PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Moisés de Paula Gouvea

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO SUBMETIDA AO VENTO PELO MÉTODO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Belo Horizonte 2019 Moisés de Paula Gouvea

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO SUBMETIDA AO VENTO PELO MÉTODO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Cristiana Brasil Maia

Coorientador: Prof. Dr. Jánes Landre Júnior

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos

FICHA CATALOGRÁFICA Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais



Moisés de Paula Gouvea

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA RECUPERADORA DE MINÉRIO SUBMETIDA AO VENTO PELO MÉTODO DE INTERAÇÃO FLUIDO-ESTRUTURA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Sistemas Térmicos e Fluidos

Profa. Dra. Cristiana Brasil Maia – PUC Minas (Orientadora)

Prof. Dr. Jánes Landre Júnior – PUC Minas (Coorientador)

Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto

Dr. Fernando Héder Teixeira

Belo Horizonte, 26 de agosto de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me possibilitar mais esta conquista, por me manter forte e em equilíbrio ante todas as barreiras e dificuldades encontradas.

Agradeço à Vale pela oportunidade pioneira de desenvolvimento de uma metodologia envolvendo simulação de interação fluido-estrutura, focada em solucionar problemas e aumentar o alcance produtivo dos equipamentos e por confiar a mim uma bolsa de estudos. Agradeço em especial aos meus tutores na Vale, Bernardo Rocha e Vinícius Donizetti, por transmitir conhecimento e informações úteis para o desenvolvimento do projeto, além de acompanhar e ajudar na construção da metodologia.

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

Agradeço à minha orientadora, Cristiana Brasil, por todo conhecimento, apoio e orientação transmitidos, que me ajudaram a aparar arestas e focar nas entregas de forma a construir e organizar o projeto desenvolvido. Agradeço também ao meu co-orientador, Jánes Landre, que tanto me ajudou a esculpir formas claras de definir e enxergar os resultados adquiridos, assim como modelar o problema.

Agradeço ao Rubens Perdigão, aluno de iniciação científica que esteve trabalhando comigo durante quase todo projeto e não poupou esforços para conseguirmos modelos funcionais.

Gostaria de agradecer também aos meus pais, José Elias e Marisa, por toda confiança, apoio e carinho, que me ajudaram a vencer os obstáculos e me deram força para atingir os resultados desejados.

Agradeço em especial à minha esposa, Amanda, que esteve comigo em apoio constante, que celebrou comigo desde as primeiras conquistas dos modelos simulados, que me deu apoio e conforto nas madrugadas em claro, que acreditou desde o começo no meu potencial para conclusão deste projeto.

RESUMO

As recuperadoras de minério desempenham um importante papel na lucratividade do setor de mineração, uma vez que são equipamentos de alta produtividade, responsáveis por coletar e depositar nas esteiras transportadoras até 10 mil toneladas de minério pelotizado por hora. Devido à sua função fundamental para a logística portuária, cada minuto de parada acarreta perdas monetárias consideráveis. A aplicação da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) atrelada ao modelo estrutural de elementos finitos (FEM) na análise de cargas de vento sobre estruturas tem sido assunto amplamente abordado nas indústrias automobilística e civil, contudo, o campo de mineração é ainda pouco estudado. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de interação fluido-estrutura (FSI) com foco na estabilidade de equipamentos portuários de alturas elevadas submetidos ao vento. Para o desenvolvimento da metodologia proposta, baseou-se em uma recuperadora de minério. A modelagem do problema e os resultados obtidos foram utilizados para compreensão dos fenômenos envolvidos nos esforços gerados pela velocidade e pressão exercida pelo vento. Além disso, os resultados também foram utilizados para confrontar a norma FEM 2.131/2.132, que hoje é utilizada como principal critério de parada. A ferramenta utilizada para desenvolvimento do modelo foi o software Ansys, com os programas Fluent e Mechanical APDL. Foram simuladas velocidades de vento de entrada de 2,5 m/s a 42 m/s. A partir dos resultados encontrados, observou-se que, em média, os valores de velocidade encontrados ao redor da recuperadora foram 30% maiores que os valores de velocidade de entrada no volume de controle. Foi observada também a geração intensa de turbulência na região atrás da recuperadora, com uma alta faixa de velocidades. A pressão estática média encontrada na frente da recuperadora, onde o vento atinge em cheio a porção da área, variou de aproximadamente 6 Pa até 1.050 Pa, nas velocidades simuladas de 2,5 m/s a 42,0 m/s, respectivamente. A análise de estabilidade foi feita por intermédio das reações de apoio obtidas na análise estrutural estática, tendo os esforços de pressão exercida pelo vento como entrada. Para as velocidades simuladas, dadas as condições de contorno impostas, a recuperadora de minério em análise não apresentou resultados que apontem instabilidade, gerando uma margem para reavaliação dos valores de velocidade máxima de operação previstos na norma FEM.

Palavras-chave: CFD; FSI; FEM; Recuperadora de minério; Carga de vento.

ABSTRACT

Bucket wheel reclaimers play an important role in the profitability of the mining industry, as they are high productivity equipment responsible for collecting and depositing up to 10,000 tons of pelotized ore per hour on conveyor belts. Due to its fundamental role in port logistics, every minute of downtime causes considerable monetary losses. The application of computational fluid dynamics (CFD) linked to the finite element structural model (FEM) in the analysis of structural wind loads has been widely discussed in the automobile and civil industries, however, the mining field is still rarely studied. Thus, the objective of this work is the development of a fluid-structure interaction (FSI) methodology focusing on the stability of high-altitude port equipment subjected to wind. For the development of the proposed methodology, a bucket wheel reclaimer was the kick start. The modeling of the problem and the obtained results were used to understand the phenomena involved in the forces generated by the pressure exerted by the wind. In addition, the results were also used to confront the FEM 2.131/2.132 standard, which is used as the main stopping criterion nowadays. The tool used for model development was Ansys software, with Fluent and Mechanical APDL programs. The simulated inlet wind speeds were from 2.5 m/s to 42 m/s. From the results found, it was observed that, on average, the velocity values found around the reclaimer were 30% higher than the velocity values in the control volume applied. It was also observed the intense generation of recirculation zones in the region behind the structure, with a high speed range. The average static pressure found at the front face of the bucket wheel reclaimer, where the wind flow fully reaches the portion of the exposed area to the flow, ranged from approximately 6 Pa to 1050 Pa, at simulated speeds of 2.5 m/s and 42.0 m/s, respectively. The stability analysis was made through the support reactions obtained in the static structural analysis, with the pressure made by the wind as input. For the simulated speeds, given the imposed boundary conditions, the ore reclaimer under analysis did not present results indicating instability, generating a margin for reevaluation of the maximum operating speed values expected in the FEM standard.

Keywords: CFD; FSI; FEM; Bucket wheel reclaimer; Wind load.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condições de acoplamento físico versus numérico em FSI49
Figura 2 - Fluxograma de um modelo FSI: da geometria aos resultados53
Figura 3 - Recuperadora de minério base para o modelo desenvolvido54
Figura 4 - Partes da recuperadora de minério estudada55
Figura 5 - Os 36 apoios da recuperadora de minério estudada
Figura 6 - Rosa dos ventos de São Luís (MA) de jan. de 2016 a set. de 201756
Figura 7 - Geometria final da recuperadora com todas as simplificações aplicadas.58
Figura 8 - Dimensões do túnel de vento58
Figura 9 - Condições de contorno das paredes do túnel de vento virtual59
Figura 10 - Configuração dos refinamentos aplicados no túnel de vento62
Figura 11 - Pontos de monitoramento de convergência no teste de malha (direção do vento representada pelas setas azuis)64
Figura 12 - Malha volumétrica tetraédrica final com os volumes de refinamento aplicados. Corte no plano yz no centro da recuperadora
Figura 13 - Regiões de contato simbolizadas por triângulos e retângulos pontilhados em azul
Figura 14 - Esquema representativo da nomenclatura dos pés da recuperadora67
Figura 15 - Apoios da recuperadora em detalhes: (a) componentes da roda e trilho; (b) condição natural de estabilidade (compressão); (c) condição de instabilidade68
Figura 16 - Modelo estrutural da recuperadora de minério gerado no software Ansys Mechanical
Figura 17 - Modelo do Workbench do Ansys para FSI70
Figura 18 - Malha tetraédrica com foco na roda de caçambas indicando a pressão em cada elemento de malha70
Figura 19 - Pontos de interpolação identificados na recuperadora de minério para mapeamento da pressão71

Figura 20 - Diagrama de blocos do modelo FSI: blocos que representam o modelo CFD e FEM acoplados
Figura 21 - Reação de apoio resultante no pé PD23_P73
Figura 22 - Pressão e velocidade na recuperadora submetida a vento de 42 m/s: (a) ponto máximo de pressão; (b) pontos máximos de velocidade
Figura 23 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 2,5 m/s
Figura 24 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 5,0 m/s
Figura 25 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 10,0 m/s
Figura 26 - Velocidade para vento de 2,5 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora
Figura 27 - Velocidade para vento de 5,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora
Figura 28 - Velocidade para vento de 10,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora
Figura 29 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 20,0 m/s
Figura 30 - Velocidade para vento de 20,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora
Figura 31 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 42,0 m/s
Figura 32 - Velocidade para vento de 42,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora

Figura 33 - Estimativa da velocidade que provocará inversão no sentido da reação nos apoios PD11, PD12, PD20 e PD2289
Figura 34 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 200 km/h
Figura 35 - Velocidade para vento de 200 km/h em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora
Figura 36 - Condição de instabilidade: (a) localização do apoio instável; (b) regressão linear do ponto onde ocorre inversão
Figura 37 - Proposta de simulação com modelagem do ambiente da recuperadora com trilhos e pilhas de minério
Figura 38 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul106
Figura 39 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul. Posicionamento com zoom 1106
Figura 40 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul. Posicionamento com zoom 2107
Figura 41 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul. Posicionamento com zoom 3
Figura 42 - Ponto para instrumentação: extensômetro 15 na base da lança, parte frontal
Figura 43 - Ponto para instrumentação: extensômetro 16 na base da contra-lança, parte traseira
Figura 44 - Ponto para instrumentação: extensômetros 17 e 18 nos balancins da recuperadora, lado lança109
Figura 45 - Ponto para instrumentação: extensômetro 19 no balancim da recuperadora, lado contra lança109
Figura 46 - Posicionamento dos sensores fora da recuperadora: (a) no meio da esteira; (b) preso a lateral da esteira nivelado com sua altura110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos principais artigos encontrados na literatura sobre simulações
CFD e FSI
Tabela 2 - Configurações e condições de contorno para simulação CFD60
Tabela 3 - Número de Reynolds para as velocidades simuladas61
Tabela 4 - Valores mínimos de altura da primeira camada prismática para cadavelocidade simulada63
Tabela 5 - Parâmetros de malha63
Tabela 6 - Reações de apoio sem carga de vento (RA1: Reações de apoio sem alívio de tração; RA2: Reações de apoio com alívio de tração)
Tabela 7 - Resultados de velocidade e pressão máximas encontrados para asvelocidades de vento simuladas
Tabela 8 - Reações de apoio para ventos de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10 m/s82
Tabela 9 - Reações de apoio para vento de entrada de 20 m/s85
Tabela 10 - Reações de apoio para vento de entrada de 42 m/s
Tabela 11 - Reações de apoio para vento de entrada de 200 km/h92
Tabela 12 - Posicionamento dos sensores para instrumentação. 105
Tabela 13 - Exemplo dos itens que devem conter na planilha de resultados de cada sensor
Tabela 14 - Resumo dos sensores111

LISTA DE SIGLAS

Tridimensional		
Lagrangiano-euleriano arbitrário		
Fluidodinâmica computacional		
Simulação de Descolamento Turbulento Atrasado		
Simulação de descolamento turbulento		
Federação Europeia de Manutenção		
Método dos elementos finitos		
Interação fluido-estrutura		
Instituto Brasileiro de Mineração		
Simulação de turbulência em larga escala		
Politereftalato de etila		
Produto interno bruto		
Médias de Reynolds das Equações de Navier-Stokes		
Método semi-implícito para equações ligadas a pressão		
Método semi-implícito consistente para equações ligadas a pressão		
Sistema de padronização da Vale		
Variação marker and cell do método SIMPLE		
Transporte de tensão cisalhante		
Regulamento de operações portuárias		

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Massa específica	kg/m³	
V	Magnitude de velocidade		
t	Tempo		
<i>u</i> '	Flutuação de velocidade em x		
<i>v</i> ′	Flutuação de velocidade em y	m/s	
w'	Flutuação de velocidade em z	m/s	
U	Média de velocidade variando no tempo em x	m/s	
Su	Contribuição tensora que altera o momento em x	kg/s².m²	
Sv	Contribuição tensora que altera o momento em y	kg/s².m²	
Sw	Contribuição tensora que altera o momento em z	kg/s².m²	
μ	Viscosidade dinâmica	kg/m.s	
V	Média de velocidade variando no tempo em y	m/s	
W	Média de velocidade variando no tempo em z	m/s	
μt	Viscosidade turbulenta	cPa	
τij	Tensor de tensão específico de Reynolds	Ν	
Sk	Contribuição tensora que altera o gradiente	Ν	
Ss	Contribuição tensora que altera o gradiente	Ν	
Gk	Coeficiente ajustável	-	
Gb	Coeficiente ajustável	-	
ΥM	Coeficiente ajustável	-	
C1s	Coeficiente ajustável	-	
C2s	Coeficiente ajustável	-	
C3s	Coeficiente ajustável	-	
σk	Coeficiente ajustável	-	
σε	Coeficiente ajustável	-	
Ρ	Pressão	Ра	
F	Força	Ν	
М	Momento	N.m	
l	Distância entre o ponto onde a força é aplicada e o apoio	m	
т	Massa	kg	
а	Aceleração	m/s²	

Lc	comprimento característico do escoamento	m
V	velocidade de escoamento	m/s
Re	Número de Reynolds	-
<i>y</i> +	Parâmetro adimensional	-
Δy	Distância da parede até o centro do elemento	m
Ut	Velocidade de atrito	m/s
V	Viscosidade cinemática	m²/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.	.23
1.1	Objetivo geral	.25
1.2	Objetivos específicos.	.25
1.3	Justificativa.	.25
1.4	Escopo do trabalho.	.26
2	ESTADO DA ARTE	.27
3	CONCEITUAÇÃO TEÓRICA	43
3.1	Equacionamento matemático para fluidodinâmica computacional (CFD)	43
3.2	Equacionamento matemático para análise de estabilidade estrutural (FEM)	46
3.3	Equacionamento matemático para Interação fluido-estrutura (FSI)	49
4 4.1 4.2 4.3 4.4 4.5 4.6	METODOLOGIA O objeto de estudo Velocidades do vento O modelo computacional de fluidodinâmica (CFD) O modelo estrutural de elementos finitos (FEM) O modelo de interação fluido-estrutura (FSI) O hardware utilizado.	53 56 56 65 69 72
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.1	Análise de estabilidade da estrutura sem carga de vento	73
5.2	Análise do escoamento	75
5.3	Análise de estabilidade para as velocidades de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10 m/s	77
5.4	Análise de estabilidade para a velocidade de 20 m/s	.83
5.5	Análise de estabilidade para a velocidade de 42 m/s	.86
5.6	Análise de conferência de instabilidade para ventos de 200 km/h	.90
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	.95
6.1	Conclusões	.95
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	.96
	REFERÊNCIAS	.99
	APÊNDICE A – Proposta de Instrumentação1	05

1 INTRODUÇÃO

A história do Brasil é fortemente marcada pela exploração e beneficiamento de seus recursos minerais. Além de terem impulsionado a ocupação territorial, os minérios e seus metais sempre contribuíram para o fornecimento de importantes insumos para o parque industrial brasileiro, alavancando e suportando a economia nacional (ROBLES, 2012). Nos dias atuais, o setor da mineração é responsável por aproximadamente 1% do PIB brasileiro, gerando uma receita de mais de 28 bilhões de dólares apenas no ano de 2017 (IBRAM, 2018).

Devido à sua grande importância econômica, a exploração de minérios vem tradicionalmente atraindo investimentos externos, gerando milhares de empregos e impulsionando o desenvolvimento socioeconômico do país. Entretanto, a lucratividade do setor de mineração é fortemente dependente de sua atividade extrativa, da capacidade de movimentação do minério em campo até os portos e do seu devido embarque nos navios, para exportação.

Para que seja possível operar em alta produtividade, equipamentos de grande porte são utilizados e, dentre eles, destacam-se as recuperadoras de minério. O robusto equipamento, que é possuí capacidade de recuperar até 10 mil toneladas de minério por hora, opera carregando e depositando pilhas de minério em navios e é de fundamental importância para a logística portuária. Além da constante tensão estrutural a que as recuperadoras de minério são submetidas, devido ao peso do minério transportado, o equipamento também é atingido por rajadas de vento, que, em regiões litorâneas, podem atingir velocidades de até 120 km/h em condições extremas (VALE, 2017). A incidência de vento sobre as recuperadoras tende, portanto, a intensificar as tensões estruturais existentes e pode, inclusive, provocar a criação de novos pontos críticos, podendo, em alguns casos, resultar no deslocamento da recuperadora.

Atualmente, o regulamento de operações portuárias (TMPM) e o sistema de padronização da Vale (SISPAV), importante mineradora brasileira, se baseiam na norma da Federação Europeia de Manutenção (FEM), seção II, documento 2.131/2.132, que define regras para o projeto de equipamentos móveis para manipulação contínua de materiais de carga, para determinar o critério de parada da recuperadora de minérios quando há expressivo aumento da velocidade do vento. A norma FEM 2.131/2.132 estabelece que a máxima velocidade de vento para operação

da recuperadora é de 20 m/s (ou 72 km/h) e que a velocidade máxima que o equipamento pode ser deixado no pátio fora de serviço (vento de sobrevivência) é de 42 m/s (ou 150 km/h) (FEM, 1997).

No entanto, diante da grande importância do equipamento para a logística portuária e do prejuízo financeiro proveniente de sua parada, é de grande interesse avaliar se a norma FEM é, de fato, um critério de parada eficaz e, caso seja necessário, adotar um critério mais preciso e específico para a recuperadora. Nesse sentido, a simulação virtual se destaca como uma alternativa eficiente para a avaliação da estabilidade estrutural do equipamento quando sujeito à incidência de vento de diferentes velocidades.

