu redor. Esse trabalho avaliou a estabilidade de uma recuperadora de minério devido a cargas de vento, com o objetivo de avaliar se os critérios de parada atualmente adotados são eficientes.

Utilizou-se como modelo uma recuperadora de minério da empresa Vale, em operação na cidade de São Luís, Maranhão. Foi desenvolvida uma análise numérica do escoamento de ar ao seu redor, avaliando-se os efeitos da carga de vento na estrutura da recuperadora e os efeitos da presença da estrutura no escoamento de ar, através da técnica de FSI. Devido à complexidade da estrutura, foi proposto um modelo mais simplificado para a geometria da recuperadora nessa análise.

A validação do escoamento foi feita através de comparação com valores experimentais medidos na recuperadora instalada em São Luís. Embora os valores de velocidade medidos sejam inferiores aos valores esperados para tombamento, o modelo foi simulado para essas velocidades mais baixas apenas para fins de validação, e a resposta do modelo se mostrou compatível com as medições em campo.

De acordo com as dimensões da recuperadora, foi determinada a velocidade crítica do escoamento de ar determinada pela norma. O escoamento foi simulado para diferentes velocidades do vento, a partir do valor da velocidade crítica, a fim de se avaliar a estabilidade do escoamento em velocidades superiores e avaliar a eficiência do critério de parada estabelecido pela norma.

Foram avaliados os campos de velocidade, pressão e as linhas de corrente no escoamento de ar, bem como as forças aerodinâmicas e as reações de apoio na estrutura. Observou-se que as forças aerodinâmicas são em média 23% mais altas do que as forças de acordo com o cálculo analítico por norma e que as velocidades de vento que provocam falha da estabilidade são consideravelmente maiores do que as previstas por esse cálculo, por este não considerar os efeitos dinâmicos e da interação fluido-estrutura.

Devido à elevada exigência computacional associada às simulações FSI, optou-se pela criação de um modelo que representa uma geometria mais próxima da

realidade, restringindo-se à simulação utilizando apenas a técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O propósito dessa abordagem foi realizar uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo simplificado e aqueles derivados do modelo mais complexo, visando avaliar a eficácia da simulação para fornecer resultados preliminares. A análise comparativa indicou que ambos os modelos apresentam uma boa correlação em termos globais, embora existam discrepâncias menores e localizadas nos detalhes específicos do escoamento.

A conclusão derivada deste estudo sugere que os critérios de parada estabelecidos pela norma FEM 2-131/13 podem ser excessivamente conservadores, resultando em períodos de inatividade prolongados que ultrapassam o necessário para garantir a segurança dos equipamentos. Essa prática conservadora, embora minimize riscos de falhas ou acidentes, pode levar a custos operacionais elevados e potenciais prejuízos devido à redução no tempo efetivo de operação, impactando diretamente a produtividade e a eficiência econômica das empresas.

Através da implementação de técnicas avançadas de simulação, como a interação fluido-estrutura (FSI), este trabalho fornece evidências de que os critérios de parada podem ser revisados para refletir mais precisamente as condições reais enfrentadas pelos equipamentos em campo. A abordagem proposta oferece uma base técnica mais sólida para a tomada de decisões relacionadas à operação segura dos equipamentos sem incorrer em paradas desnecessariamente longas.

Portanto, além de contribuir para o estado da arte em termos de técnicas de simulação, este estudo visa fomentar discussões sobre a necessidade de normas mais eficazes e adaptadas às realidades operacionais. A revisão das normas atuais com base em dados de simulação mais precisos e realistas pode levar a uma otimização significativa dos processos, com redução de custos e melhoria no desempenho operacional das empresas envolvidas.

