

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CHRISTOPHER DE SOUZA AGUIAR FRANCISCO  
RAFAEL GARCIA COSTA BASTOS  
THIAGO CERUTTI MARTINS  
VINICIUS ABREU AMORIM**

**PROJETO DE SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DE VÁLVULAS DE CARREGAMENTO  
DE HIDROGÊNIO EM CARRETAS**

**VOLTA REDONDA  
2019**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROJETO DE SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DE VÁLVULAS DE CARREGAMENTO  
DE HIDROGÊNIO EM CARRETAS**

Projeto de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da UniFoa como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Christopher de Souza Aguiar Francisco

Rafael Garcia Costa Bastos

Thiago Cerutti Martins

Vinicius Abreu Amorim

Orientador:

Prof. Alexandre Habibbe.

**VOLTA REDONDA**

**2019**

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Alunos:

Christopher de Souza Aguiar Francisco

Rafael Garcia Costa Bastos

Thiago Cerutti Martins

Vinicius Abreu Amorim

Título do Trabalho de Conclusão de Curso:

### **PROJETO DE SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DE VÁLVULAS DE CARREGAMENTO DE HIDROGÊNIO EM CARRETAS**

Orientador:

Professor Alexandre Habibbe.

Banca Examinadora:

---

Prof. Alexandre Habibbe

---

Prof. Alexandre Palmeira

---

Prof. Rui Aurélio Barbosa

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a todos aqueles que contribuíram e puderam fazer com que ele se tornasse realidade, em especial a nossa família e ao nosso orientador.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, a nossa família que sempre nos apoiou e nos incentivou a continuar, mesmo nos momentos mais difíceis, aos nossos professores e orientador, que nesse tempo não apenas nos passou conhecimento técnico, mas também nos ensinou a sermos pessoas melhores, pois a universidade contribui para formação do nosso pensamento crítico em diversas áreas, nos fazendo olhar a sociedade com um olhar diferente.

*” Combati o bom combate...”*

*(2 Timóteo 4.7)*

## RESUMO

Este trabalho objetiva compreender a falha de uma estrutura de sustentação de válvulas de carregamento de hidrogênio e, assim, adaptar uma nova estrutura com a mesma finalidade. Para isso, se tornam necessários conhecimentos específicos de engenharia como a classificação e escolha de materiais, o estudo de falhas, método de elementos finitos e outros conceitos relacionados às estruturas, vigas e soldas. Nestas situações, é de extrema importância que sejam considerados todos os riscos e cenários derivados da mudança a ser realizada e que a estrutura projetada seja segura, de baixo custo e calculada de forma a evitar futuros problemas, como visto anteriormente. Inicialmente, a modificação foi solicitada com o objetivo de haver uma maneira de sustentar as válvulas do conjunto de carregamento de hidrogênio – que estavam apresentando trincas devido ao próprio peso, durante o carregamento.

Palavras-Chave: *Adaptação, Hidrogênio, Avaliação, Estrutura, Carregamento*

## **ABSTRACT**

This work aims to understand the failure of a support structure of hydrogen loading valves and thus adapt a new structure with the same purpose. This requires specific engineering knowledge such as material classification and choice, failure study, finite element method and other concepts related to structures, beams and welds. In these situations, it is extremely important that all risks and scenarios arising from the change to be made are considered and that the projected structure is safe, low cost and calculated to avoid future problems, as previously seen. Initially, the modification was requested in order to have a way to support the hydrogen loading assembly valves - which were cracking due to their own weight during loading.

Keywords: *Adaptation, Hydrogen, Evaluation, Structure, Loading.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivo geral .....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Carregamento de Hidrogênio .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2 Segurança Operacional.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3 Causa Raiz.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Quando realizar análise de causa raiz .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.1 Tipos de causa e causa raiz.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 Seleção dos Materiais .....</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Soldagem.....</b>	<b>27</b>
<b>2.7 Aterramento .....</b>	<b>31</b>
<b>2.7.1 Tipos de manutenção .....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.2 Tratamento do terreno.....</b>	<b>32</b>
<b>2.7.3 Composição do aterramento .....</b>	<b>33</b>
<b>2.8 SolidWorks.....</b>	<b>34</b>
<b>3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 Descrições do Processo .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2 Apresentação do Problema .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3 Análise da Causa e Solução .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Eliminação do problema através da aplicação da ACR.....</b>	<b>53</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO E DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 Resultados da Simulação (SolidWorks).....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 Considerações e Cálculos do Projeto .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3 Memorial de Cálculo.....</b>	<b>61</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>79</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um perfil I e suas variáveis .....	26
Figura 2 - Soldagem por Eletrodo Revestido.....	29
Figura 3 - Interpretação do eletrodo AWS A 5.1.....	30
Figura 4 – Chave inglesa antifaiscante usada para áreas classificadas .....	34
Figura 5 - Seleção do plano e criação de um esboço .....	35
Figura 6 - Criação de qualquer desenho 2D .....	36
Figura 7 - Criação de uma peça quadrada qualquer com um furo no centro .....	36
Figura 8 - Peça com 10mm de espessura com um furo no centro .....	37
Figura 9 - Nós e elementos que constituem uma malha .....	38
Figura 10 - Criando um estudo.....	39
Figura 11 - Resultado da distribuição das tensões.....	39
Figura 12 - Resultado do deslocamento equivalente .....	40
Figura 13 - Resultado da deformação equivalente.....	40
Figura 14 - Posicionamento da carreta na baia (carregamento de hidrogênio).....	42
Figura 15 - Compartimento traseiro para carregamento das carretas.....	43
Figura 16 - Conjunto de abastecimento conectado ao bloco <i>manifold</i> da carreta.....	44
Figura 17 - Simulação do acidente.....	45
Figura 18 - Pórtico de sustentação do balancim (estrutura danificada).....	45
Figura 19 - Região ampliada da junta soldada após acidente.....	46
Figura 20 - Verificação do peso da mangueira de enchimento com uso de uma balança portátil .....	46
Figura 21 - Peso da mangueira de enchimento em Kg .....	47
Figura 22 - Reservatório utilizado para teste de peso máximo.....	47
Figura 23 - Compartimento traseiro da carreta, com ênfase para mangueira de enchimento.....	48
Figura 24 - Estruturas existentes utilizadas no projeto de sustentação das mangueiras de enchimento.....	49
Figura 25 - Estrutura de sustentação do sistema de combate à incêndio .....	50
Figura 26 - Posicionamento das carretas frente à estrutura de sustentação dos sprinklers.....	50

Figura 27 - Balancim fixo com cabo de aço à estrutura de sustentação dos sprinklers .....	51
Figura 28 - Balancim Draw P8 com capacidade entre 4 e 8Kg .....	52
Figura 29 – Balancim junto à mangueira de enchimento das carretas .....	52
Figura 30 – Composição da malha na estrutura.....	55
Figura 31 – Tensão de Von Mises.....	56
Figura 32 – Deslocamento .....	56
Figura 33 – Deformação equivalente .....	57
Figura 34 - Representação esquemática da estrutura já adaptada.....	62
Figura 35 - Considerações para o cálculo do Fator de Segurança .....	63
Figura 36 – Força Vertical .....	64
Figura 37 – Garganta x perímetro .....	65
Figura 38 - Força Horizontal direção longitudinal .....	66
Figura 39 - Força Horizontal direção transversal.....	67
Figura 40 - Análise de resistência à torção no perfil I.....	69
Figura 41 - Análise de resistência à flexão no perfil I .....	73
Figura 42 - Seção da coluna tubular da estrutura de sustentação .....	74
Figura 43 - Chumbador da estrutura de sustentação .....	75
Figura 44 - Força aplicada aos chumbadores (esforço de flexão).....	76
Figura 45 - Figura representativa da escada.....	77
Figura 46 - Tubo retangulares da rampa da escada .....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações AWS para eletrodos revestidos .....	29
Tabela 2 - Desempenho do eletrodo E 7018 em diferentes aplicações .....	31
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço ASMT A36 .....	54

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ONU	Organização das Nações Unidas
GCO	Gás de Coqueria
MEF	Método de Elementos Finitos
ACR	Análise de Causa Raiz
MASPs	Método de Análise e Solução de Problemas
PDCA	<i>Plan Do Check Act</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
TIG	Tungstênio Inerte em Gás
MIG	Metal Inerte em Gás
MAG	Metal Ativo em Gás
$\sigma_e$	Tensão Normal de Escoamento
$\zeta_e$	Tensão Tangencial de Escoamento
$\zeta_{\text{máx}}$	Tensão Tangencial Máxima
$\zeta_{\text{adm}}$	Tensão Tangencial Admissível
E	Módulo de Elasticidade Normal
G	Módulo de Elasticidade Tangencial
$\sigma_{\text{adm}}$	Tensão Normal Admissível
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão Normal Máxima
$M_f$	Momento Fletor
ASMT	<i>American Society for Testing and Materials</i>
$W_f$	Módulo da Resistência à Flexão
$W_t$	Módulo de Resistência à Torção
F	Força
Q	Massa nominal
$T_f$	Espessura da mesa
$T_w$	Momento de torção
IT	Momento de inércia à torção
E	Módulo de elasticidade

$l_w$ .....Deformação constante  
 $a$ .....Constante de torção  
 $W_{n0}$ .....Deformação normal na extremidade  
 $Sw_1$ .....Momento de deformação estática  
 $J_X$ .....Momento de inércia em relação ao eixo x  
 $J_Y$ .....Momento de inércia em relação ao eixo y  
 $W_X$ .....Módulo de resistência em relação ao eixo x  
 $W_Y$ .....Módulo de resistência em relação ao eixo y  
 $A$ .....Área  
 $\emptyset$ .....Diâmetro  
 $F_H$ .....Força Horizontal  
 $\alpha$ .....Ângulo  
 $\phi$ .....Ângulo de torção  
 $St$ .....Menor secção da garganta de solda

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia se define na geração de bens úteis à sociedade, a partir da conversão de recursos naturais. Estes podem ser materiais ou energéticos que, juntos ao meio físico, possibilitam o atendimento de determinadas demandas e resultam em produtos, processos ou sistemas. Desta forma, tem-se a definição de projeto, que essencialmente combina atitudes, conhecimentos e habilidades com criatividade e experiência.

Um Projeto de Engenharia envolve uma série de elementos e aspectos fundamentais para que se consiga atender, de forma otimizada, a uma certa necessidade ou objetivo. Dentre as atitudes e obrigações do engenheiro encontram-se a ética profissional, consciência ambiental e a responsabilidade social e política. Tais atitudes, que aparentemente não estão relacionadas aos aspectos tecnológicos envolvidos na criação dos mesmos, são fundamentais e permitem que o engenheiro atue com excelência neste processo.

No desenvolvimento de um projeto observa-se, portanto, a presença de requisitos e aspectos das seguintes naturezas: técnica, política, legal, econômica, ambiental, de segurança e confiabilidade, de saúde, entre outras. A partir desse pensamento, elimina-se a ideia de que a engenharia só se resume em ciência aplicada e matemática e destacam-se outras vertentes.

Para se realizar um projeto de engenharia deve-se ter todas as necessidades e requisitos bem definidos, a programação e a verificação de várias alternativas de solução, a definição de critérios para comparação das alternativas, a escolha, o detalhamento e a comunicação da solução final.

Os erros mais comuns no desenvolvimento de projetos são derivados de alguns pontos essenciais que, quando não observados com cautela, comprometem a segurança do projeto e podem gerar acidentes, tais como: falta de planejamento, alterações de escopo, falta de comunicação, entre outros. Destaca-se ainda, a determinação inadequada do prazo de execução de uma atividade específica, que influencia diretamente no resultado final.

Este projeto de conclusão de curso visa demonstrar a importância do atendimento de todos os requisitos levantados anteriormente, através do exemplo de uma estrutura, projetada para atender à uma demanda específica de uma fábrica de

Hidrogênio, que será explicada em detalhes posteriormente. O exemplo mostra uma estrutura aparentemente simples, que foi adaptada de forma inapropriada, devido a uma série de fatores, e acabou gerando um acidente envolvendo o operador e a estrutura, que se rompeu.

A partir da análise de todos os pontos levantados após o acidente, o projeto faz uma adaptação à outra estrutura, desta vez calculada criteriosamente, analisando toda e qualquer situação de risco. As análises foram feitas pelo método de elementos finitos, através de simulações no programa *SolidWorks*, que fornece suporte aos cálculos e consegue prever determinadas condições para, posteriormente, confirmá-las através de testes no campo.

### **1.1 Objetivo geral**

Mostrar a importância da responsabilidade do engenheiro na elaboração de qualquer projeto, por mais simples que pareça ser, através do exemplo de adaptação da estrutura para sustentação das válvulas de um conjunto de carregamento de hidrogênio. O estudo é feito através de análises paralelas com o programa *SolidWorks*. O projeto ainda substituirá a estrutura atual, que foi adaptada indevidamente como solução imediata.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Análise do sistema atual;
- Determinação dos pontos deficientes;
- Análise de causa raiz do sistema anterior;
- Elaboração de procedimentos ajustados à demanda;
- Seleção e especificação de novos componentes;
- Projeto e dimensionamento (Analógico e Computacional) de Balancim para manuseio de mangotes de carregamento.

O trabalho foi desenvolvido após um acidente envolvendo o operador da planta e o sistema de sustentação anterior – explicado posteriormente – que serviu como base nos estudos da nova estrutura.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Carregamento de Hidrogênio**

No que diz respeito ao enchimento das carretas para transporte do produto, as empresas se baseiam na norma ABNT NBR 14095 - Área de estacionamento para veículos rodoviários de transporte de produtos perigosos.

Contudo, normas referentes às exigências e procedimentos internos de cada organização são requisitos importantes para realizar o trabalho com mais segurança. O posicionamento das carretas frente a conexão e o início do enchimento (abertura das válvulas nas baias) devem ser feitos com cuidado, pois muitos acidentes são ocasionados por descumprimento de procedimentos relacionados à essa etapa do processo de enchimento.

Os maiores riscos relacionados ao enchimento das carretas são os vazamentos que podem ocorrer entre as conexões, devido à pressurização do sistema e até por má condição dos equipamentos, causada por corrosão ou má utilização e conservação.

Outro risco muito presente na estrutura para armazenar produtos perigosos (inflamáveis) é a eletricidade estática, que nesse caso com o manuseio do hidrogênio se torna um risco iminente. Para evitar qualquer problema de explosão que possa ser causado por eletricidade, toda a estrutura deve seguir normas específicas de aterramento e isolamento de qualquer meio que possa gerar uma ignição do produto.

O enchimento das carretas é realizado pelo operador, que deve seguir rigorosamente as normas internas de procedimentos operacionais. A norma interna da empresa que trata do enchimento de carretas de hidrogênio descreve o procedimento e os cuidados a serem tomados durante a manobra e foi adaptada às modificações da estrutura.

De acordo com a norma, com a chegada da carreta na unidade, o operador deve acompanhar a entrada da mesma na baia de enchimento orientando o motorista com relação ao posicionamento da carreta de forma que esta, ainda com as portas do

painel traseiro fechadas, aproxime-se das baias até o ponto de estacionamento; sendo este referenciado quando for atingida a distância aproximada de 5 a 30cm entre a estrutura superior de seu painel traseiro e o cabo de aço do balancim de sustentação da válvula piloto do mangote.

Após realização da manobra, o operador deve colocar a trava de freio da carreta para evitar engates sem autorização e acompanhar o calçamento da carreta pelo motorista, através da inserção das cunhas sob o pneu. Além disso, é importante acompanhar a abertura das portas do painel traseiro pelo motorista, observando sempre e auxiliando-o caso necessário, para que estas não sejam enganchadas ao cabo de aço do balancim de sustentação da válvula piloto.

Em seguida, o operador deve posicionar a escada de acesso ao painel traseiro adequadamente, que será utilizada durante o carregamento.

Após o preenchimento do Relatório de Controle e Análise de Carreta de Hidrogênio, verificando a existência de não conformidades, conecta-se então o gancho do cabo de aço do balancim de sustentação à manilha da válvula piloto do mangote de enchimento. Observações:

- No caso de carretas com altura de plataforma de 1,70 metro ou superior, deve-se conectar o gancho diretamente à manilha da válvula;
- No caso de carretas com altura de plataforma de 1,50 metro ou inferior, deve-se utilizar a extensão de 03 (três) elos para manter o tensionamento pré-ajustado do cabo retrátil do balancim.

Caso seja necessário, conforme avaliação do operador, o ajuste no comprimento do cabo do balancim, este pode ser modificado seguindo as instruções de campo recebidas durante o treinamento deste procedimento desde que o tensionamento do cabo de aço após novo ajuste seja mantido na faixa de 5kgf a 9kgf, medido pelo dinamômetro disponível.

Em seguida, realizar o rosqueamento manual da conexão tipo 2 WM da válvula piloto à válvula com rosca tipo ABNT 218-2 da carreta até o encosto da sede, e com o torquímetro concluir o aperto até o torque de 40 Nm. Por fim, deve-se prender o

cabo de segurança (cabo de aço) da mangueira de enchimento na válvula de enchimento da carreta. Finalizado o procedimento, começa o carregamento.

## **2.2 Segurança Operacional**

Para se conduzir produtos com alta periculosidade, a segurança no transporte é uma tarefa que requer atenção e alguns cuidados especiais. Os acidentes envolvendo produtos perigosos ocorrem quando estão sendo movimentados, através dos vários tipos de modais ou ainda quando estão armazenados ou manipulados em processos industriais. Quando se têm acidentes nas rodovias que envolvem veículos carregando produtos perigosos, há uma relevância especial. Nestes eventos, o potencial de risco está associado ao nível de perigo do material transportado com possibilidade de gerar concomitantemente diversos danos à saúde dos seres humanos expostos e ao meio ambiente.

As rodovias concentram aproximadamente de 60% do volume de carregamento transportados no Brasil, percentual que tem a tendência ao crescimento devido ao aumento do comércio entre os países da América Latina. No entanto, a má qualidade das nossas rodovias, a insuficiência de veículos que transportam cargas, e inúmeros outros problemas favorece consideravelmente o aumento da quantidade de ocorrências, criando-se um grave estorvo para a saúde pública (IPEA, 2006).