A simulação virtual de processos vem sendo amplamente empregada em diversas áreas de estudo, tais como física, química, biologia, economia e engenharias, com o objetivo de reduzir custos e aumentar a eficiência de processos e sistemas, através da previsão de comportamentos e compreensão de fenômenos, que levam à solução de problemas (SECCHI, 1995). Um fator de grande valia é realizar milhares de experimentos sem que seja necessário alocar extensa mão de obra ou parar equipamentos em funcionamento, evitando perdas monetárias consideráveis e otimizando o aproveitamento do tempo.

A capacidade de simular processos está, ainda, em consonância com as demandas da indústria 4.0, mais nova tendência da indústria. O termo foi utilizado pela primeira vez na Feira de Hanover, Alemanha, em 2011, no intuito de definir o que seria a quarta revolução industrial (DRATH, 2014). Trata-se de uma revolução que tem como base os sistemas ciberfísicos e a Internet e que aproveita a disponibilidade cada vez maior de infraestrutura de comunicação para formar grandes redes, obtendo produtos otimizados e personalizados por preços ainda mais competitivos (PEREIRA, 2018). Dentre os pilares da indústria 4.0, ressalta-se a virtualização, o que destaca a atualidade e relevância do presente trabalho.

Assim, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de uma metodologia para construção de modelos virtuais que possam ser utilizados como ferramenta, através da aplicação de softwares de engenharia de modelagem e simulação virtual, para a análise da estabilidade estrutural de recuperadoras de minério, bem como de outros equipamentos da mineração, submetidos a cargas de vento. Os resultados obtidos a partir do modelo desenvolvido serão confrontados com os limites estabelecidos pela norma FEM 2.131/2.132, a fim de se avaliar a adequabilidade dos limites

24

estabelecidos como critério de parada dos equipamentos. Para construção do modelo, propõe-se a aplicação do método de acoplamento comumente chamado de interação fluido-estrutura (FSI – *Fluid-Structure Interation*), que se dá através do uso de ferramentas computacionais de fluidodinâmica (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) e de elementos finitos (FEM – *Finite Element Method*). A primeira ferramenta fornece o campo de pressões resultante da carga de vento na estrutura, enquanto a segunda calcula a resposta estrutural em forma de deslocamentos e/ou tensões.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para análise e avaliação estrutural de uma recuperadora de minério submetida ao vento através da solução da interação fluido estrutura.

1.2 Objetivos específicos

- a. Obter o campo de pressões aplicadas no equipamento a partir do desenvolvimento de modelo CFD;
- b. Obter o campo de distribuição de tensões no equipamento a partir do desenvolvimento de modelo FEM e do acoplamento deste modelo ao CFD;
- c. Verificar a adequabilidade da norma FEM 2.131/2.132 na determinação dos limites de operação de uma recuperadora de minério.

1.3 Justificativa

As recuperadoras de minério são equipamentos indispensáveis para a logística de abastecimento dos navios e uma simples parada não prevista deste equipamento pode afetar toda a cadeia produtiva, levando a perdas econômicas consideráveis. Por este motivo, ser capaz de prever virtualmente condições críticas, localizar regiões submetidas a altas tensões e agir antes da nucleação e propagação de trincas é extremamente importante e pode trazer grandes reduções de custo, uma vez que permitirá evitar paradas bruscas e, além disso, possibilitará a otimização de estruturas ainda na etapa de projeto.

Dessa maneira, a elaboração da metodologia proposta visa possibilitar a análise virtual da integridade estrutural de recuperadoras de minério, de forma a atender às várias condições de operação, além de possibilitar a compreensão da dinâmica do ar e do impacto do vento na estrutura, uma vez que é possível obter uma visualização gráfica e intuitiva dos resultados. Além disso, diante do enorme prejuízo causado pela não operação deste equipamento e dos altos riscos associados ao seu arraste ou queda, é fundamental que o critério de parada seja o mais acurado possível.

1.4 Escopo do trabalho

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, a saber:

O Capítulo 1 se destina a contextualizar o trabalho, introduzindo o tema e apresentando os objetivos almejados, bem como sua motivação e justificativa. No Capítulo 2, é apresentado o estado da arte sobre o assunto, com o detalhamento dos principais estudos na área de CFD, FEM e FSI de autores de várias instituições a nível global. O Capítulo 3, por sua vez, traz a conceituação teórica base para a metodologia criada. Este capítulo foi dividido em três subcapítulos (itens 3.1 a 3.3), que se destinam ao equacionamento matemático para análise fluidodinâmica, análise estrutural de tensão/deformação e interação fluido estrutura, respectivamente.

No Capítulo 4, a metodologia desenvolvida é apresentada, dividida em quatro subcapítulos que trazem a descrição da modelagem do objeto de estudo. O primeiro subcapítulo aponta as características do equipamento estudado e os três subcapítulos seguintes tratam da criação dos modelos: primeiramente, a construção do modelo CFD, depois do modelo FEM e, por fim, a união dos dois, que resulta no modelo FSI. Já no Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados encontrados a partir do modelo desenvolvido, englobando a estabilidade estrutural da recuperadora e a confrontação frente aos limites estabelecidos pela FEM 2.131/2.132. A conclusão do trabalho acontece no Capítulo 6, apresentando a síntese dos resultados e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

As simulações virtuais de análise estrutural, análise dinâmica e mecânica dos fluidos foram desenvolvidas com o objetivo de agregar conhecimento e tecnologia ao projeto e operação de equipamentos, visando evitar problemas, prever falhas, aumentar durabilidade e simular comportamentos em condições de risco. A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é um tipo de simulação na qual o objeto de estudo é o fluido e sua interação com o meio em que se encontra. Desde 1930, com o desenvolvimento dos primeiros métodos para resolver equações potenciais linearizadas partindo das formulações de Navier-Stokes (MILNE-THOMSON *et al.*, 1973), a ferramenta CFD vem se tornando cada vez mais valiosa, aumentando e aprimorando seus recursos e sua aplicabilidade na resolução de problemas fluidodinâmicos, desde os mais simples até os mais complexos.

Estudos sobre os efeitos causados por carga de vento utilizando a técnica CFD têm sido realizados abordando diversas situações, como: o impacto de ventos laterais em ciclistas (FINTELMAN *et al.*, 2015), o vento em dunas de areia (LIU *et al.*, 2011), a carga de vento em navios porta-contêiner (JANSSEN *et al.*, 2017), a pressão gerada no topo de edifícios elevados (ZANG *et al.*, 2012) e os efeitos da geometria e do posicionamento de prédios na distribuição da pressão gerada pelo vento (MOU *et al.* 2017; YU *et al.*, 2015). Ainda, simulações CFD têm sido aplicadas para avaliar a pressão exercida no levantamento de cargas sujeitas a ventos (HAN; HAN, 2011) e a variação da força de elevação na estrutura de suporte de um guindaste de contêiner marítimo, durante uma tempestade com ventos de alta velocidade (HAN *et al.*, 2011).

Fintelman *et al.* (2015) analisaram o impacto gerado pelo vento lateral em um ciclista, alterando os ângulos de guinada aplicados de 0° a 90°, em um túnel de vento. Para tanto, eles utilizaram o software OPENFOAM e aplicaram diversos modelos de turbulência: modelo k-ε, baseado nas médias de Reynolds das equações de Navier-Stokes (RANS - *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation*); modelo k-ω, baseado no transporte de tensão cisalhante (SST - *Shear Stress Transport*); simulação de turbulência em larga escala (LES - *Large Eddy Simulation*), e simulação de descolamento turbulento (DES - *Detached Eddy Simulation*), avaliando e comparando os resultados obtidos a partir de cada um. A convergência do modelo foi assumida para resíduos inferiores a 10⁻⁴, para uma malha poliédrica. Uma análise experimental foi feita através de um modelo em escala, com bloqueio de 3% de seção, em um túnel

de vento de 2 m de altura por 2 m de largura e 10 m de profundidade. O modelo RANS k-ε foi o que apresentou os melhores resultados. Comparando os resultados computacionais com experimentais, observou-se uma diferença de 21% nas forças laterais e 9% de diferença nas forças de levantamento e arraste.

Blocken e Tropalar (2015) analisaram a força de arraste em ciclistas seguidos por carro batedor. Os autores utilizaram uma malha tetraédrica e a modelagem se baseou em RANS, com modelo de turbulência k- ε , uma vez que simulações virtuais correlacionadas com túnel de vento experimental mostraram que o modelo k- ε é o melhor para prever arraste com uma superestimação de aproximadamente 4%. O modelo contou com uma correlação experimental em escala 1:4. Os autores concluíram que é importante manter o carro batedor a uma distância de, pelo menos, 30 m em relação aos atletas, devido às forças de arraste que são intensificadas pela proximidade entre eles.

O impacto do vento em estruturas prediais também é alvo de grande interesse e foi bem abordado por Mou et al. (2017), que analisou o impacto e a dinâmica do escoamento do ar a partir de uma estrutura predial com diferentes profundidades. Os autores utilizaram o software Ansys Fluent 14.0, modelando o problema com RANS, turbulência k-ε e em regime estacionário, em um túnel de dimensões 500 m de altura, 900 m de profundidade e 900 m de comprimento. A entrada no volume de controle foi modelada com velocidade constante igual a 3 m/s e a saída do domínio com pressão igual a zero. A convergência foi assumida quando os resíduos atingiram o patamar de 10⁻⁴. O campo de pressões gerado no topo e nas laterais do prédio variou fortemente com a variação de profundidade, sendo que o prédio mais estreito apresentou valores maiores de pressões positivas em relação a pressão atmosférica e o prédio mais profundo apresentou valores maiores de pressão negativa, em relação a pressão atmosférica, levando à conclusão de que estruturas mais estreitas sofrem mais intensamente os efeitos de pressão direta do vento. Em um trabalho parecido, Yu et al. (2015) consideraram dois prédios ao invés de um só, e analisaram o campo de pressões somente em túnel de vento, ou seja, análise puramente experimental, em escala 1:400. Os autores avaliaram vários tipos de arranjos e chegaram a importantes conclusões: a pressão total crítica é mais baixa, uma vez que os efeitos são distribuídos entre os dois prédios, porém, há aumento da pressão lateral nos mesmos; em um arranjo paralelo, as pressões de pico aumentam, devido à canalização do ar entre as estruturas; e, com o posicionamento entre quinas, a quina de ataque para o

28

vento tende a aumentar a pressão lateral em mais de 50% e as pressões de pico em até 20%, devido aos efeitos tridimensionais do vento e à concentração substancial do vento entre os prédios.

Ntinas et al. (2018) estudaram a turbulência gerada pelo vento incidindo em três diferentes geometrias de tetos de galpões, sendo elas reto, arqueado e triangular. O problema foi modelado assim como Mou et al. (2017), utilizando o software Ansys Fluent, considerando RANS e turbulência k-ε, mas também foram realizados testes aplicando modelo de turbulência k-ω. Os autores fizeram simulações computacionais e experimentais, para que os resultados fossem correlacionados. A velocidade de entrada foi considerada igual a 0,32 m/s e a pressão na superfície de saída foi considerada igual a zero, tanto para o experimental, quanto para o computacional. A análise experimental contava com modelo em escala de 1:180. Diante dos resultados, os autores concluíram que o modelo de turbulência k-ε conseguiu prever melhor os resultados de velocidade, porém, a turbulência foi melhor representada pelo modelo k-ω. Também realizando análise em telhados, mas comparando diferentes inclinações (17°, 27° e 37°), Tominaga et al. (2015) modelaram o problema com RANS, turbulência k-ɛ, velocidade na entrada do domínio igual a 2,6 m/s e saída com pressão igual a zero. Os autores fizeram teste de malha, no qual foram testadas malhas de 826 mil, 2,3 milhões e 3,6 milhões de elementos. A malha com 2,3 milhões (considerada como malha média pelos autores) foi a escolhida para ser utilizada, uma vez que apresentou valores similares aos da malha mais refinada e exige menor esforço computacional. A correlação foi feita e um erro máximo de 15% entre os resultados computacionais e os experimentais foi encontrado e, de maneira geral, a pressão e a velocidade foram bem representadas pelo modelo computacional. Os piores resultados encontraram-se na zona de recirculação, após o descolamento do fluxo.

De modo geral, os pesquisadores vêm trabalhando para descrever o fenômeno avaliado e, ao mesmo tempo, criar possibilidades de aprimoramento do processo, como Perén *et al.* (2015), que avaliaram a modificação da posição das portas e janelas e do ângulo do teto, a fim de aumentar a renovação do ar e evitar pontos quentes dentro da casa. Para isso, utilizaram o software Ansys Fluent e modelaram o problema utilizando RANS, modelo de turbulência SST k- ω e acoplamento pressão-velocidade a partir do método semi-implícito para equações ligadas a pressão (SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*). Considerou-se convergência quando os resíduos atingiram a ordem de 10⁻⁶, o que ocorreu em aproximadamente 10 mil iterações. O modelo proposto foi correlacionado por testes experimentais em túnel de vento, com um modelo em escala 1:200. Os autores afirmaram que o posicionamento das janelas e portas exerce uma influência significativa para que haja diferença de pressão o bastante para que o ar entre no ambiente e flua por toda área, sem perder energia ao se chocar com as paredes e móveis.

Ainda sobre possibilidades de aprimoramento de estruturas de casas e prédios, Nozu *et al.* (2015) realizaram um estudo CFD de prédios resistentes a ventos de alta velocidade. Os autores utilizaram o software OPENFOAM, modelando o problema com LES ao invés de RANS, uma vez que verificaram uma melhor previsão do vento no campo de escoamento. Os autores utilizaram o método de malhas sobrepostas para obter resultados apropriados de pressão e forças geradas pelo vento no prédio. Os resultados encontrados no âmbito computacional foram validados pela correlação em túnel de vento com um modelo real em escala 1:500. Já Zou *et al.* (2018) estudaram o vento no interior de residências para compreender o fluxo criado e melhorar o layout das paredes e dos móveis para uma melhor lavagem do ar com escoamento não forçado. Foi realizada uma comparação entre os softwares STARCCM+ e Ansys Fluent, com diferentes malhas e diferentes condições de y+, observando um desempenho ligeiramente melhor no Fluent.

Visando fornecer uma visão geral sobre a simulação CFD para estruturas civis, Blocken (2015) compilou vários trabalhos, buscando organizar de forma sucinta aquelas que se apresentaram como as melhores práticas. Para definição de um problema fluidodinâmico em análises CFD urbanas, o autor indica a modelagem RANS, devido ao baixo custo para bons resultados encontrados, o acoplamento de pressão-velocidade a partir do método SIMPLE, a geração de um túnel de vento com área de bloqueio de até 10% e critério de convergência quando os resíduos são iguais ou menores que 10⁻⁴.

Liu *et al.* (2011), por sua vez, estudaram as correntes de vento em dunas de areia, utilizando o software ANSYS Fluent, com modelo de turbulência SST k- ω e utilizando o método semi-implícito consistente para equações ligadas a pressão (SIMPLEC) para acoplar pressão e velocidade. Um modelo em três dimensões simulando a duna foi desenvolvido, utilizando elementos hexaédricos para o ar e tetraédricos para a duna. Um vento de entrada com velocidade igual a 10 m/s foi considerado e o valor de y+ foi monitorado, sendo mantido na faixa de 50 a 200. A recirculação gerada demonstra grande tendência de formação de novas dunas e

deslocamento das antigas. Para correlacionar os resultados computacionais, foram realizados testes experimentais em túnel de vento com duna transversal, em escala 1:100.

Uma área também muito abordada na simulação CFD é a automobilística. Tsubokura *et al.* (2010) e Rocchi *et al.* (2012) trabalharam com carro e caminhão, respectivamente, ambos estudando o comportamento e impacto de ventos laterais. Os autores observaram que a existência de uma face lateral maior que a face frontal cria uma restrição considerável para as rajadas de ar lateral, aumentando a probabilidade de deslocamento e desprendimento durante o choque de ventos, semelhante ao que poderia ocorrer com a recuperadora de minério, caso uma forte rajada fosse aplicada em totalidade em sua área lateral. Ambos os autores utilizaram três dimensões e malhas tetraédricas, mantendo os valores de y+ entre 30 e 300, para garantir uma boa correlação.

Rocchi et al. (2012) estudaram as forças e o arraste aerodinâmico gerados pela incidência de ventos laterais sobre um caminhão atravessando uma ponte. A velocidade do vento lateral foi considerada igual a 26 m/s. Entre os resultados, foi observada a ocorrência de um ponto crítico quando o caminhão passa próximo a uma das torres da ponte, onde há aumento de velocidade do vento, devido à repartição forçada da corrente de ar ao encontrar a estrutura da torre. Tsubokura et al. (2010) realizaram seu estudo utilizando modelagem LES, considerada melhor para analisar a flutuação de vento transiente em automóveis, e o acoplamento de pressão e velocidade SIMPLE, em sua variação marker and cell (SMAC). Utilizaram o código computacional Frontier Simulation Software for Industrial Science, desenvolvido no Japão, para gerar um volume de controle retangular, com velocidade de entrada igual a 18,5 m/s, pressão igual a zero na saída e uma malha tetraédrica, de aproximadamente 20 milhões de elementos. Os resultados obtidos na simulação transiente foram comparados com resultados experimentais e, a partir da correlação feita, as forças aerodinâmicas e momentum foram extraídos como resultado do estudo.

Asress e Svorcan (2014) realizaram análise de fluidodinâmica computacional para trens modelo ICE-2 em alta velocidade submetidos a ventos cruzados. A modelagem do problema foi feita considerando escoamento incompressível do ar, modelo RANS, turbulência k-ε (que os autores sugerem serem bons para correlacionar com túnel de vento experimental) e método SIMPLE para acoplamento

de pressão e velocidade. Os autores consideraram apenas a parte do trem que é crítica para a situação estudada e a velocidade aplicada na entrada foi de 70 m/s. A simulação foi feita em condição transiente, com tamanho de passo no tempo igual a 0,08 s. Foi utilizada uma malha tetraédrica, com aproximadamente 3 milhões de elementos, com refinamentos específicos próximo à estrutura do trem e cinco camadas prismáticas. Tal configuração foi utilizada para garantir valores de y+ entre 30 e 300. Obtiveram-se resultados de força lateral, ângulo de rolagem e pressão distribuída e os autores sugeriram aplicar o modelo LES para estudar a turbulência gerada mais a fundo.