Para futuras pesquisas, sugere-se aprimorar a otimização do modelo complexo de FSI, explorando métodos de redução de complexidade computacional sem sacrificar a precisão nas simulações de cargas aerodinâmicas. Adicionalmente, recomenda-se a incorporação de outras variáveis críticas além do vento, como cargas de operação e impactos ambientais variáveis, para um modelo mais abrangente que simule realisticamente as condições de operação. Um teste experimental usando velocidades de vento superiores às consideradas nos critérios atuais também é essencial para validar a eficácia dos critérios de parada revisados e fornecer dados

empíricos para calibrar melhor os modelos numéricos. Essas abordagens combinadas podem permitir uma avaliação mais refinada da estabilidade e segurança dos equipamentos de grande porte, maximizando a eficiência operacional e a produtividade enquanto minimizam os riscos de falha.

REFERÊNCIAS

- ANDOLFATO, Rodrigo; PIERNAS; Camacho, JEFFERSON, Sidney; BRITO, Gade. **Extensometria básica**. Ilha, 2004.
- AL-JELAWY, Hayder. Computational analysis of the fluid-structure interaction occurring in a model of two vehicles overtaking each other. **Journal of Physics: Conference Series**. 2018.
- ALI, Qazi Shahzad; KIM, Man-Hoe. Unsteady aerodynamic performance analysis of an airborne wind turbine under load varying conditions at high altitude. **Energy Conversion and Management**, v. 210, p. 112696, 2020.
- ANDERSEN, Ingrid Marie Vincent. Wind loads on post-panamax container ship. **Ocean engineering**, v. 58, p. 115-134, 2013.
- ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos—A base da tecnologia CAE**. Saraiva Educação SA, 2018.
- AXISA, François; ANTUNES, Jose. Modelling of mechanical systems: **Fluid-structure interaction**. Elsevier, 2006.
- BECKER, Austin H. et al. A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society. **Climatic Change**, v. 120, n. 4, p. 683-695, 2013.
- BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. John wiley & sons, 2013.
- BELVER, Ali Vasallo; IBÁN, Antolín Lorenzana; MARTÍN, Carlos Lavín. Coupling between structural and fluid dynamic problems applied to vortex shedding in a 90 m steel chimney. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 100, n. 1, p. 30-37, jan. 2012.
- CARDIFF, Philip. An open-source finite volume toolbox for solid mechanics and fluid-solid interaction simulations. **arXiv preprint arXiv:1808.10736**, 2018.
- CARDIFF P., KARAĆ A., IVANKOVIĆ A.: Development of a Finite Volume contact solver based on the penalty method. **Computational Materials Science**, 2014, 64:283–284.
- CHEN X., ZHUANG J., HUANG H., and WU Y., **Fluid–structure interactions (FSI) based study of low-density lipoproteins (LDL) uptake in the left coronary artery**, *Scientific Reports* 2021 11:1, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, Feb. 2021.
- CONGER, Michael Anthony. Validation of CFD-MBD FSI for high-fidelity simulations of full-scale WAM-V sea-trials with suspended payload. 2015.

DELAISSÉ, Nicolas, DEMEESTER, T., HAELTERMAN, R., & DEGROOTE, J. Quasi-Newton Methods for Partitioned Simulation of Fluid–Structure Interaction Reviewed in the Generalized Broyden Framework. **Archives of Computational Methods in Engineering**, p. 1-30, 2023.

DHILLON, Balbir S. **Mining equipment reliability, maintainability, and safety**. Springer Science & Business Media, 2008.

ELSHAER, Ahmed; BITSUAMLAK, Girma. Multiobjective Aerodynamic Optimization of Tall Building Openings for Wind-Induced Load Reduction. **Journal of Structural Engineering**, v. 144, n. 10, p. 04018198, 2018.

ELSHERIF, Diaaeldin M.; ABD EL-WAHAB, Ayman A.; ABDELLATIF, Mohamed Hazem. Factors affecting stress distribution in wind turbine blade. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2019. p. 012020.

FINTELMAN, D. M. et al. CFD simulations of the flow around a cyclist subjected to crosswinds. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 31-41, 2015.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; Pritchard, P. J. Introdução à mecânica dos fluidos. 9ª. 2018.