Com isso o manuseio, seja dentro de um complexo industrial ou até mesmo no transporte rodoviário, ou seja, em vias públicas deve seguir algumas exigências de segurança, descritas em normas específicas para transporte desse tipo de material. Os produtos perigosos são ordenados em classes definidas na Portaria nº 204 do Ministério dos Transportes (visto na norma NBR 7500 página 03 item 4.1).

Durante as operações no transporte de produtos perigosos, os produtos deverão estar devidamente rotulados demonstrando o risco que apresentam e painéis de segurança específicos de acordo com as normas NBR-7500 e NBR-8286.

Produtos como o hidrogênio, apresentam um risco ainda maior se comparados com alguns outros gases, no que diz respeito ao seu transporte. O hidrogênio é um gás incolor e inodoro, o que dificulta a detecção de um provável vazamento, e por ser um gás altamente inflamável deve-se usar equipamentos à prova de explosão e ferramentas a prova de faíscas em áreas de manuseio do gás, sendo de suma

importância a identificação do produto para segurança na operação e em casos de emergência durante o transporte.

De acordo com o decreto nº 96.044 de maio de 1988 os caminhões transportando produtos perigosos só poderão ser conduzidos pelas vias públicas tendo os seguintes documentos:

a) Documento Fiscal: deve apresentar o número ONU, nome do produto, classe de risco, grupo de embalagem, quantidade do produto e declaração de responsabilidade do expedidor de produtos perigosos.

b) Ficha de Emergência: deve conter informações sobre a classificação do produto perigoso, riscos que apresenta e procedimentos em caso de emergência, primeiros socorros e informações ao médico.

As informações técnicas presente no documento fiscal referente ao hidrogênio:

Produto: hidrogênio, comprimido

Número da ONU: 1049

Classe de risco: 2.1 - gases inflamáveis

Número de risco: 23

### **2.3 Causa Raiz**

O tema de análise deste trabalho envolve os mecanismos de Análise de Causa Raiz sendo aplicados pelas organizações. Ainda que a sigla em inglês seja bem manuseada (RCA – *Root Cause Analysis*), neste projeto, todas as vezes que se mencionar a análise de causa raiz, poderá ser usada a sigla ACR.

Para tratar problemas ou falhas, as organizações costumam utilizar esse sistema de análise, para que consigam identificar o erro, e com isso continuar a produzir mais do material, porém sem o erro. Mas, apenas corrigir o erro pontualmente não é o suficiente. É preciso uma prevenção e análise total do problema.

Caso não ocorra o tratamento de forma correta e aprofundada no problema, isso pode ocorrer diversas vezes provenientes da mesma causa raiz. Por isso, muitas organizações costumam utilizar a ACR para que o problema seja bem solucionado, dificultando a ocorrência dos mesmos erros. Essa metodologia de solução para o erro, é bem utilizada em campos industriais, como o automobilístico, hospitalar, óleo e gás, dentre outros.

Conforme Uberoi (2004) relatou que “A ACR é amplamente utilizada para investigar acidentes industriais importantes, e que os fundamentos de tal metodologia estão na psicologia industrial e engenharia de fatores humanos.”

Para as organizações, a qualidade no produto, não é mais só uma vantagem competitiva de outras, mas uma condição obrigatória para manutenção e satisfação de um negócio, por isso, elas buscam sempre garantir a qualidade dos produtos fornecidos, tendo um bom rendimento e fornecendo produtos que não tenham defeito. Essa é a fórmula para se obter uma satisfação do cliente, além de reduzir gastos de retrabalho, devoluções, e defeitos que venham a ter que procurar a causa.

Segundo Slack (2002), “Boa qualidade reduz custos de retrabalho, refugo e devoluções e, mais importante, boa qualidade gera consumidores satisfeitos”.

Embora, hoje em dia, as empresas já tenham um sistema de qualidade implantado e certificados com acesso ao conhecimento, trabalhadores capacitados e especializados, enfim, tudo o que é necessário para que se tenha um ambiente que não seja propício para que surja falhas e problemas em geral, nem sempre é o suficiente. Problemas surgem em etapas de produção até o produto, e em algumas vezes, esses problemas não são gerados por uma causa conhecida, fazendo com que as empresas tenham que se adaptar à novos erros e buscando sempre a solução pela ACR.

Alguns problemas que ocorrem nas indústrias são registrados como não conformidades. Não conformidade é quando o produto não tem os requisitos estabelecidos para ser um produto que é garantido na qualidade. O fato de a empresa declarar como não conformidade é quando ocorre uma perda de tempo, de material, desperdícios, homem-hora, além da redução de produtividade e até mesmo uma parada total do maquinário, resultando em uma perda financeira. Além de abalar a confiança da clientela, que é o principal resultado do lucro.

Vale mencionar que existe uma diferença entre a análise de causa raiz e os métodos de análise e solução de problemas (MASPs). Os MASPs buscam a resolução de problemas geral, mas seus fundamentos e a maneira de colocá-los em prática em uma empresa não focam exatamente em encontrar a causa raiz do problema, elas se atentam em detalhar problemas em várias etapas, desde a produção, até o produto. Muita das vezes, não se toma a devida atitude, ou seja, não há uma preocupação em

resolver a solução do problema, apenas mencionar as causas próximas, não sendo perfeitamente definido ou detalhado.

Existem inúmeras metodologias abordadas, muitas técnicas e outras estratégicas, como “os cinco porquês”, “análise de mudanças” e até mesmo o famoso “diagrama de Ishikawa”; tendo em vista que todos os métodos têm como objetivo em comum resolver o problema de uma maneira estruturada. Além disso, a escolha que fizer do método para solução dos problemas, exige que respeite os princípios básicos da mesma, para garantir a eficácia da análise de causa raiz. Como:

- Resolução bem estruturada do problema, evitando o esquecimento de algum ponto importante, ou até mesmo o mau hábito que algumas organizações de resolver pontualmente um problema (apagar incêndio);
- Concentrar em tratar e corrigir a causa raiz, não apenas os sintomas. Levando em consideração que possa haver várias outras causas;
- Abordar conceitos de “como” e “por que” aconteceu algo, e não apenas “quem” foi o responsável;
- Abordar soluções concretas e definitivas;
- Sempre disponibilizar um banco de dados de problemas ocorridos, a fim de que seja consultado sempre que necessário.

Como já mencionado, o objetivo deste trabalho de conclusão de curso não tem por finalidade detalhar cada estrutura e seu funcionamento, mas sim apresentar de forma que se possa entender como foi relacionado o método da ACR aplicado no sistema de sustentação de válvulas de carregamento de hidrogênio em carretas e se baseando nas confecções abaixo segundo alguns autores de análise de causa raiz, como:

Rooney e Heuvel (2008), a análise de causa raiz possui algumas características, conforme abaixo:

- Ajuda identificar o que ocorreu, por que ocorreu e como ocorreu;
- Previne recorrência do problema;
- Resulta em ações eficazes para prevenir recorrências.

Ammerman (1998) lista os seguintes objetivos para ACR:

- Eliminar causas presumíveis relacionadas a problemas de performance, tais como procedimentos, pessoas, equipamentos, processos;
- Eliminar causas presumíveis e aparentes, não sustentadas por dados coletados do problema;
- Selecionar causas que requerem verificação;
- Determinar causa raiz e causas que contribuíram para o problema e que necessitam de ações corretivas.

## **2.4 Quando realizar análise de causa raiz**

Quando um problema ocorre, é possível realizar a ACR. Porém, nem todas as organizações possuem recursos suficientes, que demanda tempo, para realizar todas as análises necessárias. A ACR veio como um processo que envolve várias etapas que demanda homem-hora de trabalhadores e especialistas que estão certamente envolvidos no problema, ou seja, recursos que serão redirecionados para a ACR, ao invés de estarem cumprindo suas atividades rotineiras e cotidianas, então, este tempo é exclusivo a dedicação da resolução definitiva do problema. Também existe em alguns processos de investigação, a necessidade de testar hipóteses de causa raiz obtidas através de ensaios destrutivos em peças, realização de processos fabris, entre outros. Por isso a ACR, em alguns casos possa ser um processo caro.

Portanto, a ACR se denomina uma excelente prática para elaboração de uma seleção sobre os problemas submetidos. As empresas devem sempre priorizar os problemas analisados e esta priorização pode-se basear na frequência de acontecimentos ou ocorrências do problema, até mesmo de um grupo de problemas que serão analisados, podendo ainda sim existir características similares, ou, ainda sim podendo optar por realizar o método ACR quando o problema agravar, podendo obter consequências serias, tais como, grande prejuízo, impacto ambiental ou acidentes sérios, como dano ou perda à vida de funcionários.

Segundo Taproot (2019), alguns problemas serão considerados como problemas de pouco impacto, não exigindo então análise de causa raiz. O que se deve realizar é apenas categorizar o problema e reparar a falha.

### 2.4.1 Tipos de causa e causa raiz

Para diferenciar os tipos de causas e a causa raiz do problema, existem algumas orientações.

Segundo Ammerman (1998), é possível detectar as causas de diversas maneiras, por exemplo:

- Causas presumíveis – são motivos que se apresentam no início e, ao longo da coleta de dados, mas que precisam de validação;
- Causas contribuintes – são motivos que sozinhos, não teriam a capacidade de desenvolver o problema sozinho, porém, é necessária uma ação corretiva para que não atrapalhe a qualidade do produto. Nesse grupo, estão as causas secundárias e possíveis;
- Causa raiz – causa que se for corrigida, implicará na recorrência da problemática. É a causa conhecida como a razão do problema.

A causa raiz é a razão do problema, se não fosse ela, o problema não existiria. Entretanto, muitas das vezes acredita-se que foi encontrado a causa raiz, sendo que na verdade, o problema não foi alcançado. Para se tentar corrigir o problema, é importante que se pergunte, ao achar uma suposta causa raiz: "se for eliminada essa causa, conseguiremos acabar com o problema definitivamente?". Caso a resposta seja favorável, a probabilidade dessa causa ser a causa raiz é ampla. Já se for negativa, existe uma grande chance de não ser a resposta procurada.

Outra peculiaridade importante, é que a causa raiz não pode ser descrita como "falha no equipamento" ou até mesmo como um "erro no operador", visto que, essas causas não são específicas o suficiente para que a administração da empresa tome as devidas ações corretivas para evitar o presente problema.

Mesmo seguindo e realizando todas as orientações da ACR, existem alguns casos, que mesmo assim, a causa raiz não pode ser encontrada. Quando isso ocorre, a maneira correta de inspecionar a situação é considerar algumas supostas causas raiz e direcionar ações corretivas para que todas elas sejam verificadas, ou pelo menos, as mais tendenciosas. Assim sendo, a empresa estaria preservada da recorrência dos problemas.

## 2.5 Seleção dos Materiais

A seleção dos materiais para um projeto é na verdade o início de todo o trabalho e a base dele. É muito importante a seleção correta do material a ser usado, logo no estágio inicial, antes que seja custoso realizar a troca do material com o projeto já em processo. Os materiais a serem usados em um projeto dependem dos requisitos exigidos, tais como: resistência a corrosão, soldabilidade, usinabilidade, resistência mecânica, forma e tamanho das peças a serem produzidas, enfim depende diretamente das exigências do projeto.

A seleção inicialmente é feita por métodos teóricos, porém a escolha final é baseada em informações como: experiências documentadas, informações técnicas baseadas em estudos e ensaios e comparação do custo do processo com uso de modelos de custo. Por fim a simulação, quando possível, é de extrema importância para uma análise melhor do processo, se aproximando da realidade de forma mais simples e eficiente.

Entre os materiais de construção, o aço é um dos mais utilizados e de larga aplicação em todos os campos da engenharia, sejam em estruturas fixas ou móveis. O aço é uma liga de natureza complexa, visto que os aços comerciais não são ligas binárias (ferro e carbono), pois contêm outros elementos secundários, resíduos resultantes dos processos de fabricação.

Segundo Chiaverini (1984), para a maioria das aplicações do aço a importância da resistência mecânica é, de certo modo, relativamente pequena, assim como o fator peso. Assim sendo, cerca de 80% do aço usado é comum de baixo carbono, laminado a quente ou encruado, constituindo uma porcentagem considerável dentro do grupo de aços estruturais. Entretanto em aplicações específicas, a relação resistência/peso deve ser mais satisfatória, como é o caso da indústria de transporte (caminhões, ônibus, carros, aviões, equipamentos rodoviários e ferroviários, navios etc.) devido as condições do serviço.

Por conseguinte, pode-se estabelecer inicialmente a seguinte divisão dos aços utilizados em estruturas:

- Aço-carbono;
- Aços de alta resistência e baixo teor em liga.

Abordaremos a seguir somente os aços-carbono, pois como mencionado sua aplicação é mais frequente e satisfatória na maioria das estruturas.

De acordo com Chiaverini (1984), os requisitos fundamentais a que devem obedecer aos aços-carbono para estruturas são os seguintes:

- Ductilidade e homogeneidade;
- Valor elevado de relação entre limite de resistência e limite de escoamento;
- Soldabilidade;
- Suscetibilidade de corte por chama, sem endurecimento;
- Resistência razoável a corrosão.

Nas estruturas, os perfis de aço carbono utilizados são os mais diversos, sobressaindo-se os seguintes: barras redondas, quadradas, hexagonais, ovais, barras chatas, cantoneiras etc.

Na estrutura empregada no projeto, visto que por adaptação, foi utilizado uma viga de perfil I de aço 1020 com espessura da alma de 8,3mm, para sustentação da mangueira de enchimento, o perfil pode ser observado na figura 1 abaixo:

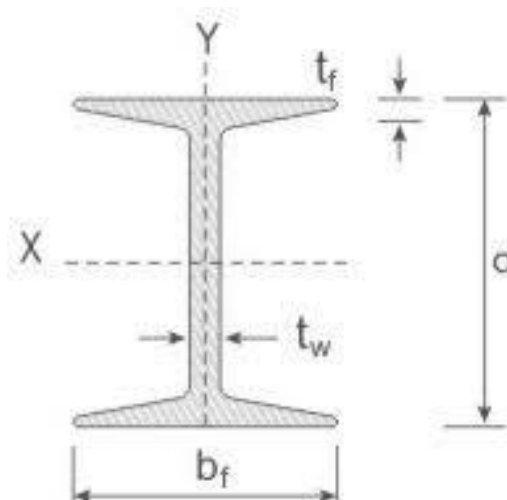


Figura 1 - Representação de um perfil I e suas variáveis

Fonte: <https://www2.gerdau.com.br/produtos/perfil-i-gerdau>

Como as vigas citadas teriam a função de apenas suportar uma massa muito pequena, que seriam as mangueiras de enchimento das carretas de hidrogênio, não seria conveniente demonstrar através de cálculos se a estrutura suportaria o peso da mangueira. Porém, num contexto geral, é válido ressaltar que nas estruturas, onde os cálculos se baseiam basicamente em esforços sobre uma viga estática, existem 4

esforços predominantes: força normal (tração ou compressão), força cortante (tende a girar o trecho da barra em que atua), momento fletor (traciona as fibras da barra) e momento torçor (O vetor momento tem o sentido da normal externa à seção transversal em que atua).

Segundo o professor Henrique Lindenberg Neto, da Universidade de São Paulo, a seção mais crítica de uma estrutura formada por barras é aquela em que se tem a combinação mais desfavorável de esforços solicitantes, levando às maiores tensões na estrutura. Para saber se uma estrutura que se está projetando resistirá ou não ao carregamento que nela irá atuar, deve-se determinar sua seção mais perigosa, as tensões que irão atuar nos pontos desta seção e compará-las com as tensões limites do material que a constitui, verificando se a estrutura proposta irá ou não suportar o carregamento previsto. A determinação da seção crítica de uma estrutura formada por barras se faz por meio dos diagramas de esforços solicitantes.

## **2.6 Soldagem**

Soldagem consiste na união de dois ou mais materiais (principalmente metais), com ou sem adição de material de enchimento. É um processo de extrema importância no ramo industrial sendo utilizado em larga escala na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas, garantindo a continuidade das propriedades físicas e químicas do material na região da junta.

Existem diversos processos de soldagem sendo sempre necessário a seleção mais adequada para cada tipo de aplicação. Seu emprego vai desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos. Utilizados nas áreas da construção civil, naval, ferroviária, indústria aeronáutica, automobilística e indústria metalúrgica. Hoje em dia podemos encontrar aplicabilidade em vidros e plásticos. Na atualidade podemos encontrar cerca de 50 processos usados no ramo industrial. O avanço da tecnologia de soldagem teve um grande impulso no século XX pela indústria automobilística em que este processo permitiu a redução do peso do chassi e de custos de montagem do veículo.

Apesar de ser conhecido a muito tempo, a soldagem era considerada um processo de segunda categoria devido aos seguintes pontos: eletrodos de baixa qualidade, utilização inadequadamente, falta de conhecimento da metalurgia da solda e a falta de ensaios não destrutivos eficientes. Um profissional qualificado é de vital

importância na realização da soldagem, tendo em vista que a durabilidade das peças soldadas está intimamente ligada a esse profissional. Podemos dividir a soldagem em dois grupos de operações:

- Soldagem por fusão;
- Soldagem por pressão.

Soldagem por fusão: consiste na aplicação de uma energia para produzir calor suficiente para fundir o material de base. Está subdividida em: soldagem com eletrodo revestido, soldagem TIG, soldagem plasma, soldagem MIG/MAG, soldagem a arco submerso entre outras.

Soldagem por pressão: consiste em aplicar uma energia para provocar uma tensão no material de base capaz de produzir a solubilização na fase sólida. Está subdividida em: soldagem por resistência, soldagem por centelhamento, soldagem por fricção, soldagem por ultrassom e soldagem a frio.

No projeto, para união do olhal a estrutura, foi utilizado o processo de soldagem com eletrodo revestido devido a sua fácil utilização e versatilidade. Este processo é realizado manualmente com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. A fusão do metal, a alma do eletrodo e seu revestimento de fluxo ocorre devido ao calor gerado pelo arco elétrico. Ao longo da decomposição do revestimento são produzidos gases que juntamente com a escória líquida protegem o metal de solda da contaminação proveniente da atmosfera.