Modelos de fluidodinâmica computacional também têm sido aplicados para avaliar o impacto de cargas de vento em navios de containers carregados, que também apresentam certas similaridades com a recuperadora de minério. Janssen et al. (2017) avaliaram um desses navios. A definição do modelo foi feita utilizando RANS, em regime permanente e turbulência k-ɛ. O volume de controle foi definido como retangular, com geometria do navio gerando um bloqueio de 8% do túnel de vento, de acordo com as melhores práticas fornecidas por Franke et al. (2010). A velocidade de entrada considerada foi de 45 m/s, com acoplamento de pressão e velocidade utilizando o método SIMPLE. Para geração de malha, o software Gambit foi utilizado, enquanto o software Fluent foi utilizado para a simulação CFD. Os autores fizeram uma interessante avaliação da simplificação de geometrias, partindo da representação do navio por apenas um bloco até uma geometria altamente detalhada. Os resultados obtidos demonstraram que é possível atingir certo nível de qualidade mesmo que a geometria não seja rica em detalhes, não considerando, por exemplo, furos de pequeno calibre, detalhes de chapas, superfícies com pouca espessura ou que não ofereçam resistência ao escoamento. Resultados experimentais foram gerados em túnel de vento em uma escala de 1:450 e os valores de correlação variaram de 38% para o bloco sem nenhum refinamento até 6% para a geometria mais refinada.

Apesar da grande variedade de estudos que utilizam a simulação CFD para avaliar os impactos gerados por cargas de vento, trabalhos sobre equipamentos de mineração alocados em portos são muito raros, fazendo deste um campo ainda pouco abordado e ressaltando a grande contribuição do presente trabalho para essa área.

O método dos elementos finitos, por sua vez, é aplicado no diagnóstico e solução de problemas de análise estrutural, através da obtenção de deslocamentos,

32

deformações e tensões. Simulações de FEM permitem representar diversos cenários e avaliar o desempenho de diferentes processos através da aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga. Além disso, variações do FEM possibilitam a análise térmica, acústica, dinâmica e eletromagnética para alguns casos mais simples, como os de comportamento linear, ou quando há grandes deslocamentos ou contato entre partes de uma montagem (MIRLISENNA, 2018).

As aplicações de FEM são diversas e sua utilização como ferramenta para solução e otimização de problemas de engenharia é crescente. Por exemplo, Sarkar et al. (2015) utilizaram simulação do tipo FEM para realizar uma análise estática da estrutura da pá de uma máquina escavadora utilizando o software Ansys Mechanical. A partir dos resultados obtidos, os autores estimaram o fator de segurança, a deformação máxima sofrida e o ponto da escavadora submetido à maior tensão, que foi identificado no contato do dente com a estrutura da caçamba, devido ao braço de alavanca gerado. Já Gwi-Nam Kim et al. (2015) avaliaram a integridade estrutural de um cilindro de perfuração. Para tanto, os autores utilizaram um modelo tridimensional (3D) dinâmico, feito sob condições de contorno e movimento (mola nos cilindros e travamentos), e um modelo FEM também feito no software Ansys. Foi aplicada uma malha hexaédrica, com alguns componentes tetraédricos, totalizando 216 mil elementos dos corpos estruturais e a estrutura foi configurada para aço DH36, material predominante do cilindro. Foram aplicadas forças de movimentação, rolamento, torção, amortecimento dos cilindros, carga de reação e carga de gravidade. Resultados de alta tensão foram encontrados no mastro, mas todos estavam de acordo com os valores permitidos.

Apesar da grande importância das simulações CFD e FEM individualmente, a engenharia é uma ciência em constante aprimoramento e, atualmente, uma forte tendência é a interdisciplinaridade. Nesse contexto, surge a interação fluido-estrutura (FSI), que vem se tornando cada vez mais viável e mais amplamente utilizada. A FSI é o acoplamento entre leis de diferentes áreas da física, em especial a fluidodinâmica e a mecânica estrutural. Este acoplamento leva em consideração o campo de pressão ou de temperatura resultante de uma análise CFD e as consequências diretas deste carregamento na análise estrutural obtida por FEM. Inúmeros sistemas podem ser avaliados sob a ótica da FSI: válvulas industriais, tubulações que transportam fluido a alta temperatura, rotores de máquinas rotativas, turbinas eólicas, válvulas sanguíneas, carenagens externas de gabinetes, entre outros (MIRLISENNA, 2018).

Em um dos primeiros trabalhos encontrados sobre a aplicação da FSI, Sheta e Hussel (2003) avaliaram a possibilidade de deslocamento da cauda vertical de aeronaves militares. Os autores observaram que o problema de fadiga ocorria em condições extremas, nas quais ocorriam ondas de choque e ângulos de ataque extremos, caracterizados por forte geração de recirculação e separação de escoamento. Para desenvolvimento do modelo CFD, o código CFD-FASTRAN foi utilizado, sob as condições de contorno de Riemann. Nas superfícies da aeronave, aplicaram condição de não escorregamento, com velocidade relativa igual a zero. Já nas superfícies de aceleração, o gradiente de pressão normal não é mais igual a zero, devido à inércia de movimentação. Para o modelo FEM, partiu-se do modelo básico massa, mola e amortecedor e utilizou-se o módulo FEM-STRESS. A interação fluidoestrutura foi analisada com o módulo *Fluid Structure Interfacing*, que funciona através do processo de interpolação e conservação de forças geradas e dissipadas do trabalho virtual, e a conexão das malhas CFD e FEM foi definida na proporção de um para um.

Desde então, diversos estudos têm sido publicados na literatura internacional sobre a aplicação desta metodologia para análise de diferentes situações. Por exemplo, Braun et al. (2008) realizaram uma análise transiente, correlacionada em túnel de vento de uma seção, para uma ponte submetida a vento lateral. Os resultados de pressão distribuída, forças, torção e arraste foram obtidos simulando diferentes condições de velocidade (variando de 30 a 70 m/s, em intervalos de 10 m/s) e ângulos de incidência do vento (variando de -8° a 8°, em intervalos de 1º). Os modelos físicos aplicados foram LES, método lagrangiano-euleriano arbitrário (ALE - Arbitrary Lagrangian-Eulerian) e o método explícito de dois passos de Taylor-Galerkin, no qual a solução do FSI é obtida considerando acoplamento particionado, ou seja, os modelos CFD e FEM são calculados sequencialmente. Já Padewska et al. (2017) avaliaram um toróide submetido a escoamento do ar perpendicular. A modelagem do problema foi feita com o pacote Ansys, utilizando o software Fluent para a parte CFD. O modelo aplicado foi SST, com turbulência k-ω, velocidade de entrada igual a 33,5 m/s e pressão de saída igual a zero. A parte estrutural estática foi modelada no software Ansys Static Structural. Os resultados obtidos foram comparados aos obtidos através da aplicação da Eurocode EN1991-1-4, norma feita para o projeto de tubos e seções curvas, como toróides, submetidos ao vento. Os autores constataram que o resultado de pressão encontrado com o modelo FSI é 30% menor que o resultado

calculado com a norma EN1991-1-4. Myrli e Khawaja (2019), por sua vez, desenvolveram um modelo FSI e atestaram a viabilidade da utilização de cabos de politereftalato de etila (PET) na confecção de redes para gaiolas de criatório de peixes, contestando a norma norueguesa NS9415, de 2013. A parte FEM do estudo foi feita no software Abaqus Explicit, considerando o peso das âncoras no mesmo sentido da gravidade e fixação na extremidade oposta da rede. A parte CFD foi feita no software Ansys Fluent 6.3, com RANS e turbulência k-ε. Os autores optaram por acoplamento de uma via, devido ao alto custo de uma operação transiente em duas vias, tanto de hardware, quanto de tempo, devido à necessidade de retroalimentação.

Assim como Tsubokura *et al.* (2010) e Rocchi *et al.* (2012), Zhu e Zhigang (2015) também fizeram um estudo a respeito do impacto de ventos laterais em automóveis, no entanto, aplicando agora o acoplamento FSI. O software utilizado foi o Ansys Fluent, com modelo baseado em RANS e turbulência k-ε, além de aplicar o método ALE para a simulação CFD. Neste método, as equações são discretizadas em uma malha que acompanha o movimento da estrutura. O FSI utilizado foi com acoplamento forte, que consiste em resolver o problema calculando os modelos de fluidodinâmica e análise estrutural simultaneamente. Os autores observaram que o automóvel pode se descolar do chão quando submetido a ventos laterais de velocidade a partir de 10 m/s, quando a força gerada pela aplicação de pressão no corpo excede o atrito dos pneus com o solo. O modelo computacional foi correlacionado com resultados experimentais, obtidos a partir de um modelo em escala em um túnel de vento real.

Assim como a simulação CFD, a FSI ainda é muito pouco utilizada para equipamentos de mineração, como as recuperadoras de minério. No entanto, são encontrados estudos para estruturas similares, como guindastes e perfuratrizes, ou estruturas de alturas elevadas, característica de grande impacto nas recuperadoras.

Para avaliar a performance de um guindaste de capacidade 100 toneladas em alto mar, Han e Han (2011) desenvolveram um procedimento para cálculo de pressão oriunda do vento na estrutura do guindaste utilizando o software Fluent. Para tanto, foi desenvolvido um modelo em regime estacionário, baseado em RANS, com turbulência k-ε e SIMPLE com discretização de segunda ordem. Os testes foram feitos aplicando velocidades de 18 e 30 m/s, em um túnel com vento nas direções frontal e lateral. Observou-se maior criticidade para os ventos laterais, devido ao braço de alavanca gerado pela haste do guindaste. Han *et al.* (2011) também analisaram a

pressão gerada na estrutura de guindastes com capacidade entre 50 e 60 toneladas em um porto, quando submetido a ventos em situação de furacão, com velocidade de 75 m/s. Na análise CFD, utilizou-se o software CFX, modelagem RANS, turbulência k-ε e o chão e a superfície do guindaste foram configurados com condição de escorregamento. A aplicação do vento em torno do volume de controle abrangeu uma faixa de 0 a 180°, em intervalos de 10°. Os resultados de pressão gerados foram exportados para o Ansys Mechanical e observou-se um deslocamento máximo de 0,8% da largura do guindaste.

Hyun Kim *et al.* (2015) realizaram análise FSI da estrutura que segura uma perfuratriz em alto mar. Utilizaram os pacotes CFX para CFD e Mechanical para FEM. A modelagem CFD foi feita com RANS e turbulência k-ε. O túnel de vento computacional de seção quadrada foi configurado com velocidade na entrada de 63 m/s, saída com pressão constante igual a zero e faces laterais abertas. A modelagem FEM foi feita com a estrutura presa nos pontos de apoio, esforços de perfuração e pressão do vento aplicados na estrutura. Os resultados demonstraram deformação máxima de 32 mm e tensão de 177 MPa.

Park *et al.* (2018) analisaram a influência de ondas causadas por tornados e furacões em estruturas de altura elevada presentes na costa litorânea. Na simulação no software Fluent, foi selecionado o modelo k- ε , uma vez que esse modelo é mais preciso quando comparado a outros. O tempo de saída foi controlado pelo número de Courant e o critério de convergência assumido para os componentes de continuidade e velocidade foi de 1,0E-6. Além disso, os cálculos de k- ε e fração de volume foram definidos para convergir a 1,0E-3, com no máximo 50 iterações, garantindo uma maior eficiência computacional. Três malhas foram avaliadas: M1, malha grosseira (0,08 – 0,16 m), com 544.880 elementos, que demandou aproximadamente 17 hs para rodar; M2, malha média (0,04 – 0,16 m), com 1.458.243 elementos, que precisou de cerca de 62 hs; e M3, malha refinada (0,02 – 0,16 m), com 3.419.530 elementos e que demandou aproximadamente 176 hs, em um computador com processador Intel core i7-4770 (3,4 GHz) com 64 GB de memória RAM.

Bak *et al.* (2013), por sua vez, utilizaram FSI para calcular a deformação do mastro de um iate de 30 pés. Os autores aplicaram a metodologia denominada *direct-coupled* FSI, que consiste em um método analítico no qual o modelo CFD e a análise estrutural são acoplados diretamente. Além disso, os autores optaram pelo tipo *two-way* FSI, uma vez que o modelo CFD demonstrou que o vento gera grande

36

deformação logo nos primeiros instantes. A ferramenta CFD utilizada foi o Ansys CFX, com módulo ICEM-CFD para gerar malha e LS-DYNA para análise estrutural. O modelo aplicado foi RANS com turbulência SST k-ω. Os resultados indicaram que o arraste aerodinâmico aumenta 4,9% sob a ação do vento, levando à deformação do tecido do mastro. Além disso, foi feita uma análise do fenômeno de divisão do ar, que é capaz de promover mudanças no arqueamento do tecido do mastro. Também em relação a barcos, Cirello et al. (2019) analisaram a deformação da vela de um barco. Entre as condições de contorno, o ângulo de incidência e a velocidade do vento foram variados. A parte fluidodinâmica foi desenvolvida em CFX, com modelo RANS e turbulência SST k-ɛ, que, de acordo com os autores, é amplamente utilizado em simulações CFD de velas; e a parte estrutural foi desenvolvida no Ansys Static Structural. Os autores propuseram, ainda, uma nova metodologia de acoplamento FSI, já que observaram que os métodos de acoplamento amplamente utilizados divergiam com facilidade. A nova metodologia realiza a interação fluido-estrutura em passos, resolvendo graves problemas de convergência e diminuindo a necessidade de processamento, mas levando, no entanto, a um maior número de iterações. Os autores concluíram que o novo método é eficaz e robusto.

A fim de avaliar a vibração de um prédio de 183 m de altura submetido ao vento, um modelo 3D de análise FSI, com CFD transiente (passo no tempo de 0,0005 s e tempo total igual a 17,3 s) foi desenvolvido por Zang *et al.* (2012). Foi utilizado RANS com ALE para calcular a deformação e movimentação dos nós e também aplicou-se o modelo de turbulência chamado simulação de descolamento turbulento atrasado (DDES – *Delayed Detached Eddy Simulation*). O túnel de vento computacional foi configurado para uma velocidade de entrada de 8,3 m/s, pressão constante igual a zero na saída e demais superfícies como condição de simetria, utilizando o software FENSAP. A malha do modelo contemplou elementos tetraédricos com refinamentos de arraste, gerando um total de 2,2 milhões de elementos, e as camadas prismáticas foram calculadas para garantir valores de y+ menores que um. A correlação dos resultados foi feita através de análise experimental em um túnel de vento com escala 1:400.

Já Belver *et al.* (2012) realizaram análise FSI de uma chaminé de aço de 90 m de altura submetida a uma vibração induzida por um vortex de ventos. A parte CFD foi modelada com RANS, considerando o escoamento do ar como incompressível e utilizando a formulação de Crank-Nicholson. As deformações foram obtidas a partir do

método ALE (para fazer o movimento da malha fluida), sendo que foram consideradas velocidades do vento de até 9 m/s, para a qual foram observadas condições críticas de oscilação. Através de um fluxograma, os autores narraram a FSI: 1) resolveu-se o problema estrutural para uma estimativa de primeira pressão; 2) moveu-se a malha do domínio fluido conforme pressão adquirida no primeiro passo; 3) resolveram-se as equações de velocidade; 4) resolveu-se o modelo estrutural novamente; e, então, 6) as condições de velocidade adquiridas foram impostas. Entre os resultados obtidos estão as frequências naturais da chaminé.

Para analisar os esforços atuantes em uma torre de transmissão submetida a um tornado, Yong e Lingyi (2017) desenvolveram uma simulação FSI de uma via, no software Ansys CFX e Mechanical APDL. O modelo consistiu de uma parte CFD, na qual a torre de transmissão foi submetida a ventos constantes de 50 m/s, e a pressão na superfície da estrutura foi computada. Os valores mapeados foram exportados para o modelo estrutural e os esforços e a deformação foram calculados. Os resultados foram comparados com a norma de projeto de torres de transmissão e os valores encontrados na FSI foram 20% menores que aqueles calculados em projeto, sem fator de segurança aplicado.

A partir dos trabalhos encontrados na literatura, percebe-se a grande aplicabilidade da FSI na engenharia, contudo, essa simulação ainda é pouco utilizada para os grandes equipamentos da mineração, principalmente aqueles que atuam em zonas portuárias. No entanto, são encontrados estudos de navios, guindastes e prédios que, da forma como foram modelados, se aproximam de alguma maneira da recuperadora de minério, objeto de estudo deste trabalho, e que, portanto, podem ser utilizados como exemplos a serem seguidos para sua modelagem. É importante ressaltar que todos os artigos aqui apresentados fornecem informações úteis para delinear diferentes aspectos da FSI aplicada à recuperadora de minério. Assim, a Tabela 1 compila os principais trabalhos apresentados, destacando seus pontos de maior interesse.

