

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**GIOVANNI MANTOVANI**

**MELHORIA CONCEITUAL DE UMA COMPORTA VAGÃO  
UTILIZANDO TEORIAS E ABORDAGENS DA ENGENHARIA DE  
PROJETOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2021**

**GIOVANNI MANTOVANI**

**MELHORIA CONCEITUAL DE UMA COMPORTA VAGÃO UTILIZANDO TEORIAS  
E ABORDAGENS DA ENGENHARIA DE PROJETOS**

**Conceptual Improvement of a Fixed-Wheel Gate using Theory and Approaches  
of Engineering Design**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.  
Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **MELHORIA CONCEITUAL DE UMA COMPORTA VAGÃO UTILIZANDO TEORIAS E ABORDAGENS DA ENGENHARIA DE PROJETOS**

por

**GIOVANNI MANTOVANI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

**Prof. Dr. Rodrigo Villaca Santos**  
Orientador

**Prof. Me. Jose Roberto Okida**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Alexandre de Castro Alves**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**  
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho a minha família, por  
todo o apoio e as oportunidades que me  
foram concedidas.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente não há sentimento mais presente neste momento que a satisfação por completar mais este ciclo. Sou imensamente grato a cada pessoa que compartilhou deste caminho comigo e peço desculpas àquelas que não contemplaram neste momento de agradecimento.

Agradeço à minha família, ao meu sábio pai Valdecir Mantovani, minha atenciosa mãe Angela Maria Krubniki Mantovani e ao meu querido irmão William G. Mantovani. Sem a presença de vocês tenho a plena certeza que não teria dado o primeiro passo.

À minha namorada, Laíse Milena Barbosa, por sempre me trazer lucidez em momentos de dificuldade.

Aos meus amigos que conquistei, pelas xícaras de café e reflexões sobre questões da vida.

Aos amigos da UTFalcon Aerodesign.

Aos professores e mentores da UTFPR – Ponta Grossa.

Em suma, todos os que por algum motivo contribuíram para realização deste trabalho.

Não existe assunto tão antigo que não se  
possa dizer algo novo sobre ele.  
(DOITOIÉVSKY, Fiódor, 1871)

## RESUMO

MANTOVANI, G. Melhoria conceitual de uma Comporta Vagão utilizando Teoria e Abordagens da Engenharia de Projetos. 2021. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

Em média, 75% dos custos finais de produtos são comprometidos apenas na etapa de Projeto Conceitual mesmo em equipamentos puramente mecânicos utilizados em usinas hidrelétricas de pequena geração (PCH). Neste trabalho é proposto como objetivo a utilização de uma abordagem sistematizada, junto com ferramentas da Engenharia de Projeto, para a otimização de custos de um equipamento utilizados em PCHs, as Comportas Hidráulicas do tipo Vagão. Inicialmente foi realizada a decomposição de uma Comporta Real para o estudo de função, analisado seus custos de manufatura e sua performance estrutural simplificada. Com base nesse estudo, foi iniciada a etapa de Síntese Conceitual a partir da elaboração um Mapa de Função generalizada. Neste mapa, foram identificadas as subfunções principais assim como seus fluxos de energia, material e sinal. Em seguida, para cada subfunção, foi elaborada uma Matriz Morfológica na qual todos os Princípios de Solução foram ranqueados conforme ferramenta de Otimização de Síntese Direta (OSD). Assim, os princípios que obtiveram as melhores pontuações foram agrupados em duas Estruturas de Trabalho (ET) distintas. Na última fase do trabalho, para estas mesmas duas ETs sintetizadas, foram utilizados Modelos Computacionais com objetivo de dar assistência na tomada de decisão. Foram gerados inicialmente dois modelos CAD que trabalharam de forma iterativa com a Análise por Elementos Finitos até a identificação de pontos favoráveis ou não nas Estruturas de Trabalho anteriormente sintetizadas. Por fim, foi elaborado um último conceito mesclando as melhores características das ETs anteriores. Ao final do trabalho, foi possível estimar uma redução de 70,4% em custos de montagem e acabamento, redução de 49,5% em quantidade de solda e uma redução de massa aproximada de 21% respeitando limites de segurança da Comporta Inicial. Com isso foi possível concluir, a partir do estudo de caso, que o Projeto Conceitual de equipamentos mecânicos é diretamente relacionado com a boa sistematização e as boas práticas da Engenharia de Projetos durante seu desenvolvimento.

**Palavras-chave:** Engenharia de Projetos. Projeto Conceitual. Comporta Vagão.

## ABSTRACT

MANTOVANI, G. **Conceptual Improvement of a Fixed Wheel Gate using Theory and Approaches of Engineering Design**. 2021. 93 p. Final Paper (Bachelor's in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

On average, 75% of the final costs of products are defined only in the Concept Design phase even in pure mechanical equipment used in small hydraulic power plants (SGP). On this paper is proposed the use of systematic approach, close with Engineering Design tools, to optimizing costs of an equipment used in SGPs, the Fixed-Wheel Gates. Firstly, it was made a product decomposing of an Existing Gate to analyze its function, manufacturing costs and its simplified structural mechanical performance. Based on this first analysis, the Conceptual Synthesis phase began by building a generic Function Structure. In this first structure, it was identified the main subfunctions as well the flow of energy, materials, and signal. Afterword, for each subfunction, it was made one Morphological Matrix in which all Principles Solutions were ranked using the Direct Synthesis Optimization (DSO). Then, the principles that got the best rating were gather in two distinct Function Structures (FS). In the last phase of this paper, for those same FS, were used Computation Models to assist decision making. First, were designed two CAD models that work iteratively with the Finite Element Analysis until finding the points favorable or not in the Functions structures synthesized before. Lastly, it was built a final FS merging the best characteristic of the previous FS. In conclusion, it was possible to estimate a 70,4% decrease in assembling and finishing costs, 49,5% decrease in welding and 21% decrease in mass maintaining safety limits. Therefore, it was possible to conclude, by this study case, that the Conceptual Design of pure mechanical equipment is straight related to the good approach and Engineering Design tools used in the early phases in the product development.

**Keywords:** Engineering Design. Conceptual Design. Fixed-Wheel Gate.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Modelo <i>Total Design</i> .....	14
Figura 2: Caminhos do <i>Design Process</i> .....	18
Figura 3: Estrutura de Função Genérica .....	22
Figura 4: Exemplo de Princípios de Trabalho a partir de sub funções a serem cumpridas.....	22
Figura 5: Processo do Projeto Conceitual (não-linear).....	24
Figura 6: Estrutura da Matriz Morfológica. Sub funções nas linhas e princípios de solução nas colunas.....	25
Figura 7: Exemplo de Classificação conforme OSD.....	26
Figura 8: Componentes Principais de uma Comporta do tipo Vagão.....	30
Figura 9: Comportas Vagão com eixos das rodas bi apoiados. ....	31
Figura 10: Comportas Vagão com eixos das rodas em balanço .....	31
Figura 11: Organograma geral da Metodologia de Pesquisa .....	34
Figura 12: Comporta Vagão em operação .....	36
Figura 13: Vista seccionada do Sistema onde a Comporta Vagão está inserida. Equipamento em Posição de Trabalho.....	44
Figura 14: Massas totais por Subconjunto da Comporta.....	47
Figura 15: Porcentagem dos Custos de Matéria-Prima por Subconjunto em relação ao custo totais de Matéria-Prima.....	48
Figura 16: Porcentagem dos Custo de Mão-de-Obra por etapa de fabricação em relação ao custo total de Mão de Obra.....	49
Figura 17: Comporta Existente simplificada para Geometria de Superfícies sem a presença dos Conjuntos das Rodas e Apoios Laterais. ....	51
Figura 18: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises (a esquerda) e Região com Concentração de Tensão com a malha de elementos (a direita).....	52
Figura 19: Tensão equivalente de von-Mises (a esquerda) e deslocamento totais no sentido do escoamento (a direita) .....	53
Figura 20: Tensão equivalente de von-Mises das Vigas Horizontais “W” principais .	54
Figura 21: Tensão equivalente de von-Mises nos Enrijecedores Verticais.....	55
Figura 22: Distribuição de Tensão nos apoios das rodas (a esquerda) e tensões máximas identificadas nas aberturas para os eixos das rodas .....	56
Figura 23: Sistemas (a esquerda) e Funções Principais destes Sistemas (a direita)	59
Figura 24: Sistemas de Obstrução (retângulo em vermelho) e Sistema de Translado externo ao retângulo .....	61
Figura 25: Matriz 2.1 – Impedir que o escoamento atravessasse o sistema .....	65
Figura 26: Matriz 2.2 – Fornecer Rigidez contra Escoamento.....	66
Figura 27: Matriz 3.1 – Transmitir carregamento hidrostática para o eixo das rodas	67
Figura 28: Matriz 3.2 – Transmitir cargas dos eixos para as rodas .....	68
Figura 29: Matriz GS – Matriz Global Simplificada e as Estrutura de Trabalho 1 (conjunto de quadrados em vermelho) e 2 (conjunto de quadrados em verde) .....	70
Figura 30: Geometria da Estrutura de Trabalho 1. A esquerda está representada E1 em perspectiva e a direita as partes e dimensões principais. ....	73
Figura 31: Geometria da Estrutura de Trabalho 2. A esquerda está representada E2 em perspectiva e a direita as partes e dimensões principais. ....	74
Figura 32: Estrutura de Trabalho 1 (a esquerda) e Estrutura de Trabalho 2 (a direita) simplificadas para geometria de superfície. ....	76

Figura 33: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises com malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 42MPa (a direita) .....	78
Figura 34: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises com malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 18MPa (a direita) .....	78
Figura 35: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita) .....	79
Figura 36: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita) .....	80
Figura 37: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita) .....	81
Figura 38: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita) .....	81
Figura 39: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 30MPa (a direita) .....	82
Figura 40: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 9MPa (a direita) .....	83
Figura 41: Estrutura de Trabalho E3 e a descrição de suas partes principais.....	84
Figura 42: Tensão equivalente de von-Mises da Estrutura de Trabalho 3 (a esquerda) e da Comporta Original (a direita) .....	85

## LISTA DE TABELAS,

Tabela 1: Decomposição do Equipamento .....	45
Tabela 2: Inputs e Outputs das análises numéricas dos subconjuntos da Comporta Vagão Existente .....	56
Tabela 3: Lista de Requisitos da Comporta Conceitual com cada item classificado como Desejo (W) ou Demanda (D) .....	58
Tabela 4: Comparativo entre as Estruturas de Trabalho E0, E1 e E3 em termos de Geometria <i>CAD</i> . .....	75
Tabela 5: Comparativo de parâmetros de pré-processamento entre E0, E1 e E2. ..	77
Tabela 6: Resultado finais de Massa, quantidade de peças do tabuleiro e metros lineares de solda de E3. ....	87

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS**

### **LISTA DE SIGLAS**

OSD	Otimização de Síntese Direta
CGH	Central Geradora Hidráulica
PCH	Pequena Central Hidreletrica
MC	Modelos Computacionais
PS	Princípio de Solução
E	Estrutura de Trabalho
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
NT	Norma Técnica

### **LISTA DE ACRÔNIMOS**

CAE	Computer Aided Engineering
CAD	Computer Aided Design
MEF	Método dos Elementos Finitos
VOC	Voz do Cliente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	Projeto de produto MECânicos	17
2.1.1	Abrangência dos Estudos na Engenharia de Projetos	18
2.1.2	O Processo de Projeto Mecânico	19
2.2	o projeto conceitual	20
2.2.1	Estruturas de trabalho e função	20
2.2.2	O Processo	23
2.3	Modelos de Solução	24
2.3.1	Decomposição de produto e Análise de processo físico	24
2.3.2	Matrizes Morfológicas	25
2.3.3	Modelos Computacionais	26
2.4	comportas HIDRÁULICAS TIPO VAGÃO	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>33</b>
3.1	<i>product design clarification</i> – PDC	34
3.2	sintetização das estruturas de trabalho	36
3.3	AVALIAÇÃO dos conceitos	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>42</b>
4.1	Análise do sistema existente	42
4.1.1	Decomposição do Equipamento	42
4.1.2	Análise das características de Manufatura	46
4.1.3	Análise Estrutural Estática	49
4.2	Lista de requisitos de projeto (PDC)	57
4.3	Estrutura de função	58
4.4	Sintetização	62
4.4.1	Construção da Morfologia	62
4.4.2	Seleção das Estruturas de Trabalho	69
4.5	avaliação conceitual	71
4.5.1	Modelagem Computacional	72
4.5.2	Características dos Modelos Numéricos	75
4.5.3	Resultados Numéricos	77
4.6	estrutura de trabalho final	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>88</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	89
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A matriz de geração de energia elétrica mundial possui em torno de 76% de fontes de geração não-renováveis segundo dados da IEA de 2018. Comparado à oferta de energia brasileira, as fontes não-renováveis não ultrapassam 19% do total, ou seja, o Brasil é referência mundial em energias renováveis em sua matriz energética. Sabe-se ainda que apenas a geração hidrelétrica brasileira contempla 65,2% da matriz nacional sendo 81,17% das fontes renováveis. Dentre as usinas hidrelétricas em operação e os potenciais inventariados (capacidade de geração confirmada) estima-se que exista em torno de 246,24 GW (*GigaWatt*) de potencial hidrelétrico brasileiro. Entretanto, apenas 107,42 GW destes 246,24 GW encontram-se em operação desde o último balanço de dezembro de 2018 (EPE, 2018).

As usinas hidrelétricas são classificadas conforme sua capacidade plena de geração de energia. As Usinas Hidrelétricas de grande porte (UHE) caracterizam-se pela capacidade de geração acima de 30 MW. Por outro lado, usinas com capacidades inferiores são classificadas em Central Geradora Hidráulica (CGH) que opera igual ou abaixo de 1 MW e em Pequena Central Hidrelétrica (PCH) entre 1 a 30 MW sendo que entre os 107,42 GW de geração atual, apenas 5,8 GW são gerados por PCHs e CGH's. Entretanto, estas mesmas usinas de pequena geração, são distribuídos em 1872 projetos em todo o país contra apenas 192 projetos das UHEs. Assim sendo, há uma grande possibilidade de expansão no número de PCHs e CGHs no país. (EPE, 2018).

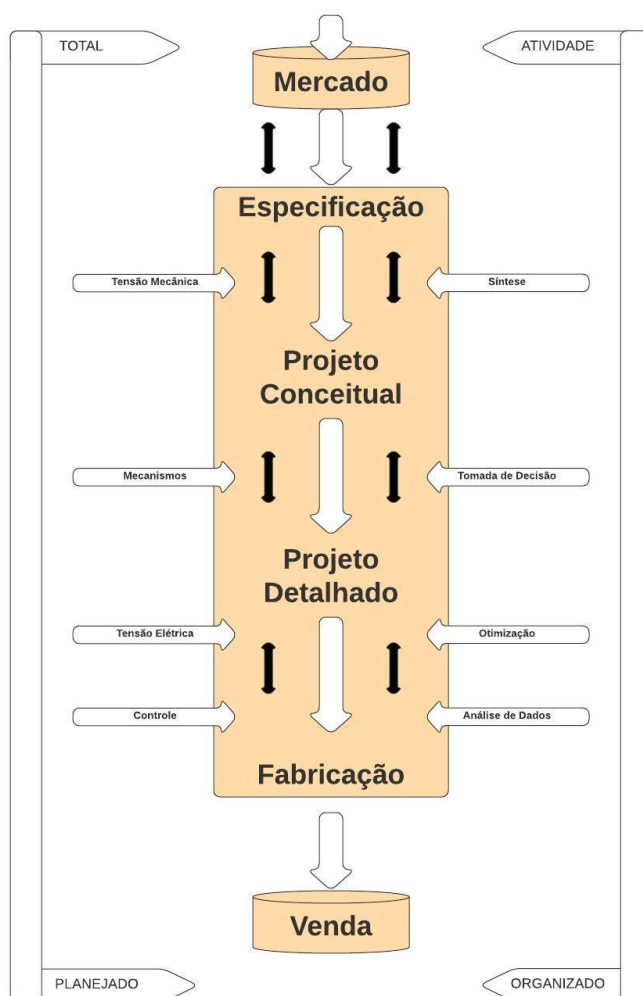
Em cada novo projeto de pequenas usinas hidrelétricas são necessários diversos equipamentos, chamados hidromecânicos, com o objetivo de atender a requisitos de operação, manutenção, segurança e da geração elétrica propriamente dita. Dentre esses componentes, temos as Comportas Hidráulicas Planas que podem ser utilizadas para atender necessidades diversas dentro do projeto de geração hidrelétrica e necessitam ser muito bem desenvolvidas principalmente pelo seu nível de responsabilidade técnica. (ERBISTI, 2014)

No desenvolvimento de qualquer produto, partindo da Voz do Cliente (VOC) até o seu primeiro modelo funcional, é necessário um longo processo iterativo conhecido como *Design* ou também traduzido literalmente como “ato de projetar” ou “desenvolver” (DICIO, 2020). Este processo objetiva a atender uma demanda específica (VOC) ou resolver algum problema através de plano estabelecido pelo

engenheiro projetista ou pela equipe de desenvolvedores. O resultado deste plano pode ter uma natureza física (como um produto físico, como uma Comporta Hidráulica) ou não (como o desenvolvimento de um novo *software*). (ULMANN, 2010)

O processo de *design* dentro da Engenharia Mecânica de Projetos foi descrito inicialmente por Stuart Pugh em “*Total Design*” e contempla desde a fase de pesquisa de mercado (*Market*) até a venda (*Sell*) como sendo um processo totalmente integrado em suas etapas como ilustrado no esquema da Figura 1. Dentro deste modelo de processo de desenvolvimento de produto, a seção intermediária entre *Market* e *Sell* é onde as ideias são elaboradas, avaliadas, testadas e refinadas estrategicamente até o produto final. São nessas etapas, especialmente no “*Concept Design*” onde o produto físico começa a adquirir forma a partir de sua função (PUGH, 1998).

**Figura 1: Modelo Total Design**



**Fonte: Pugh (1998) - Adaptado**

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Em casos específicos, o processo de projeto mecânico pode ser orientado por Normas Técnicas para garantir a confiabilidade de um equipamento. Como exemplo, tem-se a ABNT NBR 8400 que fornece diretrizes para o dimensionamento de estruturas de levantamento de carga, a ASME Seção VIII os requisitos para o dimensionamento de caldeiras e vasos de pressão ou até mesmo a NBR8333 (atualmente cancelada) que normatiza o cálculo e fabricação de comportas hidráulicas. Porém, essas normativas atendem principalmente requisitos de segurança e não fornecem orientações sobre como um produto deve ser feito ou idealizado. Isso explica a variabilidade de projetos de pontes rolantes, guindastes (ambos dimensionamentos pela NBR8400), Caldeiras (ASME Seção VIII) e objeto deste trabalho, as Comportas Hidráulicas do tipo Vagão. (ABNT, 1984; ABNT, 2008)

Em uma pesquisa realizada (ULRICH, 1998), foram selecionados vários produtos de diferentes marcas sendo que todos possuíam a mesma funcionalidade. O objetivo era mapear o custo de venda de cada produto e entender os motivos da disparidade de preços apesar da função ser a mesma. Foi constatado que em torno de 75% do custo de fabricação de cada produto era definido apenas na etapa de **Projeto Conceitual** (*Concept Design* ilustrado na Figura 1). Esta fase, representa apenas 25% do tempo de projeto até o produto ser completamente definido para a venda. E ainda, outras pesquisas apontam que 85% de novos produtos que deveriam sanar problemas para os quais foram projetados, demoram muito para chegar ao mercado ou possuem um alto custo de fabricação e isso se deve, principalmente, a um Projeto Conceitual mal elaborado ou arbitrário (ULRICH, 1998; ULMANN, 2010).

Sabe-se, portanto, que no desenvolvimento de Comportas Hidráulicas, o processo de *design* também pode impactar nos custos repassados ao cliente apesar de ser um produto puramente mecânico (sem instrumentação ou *softwares* embarcados). Logo, além do correto dimensionamento estrutural técnico, é necessária que a competitividade deste produto seja incrementada por meio um **Projeto Conceitual** bem desenvolvido utilizando Abordagens da Engenharia de Projetos.



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Aprimorar conceitualmente uma comporta hidráulica do tipo vagão utilizando abordagens da Engenharia de Projetos a partir de um estudo de caso real.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a análise de função, condições técnicas, condições fabricação e os custos de uma Comporta Hidráulica existente;
- Elaborar uma Estrutura de Função a partir do modelo estudado;
- Iniciar o desenvolvimento de um novo conceito de Comporta Vagão a partir das mesmas condições de trabalho da Comporta Vagão Existente estudada;
- Gerar estruturas de trabalho factíveis a partir de matrizes morfológicas e ferramentas de solução;
- Sintetizar, a partir destas mesmas estruturas de trabalho, modelos computacionais conceituais;
- Analisar a *performance* dos modelos sintetizados de forma quantitativa através da Análise por Elementos Finitos para o auxílio na tomada de decisão;
- Definir um Modelo Conceitual final e demonstrar as melhorias conceituais utilizando como referência a Comporta Hidráulica Inicial.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

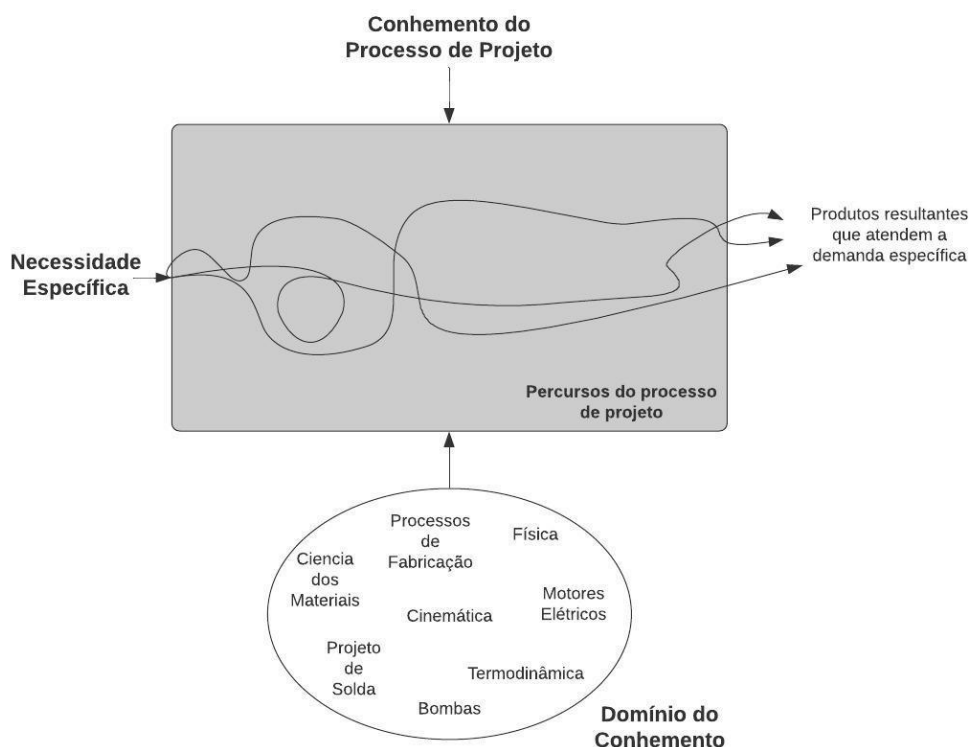
Nas próximas seções será abordado uma breve introdução da Engenharia e ao Processo de *Design* de produtos mecânicos além de estudos recentes do Projeto Conceitual. Os temas serão direcionados de modo a serem aplicados na Comporta Hidráulica a ser desenvolvida e não representam uma revisão bibliográfica completa sobre a Engenharia de Projetos ou ao Projeto Conceitual.

### 2.1 PROJETO DE PRODUTO MECÂNICOS

A importância de *como* um produto poderia ser melhor desenvolvido começou se evidenciar a partir dos anos 1980, quando o *Market Share* de determinadas empresas começou a retrair pelo aumento da competitividade. Nesta época, Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) era predominantemente “linear” entre os departamentos das empresas e cada etapa de projeto era passado adiante como nas filosofias Fordistas de produção. Este modelo, conhecido como “*over-the-wall*” (por cima do muro) não levava em conta a natureza iterativa do processo de desenvolvimento de produto o que gerava altos custos para a inserção de novos produtos no mercado. No início dos anos 90, o conceito de Produto e Processo de *Design* Integrado (IPPD, sigla em inglês), junto com os conceitos de manufatura de *Lean* e Seis Sigma iniciaram a quebra dos muros no desenvolvimento de produto, ajudando assim, na renovação da visão de como os produtos eram concebidos. (ULMANN, 2010)

Para desenvolver o *Post-it*® ou até mesmo o *Facebook*® foram exigidas áreas de conhecimento específicas pois o PDP age de forma particular em cada tipo de projeto. Da mesma forma, dentro da Engenharia Mecânica, os produtos de caráter mecânico exigem que as “técnicas” correspondentes sejam aplicadas. Como ilustrado na Figura 2, os domínios do conhecimento da Engenharia Mecânica (Física, fluidodinâmica, termodinâmica etc.) são utilizados como ferramenta no Processo de *Design* e, a partir da necessidade e restrições de Projeto, várias soluções podem ser idealizadas. (PAHL; BEITZ, 2007; ULMANN, 2010).

**Figura 2: Caminhos do Processo de Projeto Mecânico**



**Fonte: Ulmann (2010) - Adaptado**

O Processo de Projeto Mecânico, como ilustrado na Figura 2, podem tomar vários caminhos até a criação de um produto que atenda aos requisitos iniciais de projeto. Sendo assim, baseado nesta quantidade de soluções e da incerteza inerentes, os engenheiros projetistas iniciaram estudos no Processo de Projeto Mecânico na tentativa de sistematizar as decisões e compreender o funcionamento deste processo.