GOUVEA, Moisés de Paula. **Análise da estabilidade de uma recuperadora de minério submetida ao vento pelo método de iteração fluido-estrutura**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. 2019.

GOUVEA, Moisés de Paula. Oliveira, Rubens. Oliveira, Hudson. Maia, Cristiana Brasil. Júnior, Janes Landre. Pressure analysis of a bucket wheel reclaimer submitted to a storm wind load. **25 th ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, October 20-25, 2019.

HALL, Robert A.; DANESHMEND, Laeeque K. Reliability modelling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. **International journal of surface mining, reclamation and environment**, v. 17, n. 3, p. 139-155, 2003.

HAASE, Werner; SELMIN, Vittorio; WINZELL, Bengt (Ed.). Progress in computational flow-structure interaction: Results of the project UNSI, supported by the European Union 1998–2000. **Springer Science & Business Media**, 2013.

HASAMA, Takamasa et al. Evaluation of aerodynamic instability for building using fluid–structure interaction analysis combined with multi-degree-of-freedom structure

model and large-eddy simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 197, p. 104052, 2020.

HIBBELER, Russell Charles. **Estática: mecânica para engenharia**. Pearson Education do Brasil, 2005.

HUANG, M. F. et al. Dynamic Wind Load Combination for a Tall Building Based on Copula Functions. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 17, n. 08, p. 1750092, 2017.

HUANG, Peng; PENG, Xinlai; GU, Ming. Wind tunnel study on effects of various parapets on wind load of a flat-roofed low-rise building. **Advances in Structural Engineering**, v. 20, n. 12, p. 1907-1919, 2017.

HÜBNER, B.; WEBER, W.; SEIDEL, U. The role of fluid-structure interaction for safety and life time prediction in hydraulic machinery. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2016. p. 07, 2007.

Instituto nacional de meteorologia do brasil – **INMET**. Normais Climatológicas (1961/1990). Brasília - DF, 1992.

IÁSBECK, Gabriel Fontes. **Modelagem computacional de uma bioprótese de válvula cardíaca: análise dinâmica e fenômeno de flutter**. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais. 2019.

INMET. Inmet.gov.br, 2019. **Gráficos Climatológicos**. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/MA/83377>. Acesso em: 04/08/19.

KÄÄRIÄ, C. H., WANG, Y., WHITE, M. D., & OWEN, I. An experimental technique for evaluating the aerodynamic impact of ship superstructures on helicopter operations. **Ocean Engineering**, v. 61, p. 97-108, 2013.

KHAYYER, Abbas; GOTOH, Hitoshi; SHIMIZU, Yuma. On systematic development of FSI solvers in the context of particle methods. **Journal of Hydrodynamics**, v. 34, n. 3, p. 395-407, 2022.

LEE, S. G., LEE, J. S., CHUNG, Y. G., & PARK, C. B. Cause investigation for hull damage of ferry Sewol by submarine collision using FSI analysis technique. In: **Advances in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures**. CRC Press, 2024. p. 195-201.

LI, Linzhong; SHERWIN, S. J.; BEARMAN, Peter W. A moving frame of reference algorithm for fluid/structure interaction of rotating and translating bodies. **International Journal of Numerical Methods in Fluids**, v. 38, n. 2, p. 187-206, 2002.

LIU, Benli. et al. Numerical simulation of wind flow over transverse and pyramid dunes. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 8, p. 879-888, 2011.

MARINESCU, Ioan D. et al. **Tribology of abrasive machining processes**. Elsevier, 2004.

MOU, Ben. et al. Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 11, n. 1, p. 293-309, fev. 2017.

NAEIM, Farzad; KELLY, James M. **Design of seismic isolated structures: from theory to practice**. John Wiley & Sons, 1999.

NOZU, Tsuyoshi. et al. Mesh-adaptive LES for wind load estimation of a high-rise building in a city. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 144, p. 62-69, set. 2015.

