



AFYA EDUCACIONAL UNIRENEDENTOR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

BRENNER DE ANDRADE
FERREIRA
ISAAC RIBEIRO CHILESE

ESTUDO TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO PRÁTICO
DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR

Itaperuna – RJ

2022



BRENNER DE ANDRADE FERREIRA
ISAAC RIBEIRO CHILESE

ESTUDO TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR

Trabalho apresentado ao curso de graduação em engenharia mecânica do centro universitário redentor na disciplina de trabalho de conclusão de curso como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Daniel Passos Gallo

Itaperuna-RJ

2022

Autores: BRENNER DE ANDRADE FERREIRA E ISAAC RIBEIRO CHILESE

Título: ESTUDO TEÓRICO E DESENVOLVIMENTO PRÁTICO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR

Natureza: Trabalho de conclusão de curso

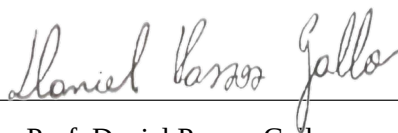
Objetivo: Título de bacharel em Engenharia Mecânica

Instituição: Centro Universitário Redentor.

Área de concentração: Engenharia Mecânica

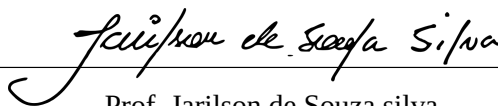
Aprovada em: 07/ 12 / 2022

Banca Examinadora:



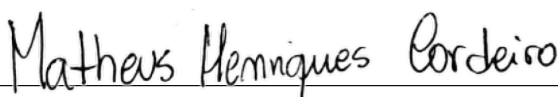
Prof. Daniel Passos Gallo

Orientador/Presidente da banca



Prof. Jarilson de Souza Silva

UniRedentor



Eng. Mecânico Matheus Henrique Cordeiro

Bacharel em engenharia mecânica pela faculdade UniRedentor

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela proteção e por tudo que tenho em minha vida.

Aos meus pais Paulo Sérgio e Regina Márcia por todo apoio que tive durante essa caminhada e por sempre estarem ao meu lado.

Ao Professor e amigo Daniel Passos Gallo, meu orientador, pela amizade construída, por sempre estar disponível e por comprar nossas ideias, ensinando as ferramentas para torná-las realidade.

Aos meus amigos Rick, Isaac e Matheus pelas noites de estudo, parcerias em projetos e pela grande amizade construída dentro e fora da instituição.

Ao meu amigo Gustavo Macedo, companheiro de faculdade, pela amizade durante e curso e por ajudar diretamente no meu TCC de toda forma que pôde

BRENNER

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por guiar meus passos durante toda minha caminhada na vida e por tudo que tenho conquistado.

Aos meus pais Vanderley Antônio Chilese e Raquel Soares Ribeiro Chilese por sempre estarem ao meu lado e me proporcionarem a oportunidade de concluir este curso de graduação.

Aos meus irmãos Sara, Vitoria e Rafael, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões.

Aos meus amigos Rick, Brenner e Matheus, por me ensinarem o verdadeiro significado de amizade e por toda a parceria que será levada por toda a vida.

Ao meu orientado Daniel Passo Gallo pela amizade, paciência e por todo o auxílio fornecido durante a execução deste trabalho.

ISAAC

EPÍGRAFE

“Toda ação humana, quer se torne positiva ou negativa, precisa depender de
motivação.”

Dalai Lama

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo e desenvolvimento de uma caldeira flamotubular com a finalidade uma otimização significativa no tempo de aquecimento e posteriormente uma redução do custo energético resultando uma otimização por completa do equipamento. Foram analisados diferentes combustíveis utilizados em caldeiras, selecionando assim o gás por maior custo benefício, eficiência e impacto ambiental. Foram levantadas informações referentes a cada tipo de caldeiras disponíveis no mercado, juntamente com seus pros e contras. Os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho mostram que a pressão de trabalho obtida foi de 4 bar e máxima interna permitida no prototipo durante os testes foram de 5,5 bar.

ABSTRACT

The present work has as objective the study and development of a fire tube boiler with the purpose of a significant optimization in the heating time and later a reduction of the energy cost resulting in a complete optimization of the equipment. Different fuels used in boilers were analyzed, thus selecting the gas for greater cost benefit, efficiency and environmental impact. Information regarding each type of boiler available on the market was collected, along with their pros and cons. The results obtained during the development of the work show that the working pressure obtained was 4 bar and the maximum internal allowed in the prototype during the tests was 5.5 bar.

Palavras chaves: Caldeiras; Caldeiras Flamotubulares; Caldeira a gás.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de caldeiras flamotubulares horizontais.....	19
Figura 2 - Desenho esquemático de uma caldeira flamotubular horizontal.....	20
Figura 3 - Esquema Representativo caldeira flamotubular vertical.....	20
Figura 4 - Caldeira aquatubular de grande porte.	21
Figura 5 - Esquema de caldeira aquatubular de tubos retos.....	22
Figura 6 - Caldeira aquatubular de tubos curvos.	22
Figura 7 - Caldeira aquatubular compacta.	23
Figura 8 - Esquema de caldeira de eletrodo submerso.	24
Figura 9 - Corrosão nos tubos de caldeiras.....	33
Figura 10 - Incrustações em caldeiras.....	33
Figura 11 - Instalação de abrandador de um Estágio.....	35
Figura 12 - Corte em perspectiva de um permutador abrandador de leito misto.....	36
Figura 13 - Esquema de um degaseador a pulverização	37
Figura 14 - Degaseificador de bandejas perfuradas.....	37
Figura 15 - Gráfico pressão - temperatura do vapor.....	38
Figura 16 - Tabela de poder calorífico inferior.....	43
Figura 17 - Máxima tensão encontrada.....	55
Figura 18 - Deslocamento máximo encontrado	55
Figura 19 - Deformação Máxima encontrada	56
Figura 20 - Deslocamento com deformação	56
Figura 21 - Simulação térmica realizada no modelo	58
Figura 22 - Renderização final do resultado final do modelo, realizado em KeyShot Pro 10	64
Figura 23 - Detalhe interno da saída da tubulação da caldeira	64
Figura 24 - Detalhe no manômetro utilizado no projeto.....	65
Figura 25 - Protótipo real desenvolvido durante o presente trabalho	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poder calorífico superior de algumas espécies de madeira.....	26
Tabela 2 - Características de resíduos da indústria da madeira.	27
Tabela 3 – Vantagens do vapor Saturado.....	39
Tabela 4 - Desvantagens do uso do vapor superaquecido.....	41
Tabela 5 - Dados iniciais para simulação por elementos finitos.....	48
Tabela 6 - Propriedades iniciais utilizados em software Solidworks 2021.....	50
Tabela 7 - Unidades de medida utilizados	51
Tabela 8 - Propriedades do material utilizado na simulação.....	51
Tabela 9 - Condições de contorno realizado para a simulação	52
Tabela 10 - Interações de contato do modelo.....	52
Tabela 11 - Condições da malha gerada no modelo	52
Tabela 12 - Qualidade dos nós e da malha gerada	53
Tabela 13 - Controle de malha aplicado ao modelo 3D em um de seus componentes	53
Tabela 14 - Forças de reações encontradas no resultado de FEA	54
Tabela 15 - Condições de contorno para análise térmica do modelo.....	57

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVO GERAL	17
3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
4.	JUSTIFICATIVA.....	17
5.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
5.1	CALDEIRAS / GERADORES DE VAPOR.....	18
5.1.1	CALDEIRAS FLAMOTUBULARES	19
5.1.1.1	CALDEIRAS FLAMOTUBULARES HORIZONTAIS	19
5.1.1.2	CALDEIRAS FLAMOTUBULARES VERTICAIS	20
5.1.2	CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	21
5.1.2.1	CALDEIRAS AQUATUBULARES DE TUBOS RETOS.....	21
5.1.2.2	CALDEIRAS AQUATUBULARES DE TUBOS CURVOS	22
5.1.2.3	CALDEIRAS AQUATUBULARES COMPACTAS	23
5.1.3	CALDEIRAS ELÉTRICAS	23
5.2	COMBUSTÍVEL.....	24
5.2.1	PODER CALORÍFICO	25
5.2.2	TEOR DE UMIDADE	26
5.2.3	CINZAS.....	27
5.2.4	CALDEIRA A COMBUSTÍVEL SÓLIDO	27
5.2.5	CALDEIRA A COMBUSTÍVEL LÍQUIDO	28
5.2.6	CALDEIRAS A GÁS.....	29
5.2.7	CALDEIRAS A ELETRICIDADE	29
5.3	NR-13 – CALDEIRAS E VASOS SOB PRESSÃO	29
5.4	ALIMENTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS	32
5.4.1	ALIMENTAÇÃO.....	32
5.4.2	TRATAMENTO.....	32
5.4.2.1	CLARIFICAÇÃO:	34
5.4.2.2	ABRANDAMENTO:	35
5.4.2.3	DESMINERALIZAÇÃO	36
5.4.2.4	DESAERAÇÃO	36
5.4.2.5	REMOÇÃO DA SÍLICA.....	38
5.5	VAPOR.....	38
5.5.1	TIPOS DE VAPOR	38
5.5.1.1	VAPOR SATURADO.....	39