### 2.1.1 Abrangência dos Estudos na Engenharia de Projetos

O Método Científico base de qualquer pesquisa acadêmica, objetiva, de forma resumida, a identificação de problemas, criação e teste hipóteses. Ao contrário do bem definido método clássico, os estudos no PDP de produtos Mecânicos buscam obter uma teoria científica ainda em desenvolvimento, sendo que em meados dos anos 80, alguns autores classificaram os estudos em fase de "pré-teoria". (DIXON; FINGER, 1987)

Atualmente, todos os estudos de processo de *Design* são chamados de “Teorias e Metodologias em Projeto” (ou Engenharia de Projetos) e foram classificadas em alguns campos de estudo. A classificação mais aceita até hoje é a proposta por Dixon e Finger (1987) em 6 grandes áreas: (1) Modelos Descritivos; (2) Modelos Prescritivos; (3) Modelos de Base Computacional (4) Representações de *Design*; (5) *Design* de Ciclo de Vida e (6) Análise de *Design*. (MOSKALIK, 1994).

Os estudos com foco em Análises de Design (6) propõem observações e interpretação de *Designs* preexistentes, também conhecidos como “Engenharia Reversa” ou como será abordado adiante, o *Redesign*. Modelos Descritivos (1), em resumo, direcionam em *como* seres humanos criam novos produtos, ou seja, os estudos são direcionados quais processos, estratégias e métodos de resolução de problemas os projetistas utilizam. Modelos prescritivos (2), pelo contrário, focam em desenvolver as estratégias com a ideia central de: “o que deve ser feito em seguida” durante o processo de *design*. Representações em *Design* (4) analisam comunicação linguística e o *Design* de Ciclo de Vida (5) a cadeia de suprimentos durante o Pré-Desenvolvimento do produto (FINGER; DIXON, 1989)

Os estudos em Modelos de Base Computacional (3), dão ênfase em como modelos computacionais podem realizar (parte ou todo) do processo de *design* ou apenas dar assistência para os engenheiros projetistas durante o desenvolvimento. São distinguidos entre processos de computador que tem a capacidade de projetar (*tomar decisões*) e aqueles que apenas provem informação, ou seja, que analisam informações e auxiliam no processo de *design*. Geralmente, Modelos de Base Computacional que se referem a problemas muito bem definidos, ou seja, as especificações iniciais de projeto possuem pouco ou nenhum nível de abstração (PAHL; BEITZ, 2007).

É importante salientar que neste trabalho será utilizado a grande área dos Modelos de Base Computacional. O objetivo principal é apenas de gerar modelos computacionais para o auxílio na tomada de decisão durante o Projeto Conceitual.

### 2.1.2 O Processo de Projeto Mecânico

Como já evidenciado, diversas pesquisas do processo de projeto mecânico buscaram analisar seu comportamento e suas especificidades. Ulmann e Pugh, definem este processo em etapas bem definidas desde a análise de mercado para o

possível produto até o suporte deste produto no pós-venda (focando os esforços no *design* baseado nessas demandas). Este trabalho, todavia, é direcionar a desenvolver o produto, apenas do ponto de vista técnico, supondo que a necessidade do produto está bem definida assim como os seus *inputs*, sendo melhores discutidos na seção 3.

Partindo desse pressuposto, Stuart Pugh inicialmente descreveu o fluxo de trabalho durante o *Design* de produto em 4 fases principais (PUGH, 1998):

- *Product Design Clarification (PDC)*:

Antes de iniciar o processo de desenvolvimento, é necessário deixar explícitas as informações sobre os requisitos de projeto de forma mais detalhada. O objetivo aqui é especificar as informações de forma que todo o restante do processo atenda aos requisitos aqui listados e documentados. Assim sendo, quanto maior o número de informações, mais restritos se tornam os “caminhos” de *design*. (PAHL; BEITZ, 2007).

- Projeto Conceitual:

Como será detalhado na seção posterior, esta fase representa a especificação de uma estrutura de trabalho para a solução do problema de projeto, ou seja, representa a ideia central do produto e a suas possíveis formas a partir das funções a serem cumpridas;

- Desenvolvimento do Produto:

Esta fase representa a especificação do *Layout* do produto com o objetivo de construção. Aqui são detalhados todo o sistema e os subsistemas que fazem parte do produto.

- Projeto Detalhado:

Especificação da produção do produto em geral, elaboração de desenhos técnicos e comunicação para a produção.

## 2.2 O PROJETO CONCEITUAL

### 2.2.1 Estruturas de trabalho e função

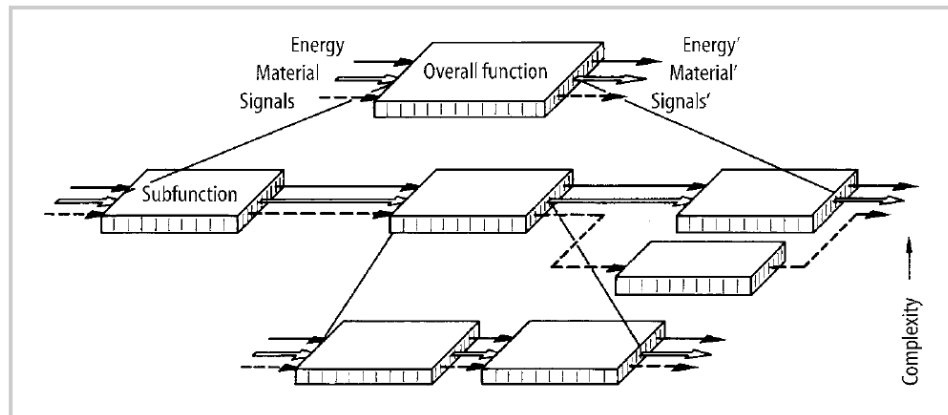
Na engenharia mecânica, sistemas mecânicos geralmente são compreendidos e classificados conforme sua função, ou seja, “o que” o produto deve fazer. Geralmente esta característica vem em forma de um verbo de ação (rolamento *reduz* atrito, eixo *transmite* torque). Qualquer função, porém, deve ser predeterminada

pela sua forma, ou seja, “*como*” o produto deve realizar determinada tarefa. Sabendo disso, uma “função” é definida na engenharia de projetos como um processo lógico de fluxo de **Energia, Material** e/ou **Sinal**. Os fluxos de Energia estão associados aos tipos de energia que atravessa o sistema, ou seja, energia mecânica, elétrica, fluida e térmica. Fluxo de Material estão associados, por exemplo, a um sistema cuja função seria transportar fluido de um ponto a outro sob determinadas restrições. Por fim, o fluxo de sinal representa o fluxo de informação que o sistema deve entregar (sinal em uma Interface Homem-Máquina para visualização, por exemplo). (ULMANN, 2010)

A maior probabilidade de sucesso uma solução de projeto está relacionada com a sistematização do processo e a caracterização das etapas de projeto conceitual. Na Figura 3, está ilustrada a denominada **Estrutura de função** onde a principal função do sistema está particionada em **sub funções** bem definidas onde o fluxo de energia, material e sinal estão presentes. Sub funções podem ser concretizadas a partir dos chamados **princípios de trabalho**, ou seja, efeitos físicos que são interrelacionados com características geométricas e de material (ver exemplos na Figura 4).

O objetivo até aqui é determinar o princípio de trabalho que melhor definiria uma sub função dadas as restrições de projeto. Assim, um princípio de trabalho pode vir de vários “princípios de solução” que é o termo utilizado para a geração de ideias factíveis para o cumprimento da sub função. Por fim, temos a **estrutura de trabalho** de solução que representa a seleção dos melhores princípios de trabalho que satisfazem a função principal do sistema. Esta estrutura compila os melhores princípios de trabalho sintetizados (que irão depender das ferramentas utilizadas para desenvolvê-las) e podem ser chamadas de “um conceito” a ser discutido para prosseguir com as etapas de projeto. (PAHL; BEITZ, 2007).

**Figura 3: Estrutura de Função Genérica**



Fonte: Pahl; Beitz (2007)

**Figura 4: Exemplo de Princípios de Trabalho a partir de sub funções a serem cumpridas**

Subfunction	Physical effect (independent of solution)	Working principle for a subfunction (physical effect, geometric and material characteristics)
	Friction  $F_F = \mu \cdot F_N$	
	Lever  $F_A \cdot a = F_B \cdot b$	
	Expansion  $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \vartheta$	

Fonte: Pahl; Beitz (2007)

Claramente, estabelecer uma estrutura de trabalho “ideal” é praticamente impossível pela infinidade de soluções que podem satisfazer uma mesma sub função. Por exemplo, satisfazer a função “transmitir torque” da Figura 4, apesar do efeito físico ser claro, as características de material e de geometria podem adquirir formas diversas. Essas soluções, porém, podem ser limitadas por etapas prévias do projeto mecânico onde todas as especificações de projeto são esclarecidas (PDC – *Product Design Clarification*), representado um ponto definitivo na seleção de uma boa estrutura de trabalho.

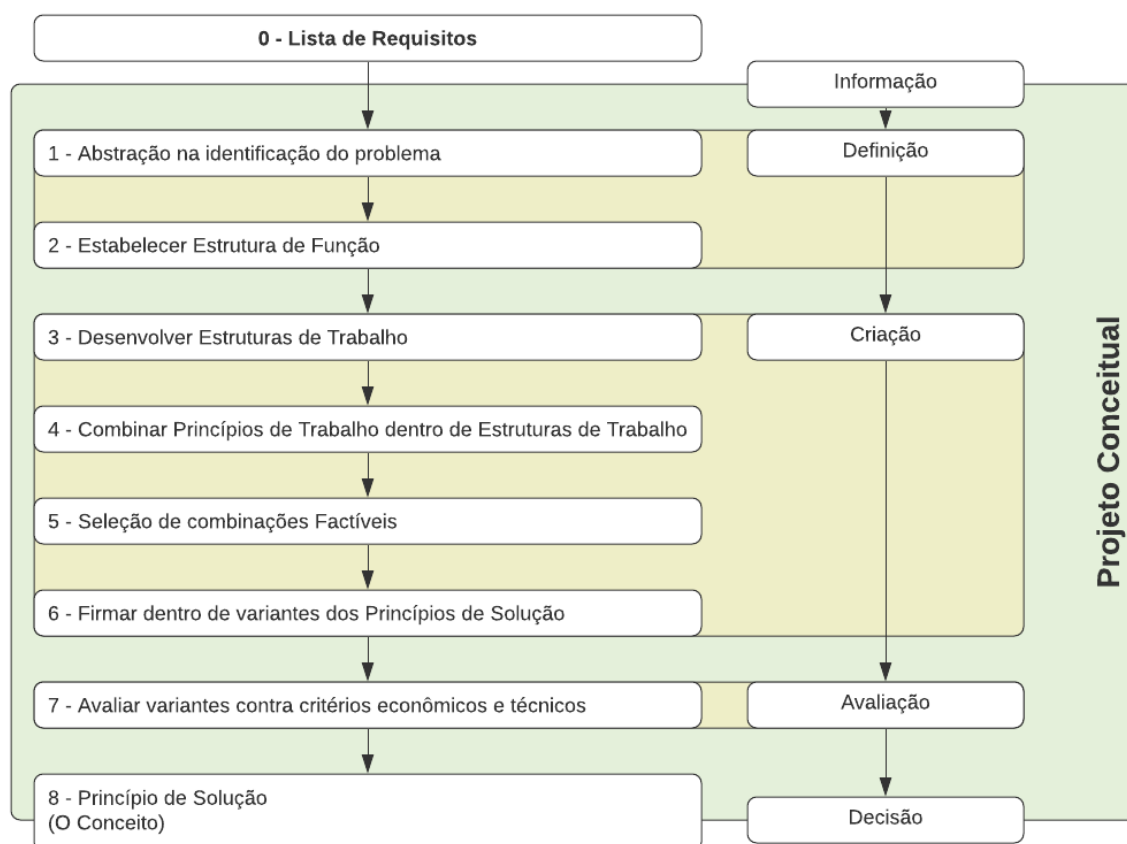
### 2.2.2 O Processo

O projeto conceitual faz parte do fluxo de trabalho durante o processo de *design* (descrito na seção 2.1.2) e como perceptível, tem impacto significativo para entregar a função principal do produto. Conforme a Figura 5, apesar do processo da etapa de projeto conceitual ser ilustrado como sequencial, as etapas não são necessariamente lineares entre si. O processo tem início na especificação de projeto de produto (*Product Design Clarification* - PDC) proveniente da lista de Requisitos (0) que está fora do escopo do processo do projeto conceitual propriamente dito. Em um primeiro momento, as definições do PDC, são identificadas com o objetivo de formular a função geral do sistema, para em seguida estabelecer a Estrutura de Função (“Definição”, Figura 5).

Após esta fase, é iniciado o processo que irá guiar para o princípio de solução, e, portanto, a fase de maior atenção nas pesquisas em *Design*, a etapa de Criação. Nos itens 3,4,5 e 6 da Figura 5, a atenção é voltada para a geração das estruturas de Função para em seguida, serem avaliadas conforme determinados critérios (item 7). A etapa final é a sintetização de um modelo conceitual que é a ‘materialização’ da estrutura de trabalho final sendo que pode ser realizado de diversas formas seja por modelos 3D, 2D ou até por croquis grosseiros. (HAIZHU 2016; PAHL; BEITZ, 2007)



**Figura 5: Processo do Projeto Conceitual (não-linear)**



**Fonte: Adaptado de Ulmann (2010) e Pugh (1998)**

## 2.3 MODELOS DE SOLUÇÃO

Nesta etapa serão apresentadas algumas abordagens que serão utilizadas na otimização da Comporta Hidráulica durante o processo de desenvolvimento de seu novo Projeto conceitual.

### 2.3.1 Decomposição de produto e Análise de processo físico

Diversos produtos mecânicos possuem um nível de maturidade avançado, ou seja, o estágio de inovação é baixo pois muitos produtos com a mesma função já foram projetados e muitas vezes replicados. No caso de Comportas Hidráulicas, um produto maduro, uma maneira eficiente de projetar estes equipamentos (partindo do zero) é analisar modelos semelhantes. A ideia é estabelecer um *benchmark*,

compreender como os componentes estão conectados e auxiliar na visão geral da estrutura de função. Esta metodologia também chamada de *concurrent design* (ou *redesign*) objetiva aprimorar a qualidade dos produtos, reduzindo tempo de desenvolvimento e também impacta em seus custos finais. (KUSIAK, 1999)

### 2.3.2 Matrizes Morfológicas

Matrizes morfológicas foram inicialmente desenvolvidas por Zwicky (1957) para providenciar um *design* sistemático para solução de um problema específico. Ela consiste na coleta de princípios de solução para serem aplicados em cada componente que desempenha uma sub função dentro do problema de projeto. Além disso, essas matrizes formam um “catálogo de *design*” durante todas etapas de projeto até a procura de uma solução factível. (HONGZHAN, 2017; ZWICKY, 1957).

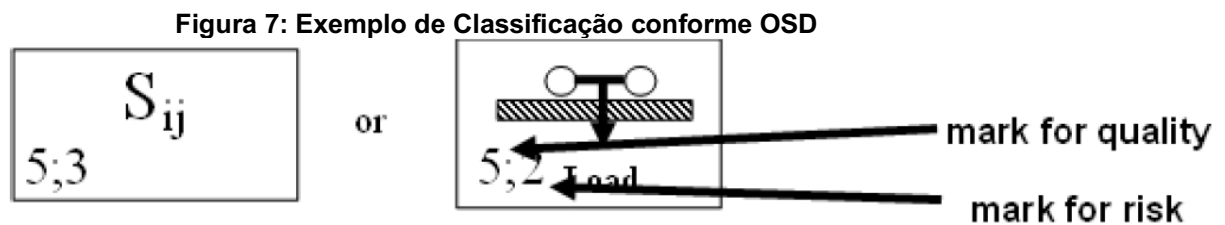
A matriz consiste na geração de um quadro com possíveis princípios de solução a partir de critérios de classificação e parâmetros preestabelecidos. A forma mais tradicional é desacoplar todas as sub funções do sistema nas linhas da matriz e os princípios de solução nas colunas conforme Figura 6. Outra forma de ilustrar essas matrizes é isolando cada sub função e elaborando uma única matriz morfológica onde nas linhas estariam os princípios de solução e nas colunas uma numeração para a identificação do princípio. A partir desta matriz, é possível combinar os termos “S<sub>ij</sub>’s” em soluções para o problema de projeto. Portanto, a geração dos princípios de solução deve ser bem sintetizada para atingir o objetivo de elaborar bons conceitos (ou boas estruturas de função) ao final do processo. (WEISS, 2004; PAHL; BEITZ, 2007)

**Figura 6: Estrutura da Matriz Morfológica. Sub funções nas linhas e princípios de solução nas colunas**

Solution Principle No.	1	2	3		j	j+1	
Sub-function 1	S <sub>11</sub>	S <sub>12</sub>	S <sub>13</sub>		S <sub>1j</sub>	S <sub>1j+1</sub>	
Sub-function 2							
Sub-function i							
Sub-function i+1							
							Combination No. k

Fonte: Weiss (2004)

Usualmente a quantidade de princípios gerados são extensos e muitas vezes a combinação definida é influenciada por aspectos intuitivos e de memória de longo prazo do projetista. Com ênfase nisso, um modelo simplificado de classificação foi desenvolvido por Weiss e Gilboa, denominado Otimização de Síntese Direta (DSO – *Direct Synthesis Optimization*) que baseia a avaliação dos princípios de solução em: (1) Performance da solução e (2) Escala de Risco que o Princípio pode expor o produto. Estas duas classificações são quantificadas em 4 escalas de 5,3,2 ou 0 sendo que seus atributos são de bom, melhor que média dos outros princípios, menor que a média e ruim, respectivamente. A Figura 7 representa um exemplo de um princípio de solução “ $S_{ij}$ ” avaliado conforme o DSO. (WEISS; GILBOA, 2004)



Apesar da aparente simplicidade da classificação, esta metodologia permite classificar os princípios solução dependendo do ponto crucial da sub função, ou seja, é possível, de maneira prática, atribuir um vetor quantificado (que representa a escala de atributos) de uma característica ou ideia meramente abstrata ou qualitativa do princípio de solução. Como exemplo, um valor de “5;2” (boa performance e risco abaixo da média) é menos preferível quando o objetivo é reduzir custos se comparado à um “3;3” (performance e escala de risco equilibrados).

### 2.3.3 Modelos Computacionais

Como descrito anteriormente na seção 2.1.1, os estudos em Modelos Computacionais (MC) aplicado à Engenharia de Projetos são classificados entre modelos que tem a capacidade de projetar (tomar decisões) e aqueles que apenas provem informação, ou seja, que analisam informações e auxiliam no processo de *design*. A aplicação dos modelos computacionais varia nessas classificações, mas também variam em que momento da etapa de projeto conceitual são aplicados. Há

MC direcionados, por exemplo, na resolução de um algoritmo para a definição de um *design* “ótimo” proveniente de uma matriz morfológica, ou seja, são MC voltados para a tomada de decisão (Exemplos: Hongzhan, 2017, Olvander 2009). Em contrapartida, em estágios mais avançados no processo de projeto conceitual, Modelos Computacionais podem ser usados para o auxílio na tomada de decisão, como por exemplo, usar uma ferramenta computacional na escolha de uma estrutura de trabalho de uma matriz morfológica genérica apenas analisando parâmetros de interesse. (HONGZHAN, 2017; OLVANDER, 2009; FINGER; DIXON, 1989)

Durante a etapa inicial de “Criação” do projeto conceitual (Figura 5), a preocupação com *performance* do conceito não está bem definida, limitando esta etapa geralmente, a croquis grosseiros com alto nível de abstração. Para auxílio em níveis mais avançados do projeto (como na fase de “Avaliação”, Figura 5), ferramentas CAD (*Computer-Aided Design*) bem como CAE (*Computer-Aided Engineering*) podem auxiliar na tomada de decisão. (BUDYNAS; NISBETT, 2008; ULMANN, 2010).

O termo “CAE” é geralmente utilizado para todas as aplicações de engenharia relacionados ao computador, sendo assim, o CAD pode ser considerado como um subconjunto do CAE. A grande diferença é que *softwares* CAD proporcionam a criação do *Design* enquanto que outras ferramentas CAE executam análises específicas ou simulações de assistência ao projetista. Modelos ou *softwares* CAE são enquadrados em duas categorias: (1) Base de engenharia e (2) Sem aplicação específica de engenharia. Na primeira classificação se enquadram a análise por elementos finitos, *softwares* de análise de mecanismos e de fluidodinâmica computacional (CFD) e na segunda classificação incluem softwares de planilhas eletrônicas e solucionadores matemáticos (exemplos: MATLAB®, Maple®, Excel). (BUDYNAS; NISBETT, 2008).

Ao final do processo de criação (Figura 5), pode ser utilizado ferramentas de base de engenharia para avaliar as estruturas de trabalho sintetizadas para analisar aspectos mais avançados, como análises estruturais. Assim sendo, a Análise por Elementos Finitos através do Método dos Elementos Finitos (MEF) torna-se indispensável em tanto em fases avançadas de desenvolvimento de produto ou na etapa de projeto conceitual. A base do método é a discretização de um sólido contínuo (proveniente de um *software* CAD) em partes menores, os elementos finitos, os quais são conectados entre si por pontos discretos (os nós). Em análises estruturais lineares, o objetivo primário é obter deslocamentos nodais (variáveis primárias) a partir

de vetores de força e matriz de rigidez do conjunto utilizando-se da resolução de equações algébricas. O procedimento prático na utilização da análise por elementos finitos para estudos estruturais lineares consiste em (SORIANO, 2009):

- Pré-Processamento:

Nesta primeira etapa são definidas, principalmente, a construção do modelo, aplicação das condições de contorno (essenciais ou não) e propriedades dos materiais. Inicialmente um modelo 3D (proveniente *software* CAD) de uma estrutura bem definida, é discretizado a critério do projetista, ou seja, a forma, o tipo, a ordem dos elementos finitos do contínuo são escolhidos. Em seguida, são definidos como a estrutura será apoiada (para garantir que a análise seja estática, somatório de forças iguais a zero) bem como os carregamentos nela atuante.

- Processamento:

As equações algébricas do sistema discreto serão resolvidas (por métodos numéricos pertinentes) e as variáveis primárias serão encontradas para posterior interpretação.

- Pós-processamento:

Nesta última etapa, será avaliada a estrutura em termos de variáveis primárias (deslocamentos nodais) e secundárias (tensões normais, von-Mises, deformações etc.) sendo esta análise o objetivo final da Análise por Elementos Finitos.

A diferença mais significativa em utilizar esta análise numérica em estágios iniciais do processo de projeto é mudar da “verificação” (quando o conceito já está definido) para a análise preditiva do comportamento estrutural antes de definir o conceito. Assim sendo, utilizar ferramentas de Análise por Elementos Finitos, além de auxiliar na compreensão do sistema mecânico, fornece uma referência no processo de tomada de decisão durante fases conceituais de projeto indicando quais conceitos podem ser superiores a outros. (ERIKSSON, 1999)

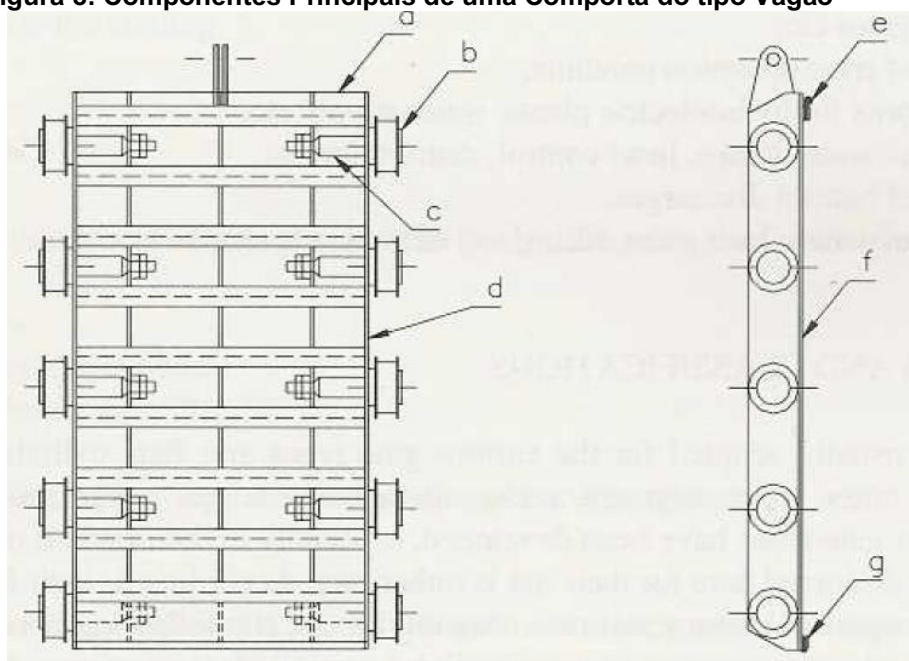
## 2.4 COMPORTAS HIDRÁULICAS TIPO VAGÃO

Comportas Hidráulicas aplicadas a usinas de pequeno e médio porte (CGH's e PCH's) são utilizadas para o cumprimento de funções específicas dentro uma planta

hidrelétrica. Podem cumprir funções de serviço (como para controle de vazão), emergência e para fins de manutenção dos equipamentos principais (as Turbina de geração). Assim como boa parte dos componentes mecânicos, comportas hidráulicas são também classificadas por sua forma ou função dentre as quais se destacam as *Fixed-Wheel Gate* (Comporta Vagão) e as *Stoplogs* (Ensecadeiras) por serem mais comuns em plantas de CGH's e PCH's. E ainda, essas comportas fazem parte de um sistema onde existem partes embutidas (como as guias metálicas embutidas no concreto para o caminho de rolamento da comporta) e acionamento (responsável por fornecer trabalho para içar a comporta). (ERBISTI, 2014)

Por se tratar de um produto maduro, diversos modelos de Comportas Vagão já foram elaborados baseados nos diferentes requisitos de projeto. Porém, a estrutura básica permanece semelhante em todos os tipos de Comportas Vagão como ilustrado na Figura 8. O item “a” representa o chamado “tabuleiro” onde estão localizados os componentes estruturais principais responsáveis por transmitir a cargas para as rodas (item b) as quais são apoiadas nas parte embutidas no concreto Para transmissão destes carregamentos (as quais irão transmitir para as partes embutidas) há o intermédio das chamadas “painéis” (item d) e os eixos das rodas (item c). E ainda, para garantir a estanqueidade, ou seja, garantir que o fluido não atravessará a comporta, são necessários a chapa principal (item f, também chamado de paramento) e os selos de vedação, geralmente emborrachados (itens “e”, “g”). Analisando as partes deste tipo de estrutura, é realizado um estudo de decomposição de produto (brevemente discutido na seção 2.3.1) pois é possível entender como as partes principais destes equipamentos estão interrelacionadas e como o fluxo, principalmente de energia, flui sobre este tipo de equipamento.