38

Autor	Tipo de Simulação	Principais pontos
Mou <i>et al.</i> (2017)	CFD	Software Ansys Fluent Modelagem com RANS k-ε Convergência dos resíduos 0,0001 Setup com Velocidade na entrada (3,0 m/s) e pressão igual a zero na saída
Tominaga <i>et al.</i> (2015)	CFD	Modelagem com RANS k-ε Setup com Velocidade na entrada (2,6 m/s) e pressão igual a zero na saída Malha média escolhida no teste de malha Correlação com erro máximo de 15%
Blocken (2015)	CFD	Modelagem com RANS k-ε Acoplamento pressão-velocidade com SIMPLE Bloqueio da seção do túnel 10% Convergência dos resíduos 0,0001
Tsubokura <i>et al.</i> (2010)	CFD	y+ de 30 a 300 Modelagem com LES Acoplamento pressão-velocidade com SIMPLE Malha tetraédrica Setup com Velocidade na entrada e pressão igual a zero na saída
Padewska <i>et al.</i> (2017)	FSI	Software CFD : Ansys Fluent Modelagem com SST k-ω Setup com Velocidade na entrada e pressão igual a zero na saída Software FEM: Ansys Mechanical Resultado FSI 30% menor que a norma.
Myrli e Khawaja (2019)	FSI	Software FEM: Abaqus Software CFD : Ansys Fluent Modelagem com RANS k-ε Acoplamento FSI 1 via
Han e Han (2011)	FSI	Software CFD : Ansys Fluent Modelagem com RANS k-ε Setup com Velocidade na entrada (18m/s a 30 m/s) e pressão igual a zero na saída Software FEM: Ansys Mechanical Criticidade dos resultados em ventos laterais
Yong e Lingyi (2017)	FSI	Software CFD : Ansys CFX Modelagem com RANS k-ε Setup com Velocidade na entrada (50m/s) e pressão igual a zero na saída Software FEM: Ansys Mechanical Resultado FSI 20% menor que calculado em projeto

Tabela 1 – Resumo dos principais artigos encontrados na literatura sobre simulações CFD e FSI

Observa-se, em primeiro lugar, que a grande maioria dos trabalhos utiliza o software Ansys Fluent para modelar a fluidodinâmica e o software Ansys Static Structural, com o Mechanical APDL, para modelar a parte estrutural. Percebe-se também a massiva utilização do modelo RANS com turbulência k-e para simulações em regime permanente, quando a principal preocupação são os valores de velocidade e pressão, e não a turbulência (já que o modelo de turbulência k- ω é o mais indicado para estudar turbulência). Vários autores optam por utilizar a interação fluido-estrutura de uma via, devido ao seu maior custo benefício, tanto no que diz respeito ao hardware, quanto ao tempo necessário para obter as respostas, já que esse método exige menos esforço computacional para uma alta qualidade de resultados. É importante destacar, todavia, que o objeto de estudo precisa se adequar ao tipo de resultado que a FSI de uma via fornece. Há também informações úteis a respeito das dimensões do volume de controle virtual, que, apesar de ser totalmente dependente do objeto de estudo, deve provocar uma taxa de bloqueio de no máximo 10% da área de escoamento do fluido, a fim de evitar que os efeitos envolvidos no fenômeno sofram interferência das paredes. Em relação à entrada e saída do volume de controle, são comumente utilizadas a velocidade do fluido como entrada e pressão nula como saída.

Nos estudos verificados, a malha tetraédrica foi a mais utilizada, seguida da poliédrica e, por fim, a hexaédrica, seguindo uma ordem de maior custo-benefício, em relação à convergência *versus* esforço computacional. Pelo mesmo motivo, a maior parte dos autores opta por utilizar malhas com grau de refinamento intermediário, que mantém as características do sistema modelado sem sobrecarregar o modelo e adequando-o ao hardware disponível. As simulações mais complexas, como as transientes e as que envolviam um nível de detalhamento muito alto, rodaram em servidores com muitos processadores e memória; para máquinas comerciais, ainda que robustas, simplificações tiveram que ser feitas. Por fim, em alguns artigos, normas que regem o projeto e/ou a operação de determinados equipamentos em relação à incidência de vento foram contestadas, sendo que os resultados encontrados a partir das simulações se mostraram de 20 a 30% menores que os previstos em norma, acentuando a importância de se verificar a adequabilidade da norma FEM 2.131/2.132 como critério de parada da recuperadora de minério.

Assim, este trabalho visa contribuir para maior conhecimento acerca do impacto do vento em equipamentos da mineração, reduzindo a lacuna existente em relação a

essa área, bem como possibilitar o aprimoramento da logística portuária no que diz respeito à exportação de minério.

3 CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão da interação fluido-estrutura, é necessário entender as bases do equacionamento matemático dos métodos CFD e FEM. Esse capítulo se destina, portanto, a apresentar os principais conceitos e fundamentos envolvidos.

3.1 Equacionamento matemático para fluidodinâmica computacional (CFD)

A fluidodinâmica (ou mecânica dos fluidos) é o campo de estudo do efeito de forças atuando em fluidos (NAKAYAMA, 2018). A compressão de um fluido acontece a partir da alteração no seu volume quando ele é submetido a uma pressão exterior. Para simplificar as equações da mecânica dos fluidos, no entanto, considera-se que os escoamentos são incompressíveis quando estão a uma velocidade abaixo de 30% da velocidade do som e os efeitos de transferência de calor podem ser considerados desprezíveis (ARAÚJO, 2018). Uma vez que a velocidade do som é de 340 m/s (ou 1.224 km/h), o escoamento do ar é considerado incompressível até uma velocidade de 367 km/h, o que significa, para esta situação, que sua densidade se mantém constante.

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais que descrevem o escoamento de fluidos e tornam possível determinar os campos de velocidade e de pressão em um escoamento. Essas equações foram assim denominadas no século 19, após Claude-Louis Navier e George Gabriel Stokes desenvolverem um conjunto de equações que descrevem o movimento de substâncias fluidas, tais como líquidos e gases, dando origem às leis de conservação de massa e momento e aproximações de primeira ordem. As equações de Navier-Stokes estabelecem que mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluida são resultantes das mudanças na pressão e forças viscosas, que se originam na interação molecular, atuando no fluido (WOLFRAM, 2012).

A base para o estudo do escoamento de um fluido parte de sua discretização em pequenas unidades de volume, com dimensões bem definidas nos eixos x, y e z, que podem ser imaginadas como elementos cúbicos. Como as fronteiras são interligadas, formando uma cadeia de elementos, a excitação de um elemento através de acréscimo de massa, imposição de pressão ou aumento de velocidade, faz com que ele reverbere pelos demais.
Uma vez que neste trabalho não serão considerados os efeitos de transferência de energia em forma de calor, duas equações devem ser consideradas em primazia para a modelagem fluidodinâmica: a equação de conservação da massa e a equação de momento linear, ou quantidade de movimento. A formulação da conservação da massa em três dimensões é vista de forma compacta na Eq. (1) (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\delta t} + \nabla . \left(\rho V \right) = 0 \tag{1}$$

Onde ρ é a densidade [kg/m³]; *V* é a magnitude de velocidade (x, y, z) [m/s]; e *t* é o tempo [s].

As médias de Reynolds das equações de Navier-Stokes (RANS) são um procedimento no qual valores instantâneos são substituídos pela média da flutuação dos componentes envolvidos, resultando em uma variação no tempo. Por exemplo, o componente de velocidade no eixo x (u) para determinada unidade de volume pode ser descrito como mostrado na Eq. (2).

$$u = U + u' \tag{2}$$

Onde u' é a flutuação de velocidade em x [m/s]; e U é a média de velocidade variando no tempo [m/s].

A lei de conservação da quantidade de movimento em três dimensões pode ser vista nas Eq. (3) a (5), para o eixo x, y e z, respectivamente. As equações são definidas pela segunda lei de Newton, em que a taxa de variação da quantidade de movimento linear de um fluido é igual à soma das forças que atuam nele mais os gradientes. As forças aplicadas podem ser de superfície (aquelas que dependem de contato) como pressão, viscosidade, contato e gravidade; ou de corpo, como centrifuga, coriolis e eletromagnética (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla (\rho U V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla (\mu \nabla U) - \frac{\partial \left(\overline{\rho u'^2}\right)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\overline{\rho u'v'}\right)}{\partial y} - \frac{\partial \left(\overline{\rho u'w'}\right)}{\partial z} + S_u$$
(3)

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla (\rho V V) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla (\mu \nabla V) - \frac{\partial(\overline{\rho u' v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v' w'})}{\partial z} + S_v$$
(4)

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \nabla (\rho W V) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla (\mu \nabla W) - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho w'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} + S_w$$
(5)

Onde *P* é a pressão [Pa]; S_u é a contribuição escalar que altera a quantidade de movimento em x [kg/s². m²] (por exemplo, caso essa contribuição seja a gravidade, o termo se tornará $-\rho g$, sendo *g* igual a 9,81 m/s²); S_v é a contribuição tensora que altera o momento em y [kg/s². m²]; S_w é a contribuição tensora que altera o momento em z [kg/s². m²]; μ é a viscosidade dinâmica [kg/m.s]; *V* e *W* são as médias de velocidade variando no tempo [m/s] e v' e w' são as flutuações de velocidade nos eixos y e z [m/s], respectivamente.

As simulações serão feitas considerando operação em regime permanente, logo, o termo de variação no tempo é igual a zero e, portanto, as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento linear no eixo x, y e z podem ser reescritas de acordo com as Eq. (6) a (9), respectivamente.

$$\nabla . \left(\rho V \right) = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \left(\overline{\rho u'^2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\overline{\rho u'v'}\right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\overline{\rho u'w'}\right)}{\partial z} - S_u = \nabla . \left(\mu \nabla U\right) - \nabla . \left(\rho UV\right)$$
(7)

$$\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \left(\overline{\rho u' v'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\overline{\rho v'^2}\right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\overline{\rho v' w'}\right)}{\partial z} - S_v = \nabla . \left(\mu \nabla V\right) - \nabla . \left(\rho V V\right)$$
(8)

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \left(\overline{\rho u'w'}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\overline{\rho w'v'}\right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\overline{\rho w'^2}\right)}{\partial z} - S_w = \nabla . \left(\mu \nabla W\right) - \nabla . \left(\rho WV\right)$$
(9)

As flutuações tridimensionais, constantes e aleatórias das propriedades, características do regime turbulento, requerem a aplicação de um modelo de turbulência. No presente estudo, optou-se pelo modelo k- ε , amplamente utilizado, como aponta o conteúdo do estado da arte, para modelos de condição de contorno e geometrias semelhantes às da recuperadora de minério. O modelo de turbulência k- ε se baseia no conceito de viscosidade turbulenta (μ_t), definida pela Eq. (10):

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \overline{U}}{\partial y} \tag{10}$$

Onde τ_{ij} representa o tensor de tensão específico de Reynolds;

Portanto, as equações de transporte para as quantidades turbulentas são dadas pelas Eq. (11) e Eq. (12).

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$
(11)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1s} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3s} G_b) - C_{2s} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_s$$
(12)

Onde S_k e S_s são contribuições escalares que alteram o gradiente e G_k , G_b , Y_M , C_{1s} , C_{2s} , C_{3s} , σ_k e σ_{ε} são coeficientes ajustáveis.

Há diversos métodos para modelar pressão e velocidade em CFD. O método aqui escolhido foi o semi-implícito para equações de pressão (SIMPLE). No SIMPLE é utilizado a equação de momento discretizada para acoplar pressão e velocidade, de forma a se obter uma boa taxa de convergência, baseando-se em processos iterativos. O processo iterativo é iniciado impondo um campo de pressão para produzir componentes de velocidade em x, y e z, de forma que o modelo os corrige em cada direção do eixo cartesiano e, então, promove um novo incremento de pressão até que o cálculo atinja a convergência (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.2 Equacionamento matemático para análise de estabilidade estrutural (FEM)

O principal objetivo do estudo da mecânica dos materiais é possibilitar a análise e projeto de diversas estruturas, sujeitas a diferentes tipos de carregamento (BEER; JOHNSTON, 1992). A análise de estabilidade de uma estrutura parte de um princípio básico: a força (F), bem definida pela segunda lei de Newton (Eq. 13).

$$F = m.a \tag{13}$$

Onde *m* é a massa [kg]; e *a* é a aceleração $[m/s^2]$.

Assim, a estabilidade de uma estrutura segue a premissa de que todos os esforços atuantes sobre ela estão em equilíbrio, mantendo-a na forma e posição de projeto ou levando à sua movimentação dentro dos limites definidos pelos projetistas. Para que uma estrutura seja arrastada ou tombe, os esforços que tendem a derrubála devem superar os esforços contrários, que a mantém em repouso. Para os equipamentos de mineração de grande porte que operam em portos, consideram-se estáveis aquelas estruturas que, quando apoiadas sobre os pontos determinados em projeto, exerçam sua função sem deslocamentos desnecessários e/ou excessivos, que podem fazer com que sua posição no espaço seja modificada. Dessa maneira, o papel dos apoios para a estabilidade dos equipamentos é de grande importância e, portanto, é necessário conhecer o número de apoios disponíveis e a localização de cada um deles.

Normalmente, os esforços atuantes sobre o equipamento de mineração são: a força peso devida à massa da estrutura, que é elevada devido ao emprego de aço em sua maior parte; a força peso devida à carga de minério pelotizado transportada pela recuperadora; a pressão do vento, que, por ser em ambiente portuário, costuma ser mais agressiva; entre outras menos relevantes. Mesmo com outros esforços atuando sobre a recuperadora, seu próprio peso sobre os apoios dificilmente é superado.

A força aplicada em uma extremidade sempre tende a ser descarregada em um apoio, o que faz com que um momento seja gerado (Eq. 14).

$$M = F.l \tag{14}$$

Onde *M* é o momento; e *l* é a distância entre o ponto onde a força é aplicada e o apoio, também chamada de braço de alavanca [m]. O momento provocado pela força aplicada sobre a estrutura gera uma força de reação, assim como definido pela terceira lei de Newton (Lei da ação e reação). Contudo, a força de reação gerada não será necessariamente igual à força aplicada, devido ao impacto do braço de alavanca. Nessa situação, o desequilíbrio dos esforços pode provocar deslocamentos e até levar à ruptura do material, dependendo da condição de apoio e do material utilizado.

As forças de ação e reação podem ser de compressão ou de tração. A força de tração atua perpendicularmente (ou normal) à superfície do material e tende a esticar suas fibras. Já a força de compressão, apesar de também atuar perpendicularmente à superfície do material, tende a comprimir suas fibras. Tais esforços estão relacionados ao aparecimento de trincas e ao deslocamento em dada direção no espaço. É importante ressaltar que, ao considerarmos uma estrutura tridimensional, os esforços podem comprimir ou tracionar nos eixos x, y e z.

O método dos elementos finitos (FEM) é uma ferramenta numérica poderosa para resolver equações diferenciais parciais (SILVA, 2009), tendo sido desenvolvido

por e para engenheiros. A ideia de se utilizar modelagem numérica para solução de problemas de análise de tensão iniciou-se por volta de 1906, porém somente em 1941 apareceram trabalhos que buscavam solução para problemas contínuos (LANDRE JÚNIOR, 2012). O termo "Elementos Finitos" foi introduzido pela primeira vez no trabalho de Clough, em 1960, e, com o avanço do desenvolvimento computacional nas últimas décadas do século XX, o FEM se tornou amplamente difundido e aplicado. Suas primeiras aplicações foram no ramo das engenharias aeronáutica e civil, mas hoje o FEM apresenta inúmeras aplicações em diversas áreas da ciência, em especial no dimensionamento de estruturas.

A ideia básica do FEM é realizar a modelagem numérica segundo uma divisão do domínio contínuo de integração de um sistema em diversos elementos menores, chamados elementos finitos. Tal divisão transforma um domínio contínuo em um discreto. O conjunto desses elementos finitos é chamado de malha e as interseções formadas entre eles são chamadas de nós. Silva (2009) defende que o grande diferencial do FEM é não buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, algo impossível para problemas complexos, mas sim buscar as soluções para cada elemento separadamente.

Há dois tipos de análise estrutural estática: linear e não linear, sendo que as não linearidades podem incluir plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, hiperelasticidade, superfície de contato e fissuração. A análise linear estática é utilizada para determinar deslocamentos e tensões e para definir as reações de apoio de uma estrutura sob condição de carga estática. Em tal análise, as características do material, como elasticidade, número de Poisson, densidade e graus de liberdade, são constantes. Grau de liberdade é o parâmetro definido pelo número de coordenadas cinematicamente independentes necessárias para descrever completamente, localizando e orientando, o movimento espacial de toda partícula de um sistema, em qualquer instante de tempo (LANDRE JÚNIOR, 2013).

Se os resultados de tal análise demonstrarem que a estrutura ultrapassa o valor definido pela tensão do material e/ou o definido na flecha máxima, que é a deformação máxima resultante da flexão ocorrida perpendicularmente ao eixo da seção e paralelamente à força atuante (D'ALAMPERT; LIPPI, 2012), ela não suporta as cargas e virá ao colapso. É possível também, através da análise estática, verificar se a força de contato é vencida, ao observar se os esforços gerados pela pressão do vento levam a forças resultantes nos apoios que excedem a força peso. Caso isso ocorra, o sentido

48

de estabilidade das forças resultantes se inverte, ou seja, se eram de tração tornamse de compressão, e se eram de compressão tornam-se de tração.

3.3 Equacionamento matemático para Interação fluido-estrutura (FSI)

A interação fluido-estrutura (FSI) é o acoplamento entre leis de diferentes áreas da física aplicada, em especial as da fluidodinâmica e da mecânica estrutural. Este acoplamento leva em consideração o campo de pressão gerado em uma análise CFD e as consequências diretas deste carregamento na análise estrutural (MIRLISENNA, 2016). As primeiras simulações virtuais não desenvolviam esse tipo de acoplamento, devido à baixa capacidade de processamento dos computadores.

Contudo, o avanço tecnológico dos sistemas tornou possível a utilização de multiprocessadores, altas quantidades de memória e capacidades de armazenamento grandes o suficiente para realizar análises com muitos elementos, difundindo, assim, a aplicação da FSI e fazendo com que essa técnica se tornasse uma tendência global na engenharia de simulação (MYRLI; KHAWAJA, 2019).

A interação fluido-estrutura pode ser caracterizada pelo grau de acoplamento entre os campos de solução do fluido e da estrutura. Há o acoplamento físico e o numérico e ambos dialogam entre si, conforme exemplificação mostrada na Figura 1.



Figura 1 - Condições de acoplamento físico versus numérico em FSI.

Como pode ser visto na figura, existem três graus de acoplamento físico:

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

- Fraco: Acoplamento sólido-fluido independente;
- Forte: Acoplamento sólido-fluido com características parte dependentes, parte independentes;
- Muito forte: Acoplamento totalmente dependente.
 E dois graus de acoplamento numérico:
- Uma via: Os resultados gerados no software de CFD são exportados como condições de contorno para o software de FEM em uma única via. Exige menor esforço computacional e é utilizado em situações nas quais os carregamentos do CFD não causam deslocamentos;
- Duas vias: Os resultados gerados no software de CFD são exportados para o software de FEM; os resultados gerados nesse software, por sua vez, realimentam o modelo CFD em um sistema contínuo, modificando o posicionamento da geometria e do volume de controle e refazendo a malha. Dessa maneira, ocorre uma retroalimentação em mão dupla, que demanda, portanto, maior esforço computacional, devido ao processo iterativo até que a convergência seja alcançada.