5.5.1.1.1 VANTAGENS DE USO DO VAPOR SATURADO PARA AQUECIMENTO.....	39
5.5.1.2 VAPOR ÚMIDO	40
5.5.1.3 VAPOR SUPERAQUECIDO	40
5.5.1.3.1 VANTAGENS DE USO DO VAPOR SUPERAQUECIDO PARA MOVIMENTAR TURBINAS:	40
5.5.1.3.2 DESVANTAGENS DE USO DO VAPOR SUPERAQUECIDO PARA AQUECIMENTO:.....	41
5.5.1.4 ÁGUA SUPERCRÍTICA	42
6. METODOLOGIA	43
6.1 MODELO ESCOLHIDO	43
6.2 CÁLCULOS DE FUNCIONAMENTO	44
7. RESULTADOS.....	48
7.1. SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS – PRESSÃO	48
7.1.1 DADOS INICIAIS	48
7.1.2 PROPRIEDADES DO ESTUDO	50
7.1.3 UNIDADES.....	51
7.1.4 PROPRIEDADES DO MATERIAL	51
7.1.5 INFORMAÇÕES DE CONTATO	52
7.1.6 INFORMAÇÕES DE MALHA.....	52
7.1.7 INFORMAÇÕES DE MALHA – DETALHES	53
7.1.8 CONTROLE DE MALHA.....	53
Fonte: SolidWorks Simulation, 2021	53
7.1.9 FORÇAS RESULTANTES.....	54
7.1.10 RESULTADO DO ESTUDO	55
7.2 CARGAS TÉRMICAS.....	57
8. RESULTADO ESPERADO	64
9. CONCLUSÃO	66
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
11. APÊNDICE 1.....	70
12. APÊNDICE 2.....	93

1. INTRODUÇÃO

Na segunda revolução industrial, o vapor era a principal fonte de energia e, com o passar dos anos, o vapor foi substituído por outras fontes de energia mais rentáveis e com maiores rendimentos. Mas atualmente, com a extensa exploração de novas energias renováveis, para a produção em grandes áreas centrais e remotas, o vapor voltou à superfície, proporcionando uma intensa busca de energia por meio da queima de biomassa e reaproveitamento de resíduos agrícolas, resíduos urbanos ou subprodutos industriais. Com isso, as caldeiras como princípio das usinas termelétricas a vapor são de grande importância, pois podem fornecer aquecimento para os mais diversos processos industriais ao mesmo tempo em que geram energia elétrica. (BAGGIO, 2018)

Os países desenvolvidos e em desenvolvimento estão aumentando o uso de fontes de energia renováveis para mitigar o impacto ambiental nocivo dos gases da combustão de combustíveis fósseis. Essa intensificação das energias renováveis também se deve à capacidade de reposição natural, enquanto as fontes de energia não renováveis podem se esgotar com o uso intensivo. (PARIKKA, 2004).

Em seu trabalho, Altafini (2002, p. 03), afirma que “Caldeira” é um termo geral para equipamentos geradores de vapor, que é amplamente utilizado em ambientes industriais, bem como nas chamadas usinas termelétricas. Portanto, atividades que necessitam de vapor para funcionar, principalmente por sua abundância de vapor d'água, têm a caldeira como componente principal para sua produção.

Outra vertente para utilização de caldeiras é a transferência de calor em temperaturas relativamente baixas nos processos de secagem, desidratação, cozimento, produção de reação químicas e esterilização, desenvolvidos em indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, farmacêutica e agroindústrias. De forma quase que total, essa transferência de calor é proveniente da geração de vapor em caldeiras [3]. Em empresas como a Petrobras, a utilização do vapor gerado em caldeiras encontra-se em diversos seguimentos, como: produção de petróleo e gás, refino, geração de energia elétrica e fabricação de fertilizantes (SANTOS E FRAGA, 2017, p. 01)

Para gerar vapor, deve haver combustão dentro da caldeira. Quanto mais espesso o fluido de combustível, maior é o processo para se conseguir a evaporação da água. Muitas vezes é necessário pré-aquecer o fluido combustível para reduzir sua viscosidade. Assim, surgiu a

primeira categoria de caldeiras, ou seja, quanto aos tipos de combustível: (1) Combustíveis líquidos (óleo combustível, diesel); (2) combustíveis gasosos (gás natural, gás combustível de refinaria) e (3) combustíveis sólidos (madeira, carvão, óleo, bagaço). (SEGUNDO, 2014)

O dispositivo opera em pressões internas bem acima da pressão atmosférica, aproximadamente de 20 vezes maiores na maioria das aplicações industriais, 60 a 100 vezes maiores em aplicações que necessitam de produção de energia elétrica, podendo atingir o máximo de até 250 vezes mais, sendo assim um risco iminente em sua operação (ALTAFINI, 2002),

Por serem equipamentos que operam em fluidos de diferentes faixas de pressão (baixa, média, alta e supercrítica), as caldeiras requerem cuidados especiais, pois apresentam alto risco potencial para a planta em operação, a Norma Regulamentadora 13 – NR-13, que trata sobre caldeiras, vasos de pressão e tubulações, estabelece como risco grave e iminente, toda condição ou trabalho que cause acidente ou doença com lesão grave ao trabalhador. Algumas situações que caracterizam essa condição e estão relacionadas ao propósito deste artigo são: operação de caldeira sem dispositivo de segurança ajustados com pressão de abertura igual ou inferior a pressão máxima de trabalho admissível – PMTA, bloqueio inadvertido de dispositivos de segurança e ausência de dispositivos de controle de nível de água. (BRASIL, 1978)

A água utilizada para a geração de vapor não pode ser injetada diretamente na caldeira a partir de fontes de captação, pois consiste em diversos contaminantes prejudiciais aos seus componentes. Com isso, necessita-se de tratamento desde a clarificação para caldeiras de baixa pressão, para remover toda a turbidez, ou até tratamentos mais complexos para atender às necessidades de caldeiras maiores que operam em condições de alta temperatura e pressão, para remover sais e gases dissolvidos, sólidos em suspensão e minerais para manter assim o bom funcionamento, a qualidade dos produtos fornecidos e a segurança das instalações e dos trabalhadores. (SANTOS e FRAGA, 2017)

O tema da pesquisa, assenta-se no desenvolvimento de uma caldeira flamotubular, para que a mesma possa fornecer energia suficiente para a movimentação de uma turbina, tendo como base principal a análise de viabilidade da utilização de determinados combustíveis energéticos, levando em conta segurança, custo e impactos ao meio ambiente, juntamente com a otimização do dispositivo, por meio do decaimento do tempo necessário para aquecimento da caldeira.

2. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um protótipo de uma caldeira flamotubular para movimentar uma turbina, visando otimização do tempo de aquecimento e custo do material energético, assim consequentemente, melhorando a produtividade do equipamento.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Promover um estudo com base em determinados parâmetros, para que o mesmo seja coerente;
- Analisar os combustíveis utilizados pelas caldeiras, segundo o custo, disponibilidade, meio-ambiente, segurança e armazenamento;
- Elaborar um protótipo visando melhorias nas fontes energéticas;
- Desenvolver um protótipo funcional de uma caldeira flamotubular.

4. JUSTIFICATIVA

Desde a revolução industrial, até os dias atuais, estamos cada vez tentando otimizar os equipamentos e máquinas, melhorando a eficiência dos mesmos.

De acordo com Sgs group (2022) A otimização e manutenção eficaz de equipamentos protege o seu investimento e melhora o seu ponto de partida, minimizando os períodos de inatividade, ampliando a vida do equipamento, reduzindo os gastos de energia e outros custos operacionais e otimizando o desempenho.

A utilização de vapor representa alto custo financeiro nas indústrias que o demandam. O consumo de energia para sua geração, que vem do consumo de algum combustível, pode ser um grande vilão nos controles de emissão de poluentes. A realização dos objetivos deste trabalho mostrará a possibilidade de economizar nos custos da fabricação de vapor, contribuindo com a questão ambiental e seguindo as diretrizes da sustentabilidade ambiental.

A viabilidade econômica é o ponto principal na justificativa do trabalho.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 CALDEIRAS / GERADORES DE VAPOR

Segundo Altafini (2002), afirma que a primeira tentativa humana de produzir vapor para fins energéticos ocorreu no século II a.C., quando Herói de Alexandria desenvolveu um dispositivo capaz de vaporizar água e mover uma esfera em torno de seu eixo, criando os primeiros (ainda que primitivos) modelos de caldeiras e turbinas a vapor. No entanto, foi somente durante a Revolução Industrial que o uso do vapor pressurizado para movimentar máquinas e equipamentos teve grande repercussão (ALTAFINI, 2002).