Podemos encontrar no mercado diversos tipos de eletrodos revestidos que possuem a capacidade de produzir diversos tipos de gases de proteção. Podem ser usados em todas as posições (plana, vertical, horizontal, sobre cabeça). Exemplo de soldagem por eletrodo revestido na figura 2.

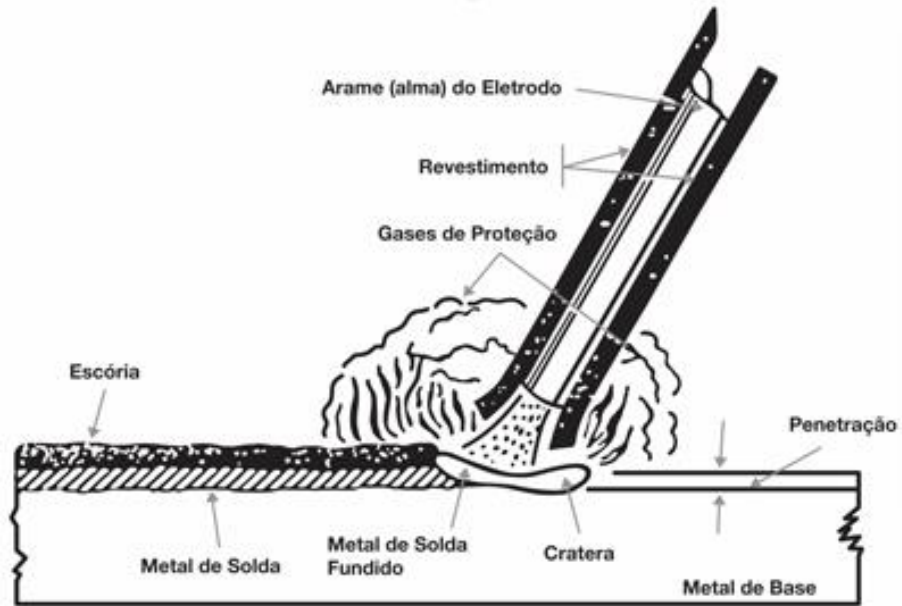


Figura 2 - Soldagem por Eletrodo Revestido

Fonte: [https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo\\_soldagem\\_eletrodo\\_revestido\\_mma\\_s\\_maw.cfm](https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_s_maw.cfm)

A AWS - *American Welding Society* (Sociedade Americana de Soldagem) criou um padrão para a identificação dos eletrodos revestidos que é utilizada praticamente no mundo todo. Podemos ver na tabela 1 como eles são numerados.

Tabela 1 - Especificações AWS para eletrodos revestidos

Fonte: [http://www.metallica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=824](http://www.metallica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=824)

TABELA ESPECIFICAÇÕES AWS PARA ELETRODOS REVESTIDOS	
REF. AWS	Eletrodos para:
A 5.1	Aços ao Carbono
A 5.3	Alumínio e suas ligas
A 5.4	Aços Inoxidáveis
A 5.5	Aços baixa liga
A 5.6	Cobre e suas ligas
A 5.11	Níquel e suas ligas
A 5.13	Revestimento (alma sólida)
A 5.15	Ferros Fundidos
A 5.21	Revestimento (alma tubular com carbonetos de Tungstênio)

Para o projeto em questão foi utilizado o eletrodo revestido AWS 5.1 E 7018.

Na figura 3 temos uma interpretação da nomenclatura utilizada pela AWS.

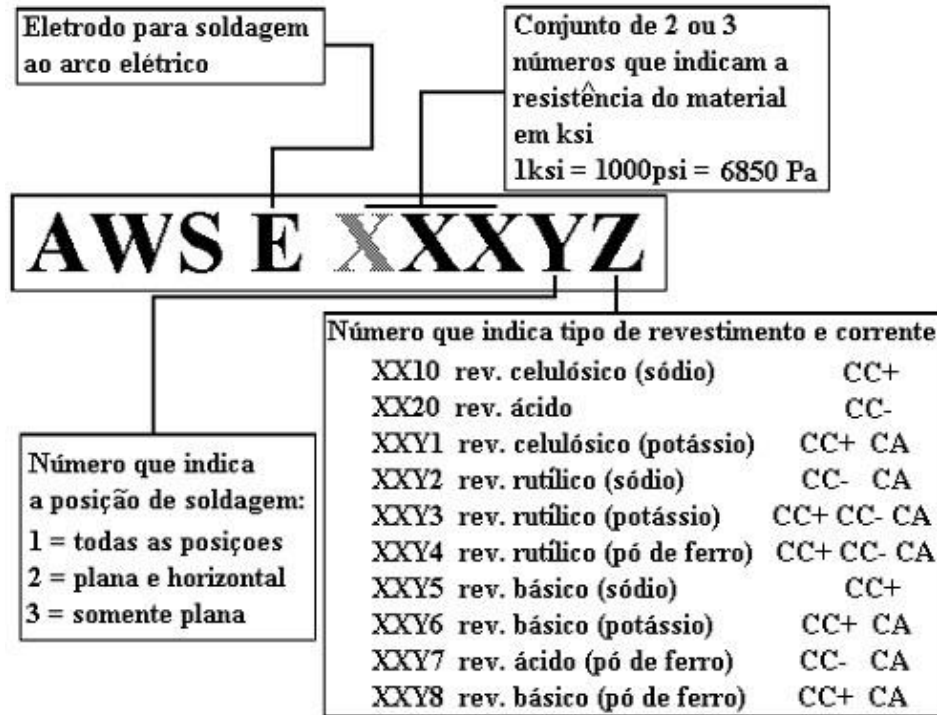


Figura 3 - Interpretação do eletrodo AWS A 5.1

Fonte: [http://www.metallica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=824](http://www.metallica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=824)

Segundo catálogo de eletrodos revestidos da empresa ESAB, “os eletrodos E7018 são a versão mais moderna do eletrodo de baixo hidrogênio. A adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos. Esse moderno balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade, direção do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições”.

Algumas outras características desta solda: facilidade na remoção da escória, solda em todas as posições, grande resistência a ruptura entre outras qualidades.

Algumas das aplicações em que podem ser utilizados este eletrodo são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Desempenho do eletrodo E 7018 em diferentes aplicações  
 Fonte: [http://www.metalica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=824](http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=824)

<b>TABELA DE DESEMPENHO DE ALGUNS ELETRODOS EM DIFERENTES APLICAÇÕES</b>						
<b>Aplicações</b>	<b>6010</b>	<b>6011</b>	<b>6013</b>	<b>7016</b>	<b>7018</b>	<b>7024</b>
Aço com enxofre alto ou sem análise química	-	-	3	10	9	5
Alta ductilidade	6	7	5	10	10	5
Alta penetração	10	9	5	7	7	4
Alta resistência ao impacto	8	8	5	10	10	9
Alta taxa de deposição	4	4	5	4	6	10
Espessura fina, probabilidade de distorção	5	7	9	2	2	7
Espessura grossa, alta restrição	8	8	8	10	9	7
Facilidade de remoção de escória	9	8	8	4	7	9
Filete 1G/2G de alta produtividade	2	3	7	5	9	10
Filete todas posições	10	9	7	8	6	-
Pouca perda por respingos	1	2	7	6	8	9
Topo posição plana e < 6,0 mm	4	5	8	7	9	9
Topo todas posições e < 6,0 mm	10	9	8	7	6	-

## 2.7 Aterramento

A eletricidade é um fenômeno que jamais pode ser esquecido na elaboração de um projeto. Assim, com as condições apresentadas anteriormente, se torna indispensável a verificação do sistema de aterramento de todo o pátio de carretas. Quando há uma boa adequação do sistema, garante-se a segurança das pessoas que ali trabalham e também do processo como um todo.

Vale ressaltar que, como todo equipamento, o aterramento também necessita de uma manutenção, evitando danos nesta malha e garantindo o funcionamento da instalação elétrica. Os tipos de manutenção serão citados à frente.

De uma maneira geral, a eletrização de um corpo se dá por três maneiras, sendo elas, atrito, contato ou indução. No caso do atrito, que se diz respeito ao carregamento de hidrogênio das carretas, podem ser eletrizados pelo ar atmosférico. Então, uma carreta, carregada ou não de hidrogênio, parada ou em movimento, armazena em sua estrutura metálica, carga elétrica (estática). Em dias secos, esse fenômeno é maior pelo fato da umidade está baixa.

Para garantir os limites de segurança, é necessário um cuidado especial durante a elaboração de projetos metálicos, o que define sua eficácia, alcançando o

principal objetivo do aterramento: proporcionar um caminho de escoamento para terra de qualquer pico de eletricidade, de modo que seja amenizado os danos.

No caso do hidrogênio, que apresenta uma atmosfera explosiva, por conta de produtos inflamáveis, pode ocorrer uma ignição por centelha, seja de uma instalação elétrica, por uso de um aparelho celular, por eletricidade estática ou pelo superaquecimento de algum equipamento.

### **2.7.1 Tipos de manutenção**

Existem dois tipos de manutenção para melhor funcionamento do equipamento, como:

- Fazer a inspeção em intervalos frequentes daqueles componentes que são acessíveis ou podem facilmente se tornar acessíveis;
- Exame, incluindo uma inspeção rigorosa e possível comprovação.

A manutenção voltada para o sistema de aterramento de uma instalação está geralmente ligada a um outro tipo de trabalho no local, por exemplo, uma melhora no serviço, extensões etc., consistindo em uma inspeção visual das partes do sistema que pode ser vista diretamente, observando se há existência de desgaste e corrosão, assegurando que as conexões entre os terminais estejam em perfeitas condições, de acordo com a regulamentação.

### **2.7.2 Tratamento do terreno**

Para o projeto de um sistema de aterramento, é de grande importância se ter um conhecimento das características do solo onde irá ser aterrado, principalmente a sua constituição.

Quando há secas, terrenos ociosos e nus, movimento do terreno etc., fazem com que a resistência do solo, o chamado terra, se eleve, chegando a valores perigosos, por isso, necessita realizar um tratamento do terreno. O mesmo, tem como finalidade, melhorar os aterramentos de uma instalação.

Quando se fala da resistividade de um terreno, levamos em consideração a composição de eletrólitos em seu conteúdo, que depende, diretamente, de sua natureza mineralógica e umidade.

### 2.7.3 Composição do aterramento

O aterramento é constituído pelos seguintes componentes: cabo de cobre nu, eletrodo de terra ou haste com revestimento de aço galvanizado, ou seja, aço cobreado. Além do uso das emendas ou derivações dos cabos nus e interligados com hastes, que na maioria das vezes é feita com alma de aço revestida de cobre, através das conexões aparafusadas.

Na unidade de produção de hidrogênio não é diferente a aplicação de tais componentes citados, portanto garante-se que, havendo uma interligação das estruturas metálicas em questão com as malhas de aterramento da unidade, não haverá problemas quanto à eventuais descargas elétricas. Além disso, há uma grande preocupação em relação às carretas, que devem ser aterradas assim que chegam na baía de enchimento.

No local onde estão localizadas as estruturas, ou seja, no local de carga e descarga do hidrogênio, existe um terminal como um tipo de tomada que liga a estrutura metálica da carreta ao aterramento eficiente para mesma finalidade, ocorrendo então a equalização, que é mais importante que o valor ôhmico do aterramento. Lembrando que deve ser providenciado um ou mais cabos para ligar a carcaça do caminhão ao ponto de terra, e a ligação do cabo de aterramento deverá ser feita antes do enchimento do produto (hidrogênio).

Outro fator importante é o uso de ferramentas específicas e fabricadas com materiais à prova de explosão, principalmente em lugares propício a vazamento, onde normalmente se utiliza ferramentas de ligas de cobre e bronze, como observado na figura 4.



Figura 4 – Chave inglesa antifaiscante usada para áreas classificadas

Fonte: <https://www.directindustry.com/pt/fabricante-industrial/chave-inglesa-bronze-225951.html>

## 2.8 SolidWorks

O *software* de projetos denominado *SolidWorks* é uma ferramenta que realiza desenhos 2D e 3D com muita facilidade e eficiência. Este programa possui diversas funcionalidades, como criar formas tridimensionais a partir de composições geométricas básicas que são de grande auxílio para projetistas, engenheiros e fabricantes em geral. A própria concepção do *software* leva o usuário a inovações que englobam todo o processo de desenvolvimento de um projeto no que tange a redução de tempo, custo, produtividade, escolha de material, simulações em tempo real, proporcionando assim produtos de alta confiabilidade. Criado e desenvolvido pela empresa *Solidworks Comporation*, que hoje pertence a *Dassault Systemes S.A.*, é um dos *softwares* mais empregados.

Nele, possui uma ampla biblioteca de projeto que possibilita aos seus usuários a criação e a utilização de diversos elementos padronizados, conforme a norma desejada, auxiliando sua fabricação e exportação dos mais simples produtos aos mais complexos. Na área da mecânica, por exemplo, ele nos permite criar máquinas, ferramentas, tubulações, chapas, estruturas, soldas, entre diversos outros componentes e simular seu desempenho quando os esforços são aplicados.

A interação com outros programas também é uma das principais características do *SolidWorks*, como por exemplo o Microsoft Excel e Word, possibilitando a

importação e exportação de dados e geração de relatórios em geral de forma prática e rápida. Possibilita também a criação de animações de projetos.

Dentre algumas ferramentas que o software nos oferece estão:

- Operações de corte: corte extrudado, corte por revolução, assistentes de furação, corte por varredura e outros;
- Operações de Ressalto: ressalto/base extrudado, ressalto/base revolucionado, ressalto/base por limite, ressalto/base loft e outros;
- Criação de filetes, cascas, nervuras, inclinações e outros;
- Operações de montagem através da junção de peças distintas;
- Análises: Estática, térmica, flambagem, fadiga, teste de queda, projeto de vazo de pressão e outros.

A fase inicial para se fazer qualquer projeto é a seleção de um plano e a criação de um esboço ao qual dará início ao desenho, conforme a figura 5, e em seguida realizar qualquer desenho 2D conforme a figura 6.

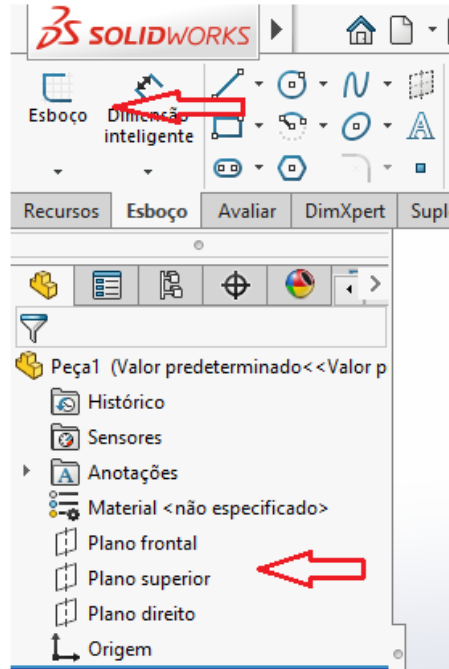


Figura 5 - Seleção do plano e criação de um esboço  
Fonte: Figura do autor

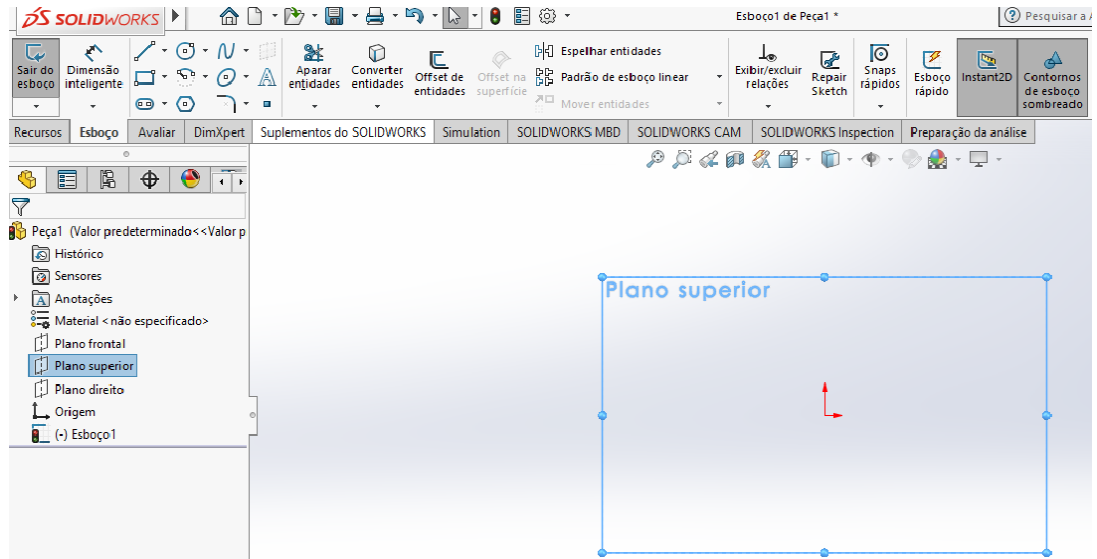


Figura 6 - Criação de qualquer desenho 2D  
Fonte: Figura do autor

Após a criação de qualquer desenho em 2D, este poderá ser transformado em 3D com a espessura desejada, como mostra as figuras 7 e 8, e a partir disto realizar qualquer outro procedimento seja ele uma montagem, uma seleção de material ao qual a peça será produzida, os custos para construção da peça, testes para identificar se o elemento criado irá suportar as condições de trabalho, entre outras.