O acoplamento de duas vias pode ser configurado de duas formas:

- Implícito, que pode ser:
 - Totalmente acoplado: as soluções do sólido e do fluído são calculadas em uma única matriz. O acoplamento é muito dependente, ou seja, muito forte;
 - Iterativo: as soluções são calculadas separadamente, com as iterações acontecendo dentro de um mesmo *time-step* (unidade de deslocamento do tempo dada uma certa quantidade de iterações em uma análise transiente). Nesse caso, a turbulência não é totalmente acoplada ao momentum no modelo CFD.
- Explícito: as soluções do sólido e do fluido são calculadas separadamente, porém, sem iterações dentro de um mesmo *time-step*. A solução do sólido é baseada no campo fluido do *time-step* anterior.

Assim, modelos FSI com acoplamento de duas vias explícito calculam o estado do volume de controle em um tempo posterior ao seu estado atual, enquanto modelos com acoplamento implícito encontram a solução resolvendo uma equação que envolve ambos estados, atual e posterior, simultaneamente. Dessa maneira, para se utilizar o acoplamento explicito, é necessário ter certeza que o acoplamento é fraco e/ou as escalas de tempo são pequenas o bastante para garantir a solução na primeira iteração acoplada. Já usando o acoplamento implícito, é certo de que não haverá solução na primeira iteração acoplada.

4 METODOLOGIA

Para se criar o modelo de interação fluido-estrutura, primeiramente modelouse o meio fluido (CFD) e, em seguida, o meio sólido estrutural (FEM), de forma que o campo de pressão obtido no modelo CFD foi exportado e aplicado no modelo estrutural, conforme fluxograma mostrado na Figura 2 e metodologia descrita nos subcapítulos a seguir.



Figura 2 - Fluxograma de um modelo FSI: da geometria aos resultados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O primeiro passo para a construção do modelo foi a geração das respectivas malhas, a partir de uma mesma geometria do objeto de estudo. Em seguida, iniciouse a simulação CFD e os resultados de velocidade e pressão distribuída na estrutura foram enviados para a simulação FEM, que proveu as reações de apoio, tensão e deformação; teve-se, então, o fim do primeiro *loop* (representado pelas setas em vermelho, na Figura 2). Diversos *loops* foram rodados, de forma que para cada um foi gerado um conjunto de resultados. Optou-se por fazer a análise FSI permanente, ou seja, sem variação do tempo, uma vez que toda a modelagem e metodologia foi desenvolvida do zero e seria necessário empregar mais tempo e configurações que demandariam mais tempo de desenvolvimento para uma análise transiente.

4.1 O objeto de estudo

Como ponto de partida para o desenvolvimento da metodologia de simulação da interação fluido-estrutura para equipamentos de alturas elevadas utilizados na mineração, uma recuperadora de minério da empresa Vale (Figura 3) serviu de base para a construção do modelo matemático.



Figura 3 - Recuperadora de minério base para o modelo desenvolvido.

Para as análises FSI aqui desenvolvidas, considerou-se a recuperadora em sua posição de trabalho, tal como mostrado na Figura 3, mas é importante lembrar que essa não é necessariamente a posição mais crítica. A simulação foi feita desta forma por ser uma posição de trabalho que oferece uma área da estrutura da recuperadora considerável para o bloqueio do vento. A metodologia criada, contudo, permitirá a análise da estabilidade para qualquer posicionamento, desde que a geometria de entrada para os modelos CFD e FEM corresponda à condição desejada e que a porção da estrutura com maior bloqueio de vento esteja voltada para ele.

A recuperadora, que hoje opera no porto de Ponta da Madeira, no estado do Maranhão, possui a tarefa de locomover-se até as pilhas de minério pelotizado, que podem chegar a 17 m de altura e 30 m de comprimento, posicionar-se em relação à pilha e, através de movimentos giratórios de uma roda com várias caçambas, carregar a esteira interna alocada na lança do equipamento. A esteira, por sua vez, leva o minério recuperado até a base da estrutura e o descarrega em uma outra esteira, entre os trilhos, que conduz o minério até os navios, onde ele é acomodado nos porões. Com dimensões de aproximadamente 35 m de altura, 36 m de largura e 81 m de comprimento e uma massa total aproximada de 1.400 toneladas, o equipamento foi dividido em nove partes distintas para construção do modelo, conforme mostrado na

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 4, onde cada parte está destacada em amarelo. É importante compreender quais partes são articuladas e como deve ser feita a simplificação de cada parte e de seus respectivos componentes, a fim de se garantir um modelo bem representado virtualmente.



Figura 4 - Partes da recuperadora de minério estudada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O equipamento possui 36 apoios sobre os trilhos, vistos na Figura 5, e todos eles foram também modelados, tanto na análise estrutural quanto na análise CFD, sendo de fundamental importância para análise da estabilidade da estrutura.

Figura 5 - Os 36 apoios da recuperadora de minério estudada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.2 Velocidades do vento

Foram definidos cinco valores de velocidade do vento para simulação: 2,5 m/s; 5 m/s; 10 m/s; 20 m/s e 42 m/s. Os dois primeiros valores correspondem a velocidades comuns no porto de Ponta da Madeira, conforme evidenciado pela rosa dos ventos de São Luís (Figura 6), e seu objetivo na simulação é gerar resultados que possibilitem uma futura correlação do modelo. A velocidade de 10 m/s é o valor máximo medido na região de janeiro de 2016 a setembro de 2017 (Figura 6). Os dois últimos valores de velocidade são os limites estabelecidos pela norma FEM 2.131/2.132 para operação da recuperadora e para sua permanência no pátio fora de serviço, respectivamente, e visam gerar resultados para comparação e verificação da adequabilidade da norma.



Figura 6 - Rosa dos ventos de São Luís (MA) de jan. de 2016 a set. de 2017.

Fonte: Rocha (2019).

A metodologia criada, no entanto, poderá ser aplicada para diversos valores de velocidade de vento, sendo essa uma variável de escolha do calculista.

4.3 O modelo computacional de fluidodinâmica (CFD)

Cada uma das nove partes da geometria da recuperadora de minério (enrolador de cabos e plataforma, cabine do operador, giro, lança, roda de caçambas, translação, transportador da lança, contra-lança e mastro e tirantes) foi importada no software de fluidodinâmica Ansys-Fluent® e passou por uma simplificação de geometria no seu

subpacote Fluent Meshing®, a fim de criar a primeira malha superficial. Para uma simulação CFD tão complexa e robusta como a da recuperadora de minério, algumas simplificações devem ser feitas, uma vez que com o aumento de detalhes há também o aumento da malha e da capacidade de hardware necessária, restrição da execução de modelos com um nível de detalhamento maior. Assim, escadas, corrimões, cabos de aço e plataformas que oferecem pouca resistência ao vento foram desprezados por não afetarem o resultado final. Essa estratégia está de acordo com Janssen *et al.* (2017), que modelaram um navio porta-contêiner submetido ao vento em diferentes escalas de simplificação e provaram que geometrias simplificadas podem retornar resultados similares àqueles obtidos com uma malha de maior refinamento, requerendo, entretanto, menor esforço computacional.

Após simplificação da geometria de todas as partes da recuperadora, realizouse o procedimento chamado *wraping*. O *wraping* é um procedimento de interpolação de superfícies, através do qual cada superfície do modelo é colada a outra superfície, dependendo de sua proximidade. Ele é vinculado a uma estratégia definida pelos valores de elementos específicos, como ângulo de curvatura ou tamanho de elemento mínimo e máximo, além da distância entre as superfícies. Espessuras, furos, regiões de contato e parte interna dos componentes foram eliminados obedecendo ao critério de tamanho, o que resultou em um modelo em formato de casca mais leve para a execução dos próximos passos. Esta casca define a interface entre o ar e a estrutura.

A malha resultante da primeira simplificação geométrica e do *wraping* continha cerca de 18 milhões de elementos triangulares. Portanto, foram feitos mais cinco loops de simplificação, uma vez que uma malha superficial de 18 milhões de elementos superaria a capacidade computacional disponível. A malha superficial final, vista na Figura 7, sofreu simplificações nos perfis estruturais, nas regiões com muitas peças menores que 200 milímetros e no contato com os trilhos. Além disso, o refinamento de curvatura foi realizado somente onde era necessário para manter a geometria da recuperadora o mais fiel possível à geometria inicial. A malha superficial final possui 4,7 milhões de elementos, com elemento mínimo de 40 mm e máximo de 800 mm e um fator de crescimento igual a 1,2.



Figura 7 – Geometria final da recuperadora com todas as simplificações aplicadas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Posteriormente, as dimensões do volume de controle foram definidas de acordo com o *datasheet* do software Fluent (FLUENT, 2017), que determina as dimensões virtuais do túnel de vento com base nas proporções geométricas do instrumento de estudo, como pode ser visto na Figura 8.



Como o objeto de estudo vai ser posicionado com a face de maior área voltada para a entrada do túnel, sua seção para configuração do túnel é de altura (H) igual a 35 m e comprimento (W) igual a 81 m. Conforme Janssen *et al.* (2017), como serão utilizadas paredes de simetria no teto e nas laterais, é possível reduzir a largura e a altura do túnel em até 40% sem penalizar os resultados, mas sempre garantindo o fator de bloqueio inferior a 10% definido por Franke *et al.* (2010). As dimensões finais definidas para o túnel, portanto, foram de 120 m de altura, 220 m de comprimento e 450 m de profundidade.

A Figura 9 mostra a configuração das condições de contorno aplicadas no túnel virtual. A face frontal, pontilhada em laranja, foi configurada como entrada de velocidade; as paredes laterais e o teto foram configurados como planos de simetria; a face de saída, em vermelho, foi definida como pressão relativa igual a zero; e o piso foi dividido em duas partes: chão 1, com 100 m de comprimento e configurado como superfície de deslizamento; e chão 2, com 350 m de comprimento e configurado como superfície de não deslizamento, assim como o equipamento. O chão 1 foi configurado como superfície de deslizamento para favorecer o desenvolvimento do escoamento antes da formação da camada limite, ajudando, assim, na convergência do modelo (YONG; LINGYI, 2017).



Figura 9 – Condições de contorno das paredes do túnel de vento virtual.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O túnel de vento foi montado com a geometria da recuperadora de minério, garantindo o contato entre o piso do túnel com os 36 apoios do equipamento. Quando se refaz a malha considerando padrões de malha com uma maior dimensão, os elementos são reconstruídos sem perder sua forma pré-estabelecida, o que reduz drasticamente o número de elementos, deixando o modelo mais leve. Então, uma segunda malha superficial foi gerada, a partir de tratamento de malha com menor refinamento que a malha superficial feita com *wraping*, reduzindo-a para cerca de 1,8 milhões de elementos, mas mantendo a forma geométrica e qualidade necessária. Foi

feito um tratamento especial, focado nos elementos que apresentaram problemas, de forma que elementos perfurados ou duplicados foram removidos e as chamadas faces torcidas, elementos triangulares com ângulos muito agudos, foram corrigidas, para evitar a ocorrência de erros na geração da malha volumétrica. A nova malha superficial obtida possui elemento mínimo de 100 mm, máximo de 1.200 mm e taxa de crescimento de 1,3 vezes.

Após a criação da malha mais leve, a zona de fluido foi separada da malha de superfície criada e uma malha volumétrica foi gerada no domínio de controle definido. A malha volumétrica foi checada quanto à sua qualidade e a resultante foi transportada para o programa principal (Fluent) para definir as condições de contorno, as condições físicas e para o pré-processamento dos resultados. Os modelos físicos aplicados foram baseados em uma simulação em estado estacionário. O ar foi aplicado com densidade constante e viscosidade dinâmica, considerando a temperatura ambiente de 25 °C. Um resumo das configurações e condições de contorno numéricas é mostrado na Tabela 2.

Item	Unidade	Valor
Entrada (Inlet)	m/s	2,5 ; 5,0 ; 10,0 ; 20,0 ; 42,0
Saída (Outlet)	Ра	0,0
Densidade	kg/m³	1,184
Viscosidade dinâmica	kg/m.s	1,85E-05
Gravidade	m/s²	9,81
Temperatura	°C	25,0
Pressão de operação	Ра	101.325

Tabela 2 - Configurações e condições de contorno para simulação CFD.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O valor de temperatura foi assumido como 25 °C por ser um valor comumente encontrado dentro da faixa de variação de temperatura na região do porto Ponto da Madeira (23 °C a 31 °C), de acordo com monitoramento realizado ao longo do ano (VALE, 2017). Para definir o tipo de escoamento do ar como turbulento ou laminar, utilizou-se o número de Reynolds (Eq. 15), número adimensional usado em mecânica dos fluídos para classificação do regime de escoamento de determinado fluido dentro de um tubo ou sobre uma superfície, a partir do quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Em um túnel de vento, o

escoamento é considerado laminar quando Re < 2.100; e turbulento quando Re > 4.000 (ROTT, 1990).

$$Re = \frac{\rho V L_c}{\mu} \tag{15}$$

Onde ρ é a massa específica do fluído [kg/m³]; L_c é o comprimento característico do escoamento [m]; V é a velocidade de escoamento [m/s]; e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s]. Assim, considerando os valores estabelecidos como configuração do modelo e assumindo como comprimento característico o tamanho mínimo do elemento no eixo x (0,1 m), encontraram-se os valores apresentados na Tabela 3.

V [m/s]	ρ [kg/m³]	L [m]	µ [kg/m.s]	Re
2,5	1,184	0,1	1,85E-05	16.000
5	1,184	0,1	1,85E-05	32.000
10	1,184	0,1	1,85E-05	64.000
20	1,184	0,1	1,85E-05	128.000
42	1,184	0,1	1,85E-05	268.800

Tabela 3 - Número de Reynolds para as velocidades simuladas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Logo, o escoamento em todas as velocidades definidas será turbulento, uma vez que o valor de Re encontrado é maior que 4.000. Para este caso, o modelo de turbulência k-ε, utilizado pela grande maioria dos autores, como visto no capítulo de estado da arte, foi usado para modelar o fluxo de ar externo, enquanto o método SIMPLE foi usado para determinar o acoplamento entre pressão e velocidade, como feito em diversos trabalhos recentes, como Fintelman *et al.* (2015), Zhu e Zhigang (2015) e Han e Han (2011).

Como o escoamento de ar se choca com a recuperadora, por uma distância considerável, espera-se encontrar turbulência na região atrás do equipamento. Prenunciando essa ocorrência, dois refinamentos de caixa, um menor e outro maior, com refinamentos altos e médios, foram realizados (Figura 10) para analisar o fenômeno da recirculação de ar.



Figura 10 - Configuração dos refinamentos aplicados no túnel de vento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Testes de malha volumétrica foram realizados com malha tetraédrica e poliédrica. A diferença entre elas é que a malha poliédrica apresenta menor contagem de células e maior número de faces de cada elemento, o que acomoda melhor a geometria e propicia um melhor contato entre as células (FLUENT, 2017). No entanto, seu processamento exige, normalmente, maior capacidade de hardware e, nos testes realizados, mostrou maior custo temporal de cada iteração. A malha tetraédrica, tipo de malha volumétrica em formato piramidal, por outro lado, demanda menor esforço computacional, processando mais rapidamente o método iterativo e convergindo com taxa de decaimento de resíduos, conforme observado no estado da arte. Dessa maneira, a malha volumétrica tetraédrica foi escolhida para a simulação.

A fim de melhorar os resultados obtidos perto da parede, é necessário verificar a Lei das Paredes, definida por von Kármán (1930), que determina a velocidade média de um escoamento turbulento em uma região fluida próxima à parede. Para tanto, utilizou-se como critério de avaliação o valor do parâmetro adimensional y+ (Eq. 16) (SCHLICHTING; GERSTEIN, 2000).

$$y + = \frac{\Delta y * Ut}{v} \tag{16}$$

Onde Δy é a distância da parede [m]; Ut é a velocidade de atrito [m/s]; e ν é a viscosidade cinemática [m²/s]. Para garantir uma boa convergência, o valor de y+ deve ser mantido entre 30 e 300, quando se utiliza o modelo de turbulência k- ε , aplica funções de parede e trabalha em região logarítmica turbulenta (FLUENT, 2017;

SCHLICHTING; GERSTEIN, 2000). Considerando um y+ em torno de 40, o valor mínimo de Δy estimado é de aproximadamente 15 mm, conforme apresentado na Tabela 4. Cinco camadas prismáticas foram criadas na recuperadora de minério, com um crescimento escalonado de 1,8 vezes para conformar a malha do túnel com a malha do prisma.

Ut [m/s]	y+	v [m²/s]	∆y [m]	∆y [mm]
2,5	40	0,01562	0,250	250
5	40	0,01562	0,125	125
10	40	0,01562	0,062	62
20	40	0,01562	0,031	31
42	40	0,01562	0,015	15

Tabela 4 - Valores mínimos de altura da primeira camada prismática para cada velocidade simulada.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Um teste de malha grosseira, média e refinada foi feito para o modelo proposto. A Tabela 5 mostra as configurações de malha.

Tabela J - Falametros de maina.					
Tipo de malha	Tamanho de malha (mm)	Caixa de refinamento alto (mm)	Caixa de refinamento médio (mm)	Refinamento do túnel (mm)	Nº. de elementos volumétricos
Grosseira	1.200 (max)	2.400 (max)	5.000 (max)	10.000 (max)	5 milhões
Média	600 (max)	1.800 (max)	4.000 (max)	8.000 (max)	12 milhões
Refinada	300 (max)	900 (max)	1.500 (max)	4.000 (max)	38 milhões

Tabola 5 - Parâmotros do malha

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O teste de malha consistiu em executar os três modelos com diferentes malhas até que os resíduos e alguns pontos de monitoramento (identificados na Figura 11) se estabilizassem. Foram escolhidos pontos de monitoramento em diferentes regiões do túnel de vento e alguns próximos da recuperadora, em regiões onde se espera um aumento de velocidade e/ou de pressão e, em alguns casos, o surgimento de recirculação de ar na zona de turbulência. Os valores de pressão exercida nas faces da recuperadora são os resultados mais importantes desta análise, visto que eles são a condição de entrada da simulação FSI. Logo, o foco do estudo foi a pressão e não a velocidade.