O advento de máquinas projetadas para gerar vapor no início do século XVIII foi impulsionado pela necessidade de encontrar alternativas para geração de calor para substituir a necessidade de queimar carvão fóssil diretamente. Hoje, a praticidade e versatilidade de seu uso tornaram o vapor d'água indispensável em diversos setores industriais. (BAZZO, 1995)

Um gerador de vapor ou caldeira é um dispositivo que converte água líquida em vapor saturado ou superaquecido usando o calor gerado pela queima de combustível. Os gases quentes da combustão trocam calor com a água, produzindo vapor para acionamento mecânico ou aquecimento.

Outra definição acrescenta que uma caldeira é um dispositivo que utiliza a energia química liberada durante a combustão do combustível para facilitar a mudança da água da fase líquida para vapor a uma pressão acima da pressão atmosférica. O vapor produzido é usado para acionar motores térmicos, gerar máquinas e eletricidade e para fins de aquecimento em processos industriais. (PERA, 1990)

Por ser um gerador de vapor, as caldeiras são construídas de acordo com as normas e especificações vigentes de um país para melhor utilizar a energia liberada pela combustão de um determinado combustível. Este combustível pode ser líquido, gasoso e/ou sólido. Dependendo da aplicação, do combustível utilizado e da capacidade de produção de vapor, a caldeira pode ser a principal despesa do processo produtivo. (BAZZO, 1995).

As caldeiras podem ser divididas em caldeiras flamotubulares e caldeiras aquatubulares de acordo com a forma de troca de calor entre o gás quente e a água. Existem caldeiras especiais, como caldeiras elétricas.

5.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES

Pera (1990), afirma em seu trabalho que caldeiras flamotubulares são as mais utilizadas, nas quais o gás é forçado através de tubos imersos em água para trocar calor para produzir vapor. As caldeiras consistem em corpos cilíndricos, também chamados de "espelhos", mantidos entre placas planas, e dependendo do projeto, tubos, tubos ou ambos são adequados.

Constituídas de chapas de diferentes espessuras, dependendo da aplicação, sua pressão pode variar de 5 a 10 kgf/cm², as unidades maiores atingem uma produção de 6 tv/h e uma pressão de saturação abaixo de 17 kgf/cm². Essas caldeiras também podem ser classificadas de acordo com a disposição dos cilindros: as chamadas caldeiras horizontais e verticais. Ambas as classes aceitam fornos externos e internos (ELETROBRÁS/ PROCE EDUCAÇÃO, 2007)

5.1.1.1 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES HORIZONTAIS

De acordo com Bizzo (2003), as caldeiras flamotubulares horizontais estão disponíveis em diferentes configurações. Eles permitem a combustão de combustíveis sólidos, e sua estrutura externa contém gases de combustão e os direciona para canais de troca de calor com água. A Figura 1 destaca os principais tipos de caldeiras horizontais de tubo de fogo.

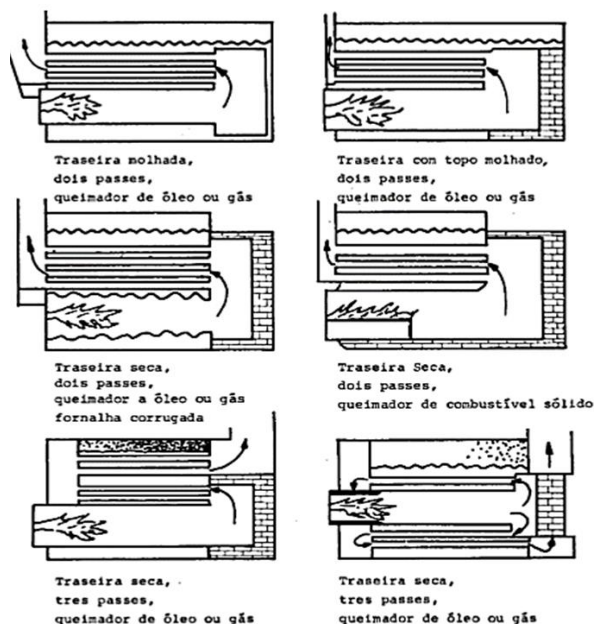


Figura 1 - Tipos de caldeiras flamotubulares horizontais.
Fonte: Bizzo, 2003

Segundo Bazzo (1995), a primeira troca de calor nessas caldeiras ocorre por radiação do próprio forno. A segunda passagem ocorre no tubo, onde a troca de calor é por convecção.

Bazzo (1995) também apontou que quanto maior o número de passagens pela tubulação, maior o uso da energia de combustão do gás. A figura abaixo mostra a passagem do gás entre os tubos.

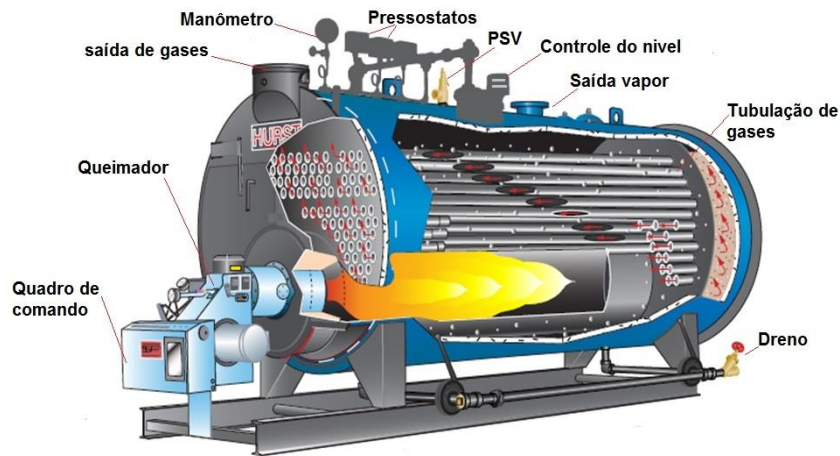


Figura 2 - Desenho esquemático de uma caldeira flamotubular horizontal.
Fonte: Dias e Santos, 2020

5.1.1.2 CALDEIRAS FLAMOTUBULARES VERTICAIS

Caldeiras de tubo de fogo vertical são mais frequentemente usadas quando grandes quantidades de vapor não são necessárias, mas é necessária alta pressão. Esta classe é composta por um cilindro com câmara de combustão externa ou interna, com tubos dispostos verticalmente entre a câmara de combustão e o espelho da chaminé, conforme mostra a Figura abaixo. (ELETROBRÁS /PROCE EDUCAÇÃO, 2007).

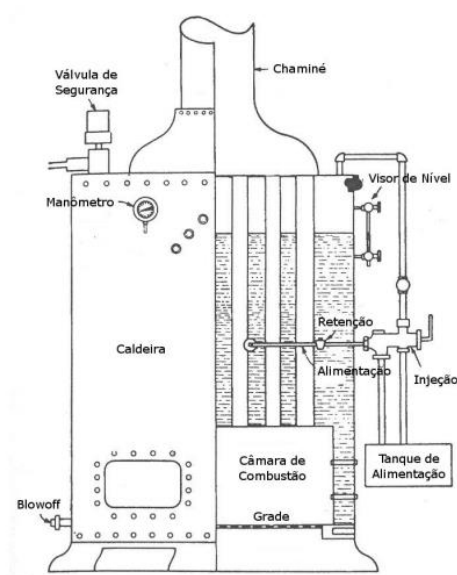


Figura 3 - Esquema Representativo caldeira flamotubular vertical.
Fonte: Telhado, 2017

5.1.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

Em comparação com as caldeiras de tubo de fogo, as caldeiras de tubo de água se destacam em maior produção de vapor, alta temperatura e alta pressão. Consiste em tubos com circulação de água em seu interior, e o vapor é formado pela troca de calor com o gás que circula fora dos tubos. "O fato de esses tubos estarem localizados fora do corpo da caldeira, conecta-os para formar um feixe tubular de água, o que permite uma superfície de aquecimento quase infinita" (PERA, 1990).