**Figura 8: Componentes Principais de uma Comporta do tipo Vagão**



Fonte: Erbisti (2014)

Apesar da pouca quantidade de componentes estruturais interrelacionados, ausência de mecanismos complexos ou presença de automação, essas estruturas podem apresentar uma variedade de *designs*. Outra possibilidade de compreender os produtos existentes é analisando os modelos manufaturados por diversos fabricantes deste tipo de equipamento. Nas Figuras 9 e 10 estão ilustradas quatro comportas do tipo Vagão feitas por diferentes fabricantes. Na primeira figura, as comportas tem a características de possuírem rodas apoiadas em dois pontos enquanto que na segunda, o eixo das rodas se encontra em balanço. Em ambas as Figuras, as quatro comportas possuem características estruturas do tabuleiro bem distintas e sendo que as rodas de apoio variam em quantidades e posições de montagem na viga vertical (item “d”, Figura 8). Além disso, os materiais empregados nos modelos são distintos podendo ser aço de baixo e alto carbono e até aço inoxidável. As rodas também variam de acordo com tipo de fixação, usinagem, largura de roda, diâmetro e quantidade. Essas extensas variações se dão principalmente a requisitos de projeto (PDC) mas são amplamente impactadas pela sistemática de projeto conceitual estabelecido ou não.

**Figura 9: Comportas Vagão com eixos das rodas bi apoiados.**



Fonte: Esquerda: PowerChina (2016); Direita: Industrial Machinery Digest (2019)

**Figura 10: Comportas Vagão com eixos das rodas em balanço**



Fonte: Esquerda: Steel – Fab Inc (2018); Direita: Steel – Fab Inc (2019)

Esses equipamentos, pelo seu nível de responsabilidade técnica e também pela diversidade de *designs*, são geralmente apoiados por normas técnicas (NT) de referência. Atualmente, as NT específicas para o cálculo e fabricação de comportas hidráulicas se encontram canceladas por entrarem em desuso pelo setor, como a norma brasileira ABNT (NBR8883, 2008). Apesar disso, são utilizados os parâmetros



principais destas normativas (assim como as recomendações indianas da IS 4622, 2003), para o desenvolvimento deste equipamento. Ambas as normativas estabelecem uma revisão geral de dos componentes principais (e como calculá-los de forma segura) de uma comporta do tipo Vagão assim como a ilustrada na Figura 8. (ABNT, 2008; IS, 2003)

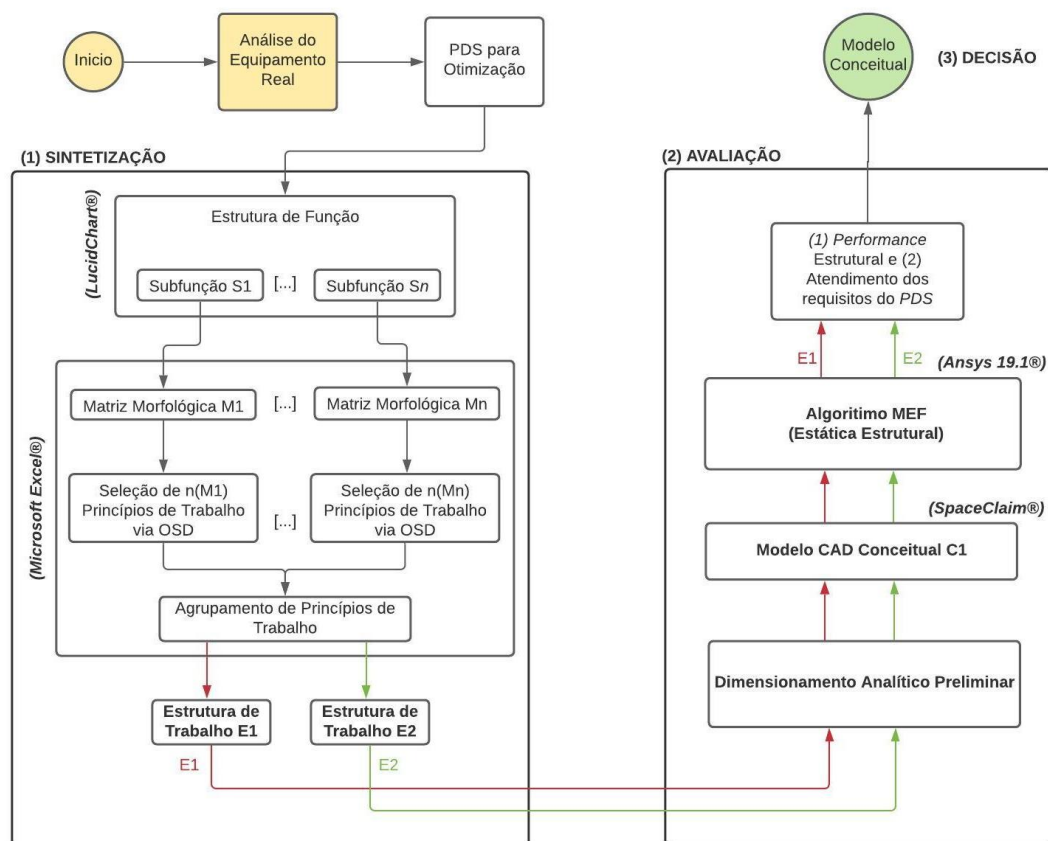
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as etapas sequenciadas para obtenção do objetivo geral do trabalho. Não haverá necessidade de bancada ou aparatos experimentais, sendo somente utilizados *softwares* comerciais e metodologias da Teoria de *Design* para a resolução de um problema real de projeto.

Considerando os aspectos descritos pela Teoria de *Design* e Modelos de assistência computacional aplicado ao Projeto Conceitual de uma Comporta Vagão, será utilizado como referência para o trabalho, o organograma ilustrado pela Figura 11. Este organograma está separado em dois grandes grupos descritos ao longo da metodologia de pesquisa, são eles: (1) Sintetização das Estruturas de Trabalho, a esquerda e (2) Avaliação dos Conceitos, a direita.

Anteriormente a etapa de sintetização (grupo 1), será definido o *Product Design Clarification* (PDC) através de dados de um estudo de caso real. O PDC (descrito na seção 3.1), apesar de estar fora do objetivo deste trabalho, representa uma fase crucial na delimitação dos requisitos e por consequência, reduz as possibilidades de solução. Para a conexão das etapas (1) e (2) será descrito brevemente no início da seção 3.3, os Critérios de Comparação necessários para a realização da modelagem computacional. Por fim, as etapas de Sintetização das Estruturas de Trabalho e Solução dos Conceitos serão descritas nas seções 3.2 e 3.3 respectivamente.

**Figura 11: Organograma geral da Metodologia de Pesquisa**



Fonte: Autoria Própria

### 3.1 PRODUCT DESIGN CLARIFICATION – PDC

Iniciando a sequência de trabalho pela Figura 11 será descrito, em forma de lista de requisitos, o *Product Design Clarification*. Serão coletados o maior número de restrições para a limitação do problema de *design* segundo os requisitos da Comporta de estudo de caso descrito a seguir.

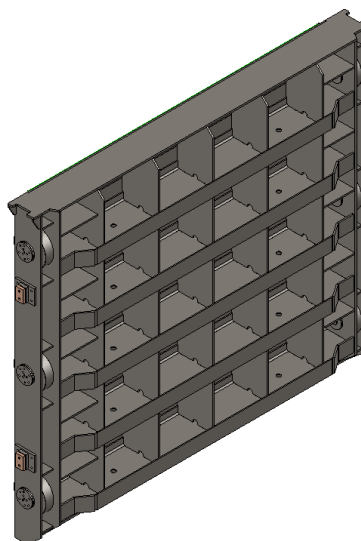
Para a delimitação do problema será utilizado um projeto real de uma Central de Geradora Hidráulica (CGH) com objetivo de utilizar requisitos de operação de uma usina deste porte. A Central em questão é a CGH Rincão da Ponte Energia Eireli localizada no município de Tibagi – PR que capta o escoamento do Rio Fortaleza, numa queda líquida de 25m. O escoamento é guiado, através de dois condutos forçados, para duas Turbinas Francis com capacidade de geração plena de 5,0MW. Em caso de manutenção periódica das Turbinas é requerido uma Comporta Vagão por turbina para interromper o fluxo de forma que haja estanqueidade completa. Cada

comporta está localizada antes de cada trecho de conduto forçado que guia o escoamento para as turbinas de geração.

A Comporta Vagão utilizada como objetivo de otimização é classificada como de baixa coluna manométrica (ERBISTI, 2014) e está ilustrada na Figura 12. Além disso, será considerado os seguintes requisitos preliminares da Comporta em operação:

- 10 metros de coluna de água de projeto sobre a soleira;
- É requerido uma comporta retangular plana;
- Abertura de passagem útil: Largura de 2600mm e Altura de 2600mm;
- Sistema de acionamento deve ser hidráulica, ou seja, para realizar a manobra de abertura e fechamento deverá existir um sistema hidráulica;
- Posição de vedação a jusante;
- A comporta deve possuir rodas acopladas para reduzir questões de atrito durante a manobra de fechamento e abertura da comporta.

A Comporta ilustrada na Figura 12 encontra-se atualmente em operação, ou seja, cumpre sua função e possui confiabilidade técnica garantida. Portanto, será utilizado esse modelo real (o qual atende a todos os requisitos listados acima) como referência para o novo projeto conceitual objetivo deste trabalho.

**Figura 12: Comporta Vagão em operação**

**Fonte: (METALÚRGICA LUBECK EIRELI., 2020)**

A lista de requisitos iniciais de projeto não estará limitada aos tópicos listados acima. Assim sendo, como incremento da lista de requisitos serão adicionadas outras restrições capazes de fornecer mais qualidade aos modelos conceituais futuros.

Os requisitos listados no PDC serão classificados em grandes grupos de restrição geométrica, forças atuantes, energias do sistema, restrições de material, requisitos de segurança, produção, condições de operação e por fim, requisitos de manutenção. Cada item será classificado como sendo uma “demanda” ou um “desejo” de projeto. O primeiro representa um requisito que deve obrigatoriamente ser cumprido em todos os modelos conceituais enquanto o segundo representa um requisito que pode ser atendido ou não (apesar de ser preferível ser atendido se possível).

### 3.2 SINTETIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE TRABALHO

Seguindo o fluxograma da Figura 11, será descrita a Estrutura de Função do problema baseado nas restrições do PDC. Essa estrutura será desenvolvida em forma de um fluxograma em cascata utilizando o *software* comercial *LucidChart®* para o estudo de caso descrito na seção 3.1. Um produto pode ser descrito em uma ou duas funções principais (ULMANN, 2010) antes da “abertura” dessas funções em sub funções. Sendo assim, inicialmente uma será identificado qual função principal (ou

funções) do sistema e dali identificado quais poderiam ser as sub funções para cumprir o objetivo do produto. Estima-se ainda, que cada sub função terá um número considerável de outras sub funções (de forma semelhante ao ilustrado pela estrutura de função genérica da Figura 3). Neste mapa (ou estrutura) de função serão descritos como o fluxo de energia, sinal e material atravessam todas as sub funções identificadas para até cumprir a função principal.

Será utilizado nesta etapa, os conceitos de *Redesign* para entender como o equipamento performa e como suas peças estão conectadas entre si e ainda, como desempenham sua subfunção até cumprir a função geral do sistema.

Organizado o mapa de Função, através do mesmo *software* gráfico *LucidChart*®, serão coletadas e numeradas todas as “n” sub funções inferiores obtidas e então geradas Matrizes Morfológicas (ou Esquemas de Classificação) para cada uma destas sub funções. Essas Matrizes representam uma ferramenta de geração e visualização de possíveis princípios de solução ou ideias e não necessariamente serão utilizadas no decorrer do trabalho. Assim sendo, serão desenvolvidas por meio de croquis grosseiros e então classificados e listados em forma de matrizes eletrônicas, utilizando o *software* de planilha eletrônica *Microsoft Excel*®. As matrizes serão geradas para cada sub função seguindo as principais etapas:

1. Selecionar uma sub função e iniciar a geração de uma única matriz morfológica específica;
2. Sintetizar o maior número possível de princípios de solução baseados em decomposição de produto e memória de longo prazo. Princípios de solução serão listados aqui de forma aleatória nas linhas da matriz;
3. Repetir o processo para todas as sub funções listadas na Estrutura de Função;
4. Em seguida, cada matriz terá um critério de classificação específico podendo ser: (1) Geometria de Trabalho (tipos: tipo, forma, número, posição ou tamanho); (2) Movimento de Trabalho (tipos: rotacional, oscilatório, etc) ou (3) Tipo de energia (tipos: mecânica, elétrica, hidráulica, etc). Ou seja, cada matriz, obtida de cada sub função, terá um critério de classificação específico para que os princípios de solução gerados sejam analisados à luz desse critério.

5. Em cada linha da matriz será inserido um determinado “tipo” de critério de classificação e em cada coluna haverá uma numeração crescente para identificar o princípio de trabalho;
6. Os princípios de trabalho serão classificados e organizados conforme esses títulos e numerados de forma matricial (Linha (tipo) “i” x Coluna (numeração) “j”) e então inseridos no *Microsoft Excel*®;
7. Identificação do Ponto Crucial da sub função, ou seja, qual objetivo principal deve ser buscado nos princípios de solução (como redução dos custos de matéria prima, horas de trabalho de montagem; quantidade de usinagem, dentre outros possíveis pontos de interesse).
8. Cada vetor da matriz será rotulado pela Otimização de Síntese Direta (OSD) baseados no ponto crucial da sub função, sua performance para o produto final e escala de risco. Serão organizados esses valores dentro do *Microsoft Excel*®;
9. Com as matrizes devidamente classificadas conforme o ODS e identificado os pontos de interesse da determinada sub função, serão pontualmente coletados 2 princípios de trabalho que melhor atendem a sub função. Em resumo, cada matriz morfológica terá um *output* de 2 princípios de trabalho.

Seguindo o fluxograma da Figura 11, após esclarecido as etapas acima, serão reunidos todos os ( $2*n$ ) princípios de solução sendo que “n” representa a quantidade de sub funções adquiridas da Estrutura de Função. A organização desses princípios será também computada no *Microsoft Excel*®. Em seguida, terá o início da última etapa de sintetização, a geração das Estruturas de Trabalho propriamente dita. Como não há previsão da quantidade de sub funções e nem dos princípios de solução que as matrizes poderão gerar, será limitado um número máximo de 2 Estruturas de Trabalho para prosseguir com a pesquisa, conforme ilustrado na Figura 11 (linhas E1 e E2). Essas Estruturas serão geradas pelo agrupamento dos princípios de solução com melhor posição conforme a Otimização de Síntese Direta. Além disso, acredita-se ainda que poderá haver incompatibilidade entre os princípios de solução e, portanto, um número de 2 conceitos de Comportas Vagão pode bem representar modelos com qualidades semelhantes e suficientes para o objetivo do trabalho. Com

essas duas estruturas de trabalho bem definidas, a próxima macro etapa terá sequência, a solução desses conceitos.

Em resumo nesta seção, o objetivo é identificar a Estrutura de Função (entendendo a função principal com o objetivo de coletar as sub funções da comporta hidráulica), identificar e agrupar os princípios de solução a partir de matrizes morfológicas e por fim sintetização das Estruturas de Trabalho factíveis para a etapa da solução de 2 modelos conceituais diferentes.

### 3.3 AVALIAÇÃO DOS CONCEITOS

Como as Estruturas de Trabalho, representados por E1 e E2 na Figura 11, não possuem (até o momento) características de forma bem definidas em termos de dimensões por exemplo, é tomado como sequência a elaboração de critérios comparativos. Ou seja, para que seja possível elaborar modelos CAD – 3D a partir de Estruturas de Trabalho conceituais são necessários estabelecer parâmetros que correlacionem os conceitos como ambos os conceitos possuírem massas iguais ou muito próximas.

Com os requisitos bem definidos e listados, as 2 Estruturas de Trabalho obtidas serão representadas por modelos 3D utilizando ferramentas CAD. Será utilizado o *software* comercial *SpaceClaim*®, parte do pacote comercial da *Ansys*®. Sabe-se que as estruturas previstas da modelagem 3D, devido aos equipamentos semelhantes à Figura 8, 9 e 10, possuem características bidimensionais (superfícies onde a espessura é constante e pequena em relação à sua área planificada). Com base nisso, será utilizado o mesmo *software* *SpaceClaim*® para simplificação geométrica com o objetivo de reduzir processamento computacional, limitando os elementos finitos em elemento de casca quando possível.

Com todos os 2 modelos computacionais definidos e simplificados, o estudo numérico pelo Método dos Elementos Finitos terá início. A análise numérica para obtenção da solução de *design* final estará limitada a análise estrutural estática tanto por representar bem o fenômeno físico de forma geral quanto pela velocidade de processamento e rápidas iterações. Será utilizando o *software* *Ansys 19.1 Student*®, especificamente o *solver Mechanical APDL* aplicado a Estática Estrutural. Os 2 modelos seguirão, individualmente, o mesmo procedimento (representado pela caixa “Algoritmo MEF” na Figura 11), seguindo a sequência:



1. Ao modelo CAD simplificado no *software SpaceClaim®*, será atribuído as propriedades dos materiais para cada peça do equipamento;
2. Atribuir contato entre peças (conforme característica do modelo CAD obtido e das características do elementos)
3. Geração de malha de elementos finitos: em todos os modelos serão gerados, se possível, (1) elementos finitos da mesma ordem (primeira ou segunda ordem) e (2) mesmo tipo (ex: SOLID186; SHELL181, etc); (3) refinamentos semelhantes entre os modelos onde gradiente de tensão pode ser significativo; (4) Quantidade de elementos que não ultrapassam 3% entre os modelos geométricos C1 e C2 na Figura 11;
4. Análise da qualidade dos elementos pós geração de malha: Todos os modelos serão avaliados conforme os critérios disponíveis no *software*, sendo (1) *Element Quality* e (2) *Skewness*, onde que 10% dos elementos não devem ultrapassar os valores de 0,80 e 0,15 respectivamente.
5. Aplicação das Condições de contorno: Baseado nos valores de projeto listados no PDC, serão aplicadas:(1) Carregamento hidrostáticos devido a coluna manométrica; (2) Restrições de deslocamento; (3) Pontos de com zero graus de liberdade e (4) Fixação Cilíndricas (se houver).
6. Solução do modelo pelo *Mechanical APDL*;
7. Análise e Interpretação de Resultados numéricos: Serão analisadas como comparativo os valores de (1) Tensões Equivalentes de von-Mises globais; (2) Deslocamentos direcionais globais no sentido de carregamento hidrostático; (3) Deformações globais. Além disso, condições típicas de singularidade, quando identificadas, serão desprezadas num valor proporcional à  $1,5 \cdot (\text{Tensão de Escoamento do Material})$ .

A partir da análise e interpretação dos resultados numéricos é possível quantificar os modelos conceituais em termos de sua capacidade estrutural. Para a seleção do modelo final para seguir para etapas posteriores de projeto (fora do escopo deste trabalho), um último filtro poderá ser necessário. Sendo assim, a definição final será baseada nos requisitos iniciais de projeto, o *Product Design Clarification* e

critérios econômico e de fabricação (conforme a sequência de trabalho da Figura 5). Os 2 modelos, validados pela análise numérica, serão ordenados conforme a capacidade de entregar as funções primárias (localizada na listagem PDC) e a *performance* que o modelo possui em relação aos outros nos critérios listados no item 7 da sequência acima.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DO SISTEMA EXISTENTE

Como descrito na metodologia, primeiramente será utilizado uma Comporta Vagão existente com o objetivo de redesenhar este equipamento a partir da criação de novos conceitos utilizando métodos de solução e análise. Primeiramente, na seção 4.1.1, será feito um estudo de Função da Comporta Vagão atual e a decomposição das suas partes individuais com o objetivo de auxiliar na elaboração da Estrutura de Função do novo conceito. Por fim, no item 4.1.2, serão analisados aspectos de manufatura do equipamento em termos de custos totais por subgrupos, custos de manufatura e massas dos componentes principais.

#### 4.1.1 Decomposição do Equipamento

Antes de analisar os componentes individuais, será descrito o funcionamento básico do sistema existente, referente à PCH Rincão da Ponte, bem como uma breve descrição do equipamento em operação.

A descrição:

- Trata-se de um equipamento projetado e fabricado sob encomenda onde a função principal é interromper o escoamento da água do Rio Fortaleza para realizar manutenções nas Turbinas Francis de geração de energia da PCH Rincão da Ponte. Este equipamento é manobrado por um sistema hidráulico movido por um pistão de dupla ação fixado acima da coluna manométrica que a comporta está sujeita.

O funcionamento básico deste sistema Comporta-Pistão Hidráulico (Figura 13):

- 1) A Comporta Hidráulica é transportada da posição recuada (ou neutra) até a posição de trabalho guiada por um cilindro de acionamento hidráulico, sendo o percurso de descida é auxiliada pelas Rodas e os Apoios Laterais. Neste momento o poço da Comporta está

preenchido por água, ou seja, existe a geração de energia pelas Turbinas Francis;

2) Quando a parte inferior (ou soleira) da Comporta entra em contato com o escoamento dentro do poço, há o início da queda de pressão à jusante da comporta e o tubo de aeração admite ar. Cargas hidrodinâmicas começam a solicitar a Comporta antes mesmo do equipamento chegar à posição final de trabalho.

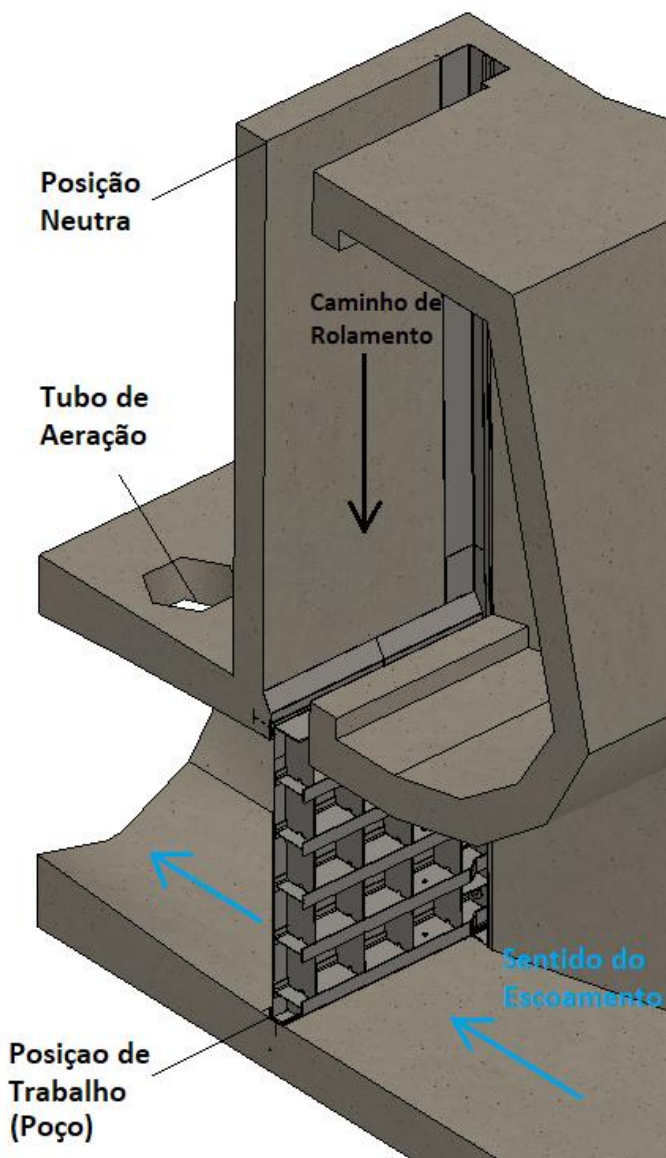
3) No momento que a Comporta encontra-se totalmente posicionada com a soleira tocando a parte inferior do poço, o escoamento é cessado inteiramente. Os Selos de vedação garantem que haja estanqueidade completa.

4) Neste momento, cargas predominantemente hidrostáticas solicitam o tabuleiro da Comporta e transmitem este carregamento para as partes embutidas do concreto por meio das Rodas de Apoio e dos próprios Selos de vedação. Vale ressaltar que as Rodas transmitem a maior parte da solicitação.

5) Após a etapa anterior, a usina não está gerando energia elétrica e é possível realizar manutenções nas turbinas ou quaisquer equipamentos a jusante da Comporta. A função do equipamento é então cumprida.

6) Após a manutenção dos equipamentos a jusante, a Comporta é transportada novamente para sua posição de neutra. Este retorno é auxiliado pelas Rodas de Apoio que reduzem atrito gerado pelos Selos de Vedação enquanto o pistão hidráulico transporta o equipamento para sua posição recuada.