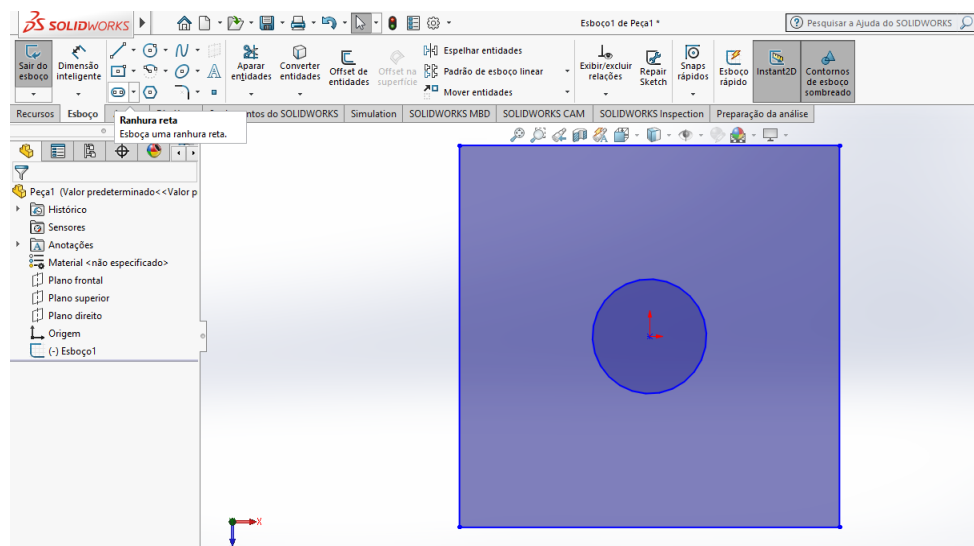


Figura 7 - Criação de uma peça quadrada qualquer com um furo no centro  
Fonte: Figura do autor

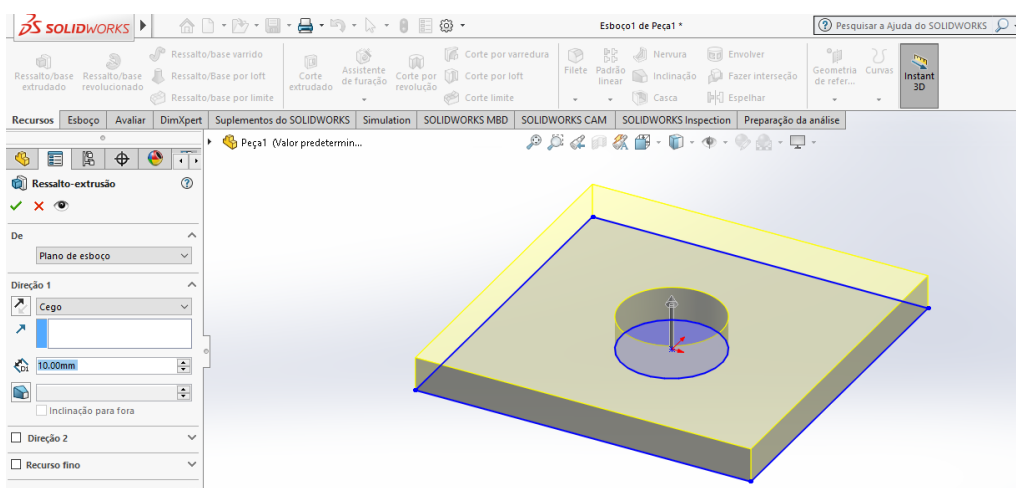


Figura 8 - Peça com 10mm de espessura com um furo no centro  
Fonte: Figura do autor

Depois de realizar a construção de um modelo, é de extrema importância verificar se esta peça produzida funcionará de modo eficiente. Para isso, o *SolidWorks* disponibiliza como uma de suas inúmeras ferramentas o *SolidWorks Simulation* em que nele é realizado numerosos estudos através do Método de Elementos Finitos (MEF). O MEF vem sendo utilizado praticamente em todas as áreas da engenharia, pois consegue realizar múltiplas análises a fim de fazer um projeto de forma mais barata e de modo que este saia com qualidades de segurança altíssimas. O MEF surgiu em meados de 1940 na indústria aeronáutica, utilizado por engenheiros para análise de distribuição de tensões em chapas de asas de avião. Devido à dificuldade dos computadores em realizar grandes quantidades de cálculo, este método foi deixado de lado por um tempo.

Edward L. Wilson, é um engenheiro civil estadunidense, desenvolveu um dos primeiros programas que usava o MEF que foi amplamente utilizado por acadêmicos de pesquisa e laboratórios industriais, porém este só realizava análises de tensões bidimensionais. O programa se tornou popular rapidamente pois o acesso era gratuito.

O MEF divide o modelo em muitas partes pequenas de formas simples, denominadas elementos, em que estes elementos são ligados por pontos denominados nós que juntos formam a chamada malha, como podemos visualizar na figura 9. Este método consiste basicamente na substituição de um número infinito de variáveis desconhecidas por um número delimitado de elementos de desempenho bem definido, fazendo com que um problema complexo seja trocado por muitos

problemas simples que serão resolvidos simultaneamente. Os cálculos são realizados em cada elemento gerado nesta malha, ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles na malha, maior será a precisão nos resultados da análise. (SolidWorks, 2018).

Segundo Soriano (2003), este tipo de cálculo está cada vez mais popular nos Estados Unidos da América e é gasto quantias bilionárias por ano em softwares de computador sobre MEF. Além disso, registram-se centenas de livros sobre o assunto em vários idiomas e em uma pesquisa feita em 2006 para a frase “elementos finitos”, usando o programa Google, encontrou mais de 14 milhões de páginas de resultados.

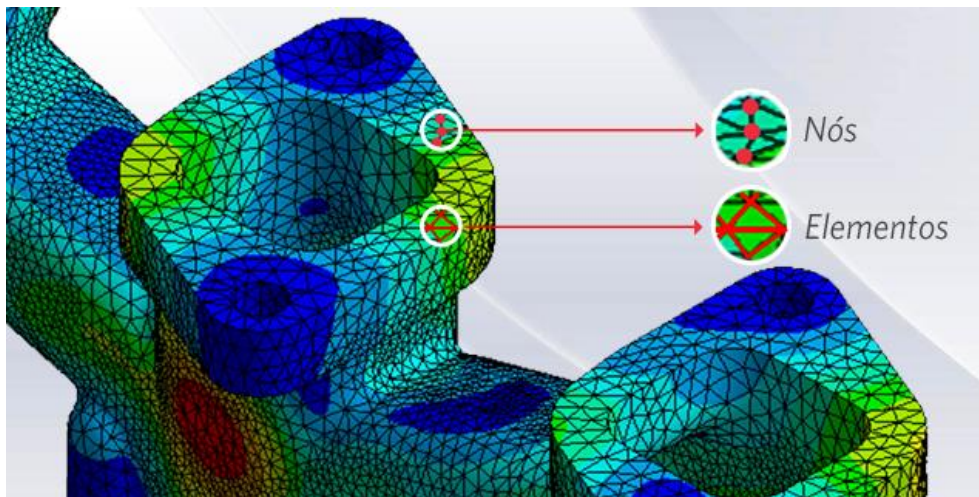


Figura 9 - Nós e elementos que constituem uma malha

Fonte: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33244/33244.PDF>, acessado em 2019

Realizado o seu projeto, tomaremos como base o montado na figura 8 com o objetivo de demonstrar o funcionamento do software, podemos criar um estudo com a ferramenta *SolidWorks Simulation* (figura 10).

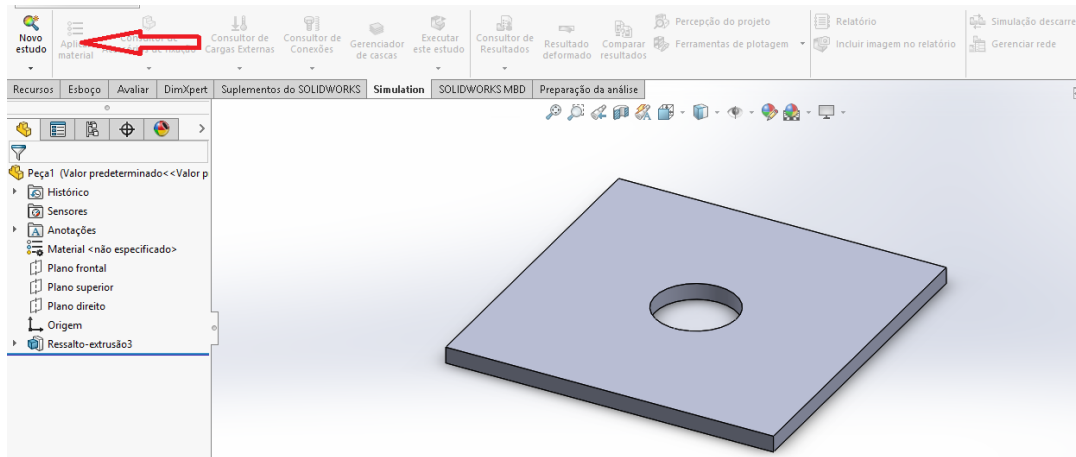


Figura 10 - Criando um estudo  
Fonte: Figura do autor

Após criarmos o estudo, escolhemos que tipo de material a peça será feita, em seguida decidimos a região onde este estará fixo (na peça em questão vai ser a parte inferior), aplicamos qualquer carga externa (foi aplicado uma força de 10 kgf em toda parte superior). Geramos uma malha para que possa ser executado uma análise. Podemos observar os resultados de tensão, deslocamento e deformação respectivamente nas figuras 11,12 e 13.

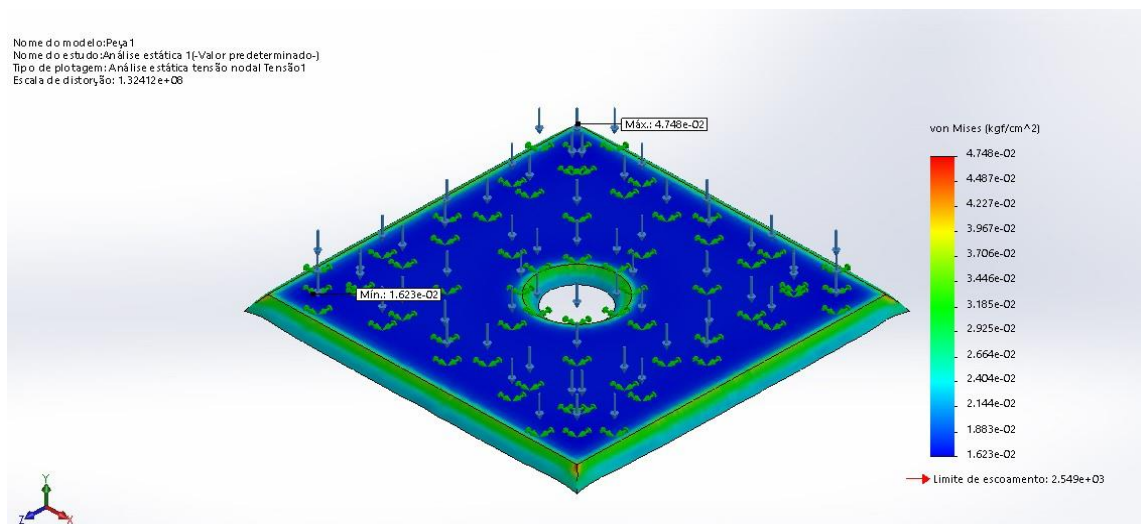


Figura 11 - Resultado da distribuição das tensões  
Fonte: Figura do autor

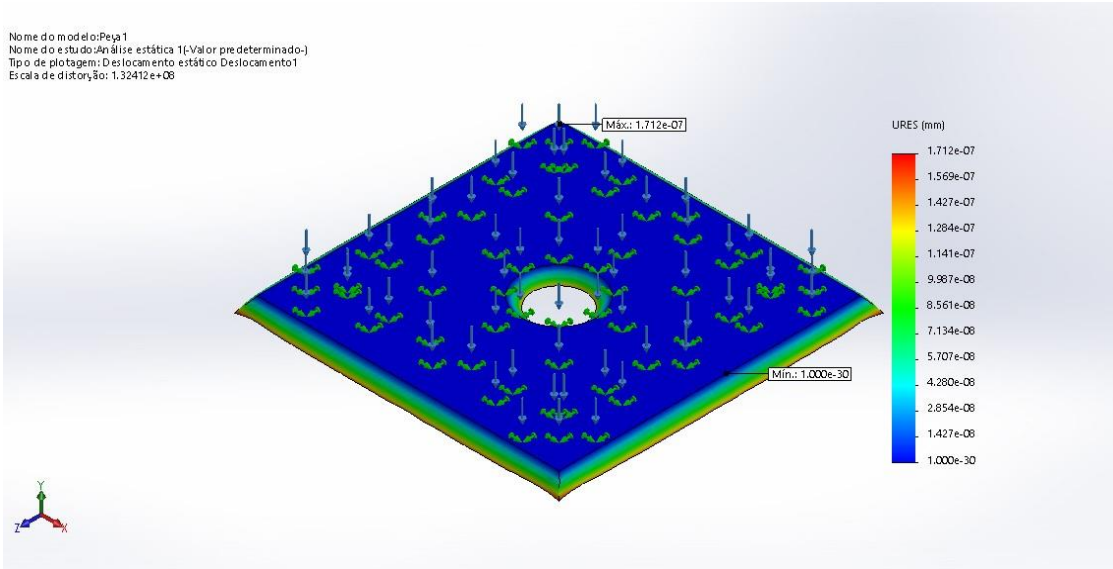


Figura 12 - Resultado do deslocamento equivalente  
 Fonte: Figura do autor

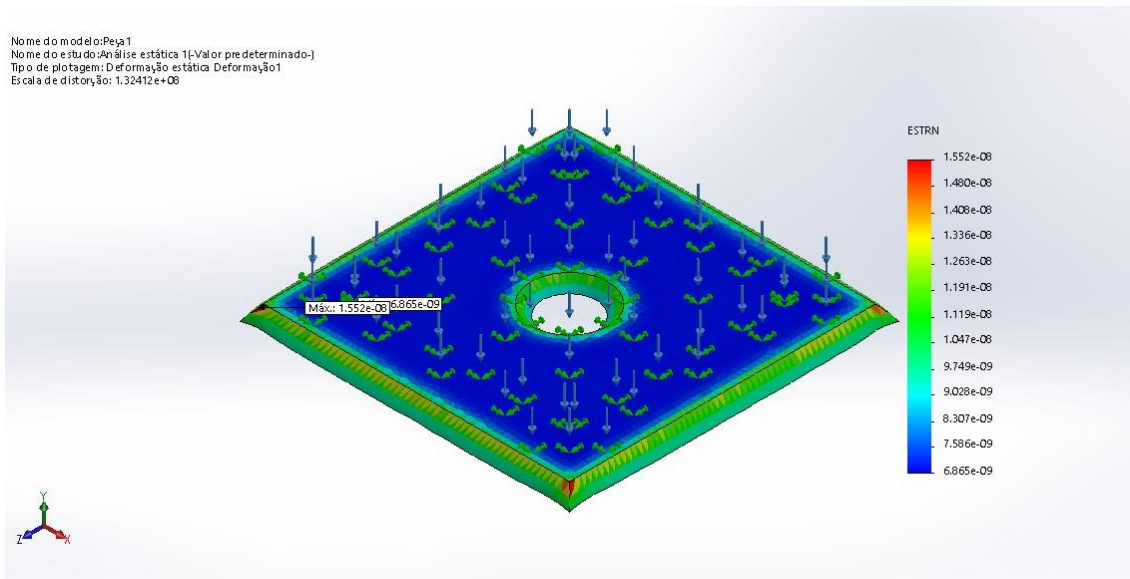


Figura 13 - Resultado da deformação equivalente  
 Fonte: Figura do autor

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1 Descrições do Processo

Inicialmente, o gás de coqueria (GCO), que é uma corrente gasosa enriquecida com Hidrogênio a aproximadamente 45%, é liberado pela dessulfurização por um gasoduto de 16” de diâmetro a aproximadamente 50 metros de distância da unidade de fabricação.

Na fábrica, o gás bruto é submetido à primeira etapa de purificação, através de lavagem com óleo em uma torre, onde substâncias solúveis em óleo são removidas. Em seguida, o gás é direcionado aos compressores de alimentação. Estes são de múltiplos estágios e do tipo parafuso, sendo acionados por motor elétrico. Todos os estágios trabalham com lubrificação e nas suas linhas de descarga, após os respectivos resfriadores (*intercoolers*), existem vasos separadores e filtros onde válvulas automáticas drenam o condensado formado para o tanque de condensados.

O GCO seco e comprimido passa, a seguir, por um leito de carvão ativado em dois vasos que operam em paralelo e cuja finalidade é remover contaminantes prejudiciais ao processo de purificação do H<sub>2</sub>.

Por fim, o GCO já pré-purificado flui pela tubulação até os vasos purificadores, onde ocorre o processo de adsorção dos contaminantes do Hidrogênio. Por diferencial de pressão, o leito de molecular libera os contaminantes adsorvidos e encaminha o Hidrogênio “puro” para duas linhas: para um gasoduto de fornecimento direto para cliente (24h) e para os compressores de produto – responsáveis pelo carregamento das carretas e manutenção do sistema de *Back Up*.

#### 3.2 Apresentação do Problema

Como visto anteriormente, a segurança no carregamento de hidrogênio é algo extremamente importante e deve ser feito seguindo normas voltadas ao processo de enchimento, seja das carretas ou tanques fixos. Muitas empresas também apresentam suas normas internas para realização do procedimento, com o intuito de assegurar ainda mais o profissional que realiza a tarefa e a segurança de todos a volta, além da segurança do produto, pois se trata de um material relativamente caro, devido ao custo de todo o processo para sua produção.

Abaixo, na figura 14, podemos observar o posto de enchimento de uma carreta de hidrogênio, local onde a estrutura a ser analisada se encontra instalada para sustentação dos mangotes de carregamento.



Figura 14 - Posicionamento da carreta na baía (carregamento de hidrogênio)

Fonte: Foto do autor

Na figura 15, mostra-se uma visão geral do compartimento traseiro de uma carreta de hidrogênio, durante o processo de carregamento. Nota-se, neste caso, a presença de 09 (nove) válvulas de bloqueio manual, manipuladas durante o enchimento individual de cada tubo *bundle*, o conjunto mangueira/válvula de acionamento automático e o bloco *manifold*, responsável pela distribuição das múltiplas linhas de hidrogênio.



Figura 15 - Compartimento traseiro para carregamento das carretas

Fonte: Foto do autor

A mangueira de enchimento é conectada à válvula principal do distribuidor da carreta (bloco *manifold*), e deve seguir alguns passos importantes para manipulação do equipamento como: registrar a pressão e a temperatura do sistema, realizar testes de vazamento em todas as guarnições e conexões, monitorar a pressão durante o enchimento e, quando esta atingir 100 bar (1500 psi), realizar testes de vazamento em todas as válvulas e conexões e antes de iniciar o processo de carregamento, deve-se conectar o cabo de aterramento.