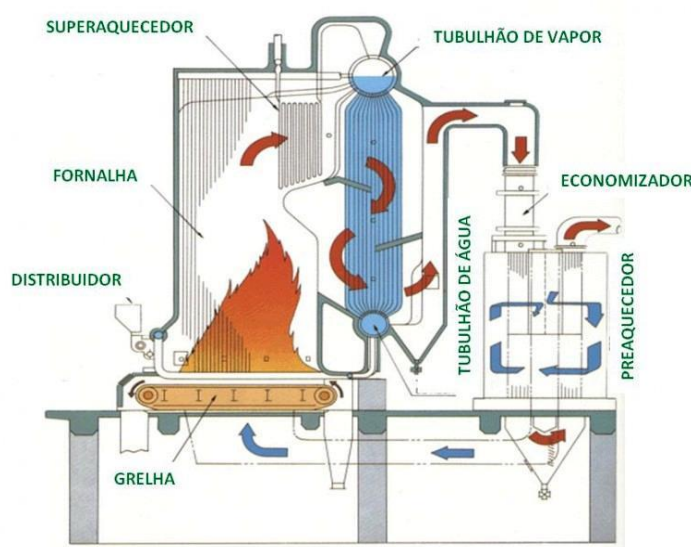


Figura 4 - Caldeira aquatubular de grande porte.
Fonte: Bizzo, 2003

As caldeiras aquatubulares têm uma capacidade evaporativa maior do que as caldeiras aquatubulares, portanto, uma alta capacidade pode ser alcançada com uma caldeira de peso e volume mais leve. Devido à baixa qualidade e eficiência do ciclo da água, o equilíbrio térmico dos componentes da caldeira aquatubular pode ser obtido mais rapidamente. Existem 3 grupos de caldeiras aquatubulares, nomeadamente caldeiras de tubos retos, caldeiras de tubos curvos e caldeiras de circulação positiva, concebidas para responder às necessidades dos edifícios mais modernos. (ELETROBRÁS/ PROCE EDUCAÇÃO, 2007).

5.1.2.1 CALDEIRAS AQUATUBULARES DE TUBOS RETOS

Também conhecida como caldeira sub-horizontal de tubos retos, é constituída por uma série de tubos retos paralelos que se estendem até um coletor denominado câmara corrugada

(PERA, 1990). A câmara mostrada na Figura 5 mostra que a viga se comunica com o tambor superior, formando um conjunto de espiras fechadas por onde circula a água. Na Figura abaixo pode-se notar também a disposição dos tubos paralelos alternados.

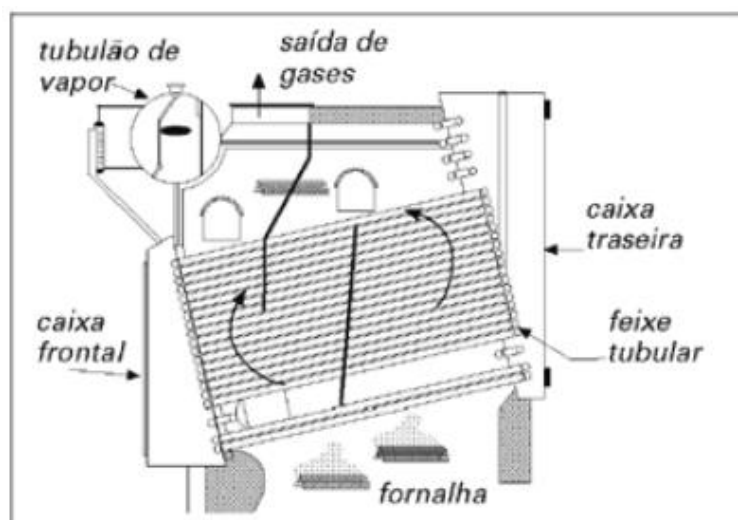


Figura 5 - Esquema de caldeira aquatubular de tubos retos.
Fonte: Chd Válvulas (2013).

5.1.2.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES DE TUBOS CURVOS

Pera (1990) afirma que caldeiras de tubos curvos são importantes no mercado porque não são limitadas em termos de capacidade de produção. Seu sistema de cotovelos é mostrado na Figura em anexo, que são fixados ao tambor por soldagem ou furação.

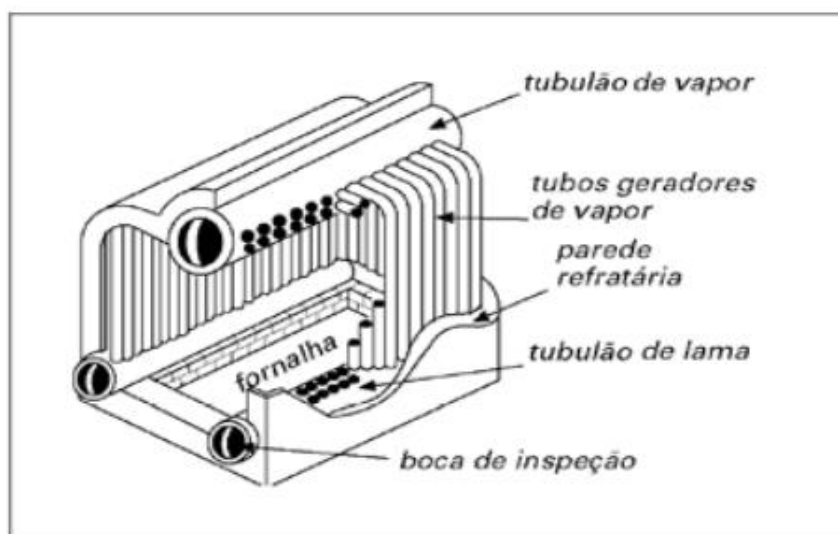


Figura 6 - Caldeira aquatubular de tubos curvos.
Fonte: Chd Válvulas (2013).

5.1.2.3 CALDEIRAS AQUATUBULARES COMPACTAS

As caldeiras compactas são analisadas de acordo com a categoria de caldeiras de tubos dobrados. A caldeira compacta deverá ser totalmente automática, com saída de vapor de até 100 toneladas/hora e eficiência de até 91%. A principal razão de sua compactação é garantir a combustão completa do combustível, o que garante uma câmara de combustão suficientemente ampla (PERA, 1990). A Figura abaixo mostra um esquema básico de uma caldeira aquatubular compacta.



Figura 7 - Caldeira aquatubular compacta.
Fonte: Brumazi (2013).

5.1.3 CALDEIRAS ELÉTRICAS

As caldeiras elétricas funcionam convertendo energia elétrica em calor. Caldeiras pequenas são construídas com resistores, têm potência limitada, cerca de 2,5 kJ/s, variam em tensão entre 200 e 500 volts e são 98% eficientes. Grandes caldeiras são feitas com eletrodos, conforme mostra a Figura em anexo (BAZZO, 1995):

Caldeiras elétricas têm aplicações em áreas onde a eletricidade é abundante e relativamente barata. O uso dessas caldeiras se justifica por não causarem poluentes ambientais ou porque o local não fornece óleo combustível, carvão, lenha e outros combustíveis em quantidade suficiente (BAZZO, 1995).

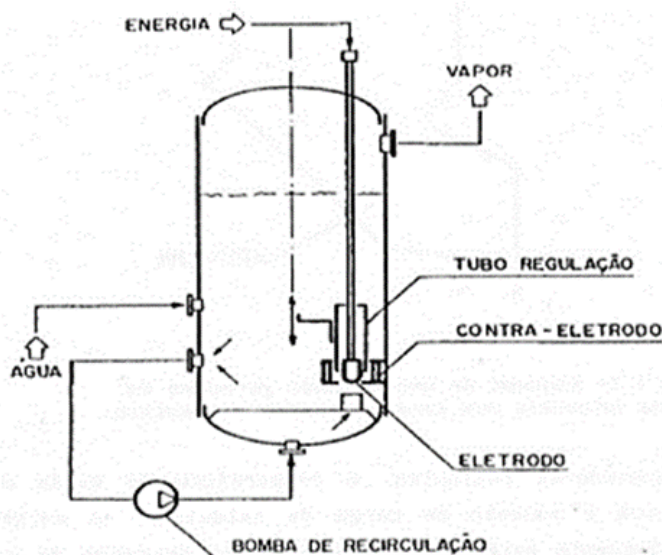


Figura 8 - Esquema de caldeira de eletrodo submerso.
Fonte: Bazzo, 1995

5.2 COMBUSTÍVEL

O avanço da civilização humana tem como um dos principais fatores, o aumento do consumo energético, tal fator se deve ao constante avanço tecnológico nos setores de transportes e processos de produção, etc.

Novas alternativas de energia se tornam de extrema importância tanto para as principais potências quanto para os países emergentes. com isso, somado à recente preocupação com os riscos ambientais, impulsionou-se uma busca por fontes renováveis de energia.

Segundo HINRICHS; KLEINBACH (2003), o acesso às matrizes energéticas adequadas e confiáveis, com o desenvolvimento do setor energético, e o suprimento e abastecimento de energia, proporcionam ao consumidor a compra de energia do fornecedor de sua preferência sem importar-se com o custo. Muitas pessoas decidiram comprar energia de fornecedores que poluem menos, as chamadas alternativas de "energia verde".