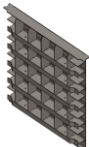

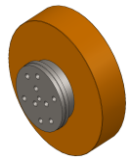

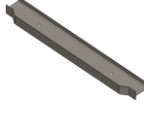


**Figura 13: Vista seccionada do Sistema onde a Comporta Vagão está inserida. Equipamento em Posição de Trabalho.**



Fonte: (METALÚRGICA LUBECK EIRELI., 2020)

Compreendendo melhor o sistema, foi possível analisar a Comporta em termos de seus componentes individuais como ilustrado pela Tabela 1. Na primeira coluna, foi identificado por numeração as montagens principais (1,2,3 e 4) e peças individuais de cada montagem (1.n, 2.n etc.) e nas colunas subsequentes identificado o nome da peça ou montagem, material e método de fabricação respectivamente. Além disso, há uma imagem ilustrativa para cada item sendo que foi inserido uma breve descrição das funções que cada parte da comporta realiza dentro no equipamento.

**Tabela 1: Decomposição do Equipamento**

Peças	Montagem/Peça	Material	Fabricação	Imagem	Funções atendidas
1	Tabuleiro	Aço predominantes	Soldagem de componentes laminados (Chapas e Perfis)		(1) Interromper escoamento da água para as turbinas;
2	Painel de Apoio das Rodas	ASTM A36	Chapas Laminadas e Soldagem		(1) Fornecer fixação para as rodas de apoio (item 3); (2) Fornecer fixação para os apoios laterais (item 4); (3) Transmitir energia do recebida pela tabuleiro (item 1) para as rodas de apoio (item 3).
3	Conjunto de Fixação e Rodas de Apoio	Vários aços	Usinagem predominante		(1) Reduzir atrito durante o retorno do tabuleiro da posição de trabalho até a posição neutra; (2) Transmitir carregamento do painel para as partes embutidas fixas;
4	Apoio Lateral	ASTM - A36 e Bronze	Laminação e Usinagem		(1) Evitar que a comporta tenha o movimento impedido lateralmente
1.1	Vigas Estruturais Principais	ASTM A572 Gr. 50 (W360 X 32,9)	Laminação		(1) Fornecer a rigidez principal do tabuleiro. (2) Encurtar as seções do paramento verticalmente.
1.2	Enrijecedores de Paramento	ASTM A36	Chapa Laminada com Usinagem		(1) Encurtar a seção destravada do paramento horizontalmente
1.3	Paramento ou Chapa de Vedação	ASTM A36	Chapa Laminada		(1) Impedir que o escoamento ocorra através do equipamento.

**Fonte: Autoria Própria**

Com ilustrado na Tabela 1, o Tabuleiro (Item 1), possui 5 vigas horizontais com nervuras verticais inteiramente soldadas no paramento da Comporta. Além disso, é importante notar que este tabuleiro é composto pelos itens 1.1, 1.2 e 1.3 também decompostos na Tabela 1. As vigas horizontais são vigas do tipo “W” padrão brasileiro sendo que cada um possui um rebaixo (ou “degrau”) para alcançar a largura do Apoio das Rodas (Item 2). Esses Perfis Horizontais bem como as nervuras verticais são espaçados igualmente e o Tabuleiro, como será mais bem abordado na seção 4.1.2, representa a maior parte do peso total do equipamento.

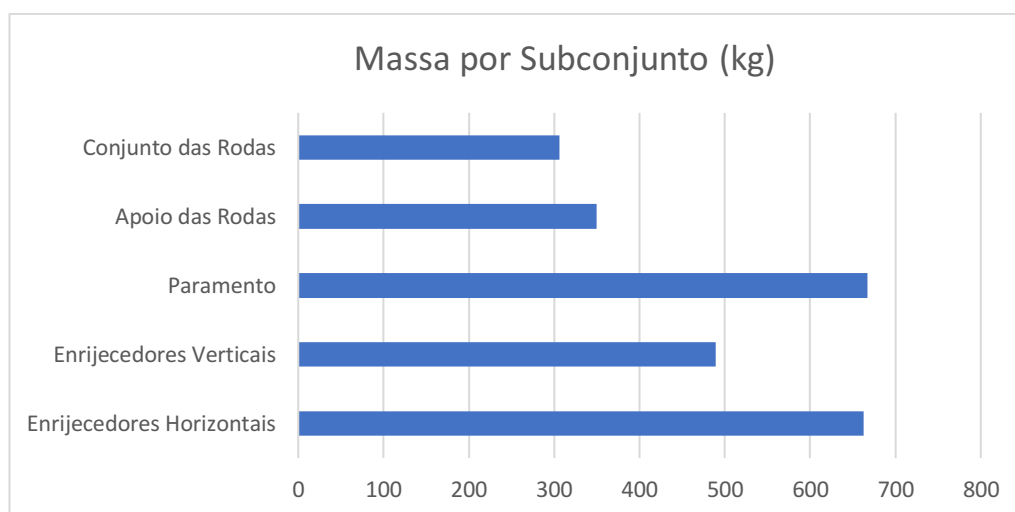
Outro aspecto importante em relação ao conceito original é relacionado ao conjunto das Rodas de Apoio. Cada conjunto, representado pelo Item 3, possui um

total de 8 peças usinadas, ou seja, 48 peças usinadas por Comporta além de 60 parafusos para fixar todos os Conjuntos de Rodas de Apoio. Os Apoios Laterais (item 4), são fixados por simples parafusos no painel e existem chapas de bronze nas suas pontas para servir de apoio durante a descida ou subida da Comporta. Os Selos de vedação são do tipo “nota musical” (não ilustrado na Tabela 1) são fabricados de Neoprene e são fixados no paramento a jusantes da Comporta. Estes últimos componentes são essenciais para garantir estanqueidade do escoamento além de auxiliar a transmissão do carregamento hidrostático para as partes embutidas no concreto.

#### 4.1.2 Análise das características de Manufatura

Nesta seção serão apresentados alguns dados gerais relacionados a características de manufatura e custos para a fabricação da Comporta Vagão descrita na seção anterior. Todos os dados relacionados a tempo de produção foram coletados do Sistema ERP da (METALÚRGICA LUBECK EIRELI, 2020) e custos relacionados à matéria prima e mão de obra são dados do momento da fabricação do equipamento. Os dados de custos de materiais e manufatura estão expressos em valores percentuais e não em valores absolutos para preservar aspectos comerciais da empresa.

A Figura 14 ilustra as massas da Comporta Vagão dividida nos respectivos subconjuntos do equipamento. Os pesos mais significativos foram identificados no Paramento (667 kg) e nos Enrijecedores Horizontais ou Vigas (662 kg) ambos representando mais da metade do peso total da Comporta (53,73%). Os enrijecedores verticais (também denotados pelo termo “nervuras”) representaram quase 20% e outros 2 subconjuntos, 26,5% da massa total de 2475kg do equipamento completo. Estes dados serão mostrados ao longo do trabalho como um dos parâmetros fundamentais para otimização pois estão diretamente ligados ao custo de matéria prima. Além disso, as massas totais representam um ponto de partida para a elaboração dos modelos CAD em fases mais avançadas do projeto conceitual.

**Figura 14: Massas totais por Subconjunto da Comporta**

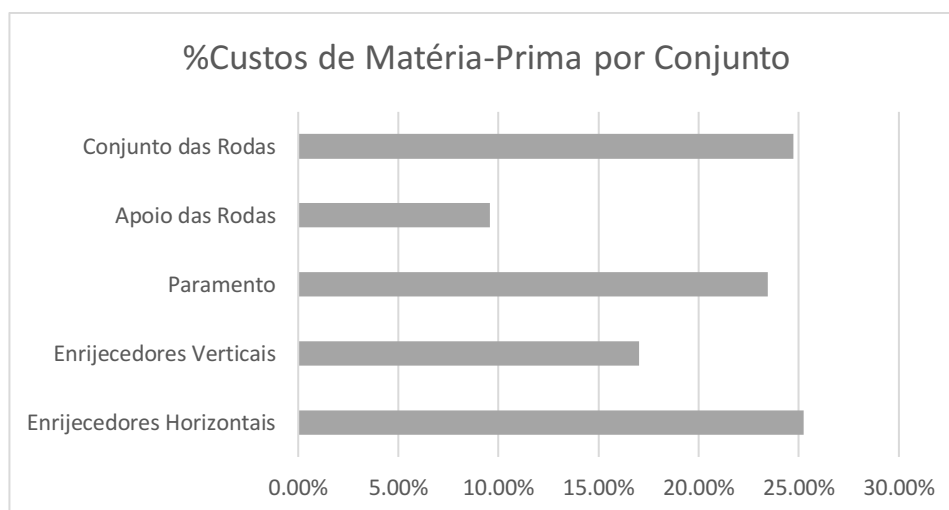
Fonte: (METALÚRGICA LUBECK EIRELI., 2020)

O segundo aspecto estudado nesta seção foi a porcentagem dos custos da matéria-prima (em relação ao custo total) de todo o equipamento. Neste estudo foram analisados os materiais brutos para fabricação da comporta sem qualquer processamento como soldagem, corte, furação ou usinagem destas matérias-primas.

Como ilustrado pela Figura 15, as porcentagens dos custos mais significativos foram os dos Conjunto das Rodas e do Enrijecedores Horizontais os quais somaram juntos 49,97% dos custos apenas de matéria-prima. É importante notar pela Figura 14, que o peso do Conjunto das Rodas representa menos da metade do peso dos Enrijecedores Horizontais apesar dos custos serem aproximadamente iguais em termos de matéria-prima. Isso se deve a diversos fatores, entretanto pode-se concluir que essa proximidade se deve principalmente ao maior preço dos aços empregados nos Conjuntos das Rodas. Este conjunto, possui um eixo AISI 4340, buchas para redução de atrito de laminado de Bronze bem como revestimento do eixo aço inoxidável 316L para proteção contra corrosão. As partes estruturais dos Enrijecedores Horizontais são fabricadas de ASTM A36 e ASTM A572 Gr50 sendo aços mais comuns encontrados comercialmente para chapas laminadas e vigas W respectivamente. Com esta análise foi possível identificar uma oportunidade de melhoria nos componentes das rodas em termos de seleção de materiais.



**Figura 15: Porcentagem dos Custos de Matéria-Prima por Subconjunto em relação ao custo totais de Matéria-Prima.**



**Fonte: (METALÚRGICA LUBECK EIRELI., 2020)**

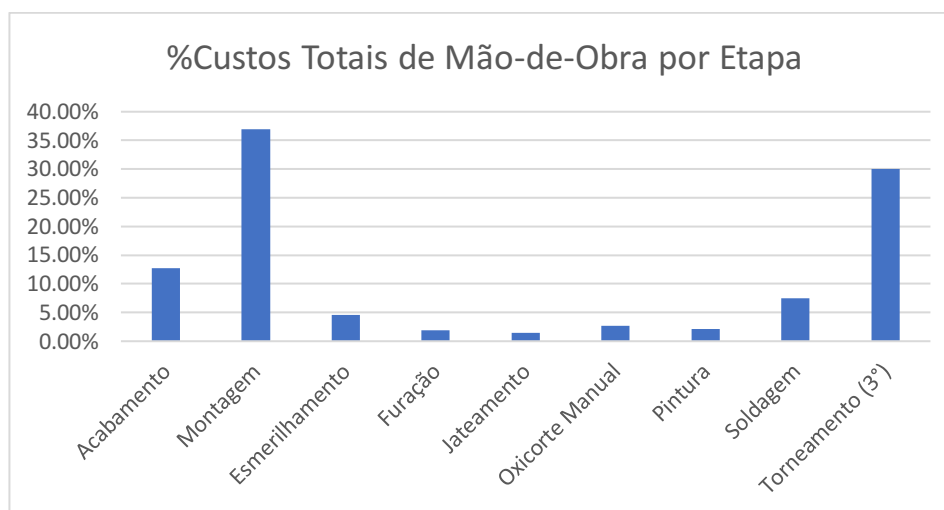
O terceiro aspecto analisado foi a porcentagem dos custos de mão-de-obra por etapa de fabricação em relação ao custo total de manufatura, ilustrado pela Figura 16. Estes custos estão diretamente ligados às horas dedicadas para cada etapa, ou seja, o maior custo operacional de uma etapa de processamento é diretamente proporcional a quantidade de horas gastas nesta mesma etapa.

O primeiro aspecto observado foram os custos superiores a 35% apenas para a etapa de montagem das peças equipamento. Para este tipo de equipamento, a correta montagem dos componentes e o alinhamento por topografia industrial (alinhamento das rodas e planicidade do paramento recomendadas pela ABNT NB 1366) é de suma importância para garantir funcionalidade nas condições de trabalho do equipamento. Entretanto, compreendeu-se que a grande quantidade de horas gastas com a Montagem está diretamente ligada a quantidade de peças que compõem o conjunto do Tabuleiro e principalmente o tempo exigido para movimentação dessas partes e alinhamento de todo o conjunto.

Apenas no tabuleiro, foram identificadas 60 peças individuais para serem alinhadas e montadas. Isto também explica a grande quantidade de horas gastas na etapa de acabamento das peças, que por serem numerosas, geraram mais horas de trabalho para eliminação de rebarbas. O segundo maior custo, como ilustrado na Figura 16, é representado pelo torneamento somando 30% dos custos totais sendo que este tipo de processamento está presente apenas nos Conjuntos das Rodas. É importante notar que, conforme discutido na seção 4.1.1, o número de peças

empregados para sustentar as cargas das rodas (os quais somam 48 peças) é o principal contribuinte para esta alta participação do torneamento nos custos finais de processamento.

**Figura 16: Porcentagem dos Custos de Mão-de-Obra por etapa de fabricação em relação ao custo total de Mão de Obra**



**Fonte: (METALÚRGICA LUBECK EIRELI., 2020)**

A partir destas análises gerais dos custos foi possível perceber que: (1) A seleção dos Materiais empregados nos Conjuntos das Rodas de apoio são diretamente proporcionais ao custo iniciais do projeto; (2) O número de peças no conjunto das rodas é fundamental nos custos de processamento; (3) O número de peças no tabuleiro impacta diretamente os custos de Montagem, Acabamento e consequentemente custos de Soldagem (maior quantidade de metros lineares de solda).

#### 4.1.3 Análise Estrutural Estática

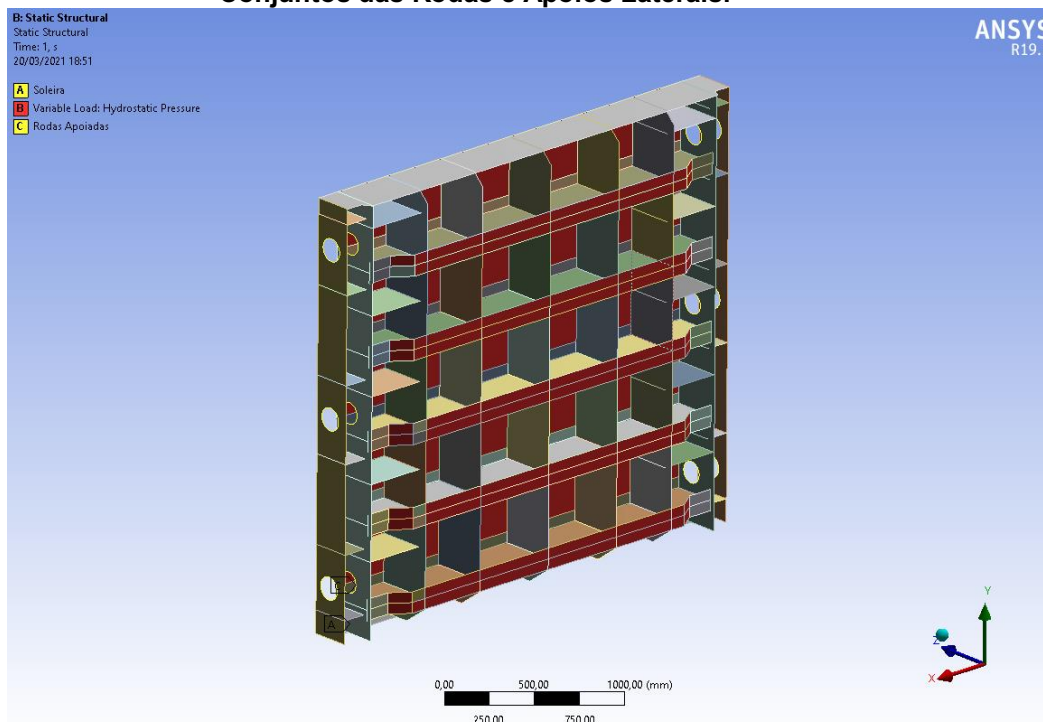
Com objetivo de compreender os gradientes de tensões, deslocamento, interações entre os componentes estruturais principais da Comporta de Estudo, foi realizado uma análise numérico pelo MEF para o auxílio na tomada de decisão. Foi suposto que apenas carregamento hidrostático estaria presente como solicitação e o seu comportamento de caráter linear elástico. Assim sendo, a Comporta estaria em posição de trabalho e efeito fluidodinâmicos como “*downpull*” não estavam presentes.

Outras considerações desprezadas em relacionado às solicitações foram a influência do peso próprio da estrutura e o a força de empuxo sobre a comporta.

Para este estudo numérico, o Conjunto das Rodas não foi discretizado e sua representação deu-se apenas por apoios virtuais (condição de contorno que restringe o movimento na direção do escoamento). Além disso, os “Apoios Laterais” (Item 4 da Tabela 1) também foram retirados da simulação por não possuírem função nesta condição de trabalho. Portanto, apenas o “Tabuleiro” (com as Vigas Horizontais e as Nervuras de reforço) e os “Apoios das Rodas” foram simplificados para geometria de superfície para economia de processamento computacional.

Uma representação das condições de contorno da geometria CAD em superfícies está ilustrado pela Figura 17. Foi aplicado um carregamento hidrostático equivalente a 10 metros de coluna d’água sobre a soleira da comporta (Carga variável trapezoidal ao longo da altura do Tabuleiro). Além disso, também foi aplicada uma restrição de movimento no eixo Z e X nas aberturas das Rodas e uma última restrição de movimentação em Y aplicada sobre a soleira da comporta (simulando o contato com o poço). Vale ressaltar que foi considerada que apenas as rodas de apoio estariam impedindo o movimento da direção Z. Ou seja, todo o carregamento hidrostático recebido pela comporta foi considerado, para efeitos de majoração, sendo transmitido apenas pelas rodas de apoio sem a presença dos Selos de Vedação.

**Figura 17: Comporta Existente simplificada para Geometria de Superfícies sem a presença dos Conjuntos das Rodas e Apoios Laterais.**

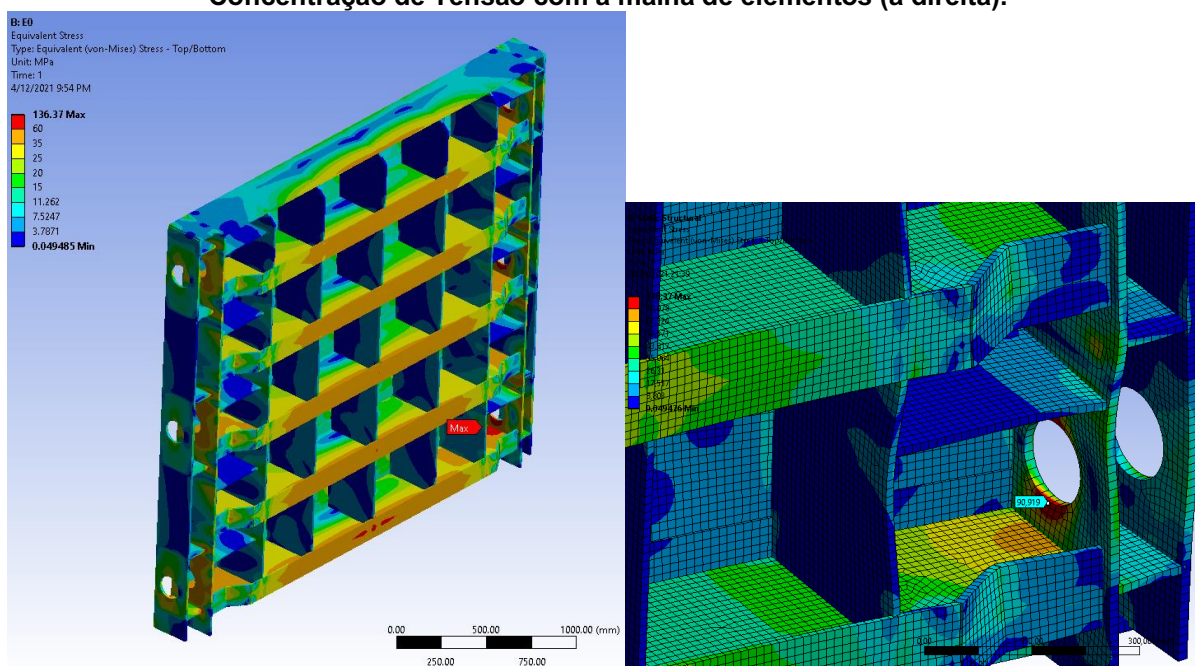


**Fonte: Autoria Própria**

Em relação à malha de elementos finitos, foram gerados pelo Ansys® Mechanical APDL um total de 137.993 elementos com seus 137.528 nós. O elemento predominante foi o SHELL181 (elemento quadrilátero com 4 nós, 6 graus de liberdade por nó, aplicável para análises lineares e estruturas finas ou médias espessuras) com uma qualidade média de 0,9848, baseado pelo critério de *Element Quality* na qual o valor máximo é 1,00.

Após a resolução do problema pelo APDL, foram retirados alguns resultados referentes às partes principais da comporta e ao equipamento completo. Na Figura 18, está ilustrado ao lado esquerdo o gradiente de tensões segundo critério de von-Mises da estrutura completa. A tensão máxima ilustrada a esquerda, a qual representou uma concentração de tensão, atingiu um valor máximo de 136,37MPa e as tensões mais expressivas atingiram a região entre a interface do apoio das rodas e as vigas horizontais (variando de 74 a 91MPa) como ilustrado com mais detalhes a direita da Figura 18.

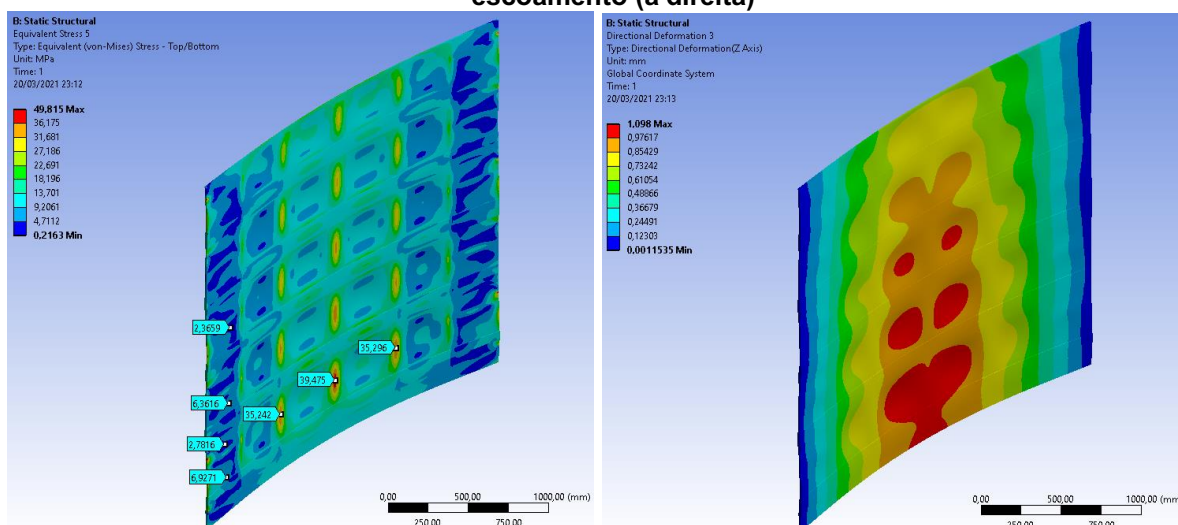
**Figura 18: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises (a esquerda) e Região com Concentração de Tensão com a malha de elementos (a direita).**



**Fonte: Autoria Própria**

O paramento, responsável por garantir a função principal do equipamento de estanquidade do escoamento, está ilustrado, isolado do conjunto, na Figura 19. As maiores tensões de von-Mises estão localizadas na menor aresta destravada (variável “a” ABNT NBR8883) da placa central mais próxima da soleira com um valor em torno de 40MPa. A direita da Figura 19 o deslocamento máximo do paramento na direção do escoamento (Eixo Z), localizado na parte inferior da Comporta, foi de 1,098mm. Outro aspecto identificado sobre o paramento é referente as bordas esquerda e direita as quais apresentaram tensões extremamente baixas em relação à média do conjunto. Essa má distribuição pode ser justificada pelas chapas posicionadas horizontalmente entre as vigas principais próximas e o apoio das rodas com pouca função de absorver tensões

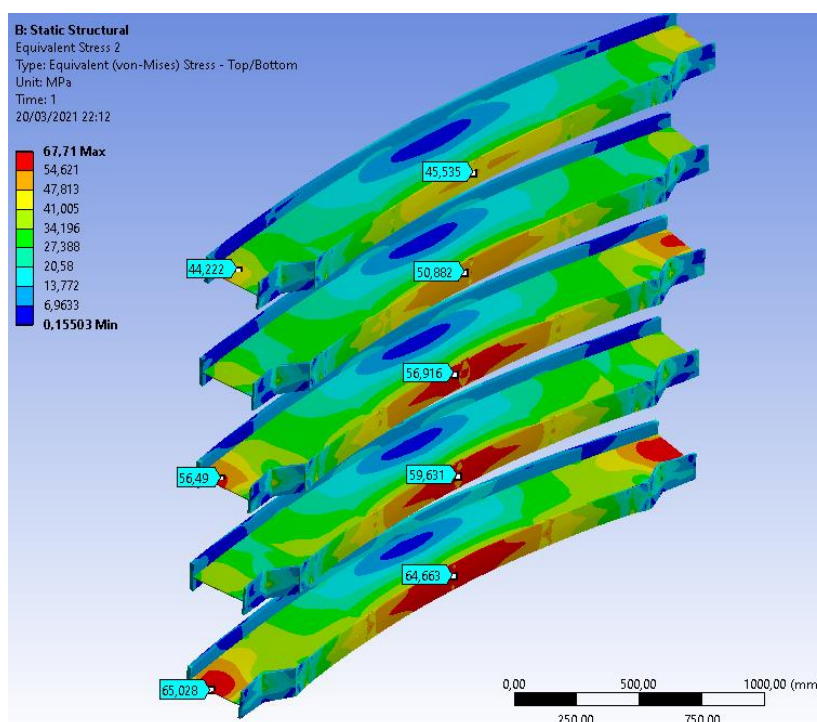
**Figura 19: Tensão equivalente de von-Mises (a esquerda) e deslocamento totais no sentido do escoamento (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

Assim como o paramento, as Vigas enrijecedoras horizontais foram analisadas conforme tensão equivalente de von-Mises, ilustradas pela Figura 20. O maior gradiente de tensão foi encontrado na região central da Viga mais próxima à soleira com valores próximos de 65MPa. Essa magnitude de tensão deve-se principalmente às tensões normais de flexão destas vigas as quais representam o principal contribuinte para a rigidez global da Comporta. Entretanto, foram identificadas tensões igualmente altas na região das vigas próximas à abertura para os eixos das rodas (valores de 65, 56 e 44MPa nas vigas 1,3 e 5 respectivamente de baixo para cima). Assim sendo, foi possível notar que esse posicionamento das vigas em relação aos eixos das rodas é um grande responsável por concentradores de tensão na estrutura. Além disso, esta proximidade é resultado de um número ímpar de vigas (5 perfis horizontais) para um número par de rodas (3 conjuntos de rodas para cada lado), ou seja, não há possibilidade de simetria das rodas em relação a estruturas principais gerando uma condição de geometria assimétrica.