Figura 11 - Pontos de monitoramento de convergência no teste de malha (direção do vento representada pelas setas azuis).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A malha tetraédrica média foi adotada por oferecer um melhor tempo por iteração que a refinada, uma vez que o número de elementos torna o processo de iteração substancial, além de apresentar boa convergência, com um valor flutuando em cerca de 4% para pressão e velocidade monitoradas, enquanto a malha refinada apresentou cerca de 2,5% de flutuação. Assim, a malha volumétrica final, que pode ser observada na Figura 12 apresentou 16,2 milhões de elementos, uma vez que foram adicionadas as cinco camadas prismáticas na recuperadora e também no chão 2.

Figura 12 - Malha volumétrica tetraédrica final com os volumes de refinamento aplicados. Corte no plano yz no centro da recuperadora.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os mesmos pontos de monitoramento em torno da recuperadora e em diferentes partes do túnel de vento utilizados para definição dos parâmetros de malha volumétrica (Figura 11) foram utilizados para monitorar a pressão e a velocidade durante as iterações e averiguar a convergência da simulação. Resíduos entre 10⁻³ e 10⁻⁵ foram garantidos. Como outros autores obtiveram convergência entre 2.000 e 5.000 iterações (FINTELMAN *et al.*, 2015; PEREN *et al.*, 2015) e nos testes de malha a convergência foi observada por volta de 5.000 iterações, esperou-se que os modelos estivessem totalmente convergidos também com 5.000 iterações.

4.4 O modelo estrutural de elementos finitos (FEM)

Assim como é observado nas malhas dos modelos CFD, a qualidade da malha nos modelos de FEM pode interferir no resultado da simulação. No modelo FEM uma malha de baixa qualidade, ou com elementos ruins em pontos de interesse, pode gerar resultados de concentração de tensões ou deformação equivocados. Optou-se por trabalhar com uma malha não-estruturada, uma vez que este tipo de malha define melhor a geometria. Além disso, para a geração da malha 3D da recuperadora de minério, foi utilizada uma malha tetraédrica.

A malha foi carregada no Mechanical® e as condições de contorno e de material foram impostas. Para esta análise, foram consideradas como forças atuantes

a pressão do vento distribuída nos perfis estruturais e o peso próprio da recuperadora. É possível considerar também os esforços advindos do trabalho da máquina, como o peso do minério em sua esteira, entretanto, eles não foram levados em conta nesta simulação. A recuperada é 85% composta por aço, no entanto, a fim de simplificar o desenvolvimento e a configuração do modelo, considerou-se que o equipamento é 100% composto por aço ASTM A36, próprio para aplicação em componentes estruturais (módulo de elasticidade igual a 210 GPa e Poisson igual a 0,3) (BEER; JOHNSTON, 1992).

Para a análise estrutural de estabilidade da recuperadora pode-se utilizar sua malha estruturada, que compreende os perfis metálicos e é sua representação fiel; ou pode-se utilizar a parte sólida do modelo desenvolvido em CFD, que compreende a estrutura da recuperadora, porém com as partes ocas e interposição de chapas removidas, o que faz com que seu volume seja consideravelmente maior. Observando novamente o foco do trabalho, que é a estabilidade estrutural, para o momento, a malha volumétrica lado sólido advinda do modelo CFD basta. No entanto, uma vez que o volume da malha é maior que o volume real da recuperadora e visando manter sua massa real (já que ela definirá o peso do equipamento e, consequentemente, os esforços gerados por ele), alterou-se o valor da densidade do material.

Como a densidade de um corpo pode variar mas a sua massa específica não e as partes ocas formadas pelo encontro das estruturas foram removidas e era necessário uma equivalência de peso com o peso real. Assim, como o volume da malha gerada foi de aproximadamente 1.320 m³, a densidade do aço foi considerada igual a 1.060 kg/m³ para que a massa da recuperadora correspondesse à sua massa real (1.400 toneladas).

Em seguida, definiu-se o ponto de contato e equilíbrio da recuperadora de minérios com o solo. O equipamento apoia-se em trilhos para locomover-se e exercer seu trabalho de coleta em campo, como visto na Figura 13. Há três grandes jogos de roletes (nos retângulos pontilhados em azul) e duas rodas mais à frente e toda esta área de contato serve de apoio para estrutura, totalizando 36 pontos de apoio.



Figura 13 - Regiões de contato simbolizadas por triângulos e retângulos pontilhados em azul.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nos pontos de apoio também foram definidos os graus de liberdade, que foram considerados como suporte fixo totalmente travados, impedindo o deslocamento em qualquer direção. Com isso, buscou-se identificar a reação de apoio resultante das cargas aplicadas. Cada apoio, nomeado conforme esquema da Figura 14, foi modelado em separado, para que os resultados fossem analisados um por um.



Figura 14 - Esquema representativo da nomenclatura dos pés da recuperadora.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Considerou-se que a estrutura perdeu sua estabilidade quando, ao se analisar a reação de apoio no eixo onde a gravidade atua, observou-se, em algum dos 36 pontos de apoio, que a carga de vento na estrutura provocou uma reação de apoio contrária (Figura 15c) àquela existente quando somente o peso próprio atua sobre ela (Figura 15b), indicando a existência de alguma força no sentido contrário, que tende a deslocar o equipamento.





Assim, o modelo estrutural da recuperadora de minério foi construído (Figura 16) e a análise estrutural linear foi desenvolvida, a partir da determinação de todas as condições de contorno, aplicação do peso próprio e fornecimento da pressão advinda do modelo CFD, com a coordenada e a pressão em cada elemento da camada superficial da malha da estrutura.



Figura 16 - Modelo estrutural da recuperadora de minério gerado no software Ansys Mechanical.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Uma vez que a malha estrutural é muito menor e a solução no campo estrutural é mais simples e envolve equações menos complexas, como foi observado por Han *et al.* (2011), esperou-se que a convergência fosse atingida mais rapidamente no modelo estrutural que no modelo CFD.

4.5 O modelo de interação fluido-estrutura (FSI)

A interação fluido-estrutura depende de programas de CFD e de FEM capazes de interagir entre si em tempo real, para que a exportação dos resultados de um modelo e importação no outro seja automática, garantindo praticidade e viabilidade operacional ao processo. O software Ansys[®] fornece um código que possui pacotes estruturais e de fluidodinâmica computacional. Para este trabalho, foram escolhidos o Fluent[®] e o Mechanical APDL[®], ambos dentro da plataforma chamada Workbench, que agrega todo o conteúdo e, através de um diagrama simplificado de blocos, realiza as funções programadas de contato, definição de condições de contorno, monitoramento do método iterativo e pós-processamento da forma desejada. Uma montagem básica de um modelo FSI é mostrada na Figura 17. As linhas interligam as unidades de interesse e, dependendo da ligação feita, podem retroalimentar os sistemas.



O campo de pressões gerado quando o modelo CFD converge pode ser simbolizado por valores no centroide de cada elemento da superfície de malha, ilustrado nos resultados de pressão da Figura 18. Cada elemento superficial tem uma posição no espaço e um valor de pressão.



Figura 18 - Malha tetraédrica com foco na roda de caçambas indicando a pressão em cada elemento de malha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Esse conjunto de valores e suas respectivas coordenadas no espaço foram exportados, como um mapa que define cada elemento e sua respectiva pressão, nos eixos x, y e z. O mapa exportado é reconhecido pelo programa estrutural e ocorre uma interpolação entre o posicionamento de cada ponto de pressão no espaço com o

posicionamento de cada elemento superficial da malha estrutural sólida. Então, o mapeamento de pressão é utilizado como condição de contorno ponto a ponto para o modelo FEM, como visto na Figura 19. O modelo FEM foi utilizado para os cálculos de deformação, deslocamento e tensão gerados.

Figura 19 - Pontos de interpolação identificados na recuperadora de minério para mapeamento da pressão.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O problema da estabilidade foi modelado para determinar o ponto inicial a partir do qual os apoios começam a perder estabilidade, logo, o modelo FSI gerado foi de uma via, iniciando com o CFD e rodando o FEM com os resultados obtidos no primeiro. O resultado total foi obtido em uma rodada de acoplamento para cada velocidade simulada. O mesmo modelo foi utilizado para todas as velocidades simuladas, que foram inseridas como condições de contorno, e as reações de apoio foram tiradas como resultado. O diagrama de blocos final que define o modelo FSI desenvolvido no software Ansys está apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama de blocos do modelo FSI: blocos que representam o modelo CFD e FEM acoplados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.6 O hardware utilizado

A escolha da configuração de malha, do modelo que representa a turbulência, do volume de controle e dos valores máximos e mínimos de tamanho de elemento podem, caso escolhidos de forma inadequada, extrapolar a quantidade de memória disponível, o que torna o processamento instável e pode causar travamentos ou fechamento do software de maneira indesejada. Dessa maneira, toda a modelagem da recuperadora foi feita e aprimorada de acordo com as capacidades de hardware disponíveis.

O hardware utilizado foi um desktop DELL com processador Intel Xeon E3-1270 v6 com oito cores e 32 gb de memória. A parte de fluidodinâmica computacional foi configurada para rodar com todos os cores de processamento e toda a memória disponível, dividindo o domínio em oito e alocando oito licenças ao mesmo tempo para solucionar o problema. O tempo gasto para garantir a convergência foi de aproximadamente 23 hs, para cada velocidade. Já a análise estrutural estática foi feita em duas partes. A primeira foi a de mapeamento e inserção da pressão nas superfícies do modelo mediante comando. A segunda parte foi a solução do campo estrutural utilizando dois cores do processador e toda a memória disponível. O tempo gasto para realizar os dois processos foi de 80 minutos para cada velocidade rodada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análises numéricas de interação fluido-estrutura foram conduzidas para uma recuperadora de minério submetida a vento constante nas velocidades de 2,5 m/s, 5,0 m/s, 10 m/s, 20 m/s e 42 m/s. O equipamento foi modelado em CFD e FEM, na posição de trabalho, e, dada a configuração de direção do fluxo de ar no túnel de vento, expôs um grande número de faces diretamente ao vento. As faces, por sua vez, geraram uma pressão de bloqueio para a qual analisou-se a reação de apoio, com foco na estabilidade do equipamento.

No modelo CFD, os resíduos estabilizaram entre 10⁻³ e 10⁻⁵ após 3.000 iterações para a velocidade de 42 m/s e 5.000 iterações para as demais velocidades. O valor médio de y+ encontrado foi aproximadamente 100, conforme faixa esperada.

5.1 Análise de estabilidade da estrutura sem carga de vento

Para compreender a variação das reações de apoio quando há pressão de vento, foi feita, primeiramente, uma análise estrutural estática da recuperadora sem a interferência de vento. Os resultados de reação de apoio são apresentados pelo software em forma de flecha, que representa o vetor resultante e, ao mesmo tempo, os resultados em cada eixo (x, y e z), representados por cores diferentes, conforme exemplificado na Figura 21, que mostra o resultado da reação de apoio em um dos pés da recuperadora, cuja identificação foi apresentada na Figura 14, no capítulo 3.



Figura 21 - Reação de apoio resultante no pé PD23_P.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Conforme metodologia, somente a reação de apoio correspondente ao eixo y, componente vetorial de reação de apoio no eixo do peso próprio da estrutura, foi analisada para averiguar a estabilidade.

Os resultados de reação de apoio sem haver vento aplicado sobre a recuperadora de minério foram compilados na Tabela 6, cuja coluna RA1 compreende os resultados de reação de apoio encontrados. Nota-se que dois apoios (PE1 e PE2) estão sob condição de tração, apresentando valores negativos. Provavelmente, estes pés tendem a trabalhar com compressão quando a recuperadora caminha nos trilhos. Estes apoios poderiam mascarar alguma variação nos apoios que fornecem equilíbrio à recuperadora na condição estudada, logo, eles foram liberados como apoios e uma nova simulação estrutural estática foi feita. Os novos resultados encontrados estão apresentados na coluna RA2 da Tabela 6.

Apoio	RA1 [N]	RA2 [N]
PE1	-9278	0
PE2	-17086	0
PE3	318530	304390
PE4	423840	421320
PE5	710450	704250
PE6	963030	960180
PE7	576500	574730
PE8	791270	787050
PE9	294590	293830
PE10	294590	382580
PE11	215650	220890
PE12	184640	220890
PE13_P	364760	365070
PD1	75622	72886
PD2	75622	64612
PD3	258590	257090
PD4	221230	223390
PD5	682380	680440
PD6	565630	568500
PD7	773190	770400
PD8	666080	667470
PD9	364250	362660
PD10	288690	289560
PD11	145690	146080
PD12	100830	102960
PD13	100830	424480
PD14	100830	243460
PD15	940830	943120
PD16	705110	702720
PD17	732940	735780
PD18	483930	481210
PD19	277500	279420
PD20	100930	98609
PD21	308440	311190
PD22	237020	236780
PD23_P	382910	383170

Tabela 6 - Reações de apoio sem carga de vento (RA1: Reações de apoio sem alívio de tração; RA2: Reações de apoio com alívio de tração).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2 Análise do escoamento

Uma vez finalizado o processo iterativo, tendo sido confirmada sua convergência, os resultados de pressão e velocidade foram obtidos. A Figura 22 traz

como exemplo os resultados encontrados para a velocidade de entrada igual a 42 m/s, mas os fenômenos nela observados foram comuns, apenas em intensidades diferentes, para todas as velocidades simuladas.

Figura 22 - Pressão e velocidade na recuperadora submetida a vento de 42 m/s: (a) ponto máximo de pressão; (b) pontos máximos de velocidade. Pressão Estática (Pa)



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Como esperado, o fluido acelerado tocou a estrutura da recuperadora de minério, gerando um campo de pressões a partir da interação do escoamento do fluido com a superfície heterogênea da recuperadora. O gradiente de pressão gerado se concentrou nas faces que geraram bloqueio do escoamento. Como o escoamento sempre flui pelo caminho mais fácil, ou seja, com menor gradiente de pressão, o fluxo de ar foi desviado para as laterais e pelas aberturas e vincos entre os perfis e treliças da estrutura da recuperadora. Nestes pontos de fuga, houve aumento de velocidade, como observado na metade inferior da Figura 22, que traz um corte de velocidade no plano referente à altura da recuperadora. Na região onde o fluxo encontra a superfície

da recuperadora foram observadas velocidades próximas de zero e altas pressões. Atrás da recuperadora, por sua vez, observaram-se pontos onde houve bloqueio total do fluxo e pontos onde o fluxo conseguiu passar; essa diferenciação gera recirculação de ar que se propaga por um longo trecho, até que o escoamento é novamente homogeneizado e provoca pressão e velocidade constantes na seção retangular do túnel. Observaram-se também regiões com pressão nula e regiões com gradiente de pressão intercaladas nos tirantes do equipamento. Esta ocorrência se deve tanto ao bloqueio do vento que a área das juntas dos tirantes, por serem mais largas, promove, quanto à turbulência gerada na região mais alta da recuperadora, ao redor do mastro. Nas seções entre as juntas, o escoamento consegue passar sem muita interferência e sem perder muita energia, justificando as pressões aproximadamente iguais a zero.

A Tabela 7 traz uma síntese dos resultados de pressão e velocidade máximas encontradas para cada velocidade de entrada no volume de controle.

	Velocidade de entrada [m/s]	Velocidade máxima encontrada [m/s]	Pressão máxima encontrada [Pa]
-	2,5	3,2	12
	5,0	6,5	28
	10,0	13,5	125
	20,0	26,0	380
_	42,0	56,0	1.400

Tabela 7 - Resultados de velocidade e pressão máximas encontrados para as velocidades de vento simuladas.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nota-se que a velocidade máxima encontrada ao redor da recuperadora se mostrou, em média, 30% maior que a velocidade configurada na entrada do volume de controle. A velocidade máxima foi encontrada ao redor da roda de caçambas, como apontado na Figura 22b. A pressão máxima, por sua vez, foi localizada em uma das faces da cabine do operador (Figura 22a). À medida que a velocidade de entrada aumentou, a pressão máxima encontrada cresceu cerca de 3,5 vezes.

5.3 Análise de estabilidade para as velocidades de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10 m/s

As velocidades de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10 m/s são comumente encontradas na região do porto Ponto da Madeira, conforme a rosa dos ventos de São Luís (Figura 6). Para esses três casos de velocidade, foi observado que a pressão gerada pelo vento não ultrapassa o valor de 100 Pa e que as variações de velocidade encontradas são

bem menores, atingindo o valor máximo de 14 m/s quando a velocidade de entrada é de 10 m/s. As Figuras 23, 24 e 25 apresentam os resultados de pressão para cada uma das três velocidades, enquanto as Figuras 26, 27 e 28 trazem os resultados de velocidade em vários planos de corte do túnel de vento.





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 24 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 5,0 m/s.



Figura 25 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 10,0 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).
Figura 26 - Velocidade para vento de 2,5 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 28 - Velocidade para vento de 10,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nesta faixa de velocidades de vento, para velocidades até 10 m/s, há pouca energia cinética envolvida, a turbulência gerada é menor e a recirculação tende a decair, uma vez que não são levados por longas distâncias por uma esteira de alta velocidade, fato notável nos cortes (d) das Figuras 26, 27 e 28. Nota-se também uma região com aumento de velocidade abaixo da lança e entre a lança e os tirantes, o que é explicado pela fuga do fluxo para regiões de menor pressão. Observa-se ainda que, ao ganhar mais energia com o aumento de velocidade, o perfil de velocidades se altera e a tendência é que as zonas de recirculação de ar sejam arrastadas, ficando cada vez mais paralelos ao escoamento, como visto nos cortes.

A pressão média encontrada nas faces que oferecem bloqueio para o ar para a velocidade de entrada de 2,5 m/s foi de aproximadamente 6,0 Pa. Para a velocidade de 5,0 m/s, a pressão média já aumentou para 19,5 Pa e para a velocidade de 10 m/s a pressão média chegou a 72,0 Pa.

A análise estática estrutural foi realizada e o compilado de resultados encontrase na Tabela 8.