O problema inicial, ou seja, o aparecimento de trincas e eventual rompimento nas válvulas de carga/descarga dos tubos *bundle* de hidrogênio, foi relatado pelos operadores como algo recorrente, o que acaba comprometendo a segurança do processo e prejudicando a etapa de distribuição do gás. Na figura 16, aponta-se a região das trincas, no conjunto de abastecimento.



Figura 16 - Conjunto de abastecimento conectado ao bloco *manifold* da carreta

Fonte: Foto do autor

### 3.3 Análise da Causa e Solução

Devido à urgência de se obter uma solução para o problema apresentado, uma estrutura presente na baia de enchimento das carretas foi projetada de forma equivocada, sem que fossem considerados vários pontos de extrema importância. A ausência de determinadas análises gerou consequências graves, confirmando a necessidade de cuidado extremo mesmo quando se trata de algo relativamente simples.

Um funcionário, ao desconectar a válvula de enchimento da carreta *tube bundle* de hidrogênio, foi atingido na face pelo conjunto balancim/viga, que sustentava a mangueira e válvula de enchimento. Conforme descrito pelo empregado e evidenciado pelas marcas no capacete, o conjunto balancim/viga atingiu primeiramente o capacete e, posteriormente, a face do colaborador, como mostra na figura 17.

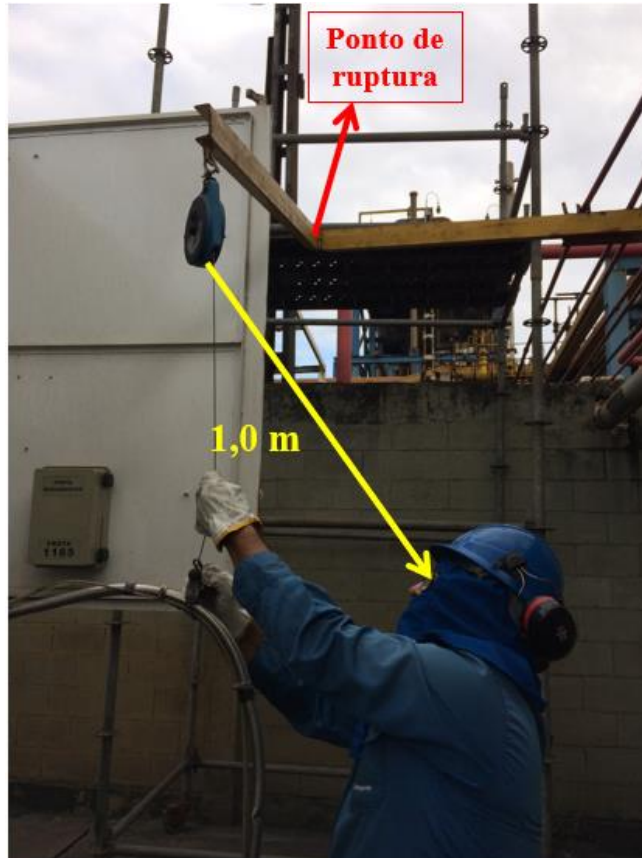


Figura 17 - Simulação do acidente

Fonte: Foto do autor

Após o acontecido, uma análise no sistema foi realizada visando melhorar a estrutura. Foram executados alguns testes para verificar a possível causa do problema, o que aparentemente parecia ter sido causado por esforço excessivo na estrutura de sustentação da mangueira em seu ponto de apoio, na região soldada, como podemos observar nas figuras 18 e 19.



Figura 18 - Pórtico de sustentação do balancim (estrutura danificada)

Fonte: Foto do autor



Figura 19 - Região ampliada da junta soldada após acidente

Fonte: Foto do autor

Junto à mangueira de enchimento, foi acoplada uma balança portátil para verificar seu peso – o que durante o carregamento, devido à pressão do sistema, pode gerar ainda mais danos à estrutura de sustentação, conforme as figuras 20, 21 e 22.



Figura 20 - Verificação do peso da mangueira de enchimento com uso de uma balança portátil

Fonte: Foto do autor



Figura 21 - Peso da mangueira de enchimento em Kg

Fonte: Foto do autor



Figura 22 - Reservatório utilizado para teste de peso máximo

Fonte: Foto do autor

A sustentação da mangueira é algo que deve ser analisado, pois seu peso durante o carregamento é parcialmente concentrado nas válvulas da carreta, podendo haver um risco de, com o tempo de uso, gerar folgas e até mesmo rompimento por fadiga no ponto de ligação da mangueira com a válvula principal do distribuidor da carreta. Na figura 23 abaixo pode-se observar a mangueira de enchimento conectada à válvula do distribuidor.



Figura 23 - Compartimento traseiro da carreta, com ênfase para mangueira de enchimento

Fonte: Foto do autor

Foi realizado então um estudo do que poderia ser feito para aliviar o peso da mangueira na conexão com a válvula de enchimento. Algumas sugestões de melhoria foram apresentadas:

- 1 - Fixar uma parte mais rígida à mangueira que à mantenha apoiada no chão conectando a mesma através desse sistema até a válvula. Porém com isso seria difícil efetuar o carregamento, já que as carretas apresentam alturas variadas e posições das válvulas em lugares diferentes. Assim, não haveria a liberdade de manipulação da mangueira, gerando dificuldade para o posicionamento das carretas na baia de enchimento;
- 2 - Uso de torquímetro para evitar aperto excessivo na conexão das válvulas e danos à mesma, garantindo uma vida útil maior à conexão. Tal procedimento passou a ser realizado, seguindo a recomendação do fabricante da válvula (aperto máximo de 40Nm);
- 3 - Conectar a mangueira direto na válvula sem apoio, substituindo o material da conexão das válvulas do distribuidor das carretas que é feito de latão, material com baixa resistência mecânica, por um material similar ao da conexão da mangueira, ou mais resistente. Porém o custo de substituição das válvulas seria muito alto frente a alternativas;
- 4 - Reduzir o comprimento do pórtico de sustentação, para assim diminuir a flexão gerada pelo peso da mangueira de enchimento e o esforço na região soldada, o que

seria viável, se não prejudicasse no posicionamento das carretas na baia, pois as carretas não teriam possibilidade de chegar mais perto da estrutura. Além disso, com o tamanho do pórtico de sustentação reduzido as mangueiras ficariam ancoradas muito longe do ponto de conexão;

5 - As baias de enchimento de carretas apresentam um sistema de combate à incêndio (deluge), que contam com 3 estruturas de sustentação da tubulação de água, conforme figura 24. Com a instalação de um balancim nas extremidades dos pórticos de sustentação seria possível encher as duas carretas já estacionadas, sustentando as mangueiras sem a necessidade desse movimento da estrutura, ou seja, seria fixa, mais resistente e somente o balancim faria o movimento para enchimento das duas carretas.

Todas foram analisadas e estudadas separadamente. A grande maioria foi descartada e as soluções de número 2 e 5 foram aplicadas, visto que o balancim fixo à estrutura seria ideal.



Figura 24 - Estruturas existentes utilizadas no projeto de sustentação das mangueiras de enchimento

Fonte: Foto do autor

Com o balancim fixo (estrutura antiga), o problema referente a junta soldada, onde há o movimento do pórtico (local da falha do projeto) não seria eliminado.

Fazendo uma análise da área, foi verificado que logo acima das carretas, estacionadas na baia, se encontram as vigas de sustentação do sistema deluge, visto na figura 25. Se tratando de uma viga com perfil I de aço 1020 e com espessura da alma de 8,3mm, o peso referente a mangueira seria algo que não danificaria a estrutura, se pudesse ser utilizado como sustentação da mangueira de enchimento.



Figura 25 - Estrutura de sustentação do sistema de combate à incêndio

Fonte: Foto do autor

O posicionamento da estrutura de sustentação da tubulação e *sprinklers* era estratégico, pois as carretas ficariam alinhadas para o carregamento, como podemos observar na figura 26:



Figura 26 - Posicionamento das carretas frente à estrutura de sustentação dos sprinklers

Fonte: Foto do autor

Como os *sprinklers* devem ser posicionados na parte superior de cada baia facilitaria usá-lo como sustentação para as mangueiras de enchimento, visto que não necessitaria de instalar uma nova estrutura ou realizar adaptações mais detalhadas a estrutura já existente.

Feito essa análise, a ideia foi instalar na estrutura de sustentação dos *sprinklers* vista na figura 27, os balancins que estavam na estrutura antiga, o que impediria seu movimento, porém seria viável instalar um cabo de aço de forma que o balancim ficaria disponível para duas baias, ou seja, somente seria removido e passado para a baia ao lado, quando terminasse o carregamento na primeira baia.



Figura 27 - Balancim fixo com cabo de aço à estrutura de sustentação dos *sprinklers*

Fonte: Foto do autor

A seleção do balancim foi feita com uso de alguns catálogos. Com relação a qualidade e custos, foi selecionado o balancim da empresa Pemaco Balancins *Draw*, do modelo P8 com capacidade máxima de 8kg, como apresentado nas figuras 28 e 29.

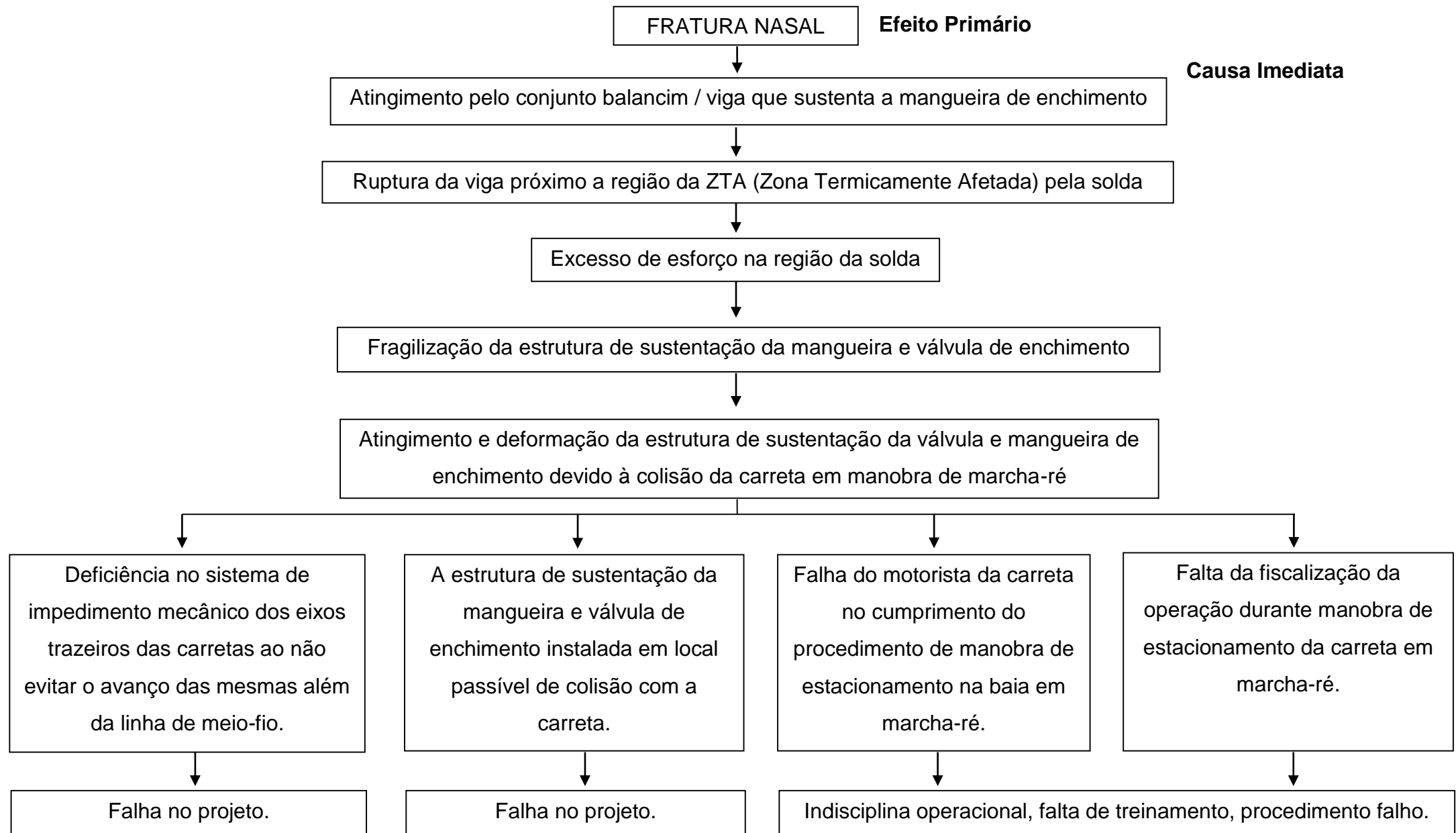


Figura 28 - Balancim Draw P8 com capacidade entre 4 e 8Kg  
Fonte: Foto do autor



Figura 29 – Balancim junto à mangueira de enchimento das carretas  
Fonte: Foto do autor

### 3.4 Eliminação do problema através da aplicação da ACR



## 4. ESTUDO DE CASO E DESENVOLVIMENTO

### 4.1 Resultados da Simulação (SolidWorks)

Foi escolhido o software SolidWorks na versão estudante para a realização da simulação da estrutura devido a sua fácil interface e utilização.

Foi feita a modelagem 3-D da carretilha retrátil como etapa inicial do projeto. A estrutura é composta das seguintes partes: um tubo com diâmetro de 8", uma viga I de 10", 4 chumbadores colocados com distâncias iguais em uma chapa de aço, um olhal e 4 cantoneiras colocadas em uma chapa que serve de sustentação da viga, em que todos os dados específicos referentes ao projeto serão mostrados com mais detalhes posteriormente.

As simulações foram realizadas no pacote *Simulation* do *SolidWorks* utilizando o elemento 3-D por considerar concentradores de tensão, demonstrando assim um resultado mais refinado que garante uma compatibilidade dos dados juntamente com a simulação estática.

Após a realização de todos esses processos foi aplicado o aço ASMT A36 que é um material de alta resistência e boa soldabilidade. Este material traz segurança para realização da adequação da estrutura, uma vez que suporta facilmente as cargas da tubulação de 1/2" para qual foi projetado (sistema *deluge*), além de suportar os esforços resultantes do peso aproximado de 30kgf do conjunto de carregamento. Na tabela 3 podemos ver algumas das propriedades mecânicas do material.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas do aço ASMT A36  
Fonte: Base de dados do *SolidWorks*

Propriedades	Valor	Unidades
Módulo Elástico	2e+ 11	N/m <sup>2</sup>
Coeficiente de Poisson	0.26	N/A
Módulo de cisalhamento	7.93e+ 10	N/m <sup>2</sup>
Massa específica	7850	Kg/m <sup>3</sup>
Resistência de tração	400000000	N/m <sup>2</sup>
Resistência à compressão	-	N/m <sup>2</sup>
Limite de escoamento	250000000	N/m <sup>2</sup>

Feito isso, especificamos as ligações, ou seja, as faces fixas que não possuem deslocamento. Depois aplicamos a força na parte interna do olhal. Essas forças são as mesmas encontradas no método analítico, e tem como finalidade, encontrar resultados semelhantes para realização das comparações.

O *software* nos disponibiliza três tipos de malha: fina, média e grossa. Escolhemos a malha média que nos proporciona alta precisão no projeto. O *SolidWorks* nos gerou um número total de nós de 103255 e um total de elementos de 50583. Podemos notar na figura 30 milhares de partes em preto que definem a chamada malha.

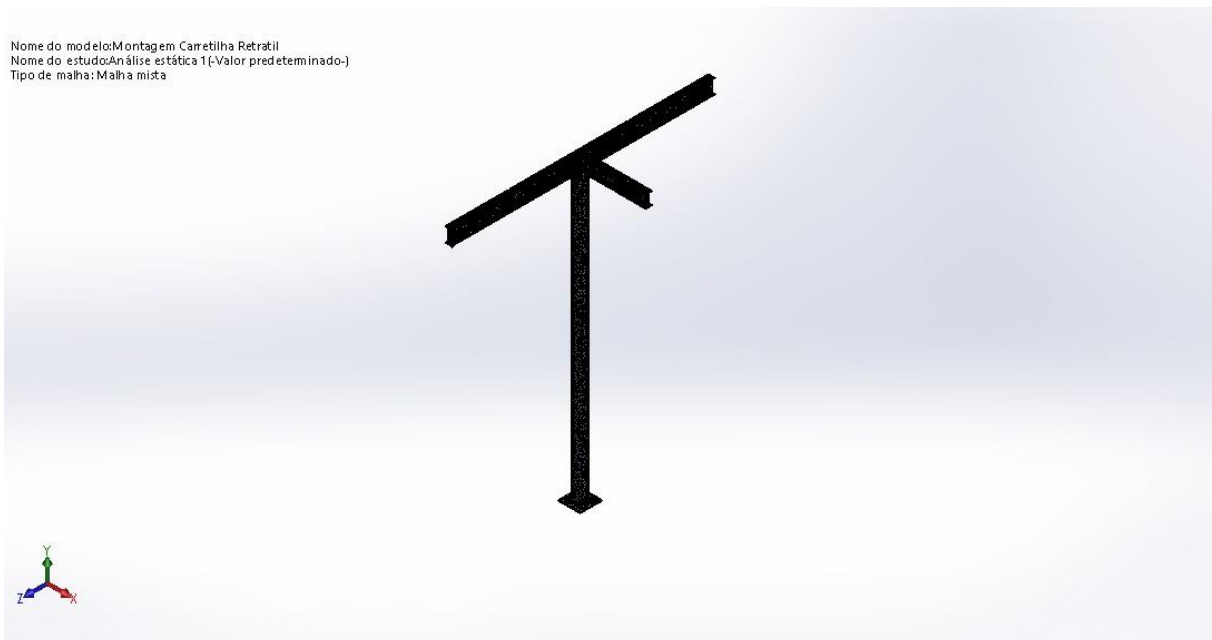


Figura 30 – Composição da malha na estrutura

Fonte: *SolidWorks*

Criado a malha, executamos os estudos estáticos da estrutura com o *Simulation*.