**Figura 20: Tensão equivalente de von-Mises das Vigas Horizontais “W” principais**



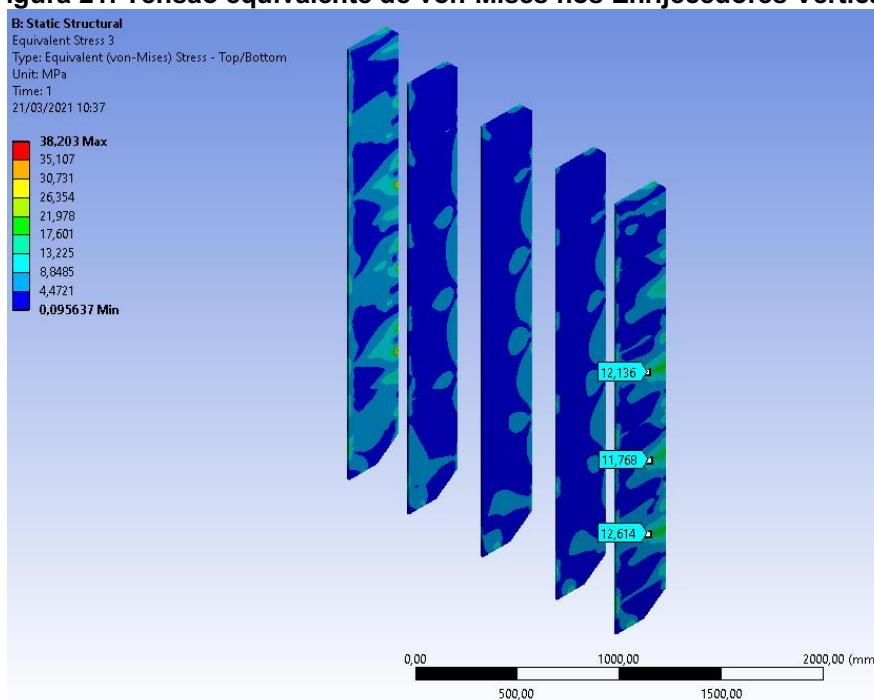
**Fonte: Autoria Própria**

Seguindo a análise, os enrijecedores (ou nervuras) verticais também foram estudados em termos numéricos. Como ilustrado na Figura 21, as tensões máximas de 38MPa representaram aspectos de singularidade de tensão, ou seja, tensões mais significativas foram mais expressivas apenas abaixo de 20MPa (isto representaria um fator de segurança ao escoamento de 12,3 vezes para o aço ASTM A36, muito acima do orientado pela ABNT NBR 8883 para casos de carga excepcional). Ainda, foi identificado que a tensão de von-Mises média de todo o conjunto das nervuras foi apenas de 4,4376MPa representando uma excessiva majoração nestes componentes.

Assim sendo, entende-se que estas placas dentro do conjunto teriam pouca função em absorver energia da carga hidrostática sendo responsáveis principalmente para a redução da altura e largura das seções do paramento (redução das tensões máximas em placas planas).



**Figura 21: Tensão equivalente de von-Mises nos Enrijecedores Verticais**



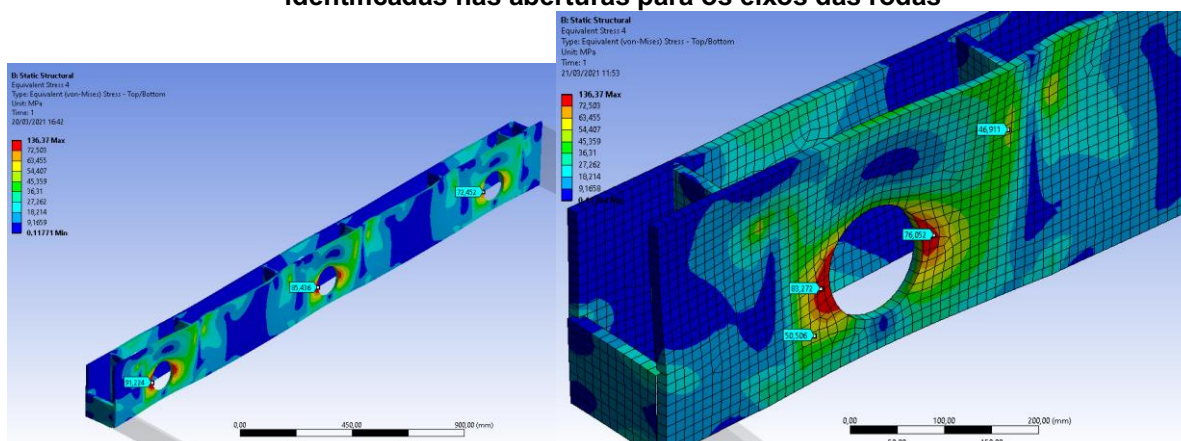
**Fonte: Autoria Própria**

Por fim, foi analisada a estrutura de apoio para o Conjunto das Rodas ainda utilizando como referência as tensões de von-Mises. Como ilustrado na Figura 22 as maiores tensões globais identificadas foram encontradas entre a transição dos apoios das rodas e as vigas horizontais com valores próximos de 95MPa (Roda mais próxima à soleira).

Estes picos de tensão podem ser justificados pela presença de concentradores de tensões típicos da mecânica estrutural (Furos, transição abrupta de geometria como pequenas curvaturas, rasgos ou cantos vivos). Neste caso, a presença da furação próxima a uma condição de contorno bem como a proximidade das vigas horizontais com estes furos, ocasionaram o aumento do gradiente de tensão. Este aspecto geométrico representa uma possibilidade de melhoria durante a geração de novos princípios de solução para solucionar o problema referente ao apoios das rodas.



**Figura 22: Distribuição de Tensão nos apoios das rodas (a esquerda) e tensões máximas identificadas nas aberturas para os eixos das rodas**



Fonte: Autoria Própria

Com estas análises foi possível identificar oportunidades de melhoria na estrutura antes mesmo de iniciar o processo de “Redesign” do equipamento. Abaixo, na Tabela 2, foi resumida as características gerais da Comporta analisadas nesta seção pelo Método dos Elemento Finitos. Os dados de discretização, massa geral do equipamento bem como as tensões e deslocamento serão utilizados como referência para as Estrutura de Trabalho posteriores. Pontos de interesse de melhoria identificados pelo MEF: (1) Redesenhar as Nervuras verticais devido as tensões médias baixas; (2) Melhoria na distribuição de tensão no paramento; (3) Redução das concentrações de tensão entre as rodas e as estruturas principais; (4) Simetria entre os componentes.

**Tabela 2: Inputs e Outputs das análises numéricas dos subconjuntos da Comporta Vagão Existente**

Partes da Comporta Vagão Inicial	Inputs						Outputs		
	n° nós	n° elemento	Element Quality (médio)	Elemento Prodrominante	Massa Aproximada	% Massa	$\sigma_{\text{von-Mises}}$ (máximo)	$\sigma_{\text{von-Mises}}$ (médio)	Deslocamento máximo em Z
Estrutura Completa	137528	137993	0,98486	SHELL181	2169,1 kg	100%	136,37 MPa	15,467 MPa	1,098 mm
Paramento	-	-	-	SHELL181	667,4 kg	30,8%	49,815 MPa	11,689 MPa	1,098 mm
Enrijecedores Horizontais	-	-	-	SHELL181	662,5 kg	30,5%	67,71 MPa	26,381 MPa	0,993 mm
Enrijecedores Verticais	-	-	-	SHELL181	489,4 kg	22,6%	38,201 MPa	4,4374 MPa	N/A mm
Apoio das Rodas	-	-	-	SHELL181	349,8 kg	16,1%	136,37 MPa	14,184 MPa	N/A mm
Conjunto das Rodas				N/A	N/A		N/A	N/A	N/A

Fonte: Autoria Própria

## 4.2 LISTA DE REQUISITOS DE PROJETO (PDC)

Para a elaboração da lista de requisitos do Projeto de Otimização, foram levadas em consideração duas questões importantes sendo que todos estes parâmetros estão ilustrados pela Tabela 3.

Primeiramente, foi esclarecido que o objetivo geral seria a *redução dos custos totais da Estrutura de Trabalho Inicial (E0)* (conforme discutida na seção 4.1.2). Ou seja, quaisquer conceitos elaborados no decorrer do desenvolvimento que desviassem deste objetivo, não seriam priorizados.

Em segundo lugar, cada requisito foi classificado como sendo um “Desejo” ou uma “Demanda” (ULMANN, 2014) no qual a primeira classificação representa requisitos que podem ou não ser atendidos durante a execução da solução analisada e o segundo são requisitos obrigatórios. Além disso, estes grupos de Desejo e Demanda assumiram valores quantitativos (valores mensuráveis, numéricos) ou descrições qualitativas. Adicionalmente, cada grupo de requisitos foram classificados em “Títulos” específicos os quais faziam parte, sendo eles: Geometria, Forças, Energia, Material, Segurança, Produção ou Manutenção (todos ilustrados na Tabela 3).

Como sendo o objetivo do PDC, boa parte dos itens da Tabela 3 eliminam ou reduzem a necessidade de criar conceitos ou pensar em soluções, diminuindo os “caminhos” possíveis de solução. Como exemplo, tem-se o item 17, onde foi definido como uma Demanda (D) a utilização de um Selo de Vedação exatamente igual à Comporta Inicial, ou seja, para o Conceito a ser desenvolvido não há necessidade de elaborar uma solução para garantir vedação da Comporta ou pensar em possibilidade de forma de vedação ou materiais vedantes. Esta característica de restringir o número de soluções é evidenciado em diversos itens, tais como: *Item 3*) 6 Conjuntos de Rodas; *Item 7*) Número máximo de Perfil de seção transversal constante igual a 6 unidades; *Item 13*) Tabuleiro deve ser de Aço carbono (AISI 1020; ASMT A572 - Gr50/60; SAC350 ou ASTM A36), dentro outras restrições listadas na Tabela 3.

Vale ressaltar ainda que esta lista de requisitos foi aprimorada, a partir de uma lista inicial à medida que foi se conhecendo melhor o problema de projeto. Ou seja, novas restrições foram surgindo visando atingir o objetivo de otimizar os custos de manufatura a partir do menor caminho possível.

**Tabela 3: Lista de Requisitos da Comporta Conceitual com cada item classificado como Desejo (W) ou Demanda (D)**

Item	Rev.	(D) ou	Requisito de Projeto	
			Descrição	Valor
			<b>Geometria</b>	
1	0	D	Largura de Passagem hidráulica	2600 mm
2	0	D	Altura de Passagem hidráulica	2600 mm
3	0	D	Número de Rodas de Apoio	6 rodas
4	0	D	Dimensões das Rodas	#4" X Ø400
5	0	D	Espessura Máxima do Paramento	1/2"
6	0	D	Menor Dimensão da Aresta Livre de Paramento ("a" ou "b")	373 mm
7	0	W	Número Máximo de Perfis de Seção Transversal Constante Horizontais	6 unid.
8	0	D	Altura máxima do perfil estrutural horizontal	600 mm
			<b>Forças</b>	
9	0	D	Deve atender a um Pressão Hidrostática de Projeto máxima sobre a soleira	10 m.c.a.
10	0	D	Deve ser reduzido o atrito entre os eixos e as rodas	N/A
11	0	D	Deve ser reduzido o atrito entre o tabuleiro e as partes embutidas através de rodas móveis	N/A
			<b>Energia</b>	
12	0	D	Sistema Hidráulico irá manobrar o equipamento	N/A
			<b>Material</b>	
13	0	D	Tabuleiro deve ser de Aço Carbono (AISI 1020; ASTM A572; ASTM A36 ou similares)	N/A
14	0	W	Eixo das rodas devem possuir resistência ao escoamento semelhante ao aço SAE 4340	N/A
15	0	D	Componentes mecânicos devem ser feitos de materiais não corrosivos ou protegidos	N/A
16	0	W	Reduzir quantidade de material total do Tabuleiro	N/A
17	0	D	Comporta deve possuir Selo de Vedação conforme modelo utilizado na Comporta Original	N/A
			<b>Segurança</b>	
18	0	D	Estar de acordo com a ABNT NBR 8883	N/A
			<b>Produção</b>	
19	0	W	Metros lineares máximo de cordões de solda	120 m
20	0	D	Perfil estrutural horizontal não pode conter mais que 4 cordões de soldas ao longo do comprimento	N/A
21	0	W	Deve ser utilizado apenas perfis e/ou chapas laminadas para o tabuleiro	N/A
22	0	W	Pode existir conformação mecânica (calandragem ou dobra) de chapas laminadas	N/A
23	0	W	Peças usinadas ou fresadas são permitidas	N/A
24	0	D	Componentes estruturais devem ser soldados (não parafusados ou rebitados)	N/A
25	0	D	Conjunto das Rodas possuir no máximo 6 componentes	N/A
			<b>Manutenção</b>	
26	0	D	Componentes mecânicos devem ser capazes de serem desmontados	N/A

**Fonte: Autoria Própria**

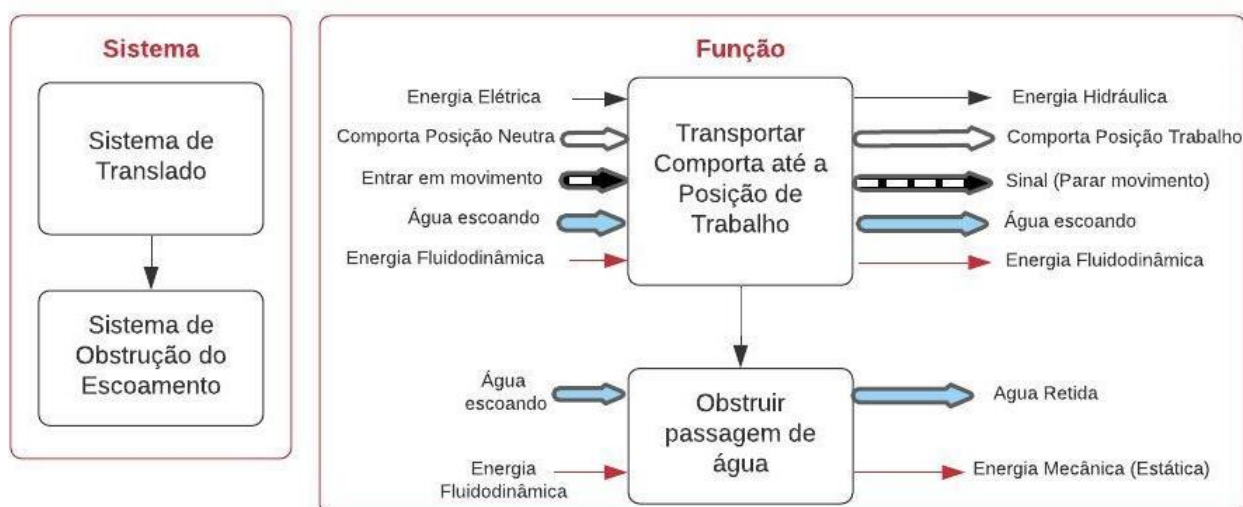
### 4.3 ESTRUTURA DE FUNÇÃO

A partir do entendimento do sistema de movimentação da Comporta Existente e das funções específicas dos componentes individuais da comporta da seção 4.1.1 foi possível elaborar uma Estrutura de Função do equipamento. Esta estrutura tem o objetivo de identificar as funções principais (separando-as em subfunções menos

genéricas) de um equipamento e com isso, dar início ao processo de sintetização dos conceitos.

Primeiramente, foram identificados dois sistemas isolados para realizar a função de interromper o escoamento do Rio para as Turbinas. Como ilustrado à esquerda da Figura 23, o primeiro sistema foi identificado como “Sistema de Translado” e o segundo como “Sistema de Obstrução do Escoamento”. Para o primeiro, a função geral identificada como “Transportar Comporta até a Posição de Trabalho” e o segundo como “Obstruir passagem de água” sendo que os fluxos de energia, sinal e material estão presentes atravessando as respectivas funções (ilustrados ao lado direito da Figura 23). As flechas menos espessas representam “energias”, as flechas mais espessas não tracejadas os “materiais” e as flechas espessas tracejas os fluxos de “sinais”.

**Figura 23: Sistemas (a esquerda) e Funções Principais destes Sistemas (a direita)**



**Fonte: Autoria Própria**

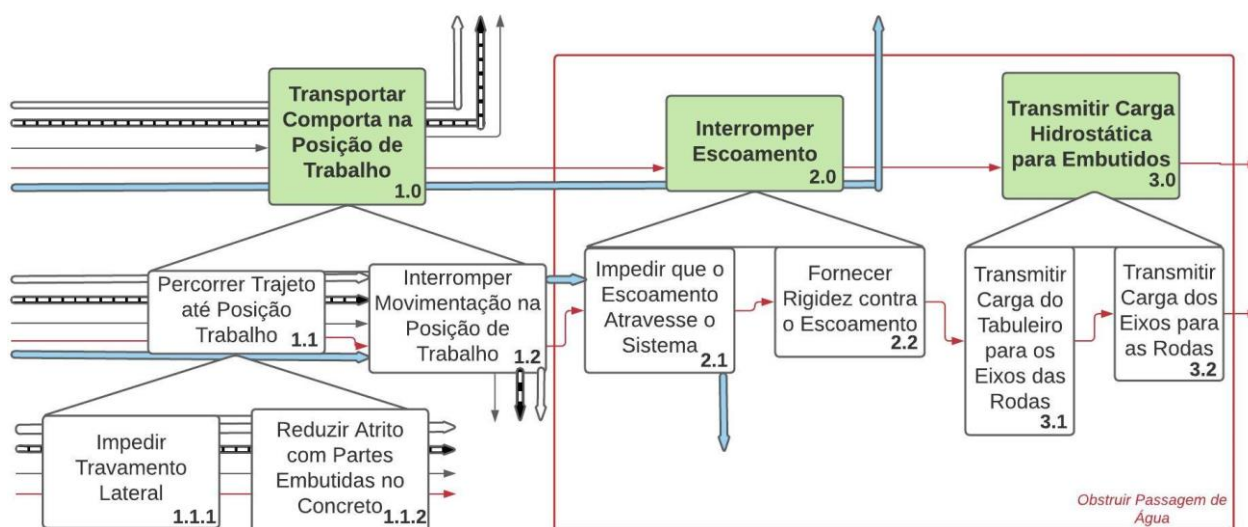
O objetivo deste trabalho é relacionado com o segundo sistema, entretanto, conhecer o sistema completo é necessário para compreender alguns componentes individuais do Comporta Hidráulica (como os “Apoios Laterais” que estão presentes na própria Comporta entretanto não cumprem função no “Sistema de Obstrução de Escoamento”).

Para que o Sistema de Translado consiga executar a sua função principal é necessário alimentação de Energia Elétrica para as bombas hidráulicas que pressurizam os pistões hidráulicas para iniciar a movimentação da Comporta. Há também uma central elétrica lógica responsável pelos sinais de avanço ou retorno do Sistema conforma a necessidade de levantamento ou descida da comporta.

Para o Sistema de Obstrução sabe-se que este próprio sistema tem a *forma* da Comporta Vagão devido a compreensão do sistema discutidos anteriormente. O primeiro fluxo deste sistema é o fluxo de material, representado pela própria água escoando através do poço da Comporta. No momento que essa função é cumprida, o escoamento é interrompido e a água é então retida (representando o fluxo “material”). O segundo é o fluxo de energia fluidodinâmica que representa a solicitação inicial que o sistema está submetido. Após a função ser cumprida, esta energia fluidodinâmica é transformada em energia mecânica quando o escoamento é interrompido.

Após esta análise inicial desses dois sistemas, as subfunções de interesse foram expandidas e estão ilustradas na Figura 24. Ambos os sistemas foram desacoplados em subfunções específicas, levando em consideração o conhecimento preliminar sobre o equipamento a partir da análise da Seção 4.1.1. As subfunções do Sistema de Obstrução estão circunscritas no retângulo em vermelho, as subfunções de interesse do Sistema de Translado estão do lado externo deste retângulo e os fluxos de energia, material e sinal seguem a mesma simbologia da Figura 23. As subfunções principais estão ilustradas pela cor verde na numeração 1.0, 2.0 e 3.0 e as funções derivadas em branco.

**Figura 24: Sistemas de Obstrução (retângulo em vermelho) e Sistema de Translado externo ao retângulo**



**Fonte: Autoria Própria**

Inicialmente, foi feita a consideração que a Comporta está na posição de neutra e o Sistema de Translado é responsável por executar a Subfunção 1.0 e todas as outras funções associadas. Para que a Comporta chegue na posição de trabalho é necessário que percorra o trajeto sem travamento (função 1.1.1 cumprida pelos “apoios laterais”) e que o atrito seja reduzido (função 1.1.2 cumprida pelas próprias rodas de apoio).

No momento que o equipamento chega à posição de trabalho pelo Sistema de Translado, a função 1.2 é cumprida e o sistema elétrico/hidráulico cessa. Nesse momento alguns os fluxos de energia, material e sinal são desviados e apenas o fluxo de “água escoando” (material) e “energia fluidodinâmica” (energia) entra no Sistema de Obstrução. Para este sistema, foram identificadas duas principais funções: 2.0) Interromper o escoamento e 3.0) Transmitir carga para os embutidos.

A primeira função é cumprida quando boa parte do fluido é retido a montante da comporta (subfunção 2.1) e o equipamento fornece rigidez suficiente para receber este carregamento hidrostático (subfunção 2.2) quando está na posição de trabalho. No momento que a função 2.0 é cumprida, o fluxo de material denotado por “água escoando” é expulso do sistema.

Claramente, as funções 2.1 e 2.2 não atuam de forma individual. Entretanto, a ilustração da Figura 24 mostra subfunções distintas com o objetivo de fornecer soluções para estas mesmas funções no decorrer do trabalho.

A segunda função principal do Sistema de Obstrução representa a carga a ser transmitida para as partes embutidas no concreto sendo que isto é cumprido por mais duas subfunções. Na primeira (subfunção 3.1) é recebido o Fluxo de Energia Hidrostática de 2.2 na qual o objetivo é transmitir esta energia para os eixos das rodas. Em seguida, deve ser transmitida a carga destes mesmos eixos para as rodas de apoio (função 3.2).

É importante ressaltar que as funções 3.1 e 3.2 estão bem definidas em termos de forma (“Rodas” e “Eixos”) pois isto já foi restringido pelo como um requisito de projeto. Ou seja, se não houvesse restrição de necessidade de “Rodas e Eixos” essa transmissão de carga (Função 3.0) poderia assumir Princípios de Trabalho ainda mais diversos.

#### 4.4 SINTETIZAÇÃO

Após a análise da Comporta Vagão Existente em termos de função de seus componentes, a análise dos custos de matéria-prima e mão de obra para sua fabricação e a capacidade estrutural do equipamento foi possível traçar os objetivos de melhoria para o *Redesign*. Em seguida, foi possível elaborar uma Lista de Requisitos e Restrições para o Projeto de Otimização (Tabela 3) e por fim, uma Estrutura de Função generalizada (Figura 24) para dar início a Sintetização dos Conceitos das próximas seções.

##### 4.4.1 Construção da Morfologia

Cada uma das 4 subfunções do Sistema de Obstrução identificadas pela Figura 24 possuem uma estrutura de trabalho a ser definida, ou seja, uma solução única para determinada função. Além disso, é importante notar que uma única estrutura de trabalho por executar uma ou mais subfunções. Como exemplo temos as “Conjunto das Rodas de Apoio” que, além de reduzir o atrito durante a descida da comporta também transmite Carregamento para as partes embutidas no concreto.