A palavra "energia" é definida por diversos autores, como "a capacidade de realizar trabalho"; "energia não se cria, se transforma", entre outras definições e conceitos. Tão importante quanto a definição do que seja energia, é o fato de que a mesma existe em grande quantidade no universo e que ela não aumenta nem diminui, mas passa por inúmeras transformações

Em seu trabalho Dadam et Al (2006) afirma que existem três tipos diferentes de combustíveis usados em caldeiras, sólido, líquido e gás, e todos eles são encontrados em diferentes linhas de produção comercial. A utilização de sólidos é alcançada através da utilização de biomassa, o combustível mais utilizado no Brasil, com grandes reservas em várias regiões do país. O petróleo na década de 1970 teve muito impulso em combustíveis de baixo custo. O gás natural está em processo de adaptação e expansão, exigindo pesquisas aplicadas sobre sua utilização nos mercados consumidores.

Outro autor em sua obra, Pera (1990), ressalta que a biomassa, objeto de pesquisa sobre sua composição, e todos os resíduos orgânicos que podem ser utilizados como fontes renováveis de energia, provenientes de plantas, seus resíduos naturais ou resíduos orgânicos de processamento, resíduos urbanos e resíduos animais. Os biocombustíveis, resultado da queima desses resíduos, são uma das soluções alternativas mais rápidas às energias renováveis.

O Ministério de Minas e Energia (MME, 2007) classifica a biomassa como recurso energético de acordo com a fonte de produção: biomassa energética florestal, seus produtos e subprodutos ou energia nas categorias de resíduos; biomassa agroenergética, culturas agroenergéticas e agrícolas, agroindustriais e Resíduos e subprodutos das atividades de produção animal e resíduos urbanos. A biomassa é geralmente considerada como um recurso para fins energéticos e é um dos recursos renováveis com maiores possibilidades em termos de propriedades, fontes, tecnologias de conversão e produtos energéticos

Ao usar biomassa, como em todos os tipos de combustíveis, é necessário fornecer a quantidade correta de ar de combustão, respeitar a estequiometria da reação e fazer o maior contato possível com o combustível dentro do combustível. forno. (SILVA & SILVA, 2008).

Para a utilização da biomassa florestal como fonte de energia, devem ser consideradas as propriedades físicas e químicas do material, que afetam o desempenho e a manutenção dos equipamentos que realizam o processo de combustão. A análise e o monitoramento de variáveis como teor de umidade (TU), teor de cinzas (TC) e poder calorífico aumentam a eficiência do material, tornando-o competitivo com outras fontes de energia. (BRAND, 2007).

5.2.1 PODER CALORÍFICO

O valor calorífico é definido como o calor produzido pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de combustível. (PERA, 1990).

O combustível é composto principalmente de hidrogênio e carbono. O hidrogênio tem um poder calorífico de cerca de 28.700 kcal/kg, enquanto o carbono tem um poder calorífico de 8.140 kcal/kg, portanto, quanto maior o teor de hidrogênio do combustível, maior seu poder calorífico. O valor calórico é dividido em alto poder calorífico (PCS) e baixo poder calorífico (PCI). Um poder calorífico mais alto ocorre quando uma unidade de massa de combustível queima a um volume constante para liberar calor, toda a água é condensada/líquida. Um poder calorífico mais baixo está associado à combustão de uma unidade de massa de combustível em volume constante, enquanto a água permanece no estado de vapor. (SILVA & SILVA, 2008).

Pera (1990) Ressalta que, na prática, a temperatura na qual os produtos da combustão nunca saem do processo permite que esse vapor d'água se condense e sua entalpia seja perdida. Portanto, o PCI só pode ser determinado quando o teor de hidrogênio e umidade do combustível é conhecido. A Tabela abaixo apresentada por Pera (1990) destaca o maior poder calorífico produzido pela biomassa energética florestal utilizando diferentes tipos de madeira.

Tabela 1 -: Poder calorífico superior de algumas espécies de madeira

ESPÉCIE	PODER CALORÍFICO SUPERIOR KCAL/KG
EUCALIPTO	3.800
PINHO	4500
BROCATINGA	3.300
ACÁCIA NEGRA	3.450
CANELINHA	4.010
PERÓBA	3.720

Fonte: PERA, 1990.

5.2.2 TEOR DE UMIDADE

Esta é a quantidade de água presente nos resíduos de biomassa florestal. Silva et ai. (2018) apontaram a importância de reduzir o teor de umidade da madeira que será utilizada como combustível, pois quanto maior o teor de umidade da madeira, menor o seu poder de queima. Isso se deve ao processo de evaporação da água, que absorve energia na combustão, portanto, controlar esse nível não só ajuda nisso, mas também agrega valor, reduzindo os custos de manuseio e envio.

5.2.3 CINZAS

A cinza representa o produto da queima de substâncias inflamáveis. São substâncias compostas por materiais inorgânicos cujo poder calorífico é inversamente proporcional. Sua presença indica uma redução no tempo de residência do combustível no forno devido à rápida volatilização da biomassa durante a combustão, o que pode levar a ineficiências energéticas. Por sua vez, o carbono fixo está diretamente relacionado ao poder calorífico. Níveis mais altos de carbono fixo significam tempos de residência mais longos dentro da unidade de combustão. (CHAVES et al., 2013).

A tabela abaixo proposta por Pera (1990) demonstra características dos resíduos de biomassa energética florestal provenientes da indústria da madeira.

Tabela 2 - Características de resíduos da indústria da madeira.

RESÍDUO	UMIDADE %	PESO ESPECÍFICO APARENTE (KG/M ³)	MATERIAIS VOLÁTEIS %	C.I. KCAL/KG	TEOR DE CINZAS %
SERRAGEM	30	185	50	2400	1,5
PÓ LIXA AGLOM.	10	265	70	3500	1
PÓ LIXA MAD.	10	250	70	3250	1
CASCA EUCALIP.	30	320	45	2000	1,5
CASCA PINHO	50	360	70	1890	2
VIRUTA	20	110	65	2800	1,5
SOBRA CARPINT.	20	120	60	2800	1,5
RECORTES PRENS.	8	110	80	3350	1,5
RECORTES AGLO	8	120	80	3350	1,5
MAD. TRITURADA	10	175	70	3260	1,5
LÂMINAS DE TÔRNO	50	115	45	1800	2

Fonte: PERA, 1990.

As caldeiras são classificadas de acordo com o meio de transferência de calor e o método de transferência de calor. Dependendo do meio de transferência de calor, as caldeiras são de combustível sólido, líquido, gás e eletricidade com eletrodos submersos ou resistência elétrica. (MACINTYRE, 2014)

5.2.4 CALDEIRA A COMBUSTÍVEL SÓLIDO

PADILHA et al, (2008), afirma que os combustíveis sólidos são:

- Carvão mineral - usado principalmente em grandes usinas termelétricas. Nos Estados Unidos, 3/4 do carvão consumido é usado para produzir vapor para gerar eletricidade.
- Carvão vegetal e lenha - atualmente são descartados devido ao alto custo e falta de matéria-prima.

- Bagaço - Utilizado nas indústrias sucroalcooleiras, utilizando como combustível o restante da usina de cana-de-açúcar. O vapor produzido é utilizado nas máquinas, geradores e aquecedores da fábrica.
- Eucalipto - de madeira de reflorestamento que atende às leis ambientais vigentes
- Casca de Arroz - Produzida pelo beneficiamento do arroz e disponível nas áreas onde o grão é cultivado e beneficiado.

Há uma vantagem em utilizar a biomassa como fonte de energia por questões ambientais, pois durante a combustão da biomassa, o CO₂ é liberado na atmosfera, enquanto o CO₂ é absorvido pelas plantas durante a fotossíntese, mantendo uma quantidade constante na atmosfera (FOLETTTO et al., 2005).

O arroz é uma das principais culturas para a produção agrícola do Brasil. Segundo estatísticas do IBGE, em dezembro de 2013, a produção de arroz foi de 188,2 milhões de toneladas. Sabendo-se que a casca de arroz representou 20% desse valor, somente neste haviam cerca de 37,64 toneladas de casca de arroz em (FOLETTTO et al, 2005).

A casca de arroz já foi descartada criminalmente antes, por exemplo, em rios, e hoje é usada para gerar energia queimando-a. Desta forma, torna-se um combustível competitivo no mercado devido à sua disponibilidade e custo (FOLETTTO et al., 2005). Além de gerar energia a partir da combustão da casca de arroz, a cinza produzida pela combustão equivale a 18% do peso da casca de arroz antes da combustão, e a cinza contém cinzas que poluem seriamente o solo e não podem ser descartadas de forma alguma. (FOLETTTO et al., 2005).

Essas cinzas também são ricas em sílica (>92%), o que agrega valor a esse resíduo, por isso a cinza da casca de arroz é utilizada em diversas indústrias, como eletrônica, fabricação de células fotovoltaicas, indústria química, construção civil (FOLETTTO et al., 2005).