Encontramos o valor máximo da tensão de Von Mises de 1419,895 Kgf/cm<sup>2</sup> sendo demonstrada na figura 31. Podemos observar que o limite de escoamento do material é de 2549,291 Kgf/cm<sup>2</sup>, ou seja, a carretilha retrátil irá suportar as cargas presentes com bastante folga.

Resultados complementares são apresentados pela figura 32, em que mostra o resultado do deslocamento, e pela figura 33, que apresenta os valores da deformação equivalente.

Notamos que o deslocamento máximo se encontra exatamente no olhal, justamente onde a carga está localizada, e a deformação equivalente se encontra na região central.

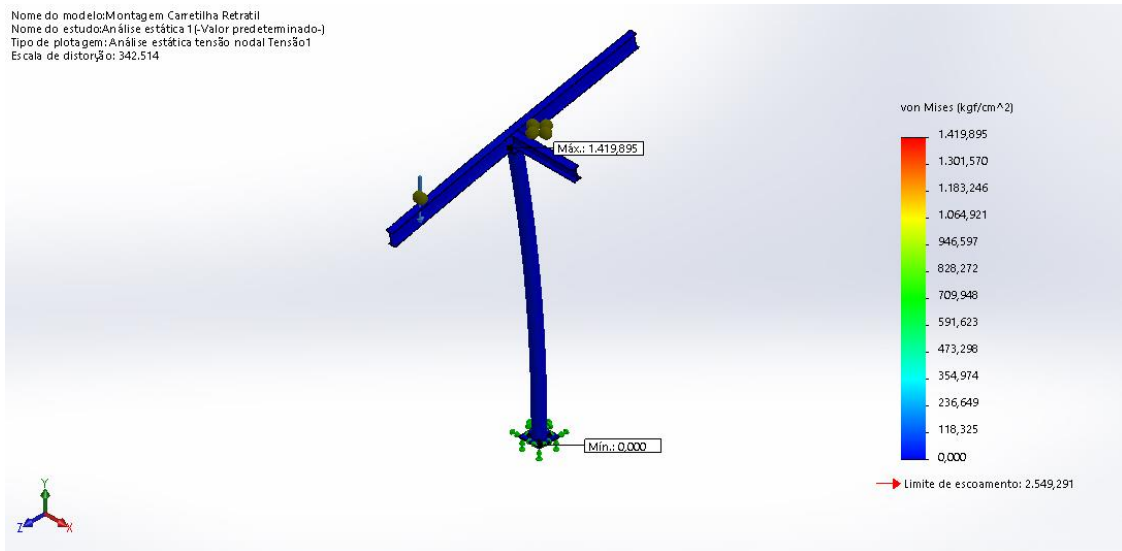


Figura 31 – Tensão de Von Mises

Fonte: *SolidWorks*

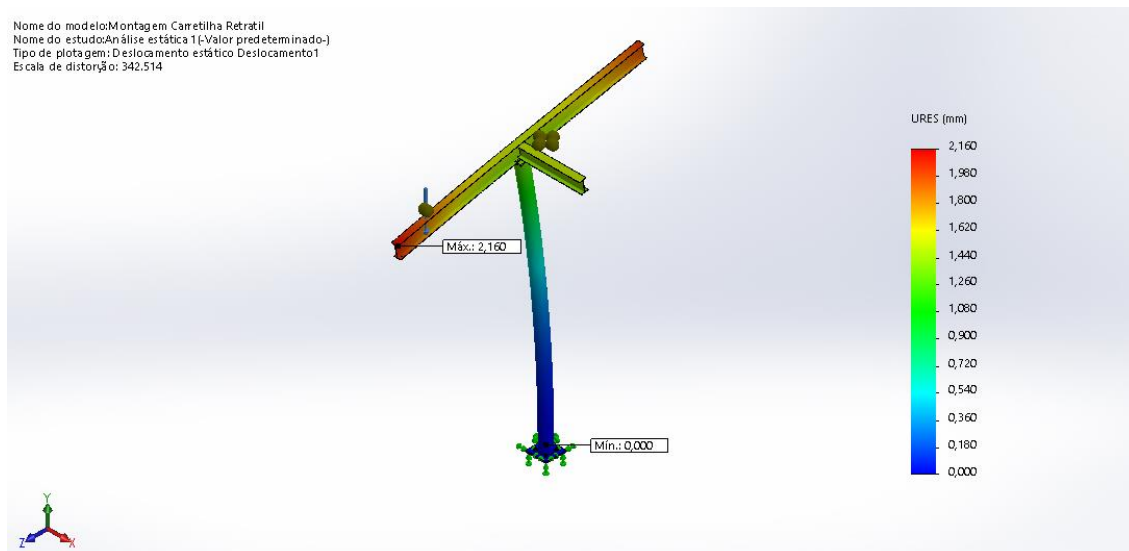


Figura 32 – Deslocamento

Fonte: *SolidWorks*

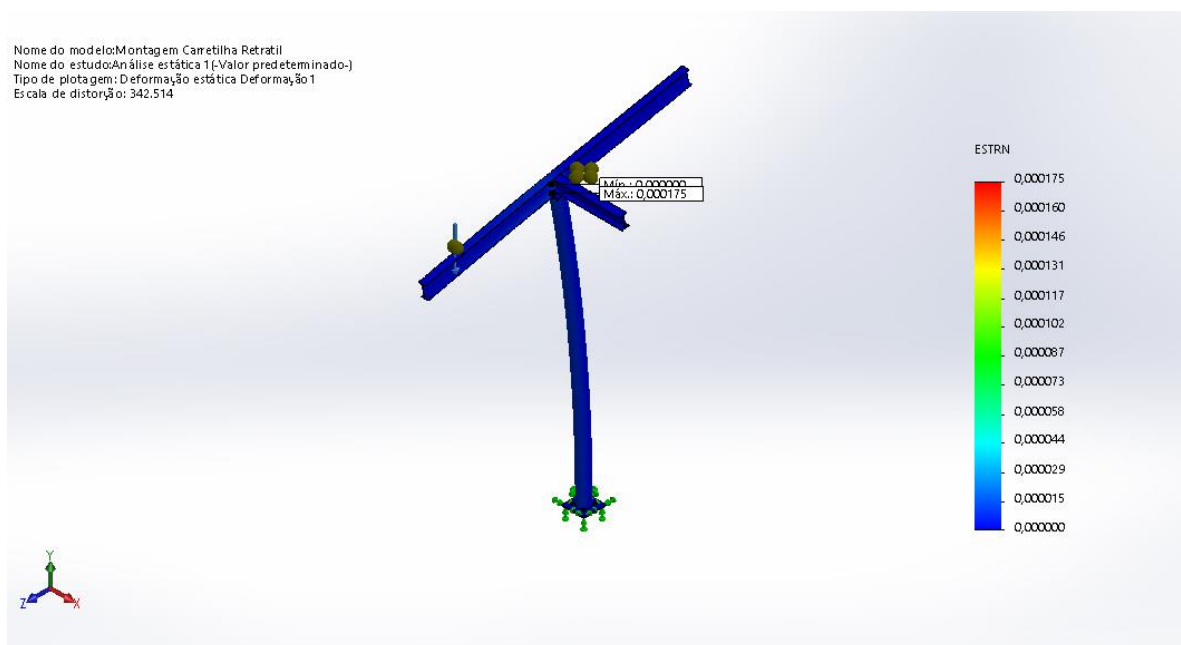


Figura 33 – Deformação equivalente

Fonte: *SolidWorks*

## 4.2 Considerações e Cálculos do Projeto

Durante a elaboração do projeto, foram consideradas diversas situações para cada componente que faz parte da estrutura. Assim, todos os esforços provenientes da força aplicada devem respeitar as condições que a estrutura suporta. Todas as conclusões discutidas neste tópico aparecem discriminadas no memorial de cálculo do capítulo seguinte.

Uma das primeiras considerações é a escolha do cabo de aço, especificado junto com o fabricante e descrito abaixo:

- Cabo de aço:

Sabe-se, primeiramente, que carga de ruptura mínima do cabo de aço, somado aos acessórios é de 273 kgf. A carga de ruptura é reduzida em 22% devido aos acessórios para montagem do laço (dados do fabricante). O cabo de aço especificado atende aos requisitos do projeto, onde a tensão admissível calculada com o uso da figura 36 prevê o fator de segurança que foi usado nos cálculos. Abaixo as tensões admissíveis referentes a força normal e tangencial, respectivamente, aplicadas ao projeto (material: aço carbono ASTM A36, fator de segurança de 3):

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

Vale ressaltar que foi utilizado um cabo de aço ao invés de uma cinta por apresentar menor custo e pela necessidade do rompimento do mesmo caso o motorista, por um descuido, fechasse o cabo de aço junto as portas e com isso não exercesse esforços demasiados a estrutura.

Após a requisição do cabo, calcula-se os esforços exercidos sobre o olhal:

- Olhal para fixação:

- Referente à força vertical, o olhal atende aos requisitos do projeto. Submetido à força de tração: A tensão máxima aplicada é inferior à tensão admissível (esforço considerado sobre a menor seção da junta soldada):

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 96 \frac{kgf}{cm^2}$$

Submetido à força de cisalhamento: A tensão máxima aplicada é inferior à tensão admissível:

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_{m\acute{a}x} = 191 \frac{kgf}{cm^2}$$

- Referente à força horizontal (longitudinal), o olhal atende aos requisitos do projeto, pois a tensão resultante do momento máximo é inferior à tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f = 275 \frac{kgf}{cm^2}$$

- Referente à força horizontal (transversal), o olhal atende aos requisitos do projeto, pois a tensão resultante do momento máximo é inferior à tensão admissível:

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f = 1155 \frac{kgf}{cm^2}$$

- Referente a força na junta soldada: o eletrodo utilizado foi o E7018, devido seu baixo teor de hidrogênio e boa penetração. Para o limite de escoamento do filete de solda foi utilizado a norma AWS 5.1 e o cálculo da tensão de cisalhamento máximo

foi calculado na seção da garganta da solda (seção mais crítica), a tensão admissível foi calculada no memorial de cálculo:

$$\zeta_{\text{adm}} = 225 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta_{\text{máx}} = 51,1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Considera-se então, os possíveis esforços sobre a viga de perfil I.

- Perfil I de 10":

Dados para análise da resistência à torção:

$F = 273 \text{ kgf}$  (carga de ruptura mínima do cabo de aço + acessórios);

$\sigma_{\text{adm}} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$  (tensão admissível referente a força normal aplicada à estrutura);

$\zeta_{\text{adm}} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$  (tensão admissível referente a força tangencial aplicada à estrutura).

A tensão normal na alma por torção de empenamento onde  $z = 0 \text{ cm}$ , sobre a coluna tubular, que seria o pior dos casos é inferior a tensão admissível referente a força normal:

$$\sigma' = 560 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para o mesmo  $z=0$  a tensão de cisalhamento de empenamento e a tensão de flexão pura na direção vertical, respectivamente representadas, são inferiores a tensão admissível referente a força tangencial:

$$\zeta' = Sw1. \left( \frac{d^3\theta}{dz^3} \right) / tf = 23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_l = 13 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

A tensão de cisalhamento por torção pura onde  $z = 230 \text{ cm}$ , que seria o pior dos casos é inferior a tensão admissível referente a força tangencial aplicada a estrutura:

$$\zeta \text{ no flange; } \zeta_o = 236 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta \text{ na alma; } \zeta_f = 149 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para a resistência à flexão pelo esforço na direção longitudinal da baia a máxima tensão aplicada é inferior a tensão admissível:

$$\sigma_{\text{adm}} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_f = 1053 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Consideradas as situações acima, verificam-se os esforços exercidos sobre a coluna tubular:

- Coluna Tubular:

A análise da coluna tubular atende aos requisitos, pois a máxima tensão aplicada é inferior à tensão admissível calculada para a estrutura:

- Resistência a flexão sobre a coluna tubular:

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f = 228 \frac{kgf}{cm^2}$$

- Resistência à torção sobre a coluna tubular:

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_f = 91 \frac{kgf}{cm^2}$$

Por fim, os chumbadores devem ser analisados, visto que serão submetidos à torção e flexão sobre a coluna.

- Chumbadores:

A análise dos chumbadores atende aos requisitos, pois a máxima tensão aplicada é inferior a tensão admissível calculada para a estrutura:

- Resistência dos chumbadores ao esforço de torção:

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_t = 175 \frac{kgf}{cm^2}$$

- Resistência dos chumbadores ao esforço de flexão sobre a coluna:

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f = 372 \frac{kgf}{cm^2}$$

Após a verificação de todos estes parâmetros, foi projetada uma nova escada de acesso às carretas visto que, com o uso da nova estrutura, as carretas passariam a estacionar mais à frente, dificultando o carregamento.

- Cálculo para resistência das escadas:

Considerando que a carga máxima do funcionário mais ferramental seja de 200kgf, a força resultante do maior momento fletor sobre o degrau da escada é inferior a tensão de escoamento do material (fator de segurança de 2,5):

$$\sigma_{esc} = 1070 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_F = 426 \frac{kgf}{cm^2}$$

### 4.3 Memorial de Cálculo

Alguns testes foram feitos para coleta de dados e análise da estrutura:

Peso carretilha = 2,5 kg

Peso mangueira desconectada = 8,2 kg

Peso total componentes normais = 10,7 kg

Carga excedente estimada por ação humana = 30 kgf

Carga total = 30 kgf

Aplicação: cabo / cordoalha estática, linga

Fator de Segurança,  $\gamma$ : 4 (conforme manual técnico do cabo – Cimaf)

Carga de ruptura mínima recomendada: 120 kgf

#### - Cabo de aço:

Especificação do cabo de aço: cabo de aço Cimaf 2,4 mm, 6 x 7 + AF, CRM 350 kgf, torção regular à direita, resistência IPS, galvanizado, comprimento 3 metros.

$F = 273Kg$ .

A estrutura de sustentação das mangueiras está representada na figura 34.



$A = \frac{k_r}{k_p} =$	$\begin{cases} 2 & \text{para materiais comuns} \\ 1,5 & \text{para aço Ni Cr, forjado e temperado} \end{cases}$	2
$B =$	$\begin{cases} 1 & \text{para carga contínua} \\ 2 & \text{para carga intermitente} \\ 3 & \text{para carga alternada} \end{cases}$	1
$C =$	$\begin{cases} 1 & \text{para carga aplicada lenta e gradualmente} \\ 2 & \text{para carga aplicada repentinamente (choque)} \end{cases}$	1
$D =$	$\begin{cases} \text{Fator de precaução: prevê cargas acidentais, sobre-cargas,} \\ \text{imperfeições do material, etc.} \\ \text{Para materiais de boa procedência, sem sobre-carga:} \\ D = 1,5 \text{ para os aços e } D = 2 \text{ para o ferro fundido.} \end{cases}$	1,5

Figura 35 - Considerações para o cálculo do Fator de Segurança  
 Fonte: NORTON, R Projeto de Máquinas Uma Abordagem Integrada 4<sup>o</sup> edição, 1996

Foram levados em consideração os dados da figura 35 para realizar os cálculos do fator de segurança:

$$\gamma = A \times B \times C \times D$$

$$\gamma = 2 \times 1 \times 1 \times 1,5$$

$$\gamma = 3$$

Logo:

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

**- Olhal Padrão para ponto de fixação do cabo de aço:**

Primeira situação:

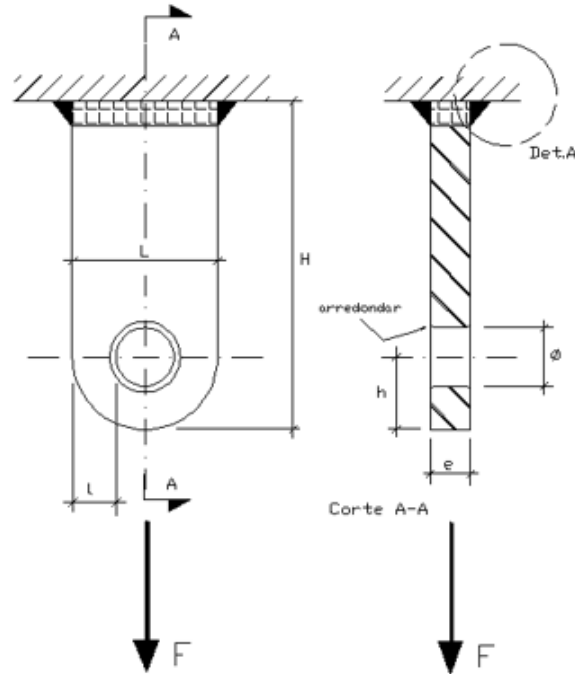


Figura 36 – Força Vertical  
Fonte: Figura do autor

Análise de resistência do olhal submetido à carga, conforme a figura 36.

$$\Phi = 2,0 \text{ cm}$$

$$L = 5,0 \text{ cm}$$

$$l = 1,5 \text{ cm}$$

$$h = 2,5 \text{ cm}$$

$$H = 6,5 \text{ cm}$$

$$e = 0,9525 \text{ cm (3/8")}$$

Avaliação do esforço de tração sobre a menor secção St.

$$\text{Menor secção: } St = 2 \times l \times e$$

$$St = \frac{2 \times (L - \phi) \times e}{2}$$

$$St = (L - \phi) \times e = 2,8575 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F}{St} = \frac{F}{(L - \phi) \times e} = 96 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{\text{máx}} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 96 \frac{kgf}{cm^2}$$

Avaliação de esforço de cisalhamento sobre a menor secção  $S_c$ .

$$S_c = \left( h - \frac{\phi}{2} \right) \times e = 1,42875 cm^2$$

$$\zeta_{m\acute{a}x} = \frac{F}{S_c} = 191 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_{m\acute{a}x} \leq \tau_{adm}$$

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\zeta_{m\acute{a}x} = 191 \frac{kgf}{cm^2}$$

Avaliação da resistência do filete de solda.

- Considerar filete completo ao redor do perímetro de fixação à estrutura existente
- Considerar a utilização de eletrodo revestido ASME SFA 5.1 E 7018 (AWS 5.1 E 7018);
- Resistência ao escoamento, (segundo DIN 4 100 para eletrodo E70).

Cisalhamento no filete de solda, conforme figura 37.