Assim sendo, por motivos de simplificação do problema de projeto e redução da quantidade de matrizes morfológicas a serem geradas, foram selecionadas apenas

as Subfunções 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2 para este estudo. Além disso, é importante salientar que estas mesmas 4 subfunções não representam o equipamento completo.

Seguindo o procedimento da geração das matrizes (seção 3.2), foram geradas as Matrizes 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2 para seguir a mesma nomenclatura das subfunções da Figura 24, ou seja, uma única Matriz Morfológica para cada uma das 4 subfunções. Assim sendo, para cada matriz foram gerados diversos Princípios de Solução (PS) sendo identificados pela nomenclatura matricial (como exemplo, PS da linha 1 e coluna 5 é representado pela forma simplificada “PS (1,5)”).

Em todas as quatro matrizes, foram utilizadas a classificação pela Otimização de Síntese Direta (ODS) para o descarte de todos os PS's com baixa performance e alta escalada de risco, sendo que (WEISS, GILBOA, 2004):

Para a classificação do PS quanto a **Performance**, foi realizado o seguinte questionamento: “O Princípio de Solução “(i,j)” atende a *todos* os requisitos do PDC?”. Conforme a resposta desta pergunta uma respectiva pontuação foi estabelecida:

- Resposta: “Sim”, Pontuação = 5;
- Resposta: “A maioria, por exceção de no máximo 2 requisitos”, Pontuação = 3;
- Resposta: “A maioria, por exceção de no máximo 3 requisitos”, Pontuação = 2;
- Resposta: “A maioria, por exceção de 4 requisitos”, Pontuação = 0

Para a classificação quanto a **Escala de Risco**, o procedimento para cada PS foi dado de forma diferente. Inicialmente foram estabelecidas três perguntas:

1. Existe a necessidade de conhecimento técnico adicional (além das grandes áreas da Engenharia Mecânica) para se utilizar este PS na Estrutura de Trabalho Final?
2. Há algum impedimento de fabricação para este PS, como investir em maquinários ou custos adicionais com terceirizações comparados a Comporta Original?
3. Há alguma dificuldade para o uso PS pelo cliente ou dificuldade de manutenção?

Dependendo da quantidade de respostas favoráveis a essas 3 perguntas, a seguinte pontuação foi atribuída:

- Resposta: “Não para todas as três perguntas”, Pontuação = 5;



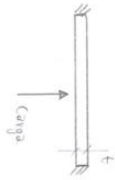
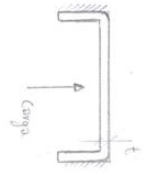
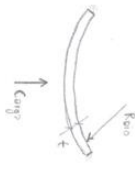
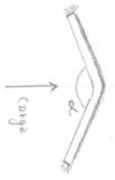
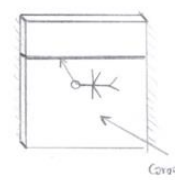
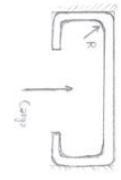
- Resposta: “Sim apenas para uma das três perguntas”, Pontuação = 3;
- Resposta: “Sim para duas das três perguntas”, Pontuação = 2;
- Resposta: “Sim para todas as três perguntas”, Pontuação = 0.

Todos os Princípios de Solução das 4 matrizes foram classificadas segundo os critérios de Performance e Escala de Risco descritos acima e estão baseadas apenas em Geometrias de Trabalho (por tipo, formato, posição, tamanho ou número). Assim sendo, os PS's gerados não variaram em aspectos de tipo de material ou mesmo por tipo de movimento, conforme restrições dos itens 13 e 14 do PDC respectivamente (PAHL, BEITZ).

Para a Matriz 2.1 (M2.1), a função principal a ser atendida é a de “Impedir que o escoamento atravessasse o Sistema” sendo que esta Matriz, classificada pelo OSD, está ilustrada pela Figura 25. Entendeu-se que essa função está principalmente associada ao paramento de comportas semelhantes (Figura 8, 9 ou 10) e a geração dos princípios não foi muito numerosa, com apenas 6 PS's.

As maiores pontuações para M2.1 foram obtidas para paramentos por chapas planas (1,1), (2,2) e (1,2) sendo que a primeira uma chapa metálica simples, a segunda com mais de duas chapas soldadas (por aproveitamento de material) e a terceira, uma chapa com dobras nas laterais por conformação a frio (com o objetivo de enrijecimento da seção). Vale ressaltar que o principal motivo das pontuações mais baixas para os outros PS's foi a solução não atender principalmente ao item 21 do PDC. É importante ressaltar também que essa construção de morfologia, os Princípios de Solução não são isolados entre si, ou seja, é possível combinar estes princípios para cumprir a função.

**Figura 25: Matriz 2.1 – Impedir que o escoamento atravesse o sistema**

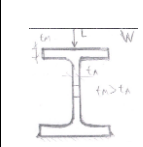

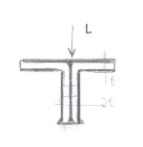
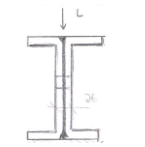
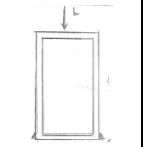
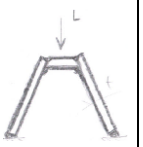
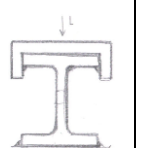

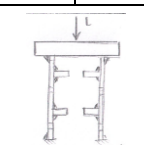
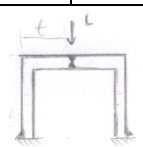
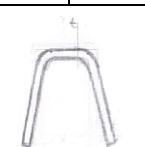
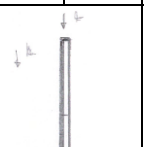
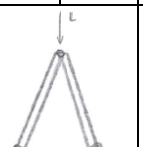
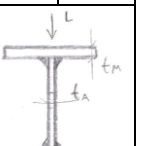

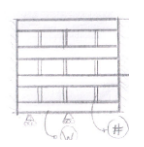
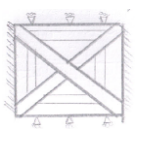

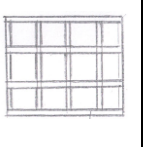
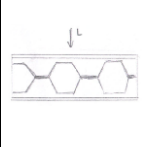
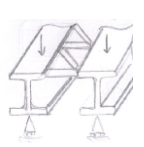
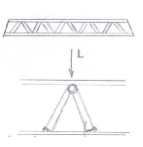
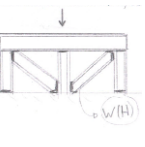
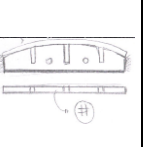
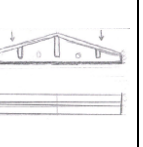
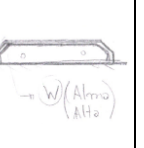
	1	2	3
1			
	5 5	5 3	2 2
2			
	2 0	5 5	5 2

**Fonte: Autoria Própria**

A Matriz 2.2 (M2.2), com objetivo de atender a função: “Fornecer rigidez contra o escoamento” apresentou a maior quantidade de PS’s somando um total de 26 sendo ilustrados pela Figura 26 e classificados conforme o ODS. Para a geração desta matriz, optou-se por definir poucas restrições na Lista de Requisitos com o objetivo de gerar um número maior de possíveis soluções. Pois, como analisado na seção 4.1.2, a grande parte do custo de manufatura de Comportas deste tipo estão concentradas nos componentes que fornecem rigidez mecânica na estrutura.

Os Princípios de Solução da Figura 26, estão organizados em subgrupos, todos eles direcionados a cumprir a função da matriz de fornecer rigidez contra escoamento. Nas linhas 1 e 2 estão agrupadas as possíveis soluções para seções transversais (encontradas pelo autor), na linha 3 os possíveis arranjos desses perfis e por fim, a linha 4 onde foram geradas soluções quanto a forma que os perfis das linhas 1 e 2 poderiam ser rearranjados no tabuleiro.

**Figura 26: Matriz 2.2 – Fornecer Rigidez contra Escoamento**

	1	2	3	4	5	6	7
1							
	5 5	2 5	5 3	5 5	5 5	3 3	5 3
2							
	3 3	2 2	5 3	5 3	5 3	5 3	5 5
3							
	5 5	5 5	3 3	5 5	5 5		
4							
	5 2	3 2	3 2	3 2	5 3	5 3	5 5

Fonte: Autoria Própria

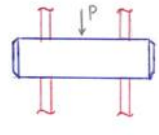
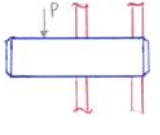
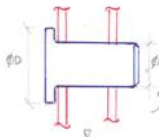
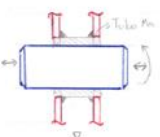
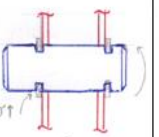
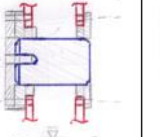
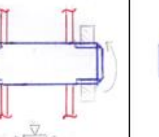
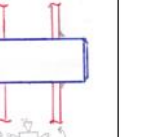
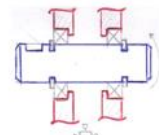
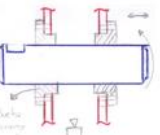
Claramente, a eficiência dos perfis das linhas 1 e 2 (em termos de rigidez contra flexão, por exemplo), está diretamente associada a parâmetros bem conhecidos da Mecânica dos Sólidos como o momento de inércia de área ou estudos da estabilidade a flambagem do perfil. Entretanto, as formas de perfis geradas na M2.2 apenas dizem respeito a condições geométricas com o objetivo de comparar as alternativas que melhor se aplica dadas condições de projeto.

Para os perfis estruturais das linhas 1 e 2 foram identificados perfis encontrados comercialmente (Vigas “W”, “U”, Cantoneira de abas iguais e Viga retangular), perfis formados por chapas soldadas entre si (Vigas “T” com espessuras de alma e mesa distintas, Vigas do tipo “Caixão”, etc) e perfis de chapas laminadas conformadas por dobra. Todos estes perfis possuem, no mínimo, 2 cordões de soldas para uni-los sobre a geometria de trabalho da Matriz 1.2, o paramento. Os arranjos dos perfis (PS’s da linha 3) foram simplificados de forma a serem simétricos nos dois eixos conforme restrição do item 9 do PDC. Por fim, a forma do comprimento do perfil (PS’s da linha

4) variam entre perfis com seção constante, perfil seção variáveis, tipo treliças e vigas do tipo alveolares.

A Matriz 3.1 (M3.1), a qual a função seria “Transmitir carga hidrostática para os eixos das rodas” foi separada em três grupos, conforme Figura 27. Na linha 1, a classificação é feita por tipo de apoio no eixo (Eixo bi-apoiado, PS(1,1) ou em balanço, PS (1,2) em relação à carga aplicada das rodas), na linha 2, os eixos são considerados fixos na estrutura enquanto na linha 3 os princípios de solução são baseados em eixos não fixos na estrutura, ou seja, eixos rotativos com as rodas fixas nos mesmos.

**Figura 27: Matriz 3.1 – Transmitir carregamento hidrostática para o eixo das rodas**

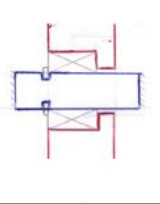
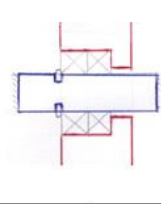
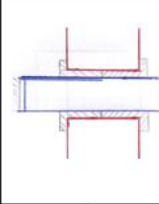
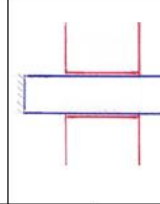
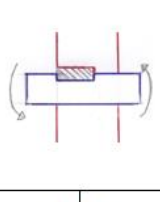
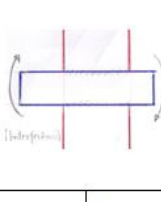
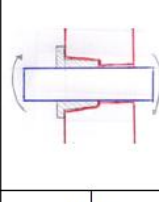
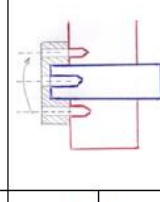
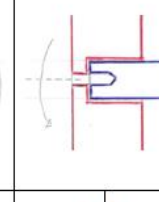
	1	2	3	4	5	6
1						
	5 5	5 5				
2						
	2 3	5 5	3 3	3 5	3 5	2 3
3						
	3 5	2 5				

Fonte: Autoria Própria

Para a última matriz da subfunção 3.2 (M3.2), os Princípios de Solução estão ilustrado pela Figura 28 com todos os PS's classificados conforme ODS sendo que os princípios desta matriz foram separados apenas em 2 grupos diferente. Na linha 1, a relação entre a roda (esboçada em vermelho) e o eixo (em azul) é rotativa, ou seja, o eixo pode rotacionar em relação às rodas. Na segunda linha, os eixos são fixados nas rodas e todo o conjunto tem a capacidade de rotacionar. Vale ressaltar que esta última matriz está diretamente ligada com a matriz 3.1. Assim sendo, para que as rodas possam estar fixas no eixo (linha 2, matriz 3.2) os eixos devem estar fixos na estrutura

(linha 2, matriz 3.1) sendo que ele é valido para as outras linhas dos PS de ambas as matrizes.

**Figura 28: Matriz 3.2 – Transmitir cargas dos eixos para as rodas**

	1	2	3	4	5	
1						
	5 3	5 3	5 5	3 2		
2						
	5 3	3 3	3 5	5 5	5 5	

**Fonte: Autoria Própria**

Como foi possível observar pelos princípios de solução das Matrizes 3.1 e 3.2 são relacionadas ao conjunto das rodas e ambas as Matrizes se relacionam diretamente. Se, por exemplo, uma Estrutura de Trabalho possuir qualquer Princípio de Solução da Linha 2 da Matriz 3.1 (eixos fixos na estrutura), logo nenhum dos PS's da Linha 2 da Matriz 3.2 (eixos rotativos) poderiam ser selecionados pois estes princípios são excludentes entre si.

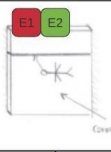
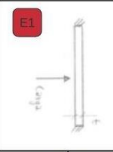
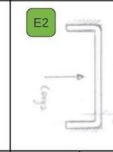
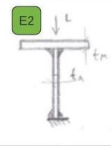

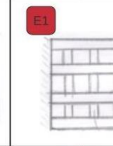
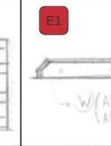
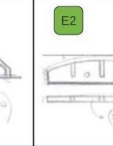
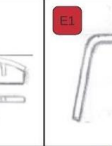

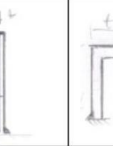
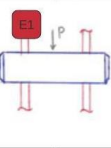
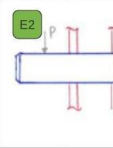
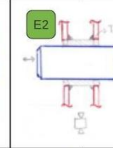
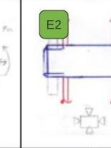
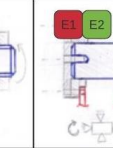
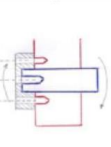
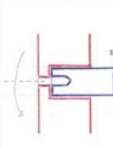
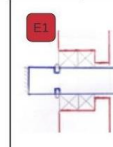
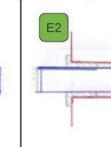
Outro aspecto relevante identificado foi a relação das Matrizes 3.1 e 3.2 (Conjunto das Rodas) com as Matrizes 2.1 e 2.2 (Conjunto Estrutural). Dependendo da escolha do PS das matrizes dos Conjuntos das Rodas, a geometria do Conjunto Estrutural teria que se adaptar para abrigar os eixos e as rodas. Este aspecto será melhor abordado na seção 4.4.2 onde as Estruturas de Trabalho serão definidas a partir destas matrizes sintetizadas até o momento.

#### 4.4.2 Seleção das Estruturas de Trabalho

Conforme seção anterior, foram geradas 4 matrizes morfológicas para o cumprimento de cada subfunção. Cada matriz foi então ranqueada conforme critério de OSD e, nesta seção, os Princípios de Solução com melhores pontuações foram agrupados em uma matriz global simplificada (denominada de Matriz GS) como ilustra a Figura 29. Os princípios foram reduzidos de um total de 51 para apenas 20 princípios com pontuações variadas. Foram retiradas das matrizes 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2 os PS's com pontuações correspondentes apenas a (5,5), (3,5) e (5,3), ou seja, as melhores pontuações obtidas das matrizes segundo critérios de Performance e Escala de Risco.

Em seguida, cada PS da Matriz GS da Figura 29 foram agrupados em dois grupos distintos: Estrutura de Trabalho 1 (denotado por "E1") e Estrutura de Trabalho 2 ("E2"). Na Figura 29, o conjunto de todos os quadrados em vermelho representam E1 e o conjunto de todos os quadrados em verde representam E2. Foi preferível, na escolha das estruturas de trabalho, evitar selecionar princípios de solução que se assemelharam com a Comporta Vagão atual com o objetivo de estudar as novas alternativas conceituais.

**Figura 29: Matriz GS – Matriz Global Simplificada e as Estrutura de Trabalho 1 (conjunto de quadrados em vermelho) e 2 (conjunto de quadrados em verde)**

	1	2	3	4	5	6	7	8
Subfunção 2.1 (1)								
	5 5	5 5	5 3					
Subfunção 2.2 (2)								
	5 5	5 5	5 5	5 5	5 3	5 3	5 3	5 3
Subfunção 3.2 (3)								
	5 5	5 5	5 3	5 3	3 5			
Subfunção 3.3 (4)								
	5 5	5 5	5 3	5 3				

**Fonte: Autoria Própria**

Para E1, a subfunção 2.1 foi cumprida pelo princípio de Solução que continha o paramento soldado e o paramento plano (PS (1,1) e PS (1,2) da Matriz GS) devido à sua simplicidade de implementação. A subfunção 2.2 exigiu uma análise mais individualizada dos PS's e para E1 foi definido a seção transversal fabricada por chapa plana conformada a frio (PS (2,6) da Matriz GS) sendo que este perfil seria o único para todo o enrijecimento do tabuleiro (PS (2,3)). Assim sendo tanto os perfil horizontais e os perfis verticais teriam o mesmo perfil tipo "U" conformado a frio. O objetivo da escolha dessa solução de enrijecimento foi a redução drástica na quantidade de metros linear de soldas (devido as dobras dos perfis), a possível redução da quantidade de componentes finais do tabuleiro e a capacidade deste perfil aumentar a rigidez do paramento.

Para o Conjunto das Rodas desta primeira Estrutura de Trabalho, foram escolhidos eixos bi apoiados travados na estruturas por tampas aparafusadas no tabuleiro, ou seja, a união de PS(3,1) e PS(3,5) para cumprir a subfunção 3.2. Por fim, como foram considerados os eixos fixados no tabuleiro pela Subfunção 3.2, a

subfunção 3.3 ficou limitada a seleção do PS (4,3) ou (4,4) sendo que o primeiro foi o escolhido para E1.

Para a última Estrutura de Trabalho, a E2, o mesmo procedimento de seleção dos PS foi adotado. Para o cumprimento da Subfunção 2.1, foi escolhido o paramento de chapas laminada soldadas com as bordas conformadas a frio. Os perfis adotados (para o cumprimento da subfunção 2.2) também foram baseadas em chapas laminadas com algum grau de processamento. Foi selecionado o perfil do Tipo “T” para o enrijecimento horizontal sendo que a mesa do perfil formada por uma chapa mais espessa (aumento do momento de inércia contra flexão) e a alma por uma chapa de espessura inferior (PS (2,1)). Além disso, foi adotado um segundo perfil (PS (2,7)) para atuar como enrijecedor vertical semelhantes ao perfil utilizados na Comporta Original devido a sua aparente simplicidade.

Para E2 foi adotado um eixo em balanço (PS (3,2)) fixado na estrutura por flanges aparafusadas no tabuleiro (PS (3,5)) como na Estrutura de Trabalho 1. As rodas são móveis em relação ao eixo e o atrito é reduzido pela presença de buchas de bronze (PS (4,4)).

Como descrito, as Estrutura de Trabalho 1 e 2 não foram apenas definidas por critérios das pontuações. Ou seja, o método de OSD apenas representou uma eliminação das soluções que não atendiam requisitos mínimos do objetivo geral de redução dos custos de manufatura. Assim sendo, a seleção das Estruturas de Trabalho 1 e 2, a partir da Matriz GS ficaram a critério do autor e não apenas no método de seleção dos Princípios de Solução pois diversas pontuações iguais.

#### 4.5 AVALIAÇÃO CONCEITUAL

Com as estruturas de trabalho E1 e E2 geradas na seção 4.4 foi possível dar início ao processo de Avaliação desses modelos. Esta seção tem início pela modelagem computacional das Estruturas de Trabalho E1 e E2 utilizando ferramentas CAD seguido do comparativo de performance estrutural desses modelos a partir de resultados numéricos obtidos pelo MEF. A última seção representa a seleção de um modelo conceitual final e a análise comparativa com o modelo existentes em termos das melhorias conceituais propostas.



#### 4.5.1 Modelagem Computacional

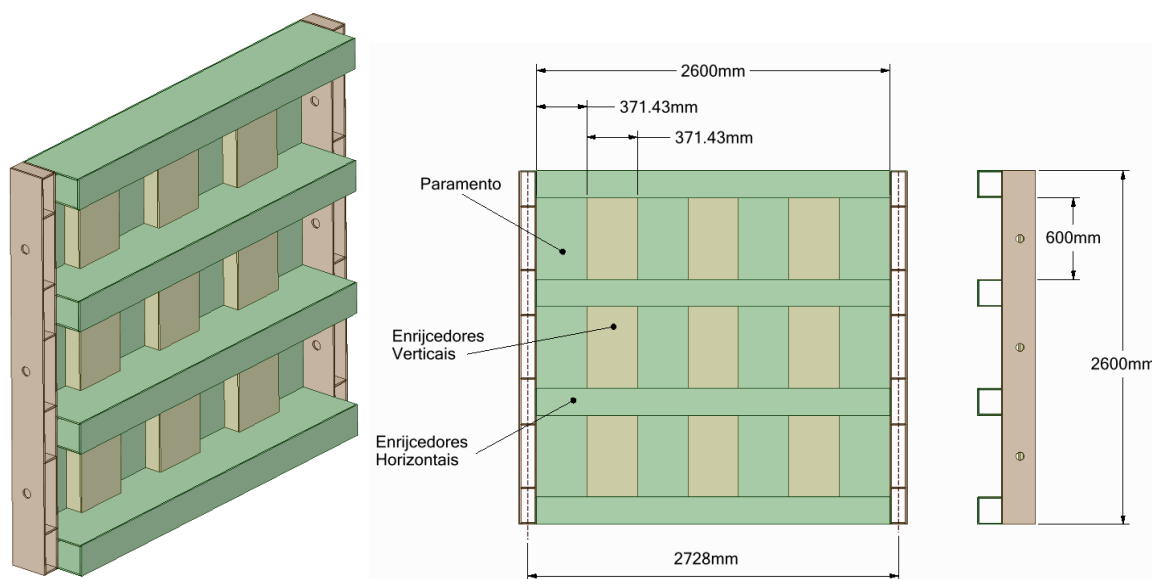
Após a definição das Estruturas de Trabalho 1 e 2, proveniente das Matrizes Morfológicas na seção 4.4.1, dois modelos CAD (*Computed Aided Design*) foram gerados. O objetivo desses modelos tridimensionais foi de incorporá-los na Análise por Elementos Finitos para validação conceitual e, portanto, não representam um modelo final do equipamento.

Analisando o modelo CAD da Comporta Existente (Tabela 1) é importante notar o modelo possui diversas peças, principalmente no conjunto das rodas, que, para fins de análise numérica, foram simplificados para E1 e E2. Assim sendo, mesmo com as definições das soluções das Subfunções 3.1 e 3.2, os princípios de solução das Matrizes 3.1 e 3.2 não foram modelados em CAD pois serão simplificados por apoio virtuais no desenvolvimento do estudo pelo Método dos Elementos Finitos. Ou seja, as Matrizes 3.1 e 3.2 apenas tiveram a função dentro do trabalho para definir a “forma” do Tabuleiro das Estruturas de Trabalho E1 e E2.

Para o primeiro modelo (E1) foi elaborado um CAD desta estrutura de trabalho ilustrado pela Figura 30. Como mostrado no lado direito da Figura, as dimensões principais foram mantidas conforma a comporta existente (2600mm Altura por 2600mm de Largura com 2728mm entre centro das Rodas). Ainda na Figura 30, está ilustrada a vista isométrica do modelo CAD simplificado desta Estrutura de Trabalho.

Para o dimensionamento do Paramento de uma Comporta Hidráulica é necessário que estes componentes sejam reduzidos em retângulos menores com largura “a” e altura “b” conforme recomendações da ABNT NBR 8883 para a redução das tensões nessas placas. Em E1 foi idealizado que para reduzir as dimensões do paramento os enrijecedores verticais seriam formados por perfis “U” mais largos e mais baixos para reduzir estas dimensões “a” e “b”. Como ilustrado na Figura 30, paramento foi delimitado pelos perfis verticais e horizontais de forma que ficassem com seções de “a” = 600mm de altura e “b” = 371mm de largura.