5.2.5 CALDEIRA A COMBUSTÍVEL LÍQUIDO

Entre os combustíveis líquidos, petróleo bruto, óleo combustível, óleo diesel e óleos de baixo ponto de fluidez (BPF) são os mais utilizados em várias capacidades de carga por caldeira. (PADILHA et al, 2008).

O petróleo bruto e o óleo combustível precisam ser pré-aquecidos para atingir a viscosidade adequada da bomba e, mais importante, para melhorar a pulverização e a

combustão. O diesel é frequentemente usado em unidades pequenas, principalmente porque não requer aquecimento e proporciona uma combustão mais limpa. No entanto, o alto preço desse combustível torna o simples uso do diesel incompatível com o custo/benefício. Por esta razão, grandes caldeiras estão atualmente em fábricas prontas para queimar diferentes tipos de combustíveis individualmente ou simultaneamente. (PADILHA et al, 2008).

5.2.6 CALDEIRAS A GÁS

Eles são amplamente utilizados na indústria do petróleo, onde há excedente de gás natural. Recentemente, o gás natural também tem sido escolhido por grandes indústrias devido à sua fácil disponibilidade, baixo custo deste combustível e grandes preocupações ambientais. (PADILHA et al, 2008).

Vale ressaltar que todas as caldeiras que utilizam combustíveis líquidos ou gasosos podem usar dois ou mais combustíveis. Hoje, existem caldeiras prontas para usar até 12 tipos diferentes de combustível. (PADILHA et al, 2008).

5.2.7 CALDEIRAS A ELETRICIDADE

Em áreas com abastecimento de eletricidade suficiente, é possível analisar se é vantajoso instalar equipamentos de aquecimento elétrico, levando em consideração o custo da eletricidade fornecida pela concessionária local. (MACINTYRE, 2014).

Ainda segundo o autor, as caldeiras elétricas oferecem certas vantagens, que são

- Ausência de poluição ambiental;
- Modulação de carga de 0 a 100%;
- Resposta rápida à variação de consumo de vapor;
- Manutenção simples – apenas bombas;
- A falta d'água não provoca danos à caldeira;
- Área reduzida de instalação;
- Não necessita de área para estocagem de combustível;
- Redução considerável no custo do vapor em relação ao produzido por óleo combustível;

5.3 NR-13 – CALDEIRAS E VASOS SOB PRESSÃO

Segundo Leite e Militão (2008), a NR-13 (BRASIL, 2013) é uma norma do Ministério do Trabalho e Emprego que regulamenta a operação de vasos de pressão e caldeiras. Foi criado em 8 de junho de 1978 e revisado em 8 de maio de 1984.

Em seu trabalho, o autor Altafini (2002) observa que, dentre os diversos destaques da norma, com foco na inspeção de segurança de caldeiras a vapor estacionárias, podem ser elencadas algumas disposições básicas:

Considera-se profissional qualificado a pessoa com capacidade legal para exercer a competência profissional de engenheiro em atividades relacionadas com projeto de edifícios, fiscalização de operação e manutenção, inspeção e fiscalização de caldeiras e vasos de pressão, de acordo com as normas profissionais em vigor.

A NR 13 classifica as caldeiras em 3 categorias: Categoria A: caldeiras com pressão de trabalho igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²); Categoria C: aquelas com pressão de trabalho igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²) com volume interno igual ou inferior a 100 litros; Categoria B: Todas as caldeiras que não se enquadrem nas categorias anteriores.

As caldeiras estarão sujeitas a inspeções de segurança internas e externas obrigatórias nas seguintes ocasiões:

- Antes da produção, quando novos produtos e locais de produção;
- Após reforma, reforma ou acidente;
- Para caldeiras Classe A e B, periodicamente, pelo menos uma vez por ano. Empresas com serviços próprios de inspeção de equipamentos podem estender o tempo entre as inspeções de segurança, cumprindo determinados prazos (vide NR-13 (Brasil, 2013)).
- Após a recolocação em uso, deve ser descontinuado por mais de seis meses consecutivos;
- Quando a posição de instalação muda; 6. Após 25 anos de serviço, a caldeira deve ser submetida a uma rigorosa avaliação de integridade estrutural nas inspeções subsequentes.

Cada caldeira deve ter os seguintes documentos no local de instalação:

- Diagrama da caldeira - contém diversas informações sobre projeto e fabricação de caldeiras (vide NR-13 (BRASIL, 2013));
- Registros de Segurança - O livro correto, com os números de página corretos, contendo todos os eventos significativos, status de segurança da caldeira e inspeções anteriores.
- Projeto de instalação;
- Itens de mudança e manutenção;

- Relatório de Inspeção - contém algumas informações dos registros da caldeira, tipo de inspeção realizada, descrição das inspeções e ensaios realizados, resultados e ações, nome claro, assinatura e CREA de profissional habilitado,
- Todos os documentos acima devem ser acessíveis aos operadores, inspetores de manutenção e pessoal da CIPA, devendo o proprietário da empresa garantir o acesso total a esses documentos.

A caldeira foi inspecionada, e uma vez emitido o relatório de inspeção, uma cópia do relatório de inspeção deve ser encaminhada por profissional habilitado a um representante da principal categoria profissional do negócio em até 30 dias após a inspeção.

A NR-13 (Brasil, 2013) também regulamenta a inspeção de vasos de pressão, com normas semelhantes às de caldeiras. A NR13 (Brasil, 2013) também prevê cursos mínimos para treinamento de segurança de operação de caldeiras em seu Anexo I-A e cursos de treinamento de segurança de operação de plantas de pressão mínima no Anexo I-B. Além disso, no Anexo II, apresenta os requisitos de certificação para serviços de inspeção de equipamentos próprios (ALTAFINI, 2002)

A NR-13 determina que os equipamentos passem por uma rigorosa avaliação de integridade por um período de 25 anos visando determinar sua vida útil restante e um novo período máximo de inspeção (caso ainda estejam em serviço).

Assim como a nr-13, existem outras normas e Regulamentos que abrangem esses equipamentos, os trocadores de calor estão sujeitos a regulamentos relativos à sua construção, segurança, etc. A norma TEMA - Tubular Heat Exchanger Manufacturers Association padroniza a maioria dos modelos desses dispositivos comumente utilizados na indústria. Outra norma que rege o projeto de vasos de pressão aos quais pertencem os trocadores de calor é a ASME - American Society of Mechanical Engineers. Esta e outras normas fornecem métodos para calcular a pressão permitida, tipo de carga, grau de segurança exigido, etc.

5.4 ALIMENTAÇÃO E TRATAMENTO DE ÁGUA PARA CALDEIRAS

O fornecimento de água alternativa à caldeira correspondente ao vapor produzido pela caldeira, bem como o tratamento para manter a qualidade da água utilizada no processo, são operações importantes para o bom funcionamento do gerador de vapor (ELETROBRÁS, 2005).

5.4.1 ALIMENTAÇÃO

Qualquer problema que impeça a entrada de água na caldeira pode fazer com que seu nível de água baixe, expondo suas superfícies metálicas ao contato com gases quentes, criando condições para que as paredes metálicas trinchem ou até explodam devido ao superaquecimento das placas. Metal (ELETROBRÁS, 2005).

Para introduzir água na caldeira de forma controlada, são utilizados dispositivos de alimentação como bombas centrífugas e redutores. Do ponto de vista termodinâmico, a função do alimentador é deslocar uma grande quantidade de água com uma pressão capaz de superar a resistência do circuito. Esses dispositivos são responsáveis pela pressurização do sistema (ELETROBRÁS, 2005).

5.4.2 TRATAMENTO

Segundo Mitamura (2005) apud Nascimento (2007), o principal objetivo do tratamento de água é prevenir problemas de corrosão, que ocorrem devido aos gases dissolvidos na água, incrustação (depósitos de sílica em caldeiras ou superfícies de aquecimento) e resistência, ou seja, há água líquida no vapor que sai da caldeira para consumo, evitando assim o acidente de perda da caldeira e ferimentos pessoais.

Nascimento (2007) também destaca que os fabricantes informam aos consumidores que a água de alimentação da caldeira afeta diretamente a vida útil do equipamento. Para garantir o bom desempenho e longa vida útil do equipamento, é necessário que a análise química da água seja feita por um laboratório qualificado, que possa fornecer as informações necessárias sobre o tipo de tratamento necessário e a ser aplicado.

As figuras abaixo apresentam exemplos de corrosão e incrustação, respectivamente.