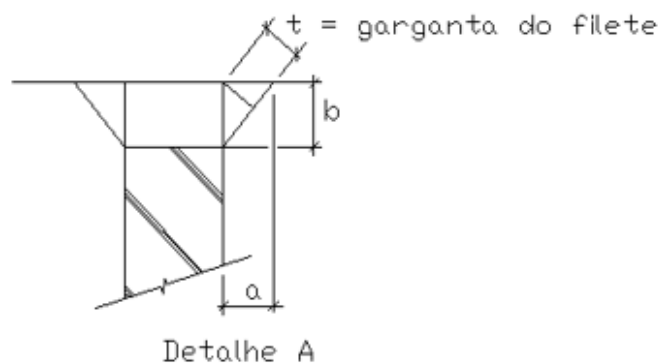


Figura 37 – Garganta x perímetro  
Fonte: Figura do autor.

Sfilete = garganta x perímetro total

$$t = \frac{a \times b}{\sqrt{a^2} \times \sqrt{b^2}}$$

$$S_{filete} = t \times p$$

Considerando a base do filete  $a = b$

$$t = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

Se  $a = 0,635\text{cm}$ , será demonstrado mais adiante.

$$t = 0,449\text{cm}$$

$$p = 2 \times (L + e) = 11,9\text{cm}$$

$$S_{\text{filete}} = t \times p = 5,3\text{cm}^2$$

$$\zeta_{\text{máx}} = \frac{F}{S_{\text{filete}}} = 51,1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta_{\text{máx}} = \frac{F}{S_{\text{filete}}} \leq \zeta_{\text{adm}} = \frac{\zeta_{\text{esc}}}{\gamma}$$

$$\zeta_{\text{esc}} = 900 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$\gamma = 4$  (Fator de segurança com base no livro: NORTON, R. Projeto de Máquinas Uma Abordagem Integrada 4ª edição, 1996).

$$\zeta_{\text{máx}} \leq \zeta_{\text{adm}}$$

Segunda situação:

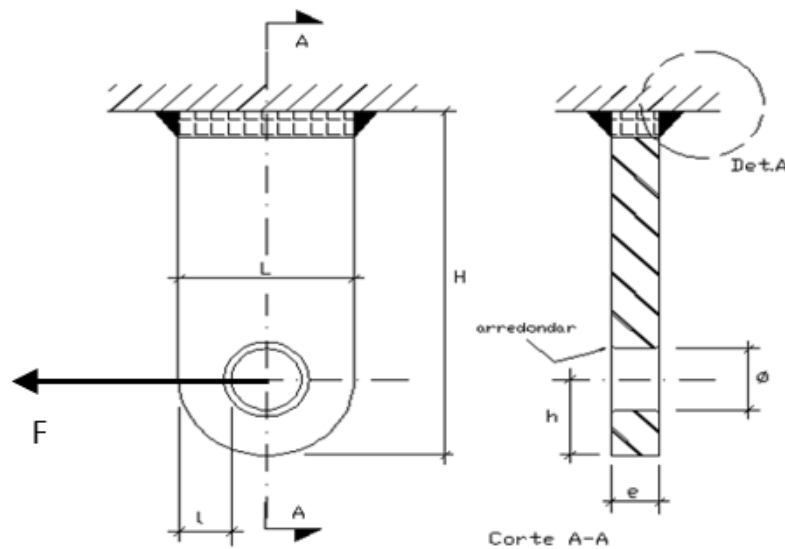


Figura 38 - Força Horizontal direção longitudinal  
Fonte: Figura do autor

Dados para análise da resistência do olhal submetido à carga, conforme a figura 38.

$$L = 5,0 \text{ cm}$$

$$e = 0,9525 \text{ cm}$$

$$H = 6,5 \text{ cm}$$

$$h = 2,5 \text{ cm}$$

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f}$$

Onde  $M_f$  = momento fletor e  $W_f$  = módulo da resistência à flexão

$$M_f = F \times (H - h)$$

$$M_f = 273 \times (6,5 - 2,5)$$

$$M_f = 1092 \text{ kgf} \times \text{cm}$$

$$W_f = \frac{e \times L^2}{6}$$

$$W_f = \frac{0,9525 \times 5^2}{6}$$

$$W_f = 4 \text{ cm}^3$$

$$\frac{M_f}{W_{f\text{perfil}}} \leq \sigma_{adm}$$

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_f = 275 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Terceira Situação:

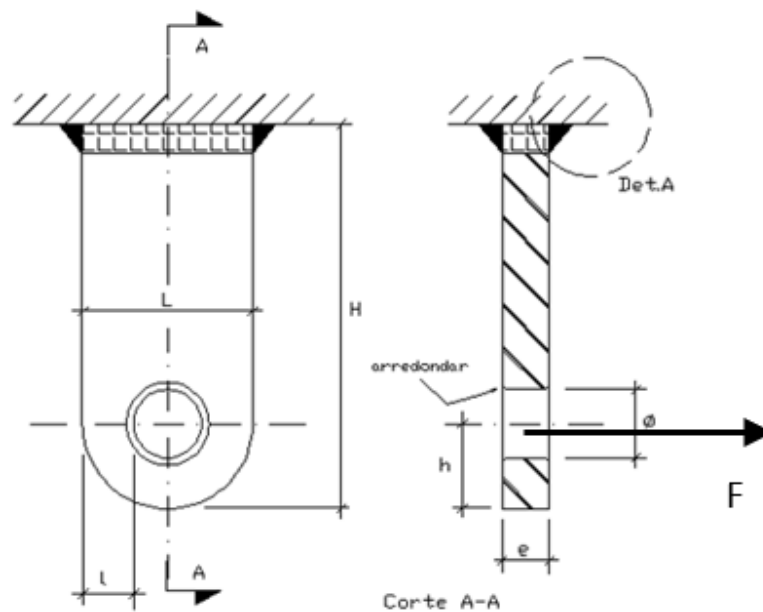


Figura 39 - Força Horizontal direção transversal  
Fonte: Figura do autor

Dados para análise da resistência do olhal submetido à carga, conforme a figura 39.

$$L = 5,0 \text{ cm}$$

$$e = 0,9525 \text{ cm}$$

$$H = 6,5 \text{ cm}$$

$$h = 2,5 \text{ cm}$$

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f}$$

Onde:

$M_f$  = momento fletor;

$W_f$  = módulo da resistência à flexão.

$$M_f = F \times (H - h) \times \cos\alpha$$

Em que  $\alpha = 36,87^\circ$ , será demonstrado na figura 41.

$$M_f = 273 \times (6,5 - 2,5) \times \cos 36,87^\circ$$

$$M_f = 874 \text{ kgf} \times \text{cm}$$

$$W_f = \frac{L \times e^2}{6}$$

$$W_f = \frac{5 \times 0,9525^2}{6}$$

$$W_f = 0,8 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_f \leq \sigma_{adm}$$

$$\frac{M_f}{W_{f\text{perfil}}} \leq \sigma_{adm}$$

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_f = 1155 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

**- Análise da resistência do perfil I de 10'':**

Dados para análise da resistência à torção, como mostrado na figura 40.

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

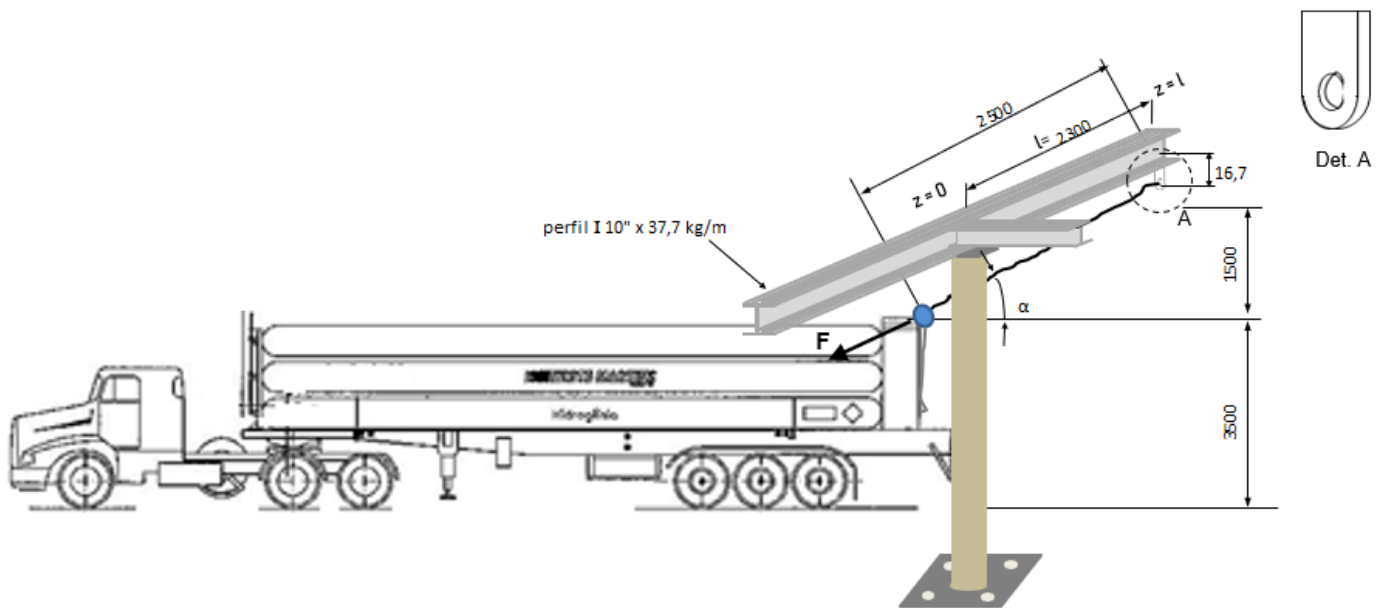


Figura 40 - Análise de resistência à torção no perfil I  
Fonte: Figura do autor

$$\alpha = 36,87^\circ \text{ (ângulo entre a força } F \text{ em relação a linha horizontal)}$$

$$\text{Componente horizontal da força } F = FH = \cos 36,87^\circ \times 273$$

$$FH = 218,4 \text{ kgf}$$

$$l = 230 \text{ cm}$$

$$q = 37,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$t_f = 1,25 \text{ cm}$$

$$t_w = 0,787 \text{ cm}$$

$$I_t = 19,2885 \text{ cm}^4$$

$$I_w = 45.484 \text{ cm}^6$$

$$W_{n0} = 89,7 \text{ cm}^2$$

$$S_{w1} = 358 \text{ cm}^4$$

$$h = 25,4 \text{ cm}$$

$$b = 11,8 \text{ cm}$$

$$J_x = 5140 \text{ cm}^4$$

$$J_y = 282 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 405 \text{ cm}^3$$

$$W_y = 47,7 \text{ cm}^3$$

$$A = 48,1 \text{ cm}^2$$

$$E = 2.150.000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$G = 826.000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Logo:

$$I_t = \frac{1}{3} \times \left( (2 \times b \times (tf^3)) + ((h - tf) \times tw^3) \right)$$

$$I_t = \frac{1}{3} \times \left( (2 \times 11,8 \times (1,25^3)) + ((25,4 - 1,25) \times 0,787^3) \right)$$

$$I_t = 19,289 \text{ cm}^4$$

$$I_w = \frac{h^2 \times J_y}{4}$$

$$I_w = \frac{25,4^2 \times 282}{4}$$

$$I_w = 45484 \text{ cm}^6$$

$$a = \sqrt{\frac{E \times I_w}{G \times I_t}}$$

$$a = \sqrt{\frac{2150000 \times 45484}{826000 \times 19,2885}}$$

$$a = 78,344 \text{ cm}$$

$$T = F \times L$$

$$T = 218,4 \times 16,7$$

$$T = 3647 \text{ kgf} \times \text{cm}$$

$$\theta = \left(\frac{T \cdot a}{G \cdot It}\right) \cdot \left(\left(\operatorname{tg}\left(\frac{l}{a}\right)\right) \cdot \left(\cos\left(\frac{z}{a}\right) - 1\right)\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{z}{a}\right) + \left(\frac{z}{a}\right)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = \left(\frac{T}{G \cdot It}\right) \cdot \left(\left(\operatorname{tg}\left(\frac{l}{a}\right)\right) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{z}{a}\right)\right) - \cos\left(\frac{z}{a}\right) + 1$$

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} = \left(\frac{T}{G \cdot It \cdot a}\right) \cdot \left(\left(\operatorname{tg}\left(\frac{l}{a}\right)\right) \cdot \cos\left(\frac{z}{a}\right)\right) - \operatorname{sen}\left(\frac{z}{a}\right)$$

$$\frac{d^3\theta}{dz^3} = -\left(\frac{T}{G \cdot It \cdot a^2}\right) \cdot \left(\left(\operatorname{tg}\left(\frac{l}{a}\right)\right) \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{z}{a}\right)\right) - \cos\left(\frac{z}{a}\right)$$

Avaliação das tensões por empenamento na seção  $z = l$

Para  $z = l = 230 \text{ cm}$

$$\frac{z}{a} = 2,936$$

$$\operatorname{sen}\left(\frac{z}{a}\right) = 9,391$$

$$\cos\left(\frac{z}{a}\right) = 9,444$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{l}{a}\right) = 0,994$$

$$\theta = 0,035$$

$$\frac{d\theta}{dz} = 2 \cdot 10^4$$

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} = 0$$

$$\frac{d^3\theta}{dz^3} = 3,94912 \cdot 10^{-9}$$

Tensão normal na alma por torção de empenamento

$$\sigma' = E \cdot Wn0 \cdot \left(\frac{d^2\theta}{dz^2}\right) = 0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de cisalhamento de empenamento

$$\zeta' = E \cdot Sw1 \cdot \left(\frac{d^3\theta}{dz^3}\right) / tf = 2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de cisalhamento por torção pura

$$\zeta = \frac{T \cdot t}{It}$$

$$\zeta \text{ no flange; } \zeta_o = 236 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta \text{ na alma; } \zeta_f = 149 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de flexão pura na direção vertical

$$\sigma l = \frac{Mx}{Wx}$$

$$Ml = \left( \frac{q \cdot (l-z)^2}{2} \right) + (F \cdot (l-z)) = 0 \text{ kgf.cm}$$

$$\sigma_l = 0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta_o = 236 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Para  $z = 0$  cm

$$\frac{z}{a} = 0 \text{ cm}$$

$$\cos\left(\frac{z}{a}\right) = 1$$

$$\text{tg}\left(\frac{l}{a}\right) = 0,994$$

$$\theta = 0$$

$$\frac{d\theta}{dz} = 0$$

$$\frac{d^2\theta}{dz^2} = 2,90559 \cdot 10^6$$

$$\frac{d^3\theta}{dz^3} = 3,7297 \cdot 10^8$$

Tensão normal na alma por torção de empenamento

$$\sigma' = E \cdot Wn0 \cdot \left( \frac{d^2\theta}{dz^2} \right) = 560 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de cisalhamento de empenamento

$$\zeta' = Sw1 \cdot \left( \frac{d^3\theta}{dz^3} \right) / tf = 23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de cisalhamento por torção pura

$$\zeta = G \cdot t \cdot \theta$$

$$\zeta \text{ no flange; } \zeta_o = 0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\zeta \text{ na alma; } \zeta_f = 0 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Tensão de flexão pura na direção vertical

$$\sigma l = \frac{Mx}{Wx}$$

$$Ml = \left( \frac{q \cdot (l-z)^2}{2} \right) + (F \cdot (l-z)) = 5123 \text{ kgf.cm}$$

$$\sigma_l = 13 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Resistência à flexão pelo esforço na direção longitudinal da baia, representado na figura 41.

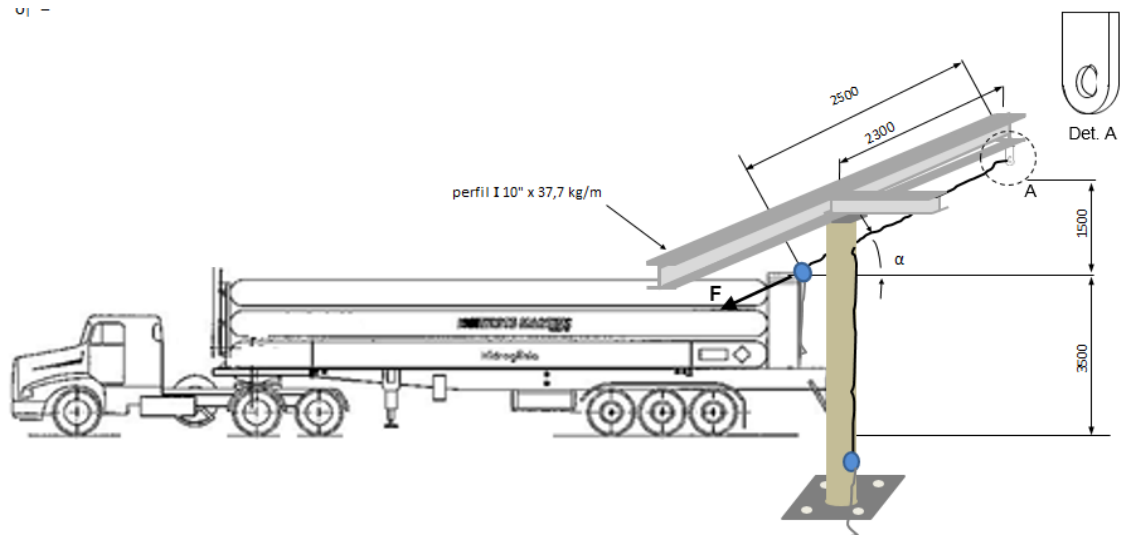


Figura 41 - Análise de resistência à flexão no perfil I  
Fonte: Figura do autor

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$V = 230 \text{ cm}$$

$$\alpha = 36,87^\circ$$

Componente horizontal da força  $F = F_H = 218,4 \text{ kgf}$

Perfil I 10" x 37,7 kg/m;  $W_y = 47,7 \text{ cm}^3$

$$M_f = F_H \cdot V = 50232 \text{ kgf.cm}$$

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_y} = 1053 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f \leq \sigma_{adm}$$

**- Coluna tubular:**

Análise de resistência da coluna tubular. Representação da coluna tubular na figura 42.