**Figura 30: Geometria da Estrutura de Trabalho 1. A esquerda está representada E1 em perspectiva e a direita as partes e dimensões principais.**

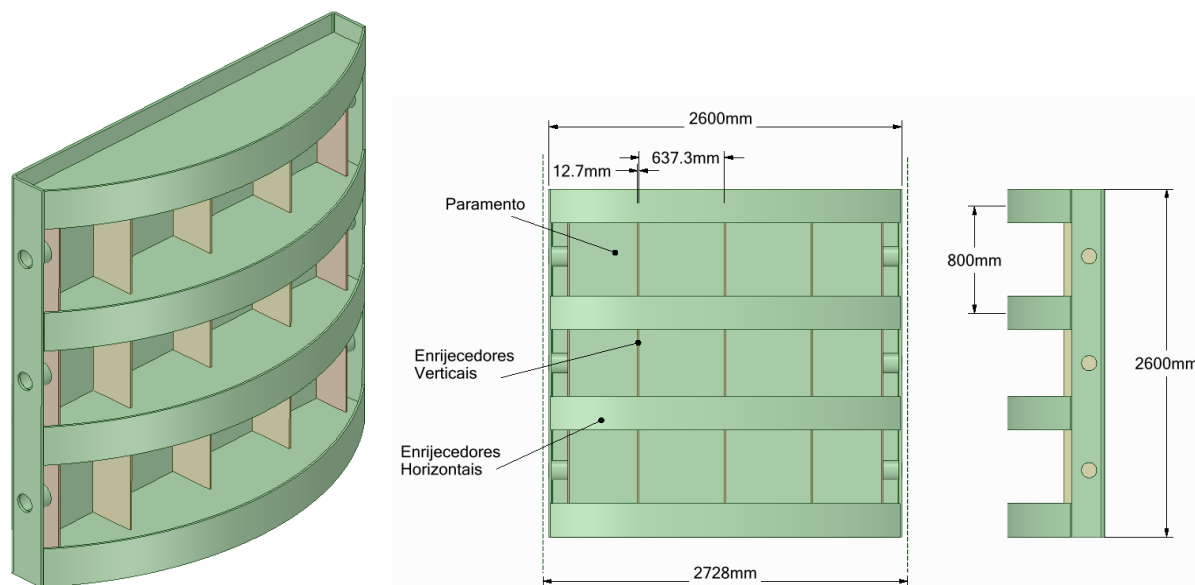


**Fonte: Autoria Própria**

Para a Estrutura de Trabalho 2, também foram modelados em CAD os Princípios de Trabalho definidos nas Matrizes Morfológicas da Matriz GS. Como ilustrado à direita da Figura 31, as dimensões principais foram mantidas iguais da Estrutura de Trabalho E1 (2600mm por 2600mm de vão hidráulico e 2728mm entre centros das rodas).

É importante considerar que as distâncias entre os centros das rodas (2728mm) estão localizadas na parte exterior da estrutura pois, como foi definido como Princípio de Solução, os eixos não possuem apoio em uma de suas extremidades. Além disso, os enrijecedores horizontais foram definidos pelo perfil de “T” e os enrijecedores verticais como chapas planas conforme os PS escolhidos como proposta de solução do problema. O paramento foi delimitado pelos perfis verticais e horizontais de forma que ficassem com seções retangulares de “a” = 800mm de altura e “b” = 637mm de largura.

**Figura 31: Geometria da Estrutura de Trabalho 2. A esquerda está representada E2 em perspectiva e a direita as partes e dimensões principais.**



**Fonte: Autoria Própria**

Após a modelagem das duas Estruturas de Trabalho, foram extraídos alguns parâmetros com o objetivo de comparação com a Comporta Existente ou Original (denotado por “E0”). É importante salientar ainda que, apesar de E0 representar um modelo CAD final, ou seja, um modelo final de fabricação, ainda é possível utilizá-la como uma referência nas sucessivas tomadas de decisão.

Como ilustrado pela Tabela 4, aspectos gerais das massas (por componentes principais), quantidade de peças totais do tabuleiro e metros lineares de solda foram extraídos dos modelos CAD de E0, E1 e E2 para fins comparativos. Além disso, todo o dimensionamento preliminar das Geometrias CAD de E1 e E2 (espessura das chapas laminadas dos tabuleiros) foram realizadas de forma iterativa com o MEF para cada Estrutura de Trabalho até a definição de uma Geometria que se assemelhasse à Comporta Original.

A primeira Estrutura de trabalho (E1) apresentou um paramento com massa inferior aos outros modelos enquanto suas vigas principais ou enrijecedores horizontais apresentaram massa mais alta em relação às demais. A segunda estrutura (E2) apresentou um paramento com peso excessivo com mais de 50% da massa total apenas neste componente. Entretanto as vigas principais e os enrijecedores verticais com pesos abaixo da média dos 3 modelos comparados. Vale salientar que E2 apresentou essa diferença devido ao cálculo dimensional preliminar da espessura do paramento pois, devido as grandes dimensões das placas ( $a = 800\text{mm}$  e  $b = 637\text{mm}$ ,

Figura 31) foi necessária uma espessura de  $\frac{3}{4}$ " de polegada para atender requisitos de segurança das tensões atuantes.

Com relação à quantidade de peças presentes em cada modelo, foram identificadas 88 peças em E0 enquanto para E1 e E2 as quantidades de peças não ultrapassaram 33 e 31 peças respectivamente.

O último aspecto relevante observado na modelagem de E1 e E2 foi a quantidade reduzida de metros lineares de solda necessárias para unir todas as peças do tabuleiro. Foi feita a consideração que todos os modelos foram soldados 100%, ou seja, não há soldas intermitentes. A menor quantidade de solda foi encontrada para E1 pois esta estrutura apresenta boa parte de seus componentes conformados a frio. Para E2, a quantidade linear necessária de solda ainda foi inferior a E0 principalmente devido à pouca quantidade de enrijecedores verticais embora as vigas principais precisaram ser soldadas para obtenção do perfil "T". Essa pouca quantidade de componentes verticais também explicou a alta espessura do paramento de  $\frac{3}{4}$ " de polegada de E2.

**Tabela 4: Comparativo entre as Estruturas de Trabalho E0, E1 e E3 em termos de Geometria CAD.**

Parâmetro		E0	E1	E2
Massa (kg)	Total	2169.3	1818.1	2069.12
	Paramento	668	506.7	1192.22
	Vigas Horizontais	662.5	793	569.5
	Enrijecedores Verticais	489	235.7	205.3
	Apoio das Rodas	349.8	282.7	102.1
Quantidade de Peças do tabuleiro		88	33	31
Metros Lineares de Solda (m)		95.7	49.61	61.31

Fonte: Autoria Própria.

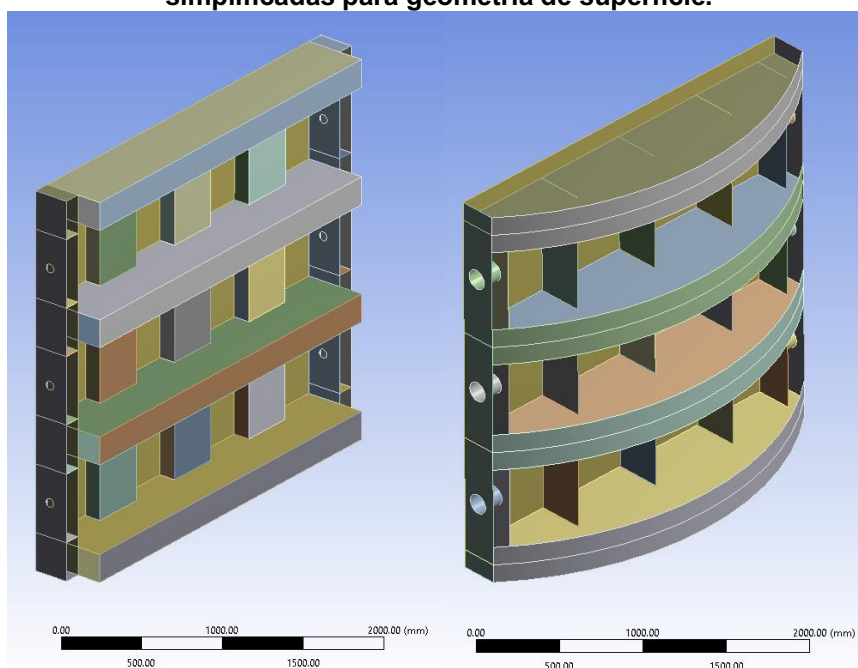
#### 4.5.2 Características dos Modelos Numéricos

Como todas as estruturas de trabalho foram baseadas em chapas laminadas (independentemente do tipo de processamento as quais foram submetidas), para a análise pelo MEF, as espessuras puderam ser simplificadas. Ou seja, ambos os modelos CAD formados por chapas metálicas tridimensionais foram simplificados para geometrias de superfície (para geração de elemento finitos de casa) conforme

ilustrado pela Figura 32. Essas simplificações geométricas permitem que elementos com menor grau de liberdade serão gerados que, conseqüentemente, encurtam o tempo de processamento total.

Além da simplificação geométrica, para ambos os modelos foram aplicadas as condições de contorno semelhantes ao modelo E0. Para E1 e E2 foi aplicada em toda a área a montante da comporta, um carregamento hidrostático proporcional à 10m.c.a de coluna máxima sobre a soleira. Além disso foram inseridos apoios virtuais na região dos eixos das rodas para manter a condição de equilíbrio estático da análise.

**Figura 32: Estrutura de Trabalho 1 (a esquerda) e Estrutura de Trabalho 2 (a direita) simplificadas para geometria de superfície.**



**Fonte: Autoria Própria.**

Para os elementos discretos gerados para as Estruturas de trabalho E1 e E2, foi realizado um comparativo dessas características com o modelo da Comporta Real (denominado por E0 nesta seção) como ilustrado na Tabela 5. Essa comparação foi realizada com objetivo de manter alguns parâmetros próximos do modelo inicial afim de não comprometer a veracidade dos resultados numéricos.

A quantidade de Elementos Finitos totais de E1 e E2 obtiveram variação de - 8,07% até +3,04% e a quantidade de nós uma variação de -7,68% até +6,5% em relação ao modelo E0. Essa variação na quantidade de elementos e nós superou 5% de margem estipulado em relação a E0, entretanto, para este estudo, foi considerado

aceitável essa margem dada a quantidade de elementos superiores 130 mil por Estrutura de Trabalho.

O Critério de *Element Quality* de E1 e E2 variaram de +0,63% a +0,48% em relação à E0 representando uma diferença pouco significativa na qualidade dos elementos totais. Além disso, em todos os modelos, os elementos predominantes foram o “SOLID181” assim como no modelo da Comporta original estudada. Assim ambos os modelos gerados pelo Mechanical APDL® puderam ser comparados reduzindo a margem de erro proveniente das aproximações numéricas.

**Tabela 5: Comparativo de parâmetros de pré-processamento entre E0, E1 e E2.**

Parâmetro	E0	E1	er. %E1	E2	er. %E2
Critério <i>Element Quality</i>	0.9886	0.9824	0.63%	0.9839	0.48%
Quantidade de Elementos	137918	149053	-8.07%	133728	3.04%
Quantidade de Nós	137453	148005	-7.68%	128525	6.50%
Tipo de Elemento	Tridimensional	Tridimensional	-	Tridimensional	-
Elementos Predominantes	SOLID181	SOLID181	-	SOLID181	-

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.5.3 Resultados Numéricos

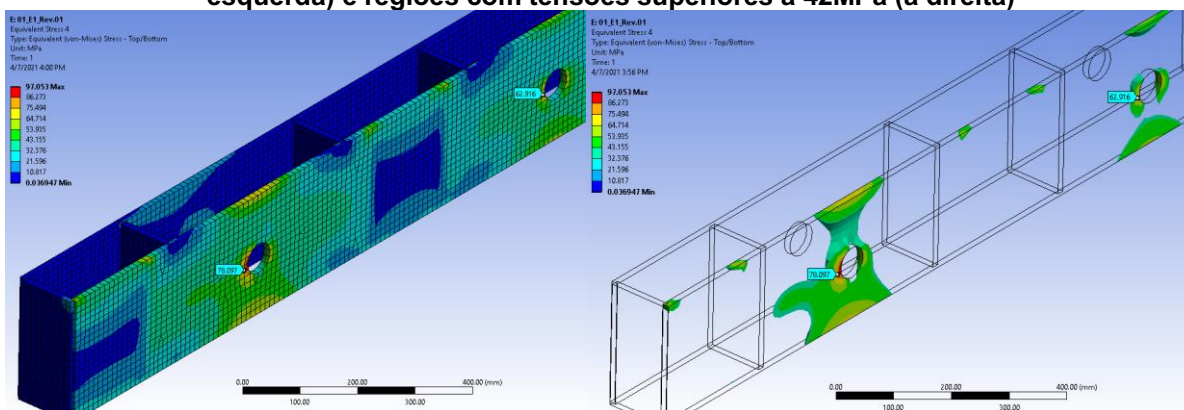
Com os modelos conceituais em formato CAD de E1 e E2 definidos, as simplificações geométricas para elementos de superfície e aplicação das condições de contorno, foi possível então, obter resultados pelo MEF. As análises apresentadas nessa seção possuem o objetivo de comparação entre E1 e E2 (em termos estruturais e, portanto, um comparativo de desempenho técnico) para o auxílio na definição do conceito final. Foram analisadas as 4 partes principais de ambos os modelos 1) Apoio das Rodas; 2) Vigas Principais; 3) Paramento e os 4) Enrijecedores Verticais. Todos os modelos foram analisados em termos de tensão equivalente de von-Mises máximas atuantes e tensões de von-Mises médias por conjunto.

Para o primeiro grupo, a estrutura de Apoio das Rodas, foi analisada o aspecto geral do gradiente de tensão de E1 (ilustrado ao lado esquerdo da Figura 33) sendo que a tensão média em todo o conjunto foi de 13,2MPa com um valor máximo de 97MPa. Ainda sobre E1, foram observadas tensões mais significativas acima de 42MPa sobre a região de apoio dos eixos (lado direito da Figura 33). Comparativamente, E2 obteve 12,2MPa de tensão média de von-Mises e tensões

significativas acima de 18MPa em torno das aberturas para os eixos das rodas ilustrado na Figura 34.

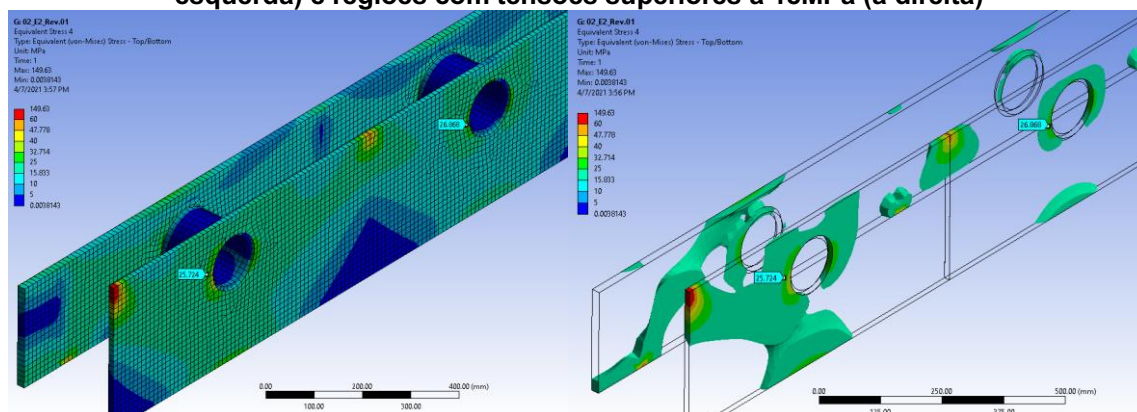
Com estes valores foi possível observar que E2 obteve menores magnitudes de tensão pela presença de concentradores de tensões menores e a presença do tubo mecânico para suporte dos eixos das rodas. Além disso, a quantidade de peças de E2 são inferiores E1 pois, parte do Apoio das Rodas de E2, é o próprio paramento conformado a frio. Sendo assim, para E2 completar a função de apoiar os eixos são necessários apenas 3 chapas soldadas ao paramento e os 3 tubos mecânicos para apoiar os eixos.

**Figura 33: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises com malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 42MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 34: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises com malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 18MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

O Segundo conjunto de componentes principais analisados foram as Vigas principais de E1 e E2. O primeiro modelo, como ilustrado na Figura 35, obteve tensões máximas próximas a 85MPa, tensões médias de 16,5MPa sendo que as tensões mais

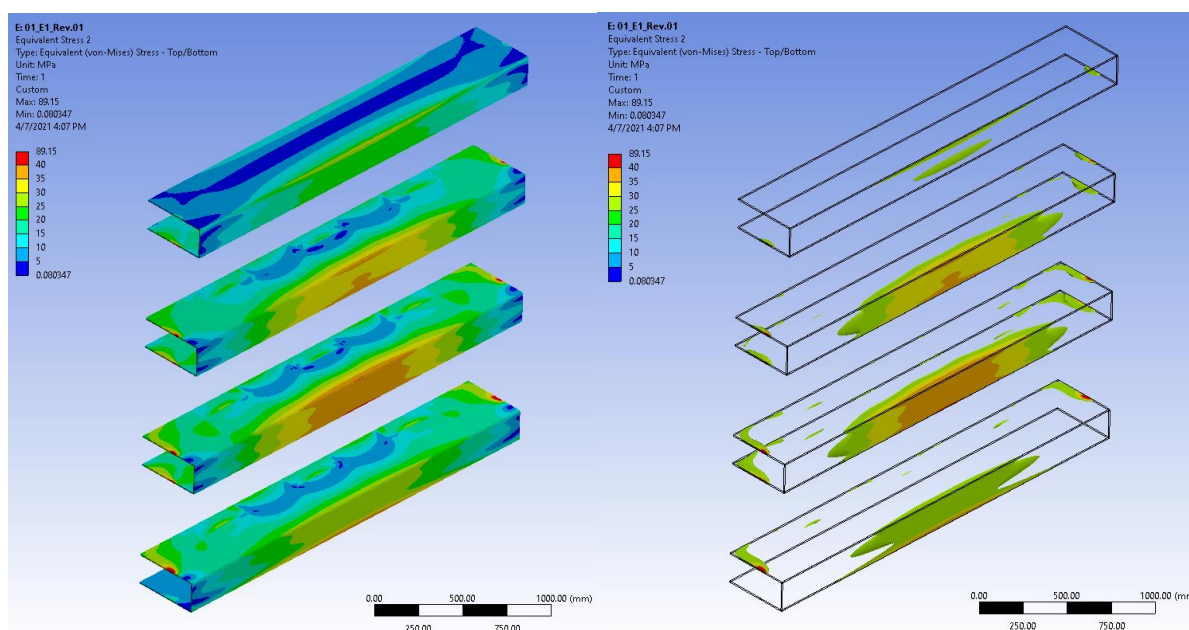


significativas foram mais expressivas apenas acima de 25MPa nas vigas U conformadas a frio (ilustrado ao lado direito da Figura 35). Para o segundo o modelo E2, foram identificados picos de tensão nas extremidades de engaste que, pela tensão abranger uma grande quantidade de elemento, não foi considerada uma singularidade de tensão, mas sim um concentrador de tensão. Assim sendo, para E2, tensões mais significativas foram observadas para tensões acima de 25MPa, muito próximo ao modelo E1 como ilustrado ao lado direito da Figura 36.

Considerando o desempenho de ambos os perfis quando ao carregamento estático, não houve diferente significativa nas tensões equivalentes principais. Caso os perfis fossem analisados individualmente e não considerando aspectos de fabricação, as vigas de E2 obteriam melhor aprovação pois possuem 28% a menos de massa em relação a E1 para absorver o mesmo carregamento. Entretanto, a geometria das Vigas de E1 permitem que o paramento possua seções menores sendo responsável por diminuir a espessura do paramento.

É importante salientar ainda que as Vigas de E1 e E2 estão sendo analisado apenas sob critério de escoamento, ou seja, ambos os perfis podem estar suscetíveis a instabilidades elásticas como flambagem de alma, mesa ou lateral por torção que devem ser analisadas após a definição do conceito.

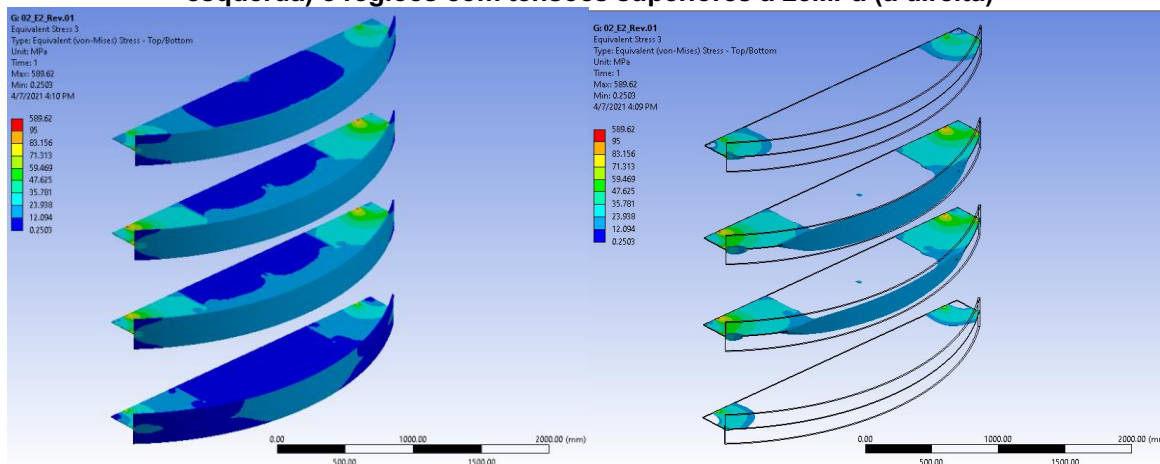
**Figura 35: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria



**Figura 36: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita)**



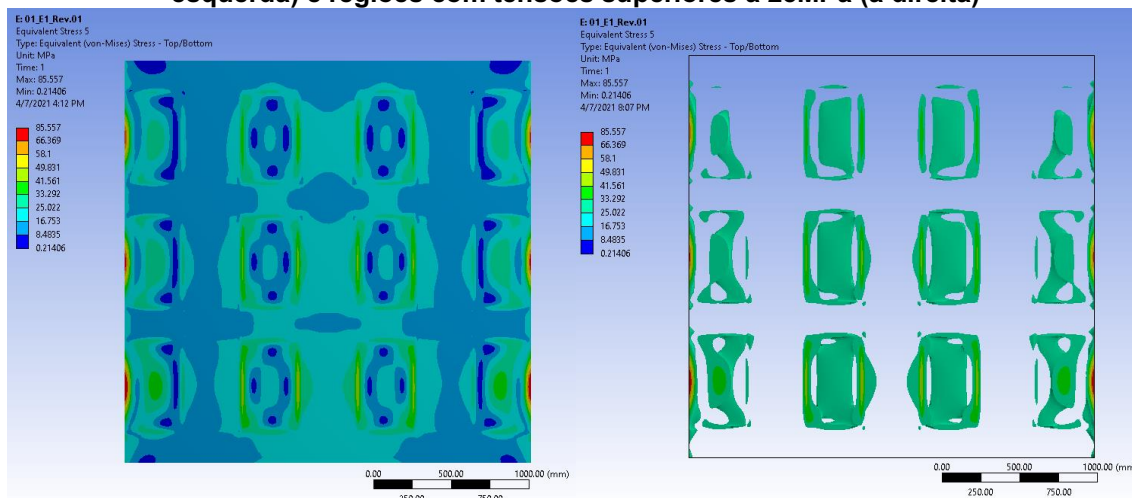
Fonte: Autoria Própria

O terceiro componente analisado pelo MEF em termos de tensões equivalente de von-Mises, foi o paramento de E1 e E2. Os resultados da primeira estrutura de trabalho (ilustradas na Figura 37), apresentaram tensões médias de von-Mises de 18,1MPa em todo o paramento e tensões significativas acima de 25MPa. Para E2, valores médios 11,6MPa de tensão foram encontrados e valores acima de 25MPa já foram identificadas, como ilustra a Figura 38.

Como pode ser observado a direita da Figura 37 e a também a direita da Figura 38, estão ilustradas regiões do paramento onde tensões superiores a 25MPa em cada Estrutura de Trabalho. É possível observar que em E2 as regiões acima de 25MPa são muito menos significativas e que a tensão máxima dos componentes foi de 65MPa. Para E1, regiões mais expressivas acima de 25MPa foram identificadas apesar da tensão máxima encontrada foi de apenas 85.5MPa (+24% em relação à E2). É importante notar que o paramento de E1, possui uma espessura de apenas 3/8 de polegada (9,75mm) enquanto E2 uma espessura de 3/4 de polegada (19,05mm) devido a condições geométricas definidas na seção 4.5.2.

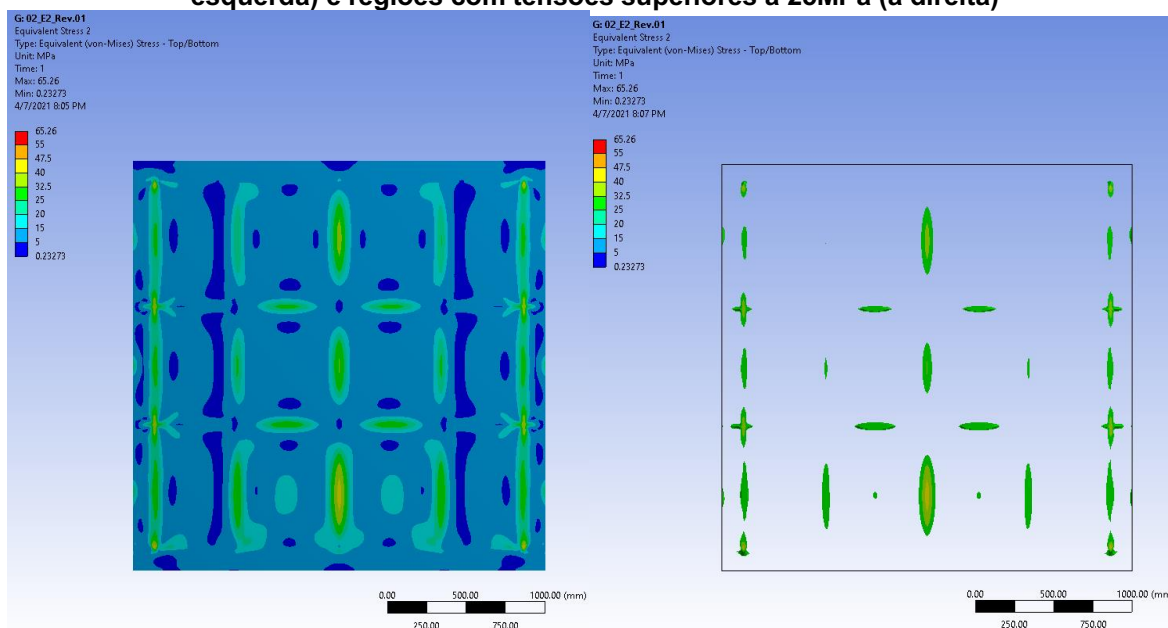
Assim sendo, é importante salientar que, apesar de E1 possuir desempenho inferior a E2 em termos de tensões máximas e médias, o paramento E2 apresenta +57,5% a mais de massa em relação a E1. Além disso, apesar dos modelos terem fins comparativos, as magnitudes de tensões equivalente de ambos se encontram muito acima do limite de segurança mais conservador exigidas pela ABNT NBR8883.