	Reação de apoio [N]			
Apoio	Velocidade do vento [m/s]			
	0,0	2,5	5,0	10,0
PE1	0	0	0	0
PE2	0	0	0	0
PE3	304390	237050	227750	225180
PE4	421320	319400	317860	316830
PE5	704250	535970	530710	528080
PE6	960180	725170	724760	721980
PE7	574730	435440	433700	431830
PE8	787050	597320	592680	588110
PE9	293830	222460	221780	221040
PE10	382580	291400	287580	284360
PE11	220890	160740	168760	170610
PE12	220890	138430	141960	141200
PE13_P	365070	275290	275480	275200
PD1	72886	52447	56525	60025
PD2	64612	39001	52726	58675
PD3	257090	198840	192380	191250
PD4	223390	164350	169950	171770
PD5	680440	519300	511660	511570
PD6	568500	422830	431070	434610
PD7	770400	581370	582070	586210
PD8	667470	492300	508060	515750
PD9	362660	274760	273610	275110
PD10	289560	212370	220800	224500
PD11	146080	118150	107010	102520
PD12	102960	80447	76161	73218
PD13	424480	314280	322550	325610
PD14	243460	184280	183150	182720
PD15	943120	705440	713420	715370
PD16	702720	533160	528280	525780
PD17	735780	549700	556800	558310
PD18	481210	368030	360560	357220
PD19	279420	206040	212720	214620
PD20	98609	77297	73103	71597
PD21	311190	236790	233790	231560
PD22	236780	187230	174870	169260
PD23_P	383170	288980	289130	289100

Tabela 8 - Reações de apoio para ventos de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10 m/s.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Nota-se o leve efeito que o aumento da velocidade do vento exerce nas condições de apoio da recuperadora que, como esperado, reduz a reação de compressão da força peso. Ao se comparar com a recuperadora sem nenhuma carga, é possível observar que alguns apoios possuem alteração considerável, o que pode ser explicado pela capacidade das forças de promover o equilíbrio quando há imposição de novas fontes de excitação. No entanto, como em nenhum apoio houve inversão no sentido da reação, nas análises de FSI feitas, como visto na Tabela 8, quando comparado os resultados de apoio sem vento e com os ventos até 10 m/s, constatou-se que, para as condições simuladas, as velocidades 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10,0 m/s parecem não apresentar risco de instabilidade dada as condições de contorno.

5.4 Análise de estabilidade para a velocidade de 20 m/s

Os resultados de pressão e perfil de velocidade encontrados para a velocidade de entrada de 20 m/s podem ser vistos na Figura 29 e na Figura 30, respectivamente. A pressão média encontrada nas faces que bloqueiam o fluxo de vento foi de 270 Pa, aproximadamente. Um importante ponto a se destacar na distribuição de pressões é o aumento do gradiente de pressão observado nas quinas das faces da recuperadora que possuem alguma inclinação. Este aumento pôde ser observado já na velocidade de 10 m/s e se tornou mais intenso agora na velocidade de 20 m/s, em especial na roda de caçambas, que é inclinada em relação ao eixo da lança.

Figura 29 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 20,0 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 30 - Velocidade para vento de 20,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O fluxo de ar com mais energia gera um gradiente maior de velocidade nas bordas da geometria. É possível notar que, em todas as regiões onde o escoamento encontra uma superfície, há um perfil de velocidades acelerado nas bordas (Figura 30), principalmente na roda de caçambas (b), na contra-lança (c) e no mastro (d).

Na Tabela 9, estão os valores de reação de apoio obtidos na simulação FSI do vento de entrada de 20 m/s. Os pontos que apresentaram maior redução de compressão foram PD11, com 41%, e PD12 com 38%. O apoio PD2 foi o que apresentou maior aumento, de 21%.

Reação de apoio [N]		
Αροίο	Velocidade do v	vento [m/s]
	0,0	20,0
PE1	0	0
PE2	0	0
PE3	304390	219900
PE4	421320	320390
PE5	704250	527290
PE6	960180	726570
PE7	574730	431950
PE8	787050	584470
PE9	293830	220880
PE10	382580	280110
PE11	220890	176740
PE12	220890	143110
PE13_P	365070	274440
PD1	72886	69608
PD2	64612	78177
PD3	257090	184670
PD4	223390	177200
PD5	680440	504760
PD6	568500	443130
PD7	770400	592210
PD8	667470	536630
PD9	362660	276140
PD10	289560	235240
PD11	146080	86282
PD12	102960	64174
PD13	424480	332400
PD14	243460	179740
PD15	943120	715530
PD16	702720	512520
PD17	735780	559260
PD18	481210	342900
PD19	279420	221990
PD20	98609	67270
PD21	311190	246530
PD22	236780	150880
PD23_P	383170	288240

Tabela 9 - Reações de apoio para vento de entrada de 20 m/s.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

De acordo com a norma FEM 2.131/2.132, atualmente utilizada como referência para determinação do critério de parada da recuperadora de minério, o vento máximo de serviço sob o qual a máquina pode operar é de 20 m/s. Contudo, os resultados de FSI para essa velocidade de vento e para as condições simuladas aparentam não oferecer risco de instabilidade da recuperadora, posicionada em condição de trabalho e modelada em túnel de vento, já que nenhum dos apoios teve o sentido da reação invertido na análise feita. Como os valores de reação de apoio encontrados para essa velocidade possuem boa probabilidade de não oferecerem problema, considerando somente a recuperadora, a possibilidade de alteração valor de velocidade de parada poderá ser estudada.

5.5 Análise de estabilidade para a velocidade de 42 m/s

Assim como nas outras velocidades simuladas, o resultado de pressão estática a 42 m/s, definida pela norma FEM 2.131/2.132 como velocidade fora de serviço, evidenciou um gradiente de pressão com valores mais elevados nas regiões onde há maior bloqueio de ar (Figura 31), ou seja, nos encaixes das vigas e nos perfis fechados. O valor médio de pressão estática encontrado nas faces voltadas para o escoamento foi de 1.050 Pa.

Figura 31 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 42,0 m/s.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A Figura 32 apresenta os cortes de velocidade para a velocidade simulada. Observa-se em todos os cortes a geração de zonas de recirculação de ar, que se desprendem a partir das faces que bloqueiam o ar. No cenário em questão, há a formação de um gradiente de velocidades e de uma região onde ar está parado, logo atrás da estrutura que gera o bloqueio. As zonas de recirculação de ar são, então, conduzidas paralelamente ao fluxo de ar e possuem característica própria, dependendo da região da recuperadora na qual foram criados. A partir de certa distância, todos eles tendem a se dissipar, homogeneizando ao fluxo que, neste ponto, apresenta velocidade constante.

Figura 32 - Velocidade para vento de 42,0 m/s em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os resultados de reação de apoio podem ser vistos na Tabela 10. Há de se notar que os pontos PD11 e PD12 foram os que apresentaram maior redução do esforço de compressão (78% e 63%, respectivamente). O apoio PD2, assim como na velocidade de 20 m/s, foi o que apresentou maior aumento, chegando a 217%, seguido pelo apoio PD1 com 98% de aumento.

	Reação de apoio [N]			
Apoio	Velocidade do ve	nto [m/s]		
	0,0	42,0		
PE1	0	0		
PE2	0	0		
PE3	304390	254950		
PE4	421320	428930		
PE5	704250	674110		
PE6	960180	959230		
PE7	574730	558140		
PE8	787050	735560		
PE9	293830	286550		
PE10	382580	338960		
PE11	220890	265270		
PE12	220890	192810		
PE13_P	365070	357640		
PD1	72886	144170		
PD2	64612	205000		
PD3	257090	213850		
PD4	223390	264140		
PD5	680440	641180		
PD6	568500	636230		
PD7	770400	825050		
PD8	667470	826170		
PD9	362660	375800		
PD10	289560	370110		
PD11	146080	31843		
PD12	102960	38175		
PD13	424480	485080		
PD14	243460	229650		
PD15	943120	967640		
PD16	702720	627740		
PD17	735780	757100		
PD18	481210	391720		
PD19	279420	322900		
PD20	98609	60682		
PD21	311190	251210		
PD22	236780	98979		
PD23_P	383170	374360		

Tabela 10 - Reações de apoio para vento de entrada de 42 m/s.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A norma FEM 2.131/2.132 define a velocidade de vento de 42,0 m/s como condição máxima fora de serviço, na qual devem ser tomadas certas precauções, como conduzir a máquina ao local de estacionamento, posicionada com a lança recolhida e devidamente ancorada. Na análise FSI desenvolvida, considerou-se a recuperadora em sua posição de trabalho e, ainda assim, os resultados obtidos para

as condições simuladas não indicaram risco de instabilidade, sendo que em nenhum apoio o sentido da reação se inverteu. Portanto, assim como para a velocidade de 20 m/s, baseado nos resultados encontrados e considerando apenas a recuperadora de minério avaliada, há a possibilidade de se estudar um aumento da velocidade máxima de vento também para a condição fora de serviço.

Apesar de aparentar baixo risco com problemas de estabilidade na velocidade de 42 m/s simulada, os apoios PD11 e PD12, com reações de apoio de 31.843 N e 38.175 N, respectivamente, serão os primeiros apoios a oferecerem risco de instabilidade, caso a velocidade do vento aumente ainda mais. Os apoios PD20 e PD22 também apresentaram valores reduzidos de reação de apoio. Assim, a fim de se estimar em qual velocidade de vento a recuperadora de minério oferecerá instabilidade, mais uma análise FSI foi feita. Para determinar a velocidade testada, estimou-se, a partir de uma regressão linear entre o ponto de mínimo, a velocidade de 20 m/s e a de 42 m/s, em qual velocidade o sentido da reação se inverteria para cada um dos quatro apoios mais críticos, conforme representado na Figura 33.





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Percebe-se que a menor velocidade que poderia provocar inversão no sentido da reação em algum dos apoios é 53 m/s (ou 190,8 km/h), no apoio PD11. Portanto, foi escolhida como última velocidade para simulação 200 km/h, a fim de verificar a instabilidade da recuperadora de minério.

5.6 Análise de conferência de instabilidade para ventos de 200 km/h

90

Ventos em velocidades tão extremas são bastante incomuns, mas há registros de tempestades cujos ventos atingiram 200 km/h, como o ciclone tropical Fani, que atingiu a costa do estado de Odisha, no leste da Índia, em maio de 2019 (TERRA, 2019). Assim, o modelo FSI desenvolvido foi configurado com uma velocidade de entrada de 200 km/h e os resultados de pressão obtidos estão apresentados na Figura 34, enquanto os resultados de velocidade são mostrados na Figura 35. A pressão média encontrada nas faces voltadas para o escoamento foi de 1850 Pa.

Figura 34 - Distribuição de pressão estática na recuperadora de minério com um vento de entrada de 200 km/h.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 35 - Velocidade para vento de 200 km/h em quatro planos de corte: (a) nos pés da recuperadora; (b) na roda de caçambas; (c) na contra-lança; (d) e no meio da recuperadora.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A Tabela 11 apresenta os resultados de reação de apoio do modelo estrutural estático. Como esperado, o apoio PD11 foi o primeiro a demonstrar instabilidade, com um resultado encontrado de -24.100 N. Ao comparar os resultados de 200 km/h com as reações de apoio da recuperadora sem vento, o ponto PD11 sofreu 116% de redução de reação de apoio, seguido pelo PD12, com 98% de redução. Os apoios que mostraram aumento, por sua vez, assim como nas demais velocidades rodadas, foram os pontos PD1 e PD2, com 153% e 322% de aumento, respectivamente. Esses resultados revelam uma tendência de alguns apoios trabalharem com um maior nível de compressão que os outros, mediante esforços externos. Assim, através do posicionamento daqueles que experimentam aumento na reação de apoio, é possível compreender a tendência do movimento da recuperadora, que tende a se equilibrar nos apoios traseiros, no sentido onde a maior massa está sendo projetada.

Reação de apoio [N]			
Apoio	Velocidade do vento [km/h]		
-	0,0	200	
PE1	0	0	
PE2	0	0	
PE3	304390	247370	
PE4	421320	447010	
PE5	704250	678430	
PE6	960180	978010	
PE7	574730	560470	
PE8	787050	724210	
PE9	293830	287380	
PE10	382580	323920	
PE11	220890	279170	
PE12	220890	190790	
PE13_P	365070	358130	
PD1	72886	184130	
PD2	64612	272660	
PD3	257090	196620	
PD4	223390	279410	
PD5	680440	627710	
PD6	568500	662420	
PD7	770400	858130	
PD8	667470	898240	
PD9	362660	385930	
PD10	289560	406030	
PD11	146080	-24100	
PD12	102960	1860	
PD13	424480	505560	
PD14	243460	219600	
PD15	943120	958690	
PD16	702720	578610	
PD17	735780	749600	
PD18	481210	340530	
PD19	279420	336610	
PD20	98609	43107	
PD21	311190	215900	
PD22	236780	29968	
PD23 P	383170	376180	

Tabela 11 - Reações de apoio para vento de entrada de 200 km/h.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O apoio PD11 localiza-se na fileira do lado direito com maior número de apoios, sendo o primeiro apoio após a lança, conforme destacado na Figura 36a. A fim de se melhorar a estimativa da velocidade a partir da qual a recuperadora se torna instável, uma nova regressão linear foi feita para o ponto PD11, agora também considerando o resultado de reação de apoio da análise de 200 km/h (Figura 36b).





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Dessa maneira, percebe-se que para velocidades de vento a partir de 50 m/s, começa-se a observar a instabilidade da recuperadora. O apoio PD11 perderá contato e outros apoios o seguirão, causando sobrecarga em alguns apoios e podendo levar até à sua quebra, uma vez que a força peso estará concentrada. Nesta situação, há possibilidade de a recuperadora tender ao arraste e/ou tombamento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

O trabalho elaborado foi motivado pela necessidade de compreender os efeitos do impacto do vento em equipamentos de altura elevada atuantes em portos. Para isso, um modelo de interação fluido-estrutura de uma via foi desenvolvido para uma recuperadora de minério, de forma que os resultados de campo de pressões encontrados em um modelo CFD serviram como condição de contorno para análise FEM, que forneceu como resultados as reações de apoio sobre o equipamento, tornando possível avaliar sua estabilidade.

O modelo CFD, baseado na geometria real de uma recuperadora de minérios da empresa Vale, foi carregado em um túnel de vento computacional. Um teste de malha com diferentes tamanhos de malhas foi realizado e a malha média foi escolhida para executar os testes, uma vez que os resultados dos resíduos para as simulações realizadas e os pontos monitorados apresentaram boa convergência. O modelo FEM estrutural estático foi desenvolvido utilizando a parte sólida advinda do modelo CFD. Para que o peso da recuperadora fosse igual ao seu peso real, foi necessário realizar um ajuste na densidade do material, uma vez que a geometria simplificada não contava com as superfícies de contato e os interstícios dos perfis estruturais que compõem a recuperadora.

Para todas as velocidades simuladas, observou-se que a velocidade ao redor da recuperadora foi cerca de 30% maior que a velocidade de entrada, em alguns pontos vazados e em regiões laterais da estrutura, onde o vento escapa. Como esperado, a turbulência gerada provocou perturbação por trás da recuperadora, com um grande perfil de velocidades. Com o aumento da velocidade do vento de entrada, houve modificação nos perfis turbulentos encontrados, aumentando o arraste e ficando mais perpendiculares ao fluxo. Já o perfil de pressão estática encontrado na área frontal apontada para o fluxo de ar, região de estagnação do escoamento, variou de cerca de 6,0 Pa, para velocidade de 2,5 m/s, a 1.050 Pa, para uma velocidade de 42,0 m/s.

A partir da análise dos resultados, concluiu-se que os ventos de 2,5 m/s, 5,0 m/s e 10m/s, comumente observados ao longo do ano no porto onde a recuperadora de minério atua, parecem não oferecer risco de instabilidade ao equipamento, uma vez que não há alteração de orientação nas reações de apoio no sentido do peso

próprio. Para as velocidades de 20 m/s e 42 m/s, valores previstos na norma FEM 2.131/2.132 como velocidade máxima de vento sobre o equipamento em serviço e fora de serviço, respectivamente, há um salto considerável em relação à pressão exercida pelo vento, quando comparado às primeiras análises, porém ainda aparenta não oferecer risco de instabilidade e existe a possibilidade de alterar a margem para reavaliação do critério de parada da máquina, considerando somente a recuperadora e as condições aqui simuladas como critério. Apesar de parecer não instáveis, os apoios PD11 e PD12 já demonstram redução elevada de força de compressão, o que indica que, em uma maior velocidade, serão as primeiras fontes de instabilidade.

Por este motivo, realizou-se mais uma análise FSI, cuja velocidade de entrada foi 200 km/h, valor no qual se estimou, a partir dos resultados das demais simulações realizadas, que começaria a ocorrer instabilidade da recuperadora. Conforme observado, o apoio PD11 apresentou inversão de sentido na reação de apoio, demonstrando uma provável instabilidade. Para a mesma condição de vento, os apoios PD1 e PD2 aumentaram o esforço de compressão em 153% e 322%, indicando uma projeção da massa da recuperadora para trás e com tendência para o lado direito.

É necessária a correlação do modelo simulado com resultados experimentais de campo para aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos no presente trabalho são importantes por contribuírem para o conhecimento acerca dos efeitos causados por cargas de vento sobre equipamentos portuários de alturas elevadas, além de fornecer uma metodologia para simulações virtuais de diferentes maquinários. No entanto, visando refinar os resultados obtidos, bem como aumentar o escopo do trabalho, seguem algumas recomendações para estudos futuros.

Um dos grandes desafios da simulação é garantir que o modelo construído corresponda, com um grau elevado de confiabilidade, àquilo que acontece em campo e, para isso, é fundamental que o modelo seja correlacionado a resultados experimentais, para que ele seja validado. Assim, é importante que os resultados de pressão, velocidade do vento, tensão e deformação sejam monitorados em campo, a fim de se obter os dados experimentais para correlação com o modelo. A alocação dos sensores deve ser feita de forma adequada, visando tanto uma economia

financeira, quanto a correta obtenção dos resultados. Levando isso em consideração, uma proposta de instrumentação da recuperadora de minério foi desenvolvida e se encontra no Apêndice A. Com os valores experimentais em mãos, é possível estabelecer uma margem de erro, além de validar os resultados encontrados na simulação FSI. Logo, com a confiança de que o modelo virtual está calibrado para a condição experimentada, é possível simular outras condições, com garantia de um alto nível de qualidade dos resultados.

Além disso, julga-se também necessário evoluir do túnel de vento para uma condição modelada do volume de controle virtual, como apresentado na Figura 37, que envolve as pilhas de minério e os trilhos sobre os quais a recuperadora se apoia, uma vez que, naturalmente, nessa condição o equipamento está mais elevado e, portanto, o vento chega na recuperadora com uma velocidade maior que no túnel de vento, devido ao efeito de concentração de fluxo pelas pilhas de minério. A expectativa é de que os resultados encontrados se aproximem ainda mais dos resultados advindos da experimentação material.