Resistência à flexão sobre a coluna

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$V = 230 \text{ cm}$$

$$\text{'Tubo } \varnothing 8'' \text{ Std } 40 \times 33,31 \text{ kg/m; } W_f = 275,56 \text{ cm}^3$$

$$M_f = F.V = 62790 \text{ kgf.cm}$$

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_f} = 228 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$\sigma_f \leq \sigma_{adm}$$

Resistência à torção sobre a coluna

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{kgf}{cm^2}$$

$$F = 273 \text{ kgf}$$

$$V = 230 \text{ cm}$$

$$\alpha = 36,87^\circ$$

$$\text{Componente horizontal da força } F = F_H = 218,4 \text{ kgf}$$

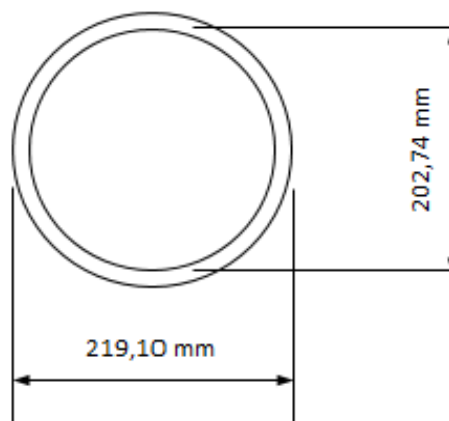


Figura 42 - Seção da coluna tubular da estrutura de sustentação  
Fonte: Figura do autor

Tubo Ø 8" Std 40 x 33,31 kg/m;  $W_T = 551,11 \text{ cm}^3$

$T = F_H \cdot V = 50232 \text{ kgf.cm}$

$$\zeta_f = T/W_T = 91 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$\zeta_f \leq \zeta_{adm}$

### - Chumbadores:

Análise de resistência dos chumbadores, representados na figura 43.

Resistência dos chumbadores ao esforço de torção:

$$\zeta_{adm} = 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$F = 273 \text{ kgf}$

$V = 230 \text{ cm}$

$\phi = 2,54 \text{ cm}$

Diâmetro dos chumbadores = 1"

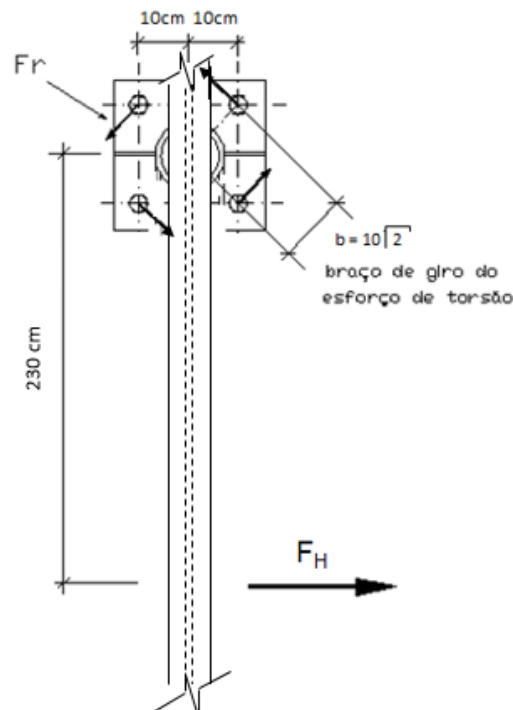


Figura 43 - Chumbador da estrutura de sustentação  
Fonte: Figura do autor

$$FH = 218,4 \text{ kgf}$$

b = braço de giro

$$b = 10 \cdot \sqrt{2} = 14,14 \text{ cm}$$

$$FH \cdot 230 = 4 \cdot Fr \cdot b$$

$$Fr = \frac{230 \cdot FH}{4 \cdot b} = 888 \text{ kgf}$$

$$\zeta t = \frac{Fr}{\text{área do núcleo do chumbador}} = \frac{Fr}{\frac{\pi \cdot \phi^2}{4}}$$

$$\zeta t = 175 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

Resistência dos chumbadores ao esforço de flexão sobre a coluna. Podemos ver força aplicada aos chumbadores na figura 44.

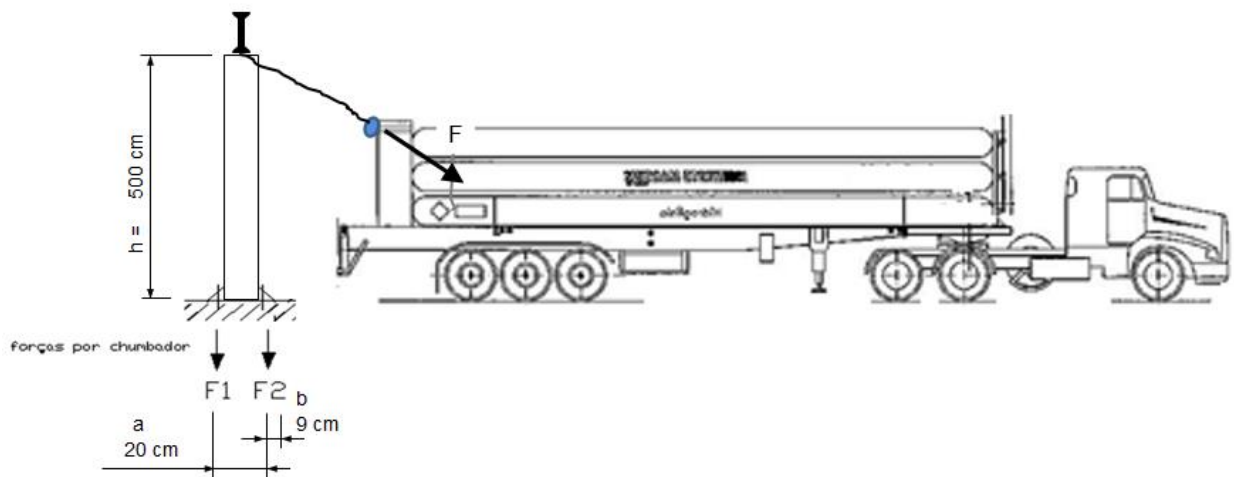


Figura 44 - Força aplicada aos chumbadores (esforço de flexão)

Fonte: Figura do autor

$$FH = 218,4 \text{ kgf}$$

$$\sigma_{adm} = 1400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\phi = 2,54 \text{ cm}$$

Diâmetro dos chumbadores = 1"

Desprezando-se a contribuição dos chumbadores próximos à borda de giro, tem-se que  $F_2=0$

$$FH.h = 2.(F1.(a + b))$$

$$F1 = 1883 \text{ kgf}$$

$$\sigma_f = \frac{F1}{\text{área do núcleo do chumbador}} = \frac{F1}{\frac{\pi \cdot \phi_c^2}{4}}$$

$$\sigma_f = 372 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

### - Cálculo da resistência das escadas:

Foi realizado um novo projeto para as escadas de acesso às carretas de H2 devido a adaptação das estruturas para sustentação das mangueiras de carregamento de hidrogênio, demonstrada na figura 45.

As escadas foram projetadas com uma liga de alumínio 6063 T5 em que este material possui as seguintes características: alta resistência à corrosão, média resistência mecânica, boa conformabilidade e apropriado para anodização. Este material atende perfeitamente os esforços demandados.

- Dados para o cálculo:

$$\sigma_{esc} = 1070 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$\sigma_{rup} = 1478 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

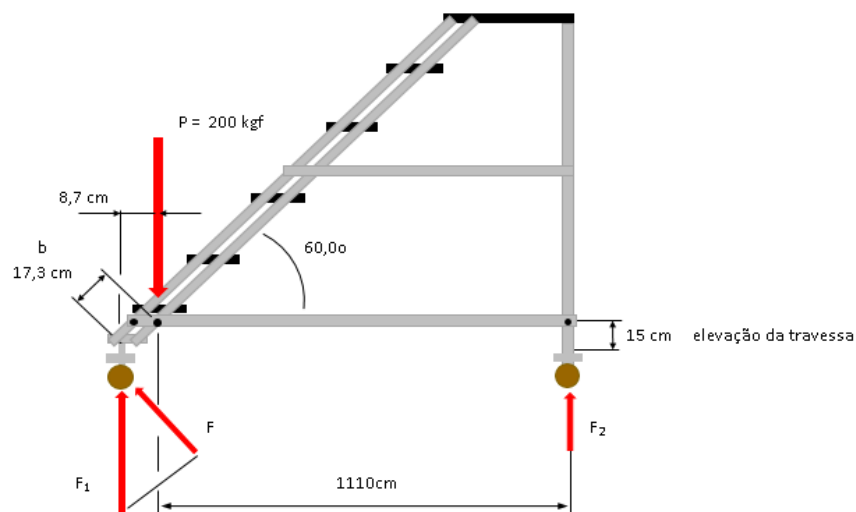


Figura 45 - Figura representativa da escada  
Fonte: Figura do autor

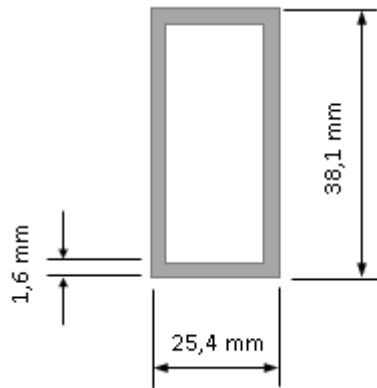


Figura 46 - Tubo retangulares da rampa da escada  
Fonte: Figura do autor

$$Wf = 2,017 \text{ cm}^3$$

$$S = 1,9296 \text{ cm}^2$$

Assim podemos realizar os cálculos dos esforços sobre a escada.

$$\Sigma f = 0$$

$$P = (2 \times F1) + (2 \times F2)$$

$$\Sigma M = 0$$

$$(8,7 \times 2 \times F1) - (111 \times 2 \times F2) = 0$$

$$F2 = 0,008F1$$

$$p = (2 \times F1) + (2 \times 0,008F1)$$

$$P = 2,02 \times F1$$

$$F1 = \frac{P}{2,02}$$

Considerando-se o esforço por flexão sobre apenas um dos tubos retangulares da rampa da escada, como podemos ver na figura 46, e que a carga máxima do funcionário e ferramental seja  $p = 200 \text{ kgf}$

$$F1 = 99 \text{ kgf}$$

$$F = F1 \times \cos 60^\circ$$

$$F = 50 \text{ kgf}$$

Após o cálculo da força, podemos calcular o momento fletor.

$$Mf = b \times F$$

$$Mf = 8,7 \times 50$$

$$Mf = 859 \text{ kgf} \times \text{cm}$$

Portanto,

$$\sigma F = \frac{Mf}{Wf}$$

$$\sigma F = 426 \frac{kgf}{cm^2}$$

É calculado o coeficiente de segurança ( $\gamma$ ):

$$\gamma = \frac{\sigma_{esc}}{\sigma F}$$

$$\gamma = \frac{1070}{426}$$

$$\gamma = 2,5$$

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos problemas surgem no decorrer de um projeto, que só são identificados com o andamento do trabalho. Alterações no projeto ou soluções imediatas, que muitas das vezes não são bem sucedidas, podem comprometer a segurança de todos.

Um problema real foi identificado, gerando um dano físico a uma pessoa (acidente ao operador). Com tudo isso um novo projeto foi desenvolvido, nos aproximando da realidade do dia a dia de um engenheiro, em analisar e solucionar problemas. O aproveitamento de uma estrutura já existente no local foi estratégico para atender a necessidade de sustentação das mangueiras de hidrogênio que frequentemente, devido ao seu peso durante o carregamento das carretas, apresentavam trincas em sua conexão.

Cálculos foram realizados para que a estrutura de sustentação dos sprinklers presente na área de carregamento fosse utilizada como sustentação para as mangueiras e seus acessórios. Os componentes calculados no projeto foram: cabo de aço, olhal para fixação, perfil I, coluna tubular e chumbadores.

O cabo de aço foi selecionado em catálogo e o peso da mangueira junto com seus acessórios foi tomado como base para a escolha do cabo. A força considerada para todos os cálculos é de 273kgf (carga de ruptura do cabo de aço reduzida em 22%). Para o olhal de fixação foi considerado a força vertical de tração ( $\sigma_{m\acute{a}x} = 96 \frac{kgf}{cm^2}$ ), força vertical de cisalhamento ( $\zeta_{m\acute{a}x} = 191 \frac{kgf}{cm^2}$ ), força horizontal no sentido longitudinal do olhal ( $\sigma_f = 275 \frac{kgf}{cm^2}$ ), força horizontal no sentido transversal do olhal ( $\sigma_f = 1155 \frac{kgf}{cm^2}$ ).

e força de cisalhamento na junta soldada ( $\zeta_{\text{máx}} = 51,1 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ). No caso do perfil I foi calculado o empenamento e a torção no ponto crítico de cada situação, a tensão de cisalhamento de empenamento ( $\zeta' = 23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ), a tensão normal na alma por torção de empenamento ( $\sigma' = 560 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ), tensão de cisalhamento por torção pura no flange ( $\zeta_0 = 236 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ), tensão de cisalhamento por torção pura na alma do perfil ( $\zeta_f = 236 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) e a resistência à flexão pelo esforço na direção longitudinal da baía ( $\sigma_f = 1053 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ). Na análise da coluna tubular foi calculado a resistência a flexão sobre a coluna tubular ( $\sigma_f = 228 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) e a resistência à torção sobre a coluna tubular ( $\zeta_f = 23 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ). Por fim na análise dos chumbadores foi calculado a resistência ao esforço de torção ( $\zeta_t = 175 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ) e a resistência ao esforço de flexão sobre a coluna ( $\sigma_f = 372 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ).

Com todo os cálculos e simulações realizado e tendo como base que as tensões máximas sofrida por cada componente da estrutura são inferiores as tensões admissíveis determinada para o projeto, a estrutura está aprovada para ser utilizada de forma mais segura.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[https://www.linde-gas.pt/pt/safety\\_and\\_quality/gas\\_risks/flammable\\_gases/index.html](https://www.linde-gas.pt/pt/safety_and_quality/gas_risks/flammable_gases/index.html)

Acesso: 09/05/2019 às 13:56h

<https://www.solidworks.com/pt-br>

Acesso: 09/05/2019 às 18:03h

<http://mechworks.com.br/produto/solidworks/>

Acesso: 09/05/2019 às 18:00h

<https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/informatica/saiba-mais-sobre-o-software-solidworks/51075>

Acesso: 09/05/2019 às 17:25h

<http://www.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TCC-ARTUR-GARDONE.pdf>

Acesso: 21/05/2019 às 17:00h

[http://help.solidworks.com/2018/Portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c\\_introduction\\_toplevel\\_topic.htm](http://help.solidworks.com/2018/Portuguese-brazilian/SolidWorks/sldworks/c_introduction_toplevel_topic.htm)

Acesso: 21/05/2019 às 18:00h

[http://www.puc-rio.br/Pibic/relatorio\\_resumo2009/relatorio/mec/thomas.pdf](http://www.puc-rio.br/Pibic/relatorio_resumo2009/relatorio/mec/thomas.pdf)

Acesso: 21/05/2019 às 17:00h

<http://www.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TCC-II-Marco-Aur%C3%A9lio-Martins-Piazzes1.pdf>

Acesso: 21/05/2019 às 17:00h

<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33244/33244.PDF>

Acesso: 21/05/2019 às 18:43h

<https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/1891/TCC%20Cristian%20Rodrigues%20Bertin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Acesso: 11/07/2019 às 18:06h

CHIAVERINI V. Aços e Ferros Fundidos. 5ª edição. Associação Brasileira de Metais: ABM, 1984.

<https://www.comercialex.com.br/produtos/equipamentos/sistema-de-aterramento-prova-de-explosao/>

Acesso: 29/06/2019 às 15:29h

[https://www.steelconstruction.info/images/6/6f/Sci\\_p385.pdf](https://www.steelconstruction.info/images/6/6f/Sci_p385.pdf)

Acesso: 29/06/2019 às 15:31h

<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aterramento.pdf>

Acesso: 29/06/2019 às 16:58h

[https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo\\_2018\\_claudio.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_2018_claudio.pdf)

Acesso: 29/06/2019 às 18:13h

<http://www.alusolda.com.br/conteudo/processos-de-soldagem.html>

Acesso: 22/07/2019 às 21:32h

<http://mmborges.com/processos/Uniao/uniao%20termica%20-%20soldagem.htm>

Acesso: 22/07/2019 às 20:40h

<http://www.alusolda.com.br/conteudo/caracteristicas-da-soldagem-com-eletrodos-revestidos.html>

Acesso: 22/07/2019 às 21:00h

[http://www.metlica.com.br/pg\\_dinamica/bin/pg\\_dinamica.php?id\\_pag=824](http://www.metlica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=824)

Acesso: 22/07/2019 às 21:32h

[https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1\\_apostilaeletrodosrevestidos\\_ok.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf)

Acesso: 22/07/2019 às 21:51h

UBEROI, R.S.; GUPTA, U.; SIBAL, A. *Root Cause Analysis in Healthcare*. Apollo Medicine, Vol.1, 2004.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. *Administração da Produção*. 2.d. São Paulo: Atlas, 2002.

ROONEY, J.J.; HOPEN, D. *On the trial to a solution... Part 2: What's in? What's out? Defining your problem. The Journal for Quality & Participation*, 2004.

CAMPAGNARO, C.A.; REBELATO, M.G.; RODRIGUES, A.M.; RODRIGUES, I.C.; Um estudo sobre métodos de análise e solução de problemas (MASP) na cadeia de fornecimento das montadoras automotivas nacionais.

CAMPOS, V.F.; TQC: Controle da Qualidade Total. 7. ed. Belo Horizonte: Bloch, 1992.

CHELSON, J.V.; PAYNE, A.C.; REAVILL, L.R.P. *Management for Engineers, Scientists and Technologists*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

HEUVEL, L.N.V.; LORENZO, D.K.; JACKSON, L.O.; HANSON, W.E.; ROONEY, J.J.; WALKER, D.A. *Root Cause Analysis Handbook: a guide to efficient and effective incident investigation*, 3.ed, 2008.

AMMERMAN, M. *The Root Cause Analysis Handbook: a simplified approach to identifying, correcting, and reporting workplace errors*. Portland: Productivity, 1998.

NORTON, R. *Projeto de Máquinas Uma Abordagem Integrada* 4<sup>o</sup> edição, 1996.