**Figura 37: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 38: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 25MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

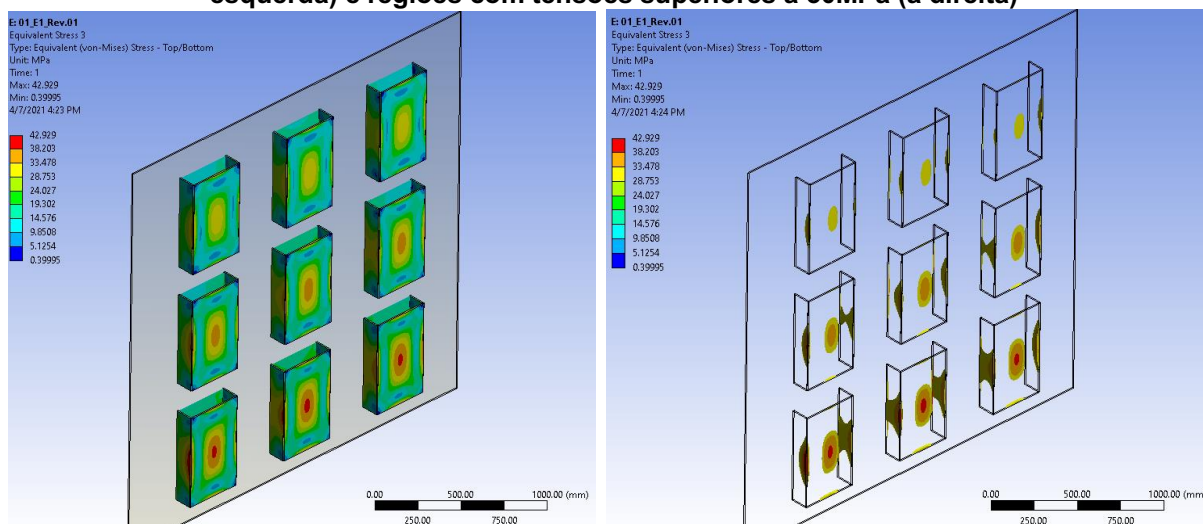
Por fim, o ultimo componente analisado em termos de desempenho estrutural, foram os Enrijecedores Verticais. Para a primeira estrutura, os enrijecedores, como definidos conceitualmente, possuem o perfil conformado a frio de forma de “U”. Estes mesmos perfis de E1, são solicitados de forma semelhante do paramento pois estão posicionados perpendiculares ao carregamento hidrostático atuando como pequenas “placas” de largura “a” e altura “b”. Assim sendo, as tensões nesses enrijecedores de E1 foram da mesma ordem das tensões encontradas no paramento, ilustra a Figura

39. Valores superiores a 30MPa foram identificados na estrutura assim como tensões médias de 18,4MPa.

O segundo conjunto, ilustrado pela Figura 40 apresentou tensões tão baixas quanto a estrutura da Comporta Original (discutidos na seção 4.1.3), sendo mais significativas apenas acima de 9MPa como ilustra ao lado direito da Figura. As tensões médias nestes enrijecedores verticais apresentou uma magnitude de apenas 6,53MPa.

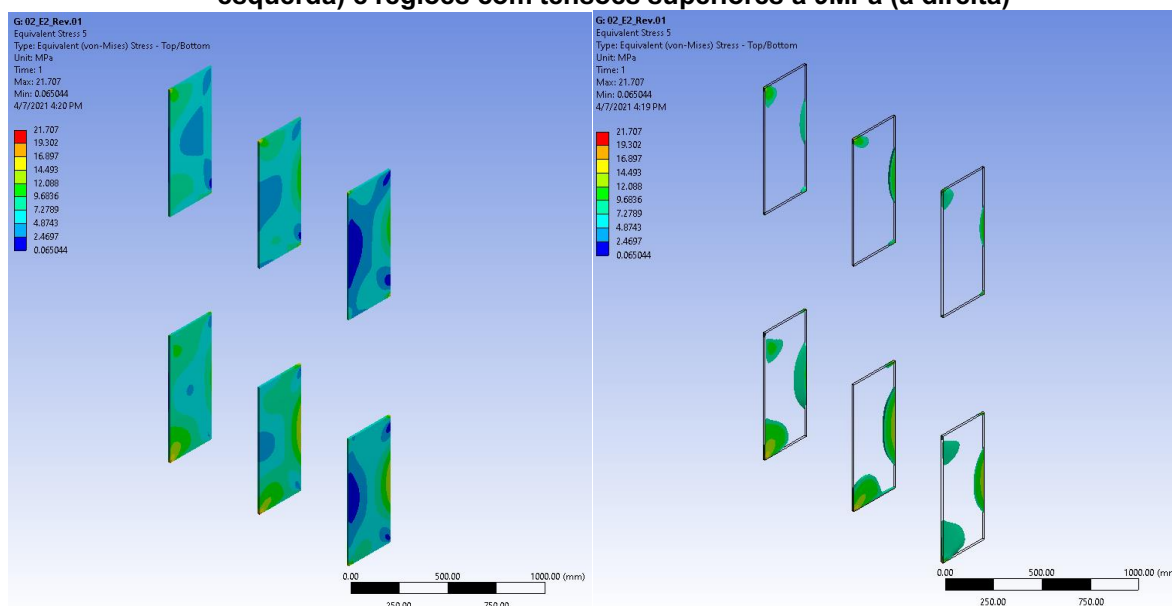
A partir desses resultados de tensão desses enrijecedores verticais de E2, foi possível notar que a função principal deste componente é de apenas reduzir a largura e altura destravada (variáveis “a” e “b” discutidas na seção 4.5.1) do paramento. Para E1, a função dos enrijecedores foi cumprida da mesma forma entretanto com mais matéria-prima necessária. A grande vantagem conceitual do modelo E1 foi observada principalmente na sua função não-obrigatória de reduzir a espessura dimensional do paramento. Ao contrário, a solução de enrijecimento vertical para E2, apesar da simplicidade de manufatura e quantidade reduzida de peças totais, este conceito faz com que a espessura do paramento seja maior para atender requisitos de segurança contra escoamento do paramento.

**Figura 39: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 30MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 40: Distribuição de Tensão equivalente de von-Mises sem malha de elemento (a esquerda) e regiões com tensões superiores a 9MPa (a direita)**



Fonte: Autoria Própria

#### 4.6 ESTRUTURA DE TRABALHO FINAL

Para a completa definição de uma Estrutura de Trabalho final, optou-se por elaborar um último modelo baseado nas análises das Estruturas E1 e E2 estudadas na seção anterior. Este modelo, denotado por “E3” possui as melhores características identificadas pelos estudos dos CADs gerados e no comportamento estrutural de E1 e E2 pelo Método dos Elementos Finitos. Assim sendo, E3, buscou manter o objetivo inicial de reduções dos custos gerais do equipamento sem comprometer capacidade de suportar solicitações com boas margens de segurança (comparativamente com E0).

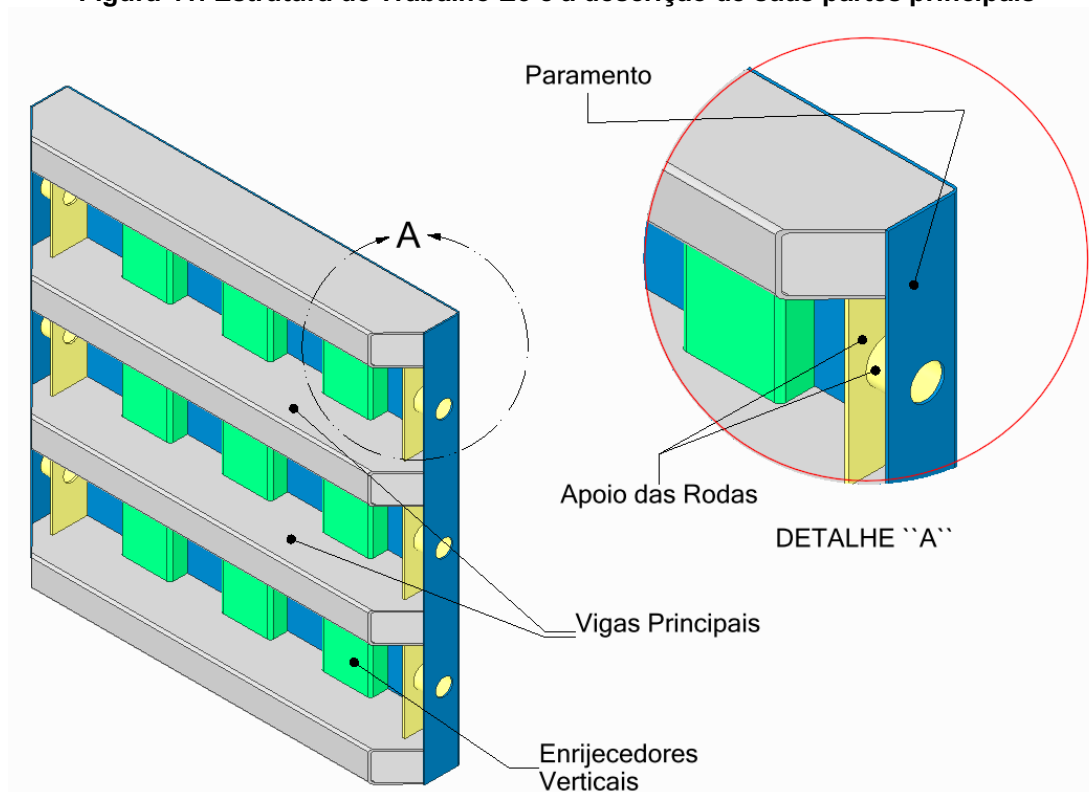
Como ilustrado na Figura 41, foram mantidas as Vigas Principais conforme Estrutura de Trabalho 1. O motivo principal se deve pelo seu bom desempenho estrutural sem grandes concentradores de tensão como na Vigas de E2. Os mesmos Enrijecedores Verticais de E1 também foram selecionados para E3 pois a escolha dos Enrijecedores de E2 acarretariam um aumento da quantidade de peças totais para manter a espessura de paramento de E1 (chapa de 3/8 de polegada).

Para o paramento foi adotado o mesmo conceito utilizado em E2 (também conformado a frio, ilustrado com mais detalhes a direita da Figura 41) com objetivo de

reduzir a quantidade linear de solda e fornecer um dos apoios para os eixos de sustentação das rodas. Esta alternativa de paramento também conformado a frio mostrou-se uma solução viável justamente pelas Vigas Principais e Enrijecedores de E3 também necessitarem desse processamento adicional de conformação a frio.

Por fim, os Apoios das Rodas foram adotados a mesma solução de E2 as quais os eixos de sustentação das rodas se encontram em balanço. A razão principal da escolha deste modelo de apoio para os eixos foi devido ao seu desempenho estrutural com a solução de E2 apresentando tensões inferiores a 57% das tensões encontradas para E1. Além disso, todo o modelo apresentou espessuras iguais de 3/8 de polegada exceto pela chapa do Apoio das Rodas e o Tubo Mecânico (ilustrado em amarelo na Figura 41).

**Figura 41: Estrutura de Trabalho E3 e a descrição de suas partes principais**



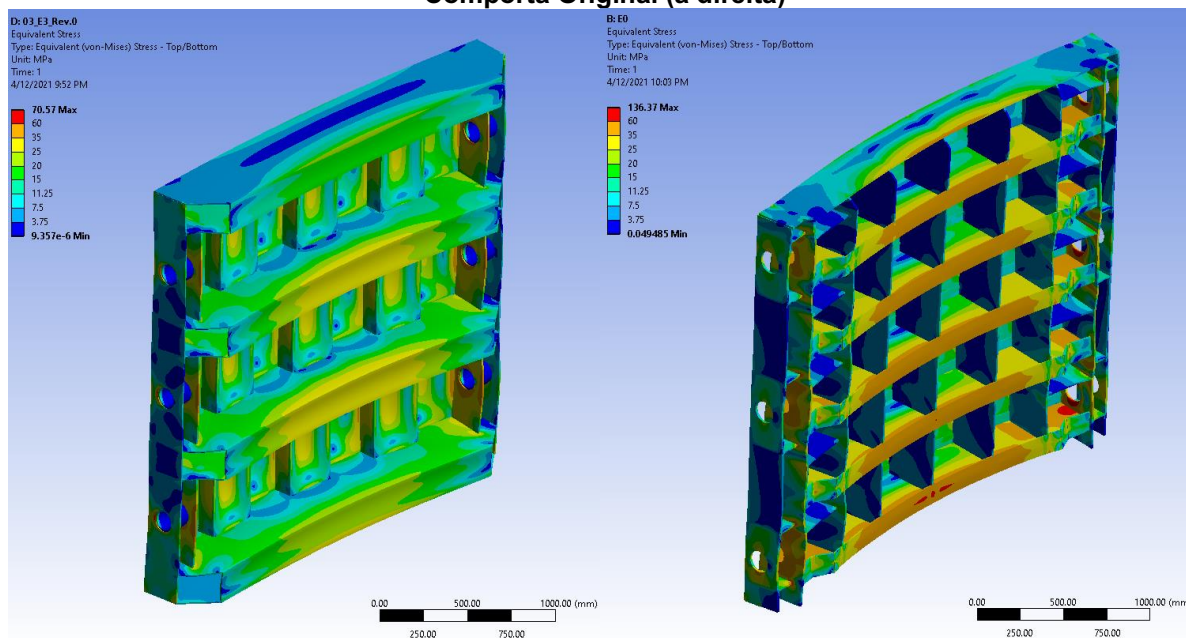
Para que fosse válida o comparativo entre a estrutura E3 e E0 foi realizado um último estudo numérico (ainda pelo método dos elementos finitos) para que fosse possível utilizar o modelo E3 como conceito final para a solução do problema de projeto.



Toda a análise de E3 pelo MEF seguiu a mesma rotina de E0, E1 e E2 incluindo a simplificação geométrica, condições de apoio, restrições de movimento e as solicitações (estudo linear estático). A direita da Figura 42 estão ilustrados os gradientes de Tensões equivalentes de von-Mises da estrutura E0 e a esquerda o modelo final E3. Ambos os modelos estão na mesma escala de cores para fins comparativos de tensões máximas.

Como ilustrado pela figura, o modelo E3 pode ser considerado (até o momento da etapa conceitual de projeto) uma estrutura com bom equilíbrio de tensões. Não foram identificadas regiões subdimensionadas ou partes com coeficientes de segurança contra escoamento excessivos (novamente utilizando a referência da ABNT NBR 8883). Além disso, comparativamente com o modelo E0, foi possível notar que a estrutura E3 com tensões nas estruturas principais de 35MPa. Em contrapartida, a comporta original, com as mesmas condições de carregamento e condições de apoio, apresentou tensões predominantes acima de 35Mpa e algumas regiões com concentrações de tensões acima de 60MPa.

**Figura 42: Tensão equivalente de von-Mises da Estrutura de Trabalho 3 (a esquerda) e da Comporta Original (a direita)**



**Fonte: Autoria Própria.**

Com a validação da seleção da Geometria CAD (Figura 41) pelo MEF foi possível analisar o modelo E3 em termos de massas e condições de fabricação assim como as estruturas de trabalho E0, E1 e E2 discutidas anteriormente como ilustrado

na Tabela 4. A coluna “E3” ilustra os valores de massas por componente, quantidade de peças totais e metros lineares de solda da Estrutura de Trabalho 3. A segunda coluna “1-(E0/E3)”, ilustra um comparativo (de redução ou aumento em termos percentuais) de cada parâmetro de E3 em relação ao modelo da Comporta Original “E0”.

O primeiro aspecto notável no comparativo da Tabela, foi a redução de massa, e, portanto, de matéria prima, equivalente a 21,41% da comporta original. Houve uma diminuição da massa dos Enrijecedores Verticais de 58,02% (devido a diminuição da quantidade desses Enrijecedores e das suas espessuras equilibradas com o modelo), 67,53% menos massa nos apoios das rodas e uma redução do peso do paramento (11,24%). Entretanto, apesar do modelo E3 possuir apenas 4 vigas principais (contra 5 do modelo E0), os pesos totais tiveram um acréscimo de 19,70% do modelo inicial. Isto é justificado pela geometria do perfil das Vigas “U” que possuem, em geral, menor capacidade de resistir a flexão se comparadas a Vigas “W”. Ou seja, o maior momento de inércia de área de Vigas “W” é maior se comparado com Vigas “U” para o mesmo peso por metro de cada um dos perfis.

Os últimos aspectos da geometria E3 também estão ilustrados nas duas linhas finais da Tabela 6. O objetivo inicial de redução dos custos de fabricação foi atingido principalmente pela expressiva redução da quantidade de peças totais do modelo E3. Foram computados para o modelo conceitual E3, apenas 26 peças individuais representando uma redução de 70,45% na quantidade inicial de 88 peças para montar o tabuleiro por completo. Outro fator determinante na definição deste modelo foi a quantidade linear de solda necessária para unir todas as peças do tabuleiro. Foi obtida uma redução de 49,53% da quantidade de solda (apenas 48 metros de E3 contra os 95,7 metros iniciais de E0). Vale ressaltar que para a somatória da quantidade de solda de E3 foi também considerado que toda a estrutura é soldada, ou seja, não há cordões intermitentes de solda assim em como todos os outros modelos.

**Tabela 6: Resultado finais de Massa, quantidade de peças do tabuleiro e metros lineares de solda de E3.**

Parâmetro		E0	E1	E2	E3	1 - (E3/E0)
Massa (kg)	Total	2169.3	1818.1	2069.12	<b>1704.78</b>	<b>-21.41%</b>
	Paramento	668	506.7	1192.22	<b>592.9</b>	<b>-11.24%</b>
	Vigas Horizontais	662.5	793	569.5	<b>793</b>	<b>19.70%</b>
	Enrijecedores Verticais	489	235.7	205.3	<b>205.3</b>	<b>-58.02%</b>
	Apoio das Rodas	349.8	282.7	102.1	<b>113.58</b>	<b>-67.53%</b>
Quantidade de Peças do tabuleiro		88	33	31	<b>26</b>	<b>-70.45%</b>
Metros Lineares de Solda (m)		95.7	49.61	61.31	<b>48.3</b>	<b>-49.53%</b>

**Fonte: Autoria Própria.**



## 5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou ilustrar a importância de um Projeto Conceitual sistematizado antes de prosseguir com estágios mais avançados no desenvolvimento de produtos mecânicos. Esta necessidade de robustez foi ilustrada pelo estudo de caso de uma Comporta Vagão seguida da proposta de melhoria deste modelo em termos de custo de fabricação. Inicialmente, foram estabelecidos objetivos específicos a serem alcançados e foram elaborados requisitos e restrições de projeto. Em seguida, abordagens da Engenharia de Projetos como Otimização da Síntese Direta (OSD), utilização de modelos CAE (pelo Método dos Elementos Finitos) e CAD foram aplicadas tanto para o auxílio da tomada de decisão no momento de síntese do Princípios de Solução quanto em etapas de avaliação das Estruturas de Trabalho. Além disso, para o modelo conceitual final foram comparados aspectos econômicos e técnicos (simplificados) em relação à Comporta Original com o objetivo de validar a melhoria conceitual.

A partir deste estudo, é esperado contribuir com a comunidade acadêmica na sintetização de soluções, métodos de validação e seleção de Modelos Conceituais a serem utilizados durante o desenvolvimento de produtos mecânicos. Espera-se também, contribuir com a indústria de geração de energia hidrelétrica nacional tornando os custos dos produtos hidromecânicos menos significativos em usinas de pequena e média geração a partir da utilização de boas práticas da Engenharia de Projetos.

Quanto aos resultados do estudo de caso, o modelo conceito final obteve bons resultados se comparados a Comporta Vagão utilizada como referência. Apenas em relação a matéria-prima total, foram reduzidos 21,4% no último modelo. Ou seja, como na indústria metalmeccânica equipamentos são precificados geralmente em torno dos pesos totais, apenas essa redução justificaria a robustez do projeto conceitual. Entretanto, como outros objetivos foram propostos no início do projeto de melhoria, também foram reduzidas 70,4% a quantidade de peças totais (redução proporcional dos custos de montagem, solda e acabamento) e 49,5% menos metros lineares de solda sem comprometer a segurança do equipamento. Portanto, foi possível notar pelos resultados obtidos, a importância da solidez de um Projeto Conceitual e o impacto destas decisões nos custos finais mesmo de um equipamento com alto grau de maturidade como uma Comporta Hidráulica Vagão.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como evidenciado ao longo do trabalho, critérios econômicos foram utilizados de forma mais explícita como justificativa para a seleção do modelo final, a Estrutura de Trabalho 3. Além disso, as análises numéricas e estruturais foram simplificadas com o objetivo auxiliar apenas no processo de decisão. Entretanto, para que este modelo seja utilizado como um modelo de fabricação final, é importante salientar a necessidade de análises técnicas com maior grau de refinamento e os possíveis impactos nos custos adicionais de fabricação desta nova geometria.

Assim, é proposto como estudo futuro outras análises técnicas desta nova geometria: 1) A influência da Geometria de Cunha inferior da comporta sobre o fenômeno de “*downpull*”, 2) A análise das primeiras frequências naturais desta geometria e a influência das solicitações fluidodinâmicas sobre esta análise modal e 3) a influência do maior empuxo durante o fechamento da comporta. Além disso, também é proposto o estudo conceitual dos conjuntos das rodas em aspectos técnicos e econômicos que possuem alto impacto dos custos finais de fabricação e matéria prima.

Por fim, pode-se concluir que o objetivo inicial do Aprimoramento Conceitual com objetivo de redução de custos de fabricação do modelo real de Comporta Vagão foi atingido. O novo conceito proposto, apresentado pela última Estrutura de Trabalho, apenas foi possível devido à estratégia de execução do Projeto Conceitual e as ferramentas utilizadas para as sucessivas tomadas de decisão.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8400:** Cálculo de equipamento para levantamento e movimentação de cargas. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8883:** Cálculo e fabricação de comportas hidráulicas. Rio de Janeiro, 2008.

BUDYNAS R. G; NISBETT J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 9 ed. New York: Mc Graw Hill, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo**. Brasília, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional - BEN2018**. Brasília, 2018.

ERBISTI, P. C. **Design of Hydraulic Gates**. 2 ed. Netherlands: Swets & Zeitlinger, 2014.

ERIKSSON, M. Finite Element Analysis and Design of Experiments in Engineering Design. **Division of Machine Design**. Lund (SW). 1999

FINGER, G; DIXON, J. R. A review of mechanical Engineering Design. Part I: Descriptive, prescriptive, and Computer Bases-models of Design Processes. **Springer-Verlag New York Inc**, New York (NY), 1989.

HONGZAN, M; CHU, X; XUE, D; CHEN, D. A systematic decision-making approach for product conceptual design based on fuzzy morphological matrix. **Elsevier – Expert Systems With Applications**. 2017.

INDIAN STANDART. **IS 4622**: Recommendations for Structural Design of Fixed Wheel Gates. Bhartrhari, 2003.

KUSIAK, A. **Engineering Design: Products Processes and Systems**. 1 ed. San Diego: Academic Press, 1999.

METALÚRGICA LUBECK EIRELI. – *Hidromecânicos – Comporta Vagão para Tomada d'agua – Memorial de Cálculo*. Revisão b. Castro, Julho 2020. 15 p.

MOSKALIK, A. J. **Recent Advances in Engineering Design**: Theory and Practice. 1994. 117p. Dissertação (Mestrado) – Degree of Mater Science, Western Michigan University. 1994

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada**. 4 ed. São Paulo: Bookman, 2013.

OLVANDER, J; LUNDÉN, B; GAVEL, H. A computerized optimization framework for the morphological matrix applied to aircraft conceptual design. **Ensevier – Computer Aided Design**. Linkoping (SW). 2009

PUGH S. **Total Design**. 1 ed. New York: Springer, 1998.

PAHL G; BEITZ W; FELDHUSEN J; GROTE K. H. **Engineering Design: A systematic approach (translated from German)**. 3 ed. London: Spring-Verlag, 2007.

SORIANO, H.L. **Elementos Finitos Formulação e Aplicação na Estática das Estruturas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Eireli, 2009

ULMANN, G. D. **The Mechanical Design Process**. 4 ed. New York: Mc Graw Hill, 2010.

ULRICH K. T; PEARSON, S. A. Assessing the Importance of Design Through Product Archaeology. *Management Science*, vol 44, no 3, p. 354 – 369, mar. 1998.

WEISS, M. P. GILBOA, Y. More on synthesis of concepts as an optimal combination of solution principles. **International Design Conference**. Dubrovnik (CR), dez. 2004.

ZHANG, H; HAN, X; LI, R; QIN, S; DING G; YAN, K. A new conceptual design method to support rapid and effective mapping from product design specification to concept design. **Int J Advanced Manufacturing Technology**. Southwest Jiaotong (CH). 2016.