OBERKAMPF, William L.; ROY, Christopher J. **Verification and validation in scientific computing**. Cambridge University Press, 2010.

PANTUA, Conrad Allan Jay; CALAUTIT, John Kaiser; WU, Yupeng. A fluid-structure interaction (FSI) and energy generation modelling for roof mounted renewable energy installations in buildings for extreme weather and typhoon resilience. **Renewable Energy**, v. 160, p. 770-787, 2020.

PATEL M. Considerations for analysis of endothelial shear stress and strain in FSI models of atherosclerosis, **Journal of Biomechanics**, vol. 128, p. 110720, Nov. 2021.

RAHMAN, Mosfequr; MORSHED, Khandakar N.; MIAN, Ahsan. Aerodynamic Performance Analysis of Three Bladed Savonius Wind Turbine with Different Overlap Ratios and at Various Reynolds Number. In: **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. 2010. p. 1209-1219.

RAHNEJAT, Homer; ROTHBERG, Steve (Ed.). **Multi-body dynamics: Monitoring and simulation techniques III**. John Wiley & Sons, 2004.

RACHID, FB Freitas; MATTOS, HS Costa. Modelling of pipeline integrity taking into account the fluid–structure interaction. **International journal for numerical methods in fluids**, v. 28, n. 2, p. 337-355, 1998.

K. H. Bescher. Engineers report destruction of navy hangars to unprecedented wind load. **Journal of the Franklin Institute**, v. 242, 1946.

ROACHE, Patrick J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annual review of fluid Mechanics**, v. 29, n. 1, p. 123-160, 1997.

SANYAL, Prasenjit; DALUI, Sujit Kumar. Effects of courtyard and opening on a rectangular plan shaped tall building under wind load. **International Journal of Advanced Structural Engineering**, p. 1-20, 2018.

SATURNINO, L. J. M. **Desenvolvimento de ferramentas para definição, análise e avaliação de desempenho de veículos automotivos**. 2004. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SCRUTON, C.; ROGERS, E. W. E. Steady and unsteady wind loading of buildings and structures. **Phil. Trans. R. Soc. Lond. A**, v. 269, n. 1199, p. 353-383, 1971.

Skelton, Robert E. Efficient Models of Multi-body Dynamics. Encyclopedia of Aerospace Engineering, 2010.

TAMURA, Y. et al. Wind load and wind-induced response estimations in the Recommendations for Loads on Buildings, AIJ 1993. **Engineering structures**, v. 18, n. 6, p. 399-411, 1996.

SIMIU, Emil; SCANLAN, Robert H. **Wind effects on structures: fundamentals and applications to design**. New York: John Wiley, 1996.

VALE. **Monitoramento e análise de vento**. São Luís, MA, 2020. Relatório técnico.

VERSTEEG, H.K. e MALALASEKERA, **Introduction to Computational Fluid Dynamics**, Longman Scientific & Technical, 2007.

ZHU, Hui; ZHIGANG, Yang. Fluid–structure interaction study of three-dimensional vehicle model under crosswind. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 7, p. 1- 10, jun. 2015.

ZHANG, Qun; HISADA, Toshiaki. Studies of the strong coupling and weak coupling methods in FSI analysis. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 60, n. 12, p. 2013-2029, 2004.

TUKOVIĆ, Z.; KARAČ, A.; CARDIFF P.; JASAK, H.; IVANKOVIĆ, A; Openfoam finite volume solver for fluid-solid interaction. **Transactions of Famena**, 42 (3), pp. 1-31, 2018.

WHITE, F. M.; **Fluid Mechanics**, sétima edição, McGraw- Hill, New York, 2011.

WARSI, Z.U.A., 2006. **Fluid Dynamics: Theoretical and Computational Approaches**. 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC

ZIENKIEWICZ, Olek C.; TAYLOR, Robert Leroy; ZHU, Jian Z. **The finite element method: its basis and fundamentals**. Elsevier, 2005.