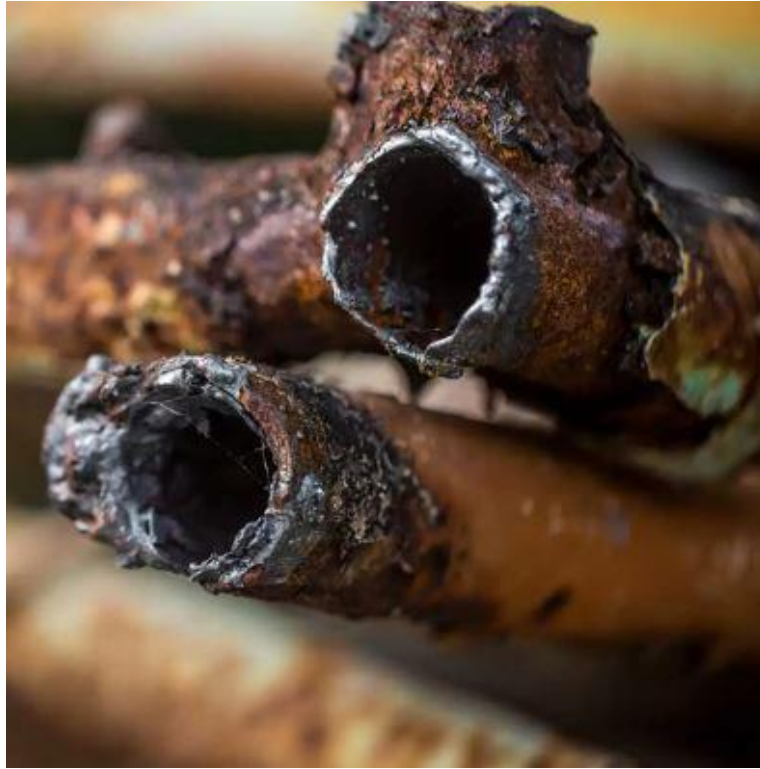


Figura 9 - Corrosão nos tubos de caldeiras
Fonte: Ferraz, 2020

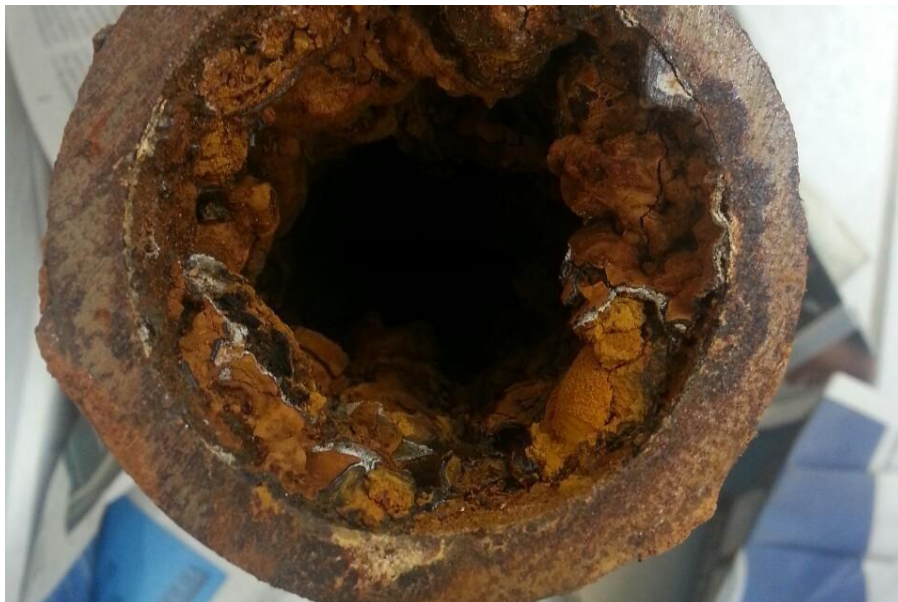


Figura 10 - Incrustações em caldeiras
Fonte: Ferraz, 2020

Normalmente, a água utilizada nas caldeiras é proveniente de fontes naturais como rios, lagos, poços ou outras nascentes. Dependendo de sua origem, diferentes produtos dissolvidos

ou suspensos podem ser encontrados na água em diferentes concentrações (ELETROBRÁS, 2005).

Quando a água evapora dentro da caldeira, deixa um resíduo que se deposita na superfície metálica, que adere ao material. Alguns resíduos são misturados em peças metálicas e são mais difíceis de remover, denominados incrustações (ELETROBRÁS, 2005).

Por serem maus condutores de calor, esses resíduos que se acumulam nas superfícies metálicas tendem a criar mais resistência à transferência de calor, o que pode levar à redução da eficiência térmica do gerador de vapor. Dada a necessidade de manter a alta eficiência do gerador de vapor, é necessário o controle rotineiro da água fornecida à caldeira. Para tanto, foi desenvolvido um método simples com resultados satisfatórios. (ELETROBRÁS, 2005)

Estes métodos baseiam-se na determinação dos seguintes valores: dureza, alcalinidade, cloreto, fosfato e pH (acidez). Para alguns tipos de água é importante determinar outros dados como: sólidos totais, resíduos de calcinação, orgânicos, O₂ livre e concentrações de sílica (ELETROBRÁS, 2005). Dos citados, é importante ressaltar que o oxigênio é extremamente corrosivo, atacando os metais da caldeira. Por sua vez, a sílica é responsável pela remoção de crostas mais duras de superfícies metálicas (ELETROBRÁS, 2005).

O tratamento da água é necessário para evitar que depósitos sólidos inibam a taxa de transferência de calor, o que pode levar ao superaquecimento causando danos onerosos e interrompendo o processo de produção de vapor (ELETROBRÁS, 2005).

Além disso, de acordo com Macyntire (2012), a água de alimentação da caldeira deve ser tratada para remover os sais de cálcio e magnésio, o que pode levar à incrustação e possível ruptura das tubulações. O processo de tratamento de água deve ser selecionado com base na fonte de água, suas propriedades químicas, a quantidade de água de reposição e outros critérios específicos da instalação. Além disso, os parâmetros que determinam quais processos são utilizados no tratamento são: qualidade da água, pressão da caldeira e pureza do vapor (ELETROBRÁS, 2005).

Os processos a seguir são realizados antes da água ser introduzida na caldeira:

5.4.2.1 CLARIFICAÇÃO:

Através do clarificador, a água é colocada na presença de um coagulante que forma uma folha tipo gel que absorve as impurezas presentes na água. Esses reagentes consistem em ferro e, mais comumente, alumínio. Por exemplo, o hidróxido de alumínio formado sedimenta,

arrastando as impurezas para o fundo do equipamento. Portanto, o clarificador é formado por floculação e decantador formando flocos (ELETROBRÁS, 2005)

5.4.2.2 ABRANDAMENTO:

O tratamento envolve a introdução de soluções de CaO (cal) e NaCO₃ (carbonato de sódio ou soda), que precipitam carbonato de cálcio e formam hidróxido de magnésio floculado para remoção antes de bombear para a caldeira (MACINTYRE, 2012). Além disso, segundo Macintyre (2012), existem processos mais modernos como o amolecimento por troca iônica, que incluem o uso de resinas catiônicas.

A Figura mostra uma planta de amaciador de estágio único com um tanque de salmoura para regeneração e toda a tubulação operacional, e a Figura abaixo mostra um amaciante de leito misto.