Figura 37 – Proposta de simulação com modelagem do ambiente da recuperadora com trilhos e pilhas de minério.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Ainda, destaca-se também a possibilidade de se realizar um estudo variando as condições do vento, como inclinação, direção e até a forma como se aplica, podendo ser por rajadas variadas em uma simulação transiente em FSI de duas vias, na qual há retroalimentação do modelo CFD com os deslocamentos do modelo estrutural e a simulação de FSI dinâmica, aonde a estrutura está se movimentando e recebe uma carga de vento.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Jonatha Wallace da Silva. **Análise numérica de seção de compressão de demonstrador de tecnologia scramjet**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

ASRESS, Mulugeta Biadgo; SVORCAN, Jelena. Numerical investigation on the aerodynamic characteristics of high-speed train under turbulent crosswind. **Journal of Modern Transportation**, v. 22, n. 4, p. 225-234, dez. 2014.

BAK, Sera; YOO, Jaehoon; SONG, Chang Yong. Fluid-structure interaction analysis of deformation of sail of 30-foot yacht. **International Journal Of Naval Architeture And Ocean Engineering**, v. 5, p. 263-276, 2013.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Vol. 1, 2^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON, Elwood Russell. **Resistência dos materiais**. 3ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1992.

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.

BLOCKEN, Bert. Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v. 91, p. 219–245, set. 2015.

BLOCKEN, Bert; TORPALAR, Yasin. A following car influences cyclist drag: CFD simulations and wind tunnel measurements. **Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 145, p.178–186, out. 2015.

BRAUN, Alexandre Luis; AWRUCH, Armando. Finite element simulation of the wind action over bridge sectional models: Application to the Guamá River Bridge (Pará State, Brazil). **Finite Elements in Analysis and Design**, v. 44, p. 105-122, jan. 2008.

ÇENGEL, Yunus; CIMBALA, John. **Mecânica dos fluidos:** Fundamentos e aplicações. 3 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill Education, 2015.

CIRELLO, Antonino. *et al.* Fluid–structure interaction of downwind sails: a new computational method. **Journal of Marine Science and** Technology, v. 24, n. 1, p. 86-97, mar. 2019.

CLOUGH, Ray William. **The finite element method in plane stress analysis**. *In*: 2nd CONFERENCE ON ELETRONIC COMPUTATION, 1960, Pittsburg. Proceedings ASCE, [*S. I.*], [*S. n.*], p. 345-378.

D'ALAMPERT, Flávio; LIPPI, Ivan. **Tabelas de Vãos e Cargas**. 3 ed. São Paulo: Gerdau, 2012.

DRATH, Rainer; HORCH, Alexander. Industry 4.0: Hit or hype? Industrial Electronics Magazine, v. 8, n. 2, p. 56–58, 2014.

FEDERAÇÃO EUROPEIA DE MANUTENÇÃO. **FEM Section II, 2.131/2.132**: Rules for the Design of Mobile Equipment for Continuous Handling of Bulk Materials. Paris, FEM: 1997.

FINTELMAN, Danique. *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, set. 2015.

FLUENT. **Datasheet and Help**. Version 19, mar. 2017. [Disponível em computadores com o software instalado].

FRANKE, Jörg. *et al.* **The Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment**: an outcome of COST 732. Trabalho aprensentado no The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Carolina do Norte, mai. 2010.

HAN, Dae-Suk. *et al.* Coupling analysis of finite element and finite volume method for the design and construction of FPSO crane. **Automation in Construction**, v. 20, n.4, p. 368–379, jul. 2011.

HAN, Dong-Seop; HAN, Geun-Jo. The difference in the uplift force at each support point of a container crane between FSI analysis and a wind tunnel test. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 25, p. 301-308, fev. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório anual de atividades**. Brasília, DF: IBRAM, 2018.

JANSSEN, Wendy. *et al.* CFD simulations of wind loads on a container ship: Validation and impact of geometrical simplifications. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 166, p. 106-116, 2017.

KIM, Gwi-Nam. *et al.* Structure stability evaluation of offshore heave compensator using multi-body dynamics analysis method. **Journal of Vibroengineering**, v. 17, n. 8, p. 4134-4141, dez. 2015.

KIM, Hyun. *et al.* FSI Analysis and Fatigue Analysis of BOP Gantry Crane. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 7, p. 347-358, jan. 2015.

LANDRE JÚNIOR, Jánes. **Dinâmica de estruturas**. Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2013.

LANDRE JÚNIOR, Jánes. Introdução aos Elementos Finitos. Pontifícia Universidade Católica, Belo Horizonte, 2012. 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.

MILNE-THOMSON, Louis Melville. **Theoretical Aerodynamics**. [S. *l*.]: Courier Corporation, 1973.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos elementos finitos: o que é?** *In*: MIRLISENNA, Giuseppe. ESSS Tecnologia de Simulação Estrutural. [*S. I.*], 22 jan. 2016. Disponível em: https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-quee/. Acesso em: 13 mai. 2018.

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.

MYRLI, Odd Einar; KHAWAJA, Hassan. Fluid-Structure Interaction (FSI) Modelling of Aquaculture Net Cage. **The International Journal of Multiphysics**, v. 13, n. 1, p. 97-111, 2019.

NAKAYAMA, Yasuki. Introduction to fluid mechanics. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2018.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1028 p.

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.

NTINAS, Georgios. *et al.* Evaluation of CFD turbulence models for simulating external airflow around varied building roof with wind tunnel experiment. **Building Simulation**, v. 11, n. 1, p. 115-123, fev. 2018.

PADEWSKA, Agnieszka; SZCZEPANIAK, Piotr; WAWRZYNEK, Andrzej. Analysis of fluid-structure interaction of a torus subjected to wind loads. **Computer Assisted Methods in Engineering and Science**, v. 21, n. 2, p. 151-167, jan. 2017.

PARK, Hyoungsu. *et al.* Numerical modeling of non-breaking, impulsive breaking, and broken wave interaction with elevated coastal structures: Laboratory validation and inter-model comparisons. **Ocean Engineering**, v. 158, jun. 2018.

PEREIRA, Adriano; SIMONETTO, Eugênio de Oliveira. Indústria 4.0: Conceitos e Perspectivas Para o Brasil. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, p. 1-9, 1º sem. 2018.

PERÉN, Jorge. *et al*. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**, v. 85, p. 263-276, fev. 2015.

ROBLES, Léo Tadeu; MERIGUETI, Brunela de Alcântara; CUTRIM, Sergio Sampaio. Eficiência Global da Operação Portuária: estudo de caso do Píer I do Porto de Tubarão em Vitória-ES. **Revista Organizações em Contexto**, São Bernardo do Campo, ano 8, n. 16, p. 195-221, 2º sem. 2012.

ROCCHI, Daniele. *et al.* A numerical–experimental methodology for simulating the aerodynamic forces acting on a moving vehicle passing through the wake of a bridge tower under crosswind. **Journal ofWindEngineering and IndustrialAerodynamics**, v. 104, p. 256–265, mai-jul. 2012.

ROCHA, Bernardo. **Cátedra Vale-PUC**: Questionamento sobre velocidades de vento simuladas. Destinatário: Moisés de Paula Gouvea. [*S. I.*], 16 jul. 2019. 1 mensagem eletrônica.

ROTT, N[?]. **Note on the history of the Reynolds number**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 22, p. 1–11, 1990.

SARKAR, Mayukh; SHAW, Rakesh; GHOSH, Subrata. Numerical analysis of stresses in mine excavator bucket. **Journal of Mining Science**, v. 51, n. 2, p. 309-313, mar. 2015.

SCHILICHTING, Hermann; GERSTEN, Klaus. **Boundary-Layer Theory**. 8 ed. Berlim: Springer-Verlag, 2000.

SCHWAB, Klaus Martin. **A Quarta Revolução Industrial**. Tradução Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2019.

SECCHI, Argimiro. **Modelagem e Simulação de Processos**. Florianópolis: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

SHETA, Essan; HUTTSELL, Lawrence. Characteristics of F/A-18 vertical tail buffeting. **Journal of Fluids and Structures**, v. 17, p. 461-477, mar. 2003.

SILVA, Samuel da. Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Foz do Iguaçu: 2009. Disponível em: http://www.inf.unioeste.br/~rogerio/Analise-Estruturas1.pdf. Acesso em: 13 mar. 2014.

TERRA. Ciclone Fani atinge costa leste da Índia com ventos de até 200 km/h. 3 mai. 2019. [S. I.], 2019. Disponível em: https://www.terra.com.br/noticias/ciclone-fani-atinge-costa-leste-da-india-com-ventos-de-ate-200-kmh,29af9582ca7235aea3e8046a663114abginng6na.html. Acesso em: 28 jun. 2019.

TOMINAGA, Yoshihide. *et al.* Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. **Building and Environment**, v. 84, p. 204–213, jan. 2015.

TSUBOKURA, Makoto. *et al.* Large eddy simulation on the unsteady aerodynamic response of a road vehicle in transient crosswinds. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 31, p. 1075-1086, dez. 2010.

VALE. Regulamento do terminal marítimo de Ponta da Madeira. São Luís: VALE, [2017?].

VERSTEEG, Henk; MALALASEKERA, Weertunge. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics:** The Finite Volume Method. 2 ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.

von KÁRMÁN, Theodor. **Mechanical Similitude and Turbulence**. Technical Memorandus NACA, n. 611, Washington, mar. 1931.

WOLFRAM, Stephen. A new kind of science. Champaign: Wolfram Media, 2002.

YONG, Wang; LINGYI, Lv. One-way Fluid-structure Interaction Analysis of Transmission Tower Under Tornado Loading. **Special Structures**, n. 2, p. 4, 2017.

YU, Xianfeng. *et al.* Interference effects on wind pressure distribution between two highrise buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 142, p. 188–197, jul. 2015.

ZANG, Yue. *et al.* **Hybrid RANS/LES method for FSI simulations of tall buildings**. 2012. Trabalho apresentado no The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM12), Seoul, ago. 2012.

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.

ZOU, Ying; ZHAO, Xingwang; CHEN, Qingyan. Comparison of STAR-CCM+ and ANSYS Fluent for simulating indoor airflows. **Building Simulation**, v. 11, n.1, p. 165–174, fev. 2018.

APÊNDICE A – Proposta de Instrumentação

Para garantir a qualidade dos resultados obtidos na simulação FSI realizada, o modelo deve ser correlacionado a resultados experimentais. Dessa maneira, criou-se uma proposta para a instrumentação da recuperadora de minério, que deve ser monitorada quanto à velocidade, temperatura e pressão exercida pelo vento. Os sensores sugeridos para isso estão relacionados na Tabela 12 e nas Figuras 38 a 45.

SENSOR	TIPO	POSIÇÃO	REFERÊNCIA
SENSOR 1	ANEMÔMETRO	Instalação na parte externa da cabine fixada no teto	Teto da cabine
SENSOR 2	ANEMÔMETRO	Instalação na roda de caçamba, parte mais externa	Mais à direita da roda de caçambas
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 6	ANEMÔMETRO	Instalação na ponta da estrutura da base, mais externa possível, próximo ao conjunto de cabos de aco	Quina a esquerda da recuperadora
SENSOR 7	ANEMÔMETRO	Instalação no conjunto do enrolador de cabos, parte contrária a lança	Parte mais à esquerda da recuperadora
SENSOR 8	ANEMÔMETRO	Instalação no chão a 50 metros à frente da recuperadora	Entre os trilhos
SENSOR 9	ANEMÔMETRO	Instalação abaixo da lança posicionamento aproximado no meio da lança	Lado direito da recuperadora
SENSOR 10	ANEMÔMETRO	Instalação no chão a 50 metros a trás da recuperadora	Entre os trilhos
SENSOR 11	ANEMÔMETRO	Instalação no chão lado inverso da lança	Lado esquerdo da recuperadora
SENSOR 12	ANEMÔMETRO	Instalação no patamar entre o enrolador de cabos e a torre	Próximo a caixa do motor
SENSOR 13	TERMOPAR	Instalação próximo ao sensor 8	Entre os trilhos
SENSOR 14	TERMOPAR	Instalação próximo ao sensor 4	Encontro da lança com o centro de giro
SENSOR 15	EXTENSÔMETRO	Instalação na estrutura da lança, perfil que chega na base.	Região frontal da recuperadora, lado roda de caçamba
SENSOR 16	EXTENSÔMETRO	Instalação na estrutura da contra lança, estrutura que recebe a contra- lança, mais próximo da articulação	Região traseira da recuperadora, lado contrário à roda de caçambas fica presa
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

Tabela 12 - Posicionamento dos sensores para instrumentação.



Figura 38 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 39 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul. Posicionamento com zoom 1.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



Figura 40 - Pontos para instrumentação: anemômetros em preto, termopares em vermelho e extensômetros em azul. Posicionamento com zoom 2.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).





Fonte: Elaborado pelo autor (2019).



Figura 42 - Ponto para instrumentação: extensômetro 15 na base da lança, parte frontal.

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 43 - Ponto para instrumentação: extensômetro 16 na base da contralança, parte traseira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 44 - Ponto para instrumentação: extensômetros 17 e 18 nos balancins da recuperadora, lado lança.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 45 - Ponto para instrumentação: extensômetro 19 no balancim da recuperadora, lado contra lança.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para o anemômetro longitudinal 8 e o termopar 13 é sugerido o posicionamento de 50 m à frente da recuperadora, e para o anemômetro 10, 50 m atrás. Como o posicionamento das pilhas fica a cerca de 30 m do centro dos trilhos, local de apoio da recuperadora, o posicionamento dos anemômetros fixados ao solo nas laterais, 11 e 9, pode ser de aproximadamente 15 m em relação à base da recuperadora, ou no ponto médio entre o centro da recuperadora e o início da pilha de minério. Todos os

anemômetros e termopares devem ficar expostos ao fluxo de ar. Para os sensores 8, 13 e 10, que ficam posicionados entre ou nos trilhos, é necessário fornecer fixação adequada para que eles não fiquem escondidos abaixo dos 3,2 m de altura que os trilhos possuem. É sugerido, então, que os mesmos sejam fixados ou no centro dos transportadores de correias (Figura 46a) ou na estrutura metálica dos transportadores de correias, na sua parte lateral, com alguma haste (Figura 46b).

Figura 46 - Posicionamento dos sensores fora da recuperadora: (a) no meio da esteira; (b) preso a lateral da esteira nivelado com sua altura.



Fonte: Adaptado de Plamont Engenharia (2018)¹.

A medição da velocidade do vento deve ser feita, no mínimo, no período de 24 horas de experimentação e as aquisições para os anemômetros devem ser feitas a cada 10 segundos, totalizando 8.640 medições para cada anemômetro [m/s], todas no mesmo instante. O mapa de pontos deve ser entregue em formato de planilha e deve constar a hora da medição, com referência ao horário local; o acréscimo de tempo; o nome de cada sensor de velocidade bem definido; a direção do vento dado eixo x, y e z ou devidamente indicado conforme a rosa dos ventos; e posicionamento da recuperadora de minérios, assim como mostrado na Tabela 13. Justifica-se a aquisição de dados em 24 horas pela variação climática e de velocidade que pode ocorrer ao longo do dia e da noite. Com esta verificação, será possível compreender a parte do dia mais crítica em um dia normal de trabalho.

¹ PLAMONT ENGENHARIA. **Large mining machinery**. Disponível em:< http://www.plamont.com.br/en/largeminingmachinery/>. Acesso em agosto de 2018.

	SENSOR 1		
Horário local	Acréscimo de tempo	Velocidade	Direção
12:30	0	1.210	Ν
12:30:10	00:00:10	1.300	Ν
12:30:20	00:00:20	1.240	NE
12:30:30	00:00:30	1.270	NE
12:30:40	00:00:40	1.270	S
	Horário local 12:30 12:30:10 12:30:20 12:30:30 12:30:40 	SENSOR 1 Horário local Acréscimo de tempo 12:30 0 12:30:10 00:00:10 12:30:20 00:00:20 12:30:30 00:00:30 12:30:40 00:00:40	SENSOR 1 Horário local Acréscimo de tempo Velocidade 12:30 0 1.210 12:30:10 00:00:10 1.300 12:30:20 00:00:20 1.240 12:30:30 00:00:30 1.270 12:30:40 00:00:40 1.270

Tabela 13 - Exemplo dos itens que devem conter na planilha de resultados de cada sensor.

Para o monitoramento da temperatura ambiente, as medições devem ser feitas a cada 10 minutos, totalizando 144 medições para os dois sensores requisitados. As medições devem ser realizadas no mesmo instante e no mesmo intervalo de tempo, ou período de prova que estarão sendo mensurados os valores de pressão pelos anemômetros, para que seja garantido o mapeamento de velocidade e temperatura no mesmo intervalo de tempo. Os resultados experimentais de temperatura devem ser entregues em formato de planilha, as quais devem conter a hora da medição com referência ao horário local, o acréscimo de tempo e o nome de cada sensor de temperatura, de maneira análoga ao representado na Tabela 13. As informações referentes ao monitoramento de velocidade do vento e temperatura estão sumarizadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Resumo dos sensores.			
SENSOR	QUANTIDADE	FREQUÊNCIA DE MEDIÇÃO	TOTAL DE PONTOS REGISTRADOS
Anemômetros	12	A cada 10 s	8.640
Termopares	2	A cada 10 min	144
Extensômetros	5	A cada 0,5 s	172800

Para o monitoramento da tensão/deformação causada, as medições com os extensômetros devem ser feitas em uma frequência tal que a coleta não venha com ruído. Para a medição experimental de 24 horas, pede-se uma medição a cada 0,5 segundo, totalizando 172.800 medições.

Não há obrigação de se colocar os sensores exatamente na posição indicada, mas sua fixação deve ser feita o mais próximo possível do local indicado. Toda e qualquer modificação feita no posicionamento deve ser indicada e fotografada para que, posteriormente, seja feita a adequação pertinente no modelo virtual, de forma que ambos os sensores, virtuais e experimentais, mensurem os dados exatamente no mesmo local. Por fim, é importante que a recuperadora seja posicionada no pátio em região com menor concentração de pilhas de minério, visando evitar bloqueio do escoamento incidente na mesma. Além disso, deve-se buscar posicionar a lança de forma que fique perpendicular ao escoamento.