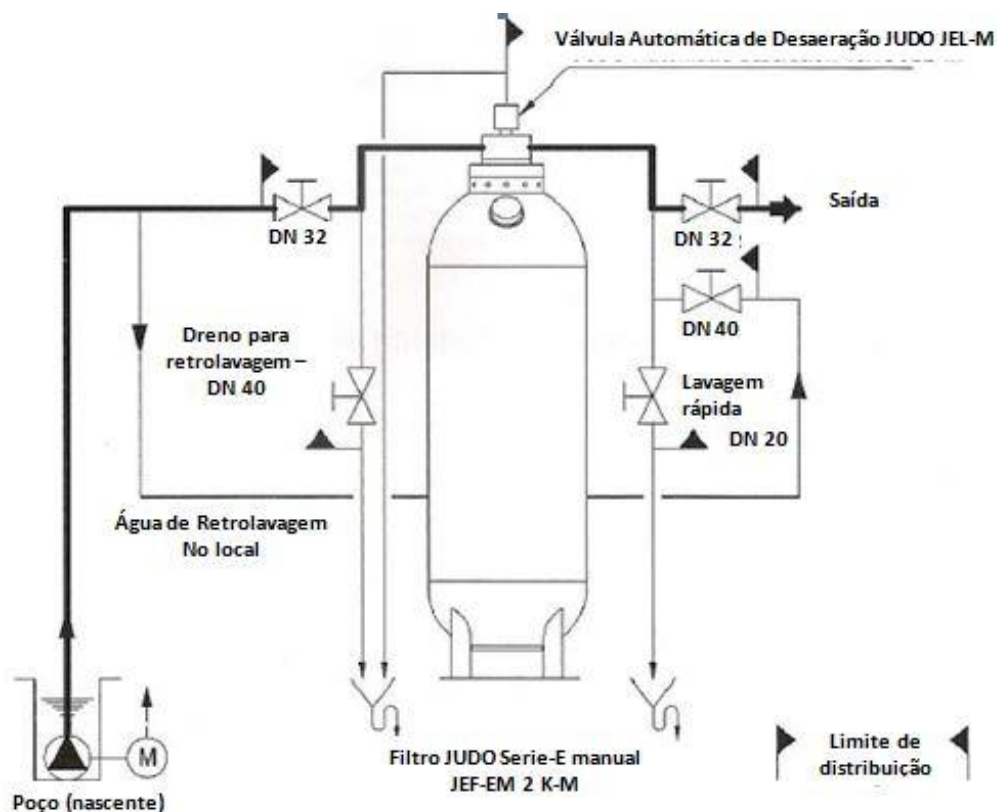


Figura 11 - Instalação de abrandador de um Estágio
Fonte: Biotec, 2020

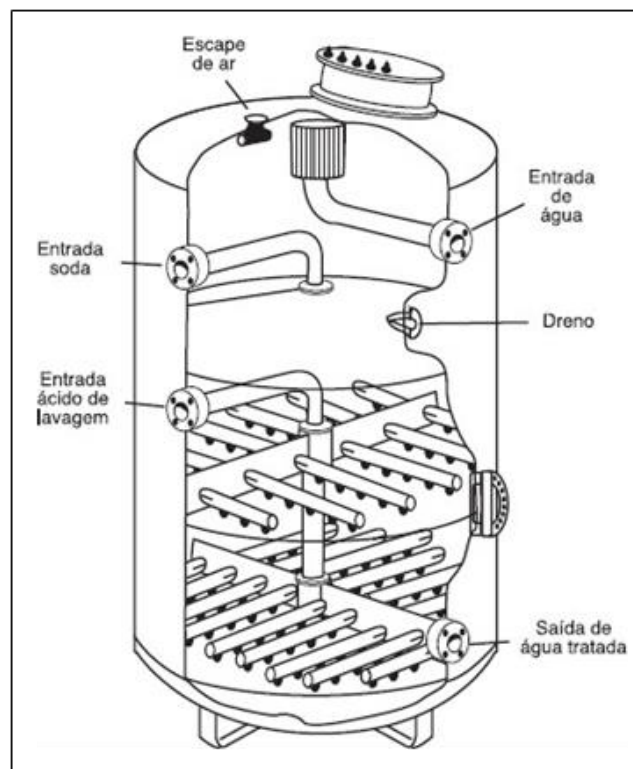


Figura 12 - Corte em perspectiva de um permutador abrondador de leito misto
Fonte: Eletrobrás, 2005

5.4.2.3 DESMINERALIZAÇÃO

Este tratamento é indicado para caldeiras com pressões acima de 40 kgf/cm², principalmente quando possuem superaquecedores para alimentar as turbinas da usina. O equipamento utilizado realiza troca aniônica e catiônica de acordo com a qualidade exigida da água (ELETROBRÁS, 2005).

5.4.2.4 DESAERAÇÃO

Envolve a introdução de vapor na água a pressão constante, reduzindo parcialmente a pressão de oxigênio dissolvido e dióxido de carbono na água e eliminando alguns desses gases (MACINTYRE, 2012).

O equipamento utilizado para este processo é chamado de desgaseificador. A Figura abaixo mostra um desaerador de spray que usa spray para dispersar água na câmara de vapor do dispositivo.

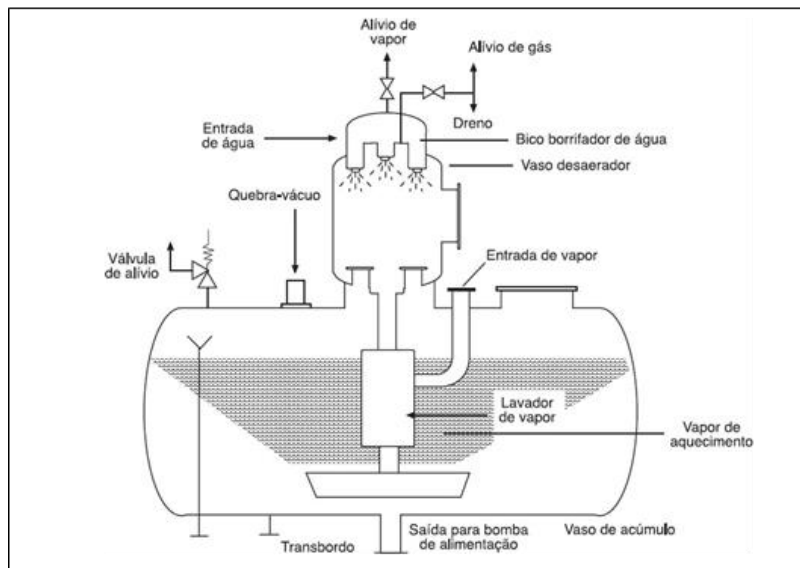


Figura 13 - Esquema de um degaseador a pulverização
Fonte: Eletrobrás, 2005

A figura abaixo mostra um desgaseificador de disco perfurado que produz uma série de jatos cilíndricos descendentes e aumenta a superfície de contato das fases.

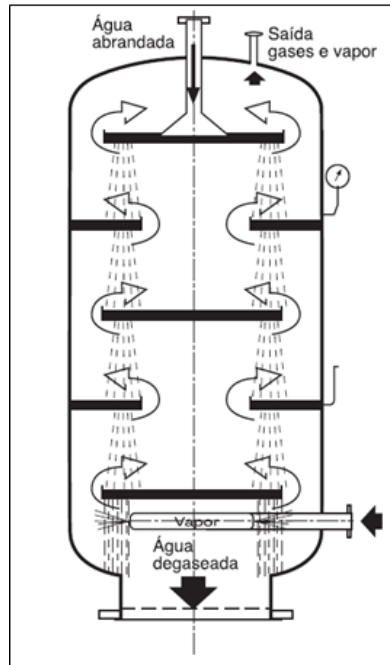


Figura 14 - Degaseificador de bandejas perfuradas
Fonte: Pêra, 1990 apud Eletrobrás, 2005

5.4.2.5 REMOÇÃO DA SÍLICA

Conforme mencionado anteriormente, a sílica pode causar incrustações de difícil remoção, e o método de tratamento utilizado para removê-la da água antes de entrar na caldeira é por troca iônica com óxidos (ELETROBRÁS, 2005).

5.5 VAPOR

Segundo TLV (2022), vapor é o gás formado quando a água passa de líquido para gás. No nível molecular, isso acontece quando as moléculas de H₂O conseguem se libertar das ligações enquanto as mantêm juntas. Na água líquida, as moléculas de H₂O estão constantemente ligadas e separadas.

No entanto, quando as moléculas de água são aquecidas, as pontes que ligam as moléculas começam a se desintegrar mais rapidamente do que se formam. Eventualmente, quando calor suficiente é fornecido, algumas moléculas se quebram em um estado mais livre. Essas moléculas "livres" formam o gás transparente que chamamos de vapor, ou mais especificamente vapor seco (tlv, 2022),

O vapor é muito importante como fonte de calor industrial. além de ser uma fonte de energia limpa, o vapor proporciona um aquecimento rápido e uniforme. o aquecimento a vapor é de 1,5 a 2 vezes mais eficiente do que o uso da água quente.

5.5.1 TIPOS DE VAPOR

Se a água for aquecida acima de seu ponto de ebulição, ela evaporará em vapor ou água gasosa. No entanto, nem todo vapor é criado igual. As propriedades do vapor mudam gradualmente de acordo com a pressão e a temperatura a que é submetido.

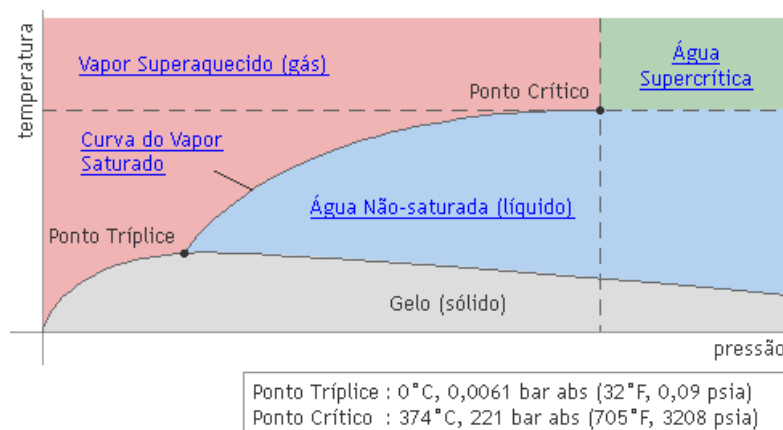


Figura 15 - Gráfico pressão - temperatura do vapor
Fonte: TLV, 2022

5.5.1.1 VAPOR SATURADO

De acordo com Disparco (2022) o vapor saturado ocorre em temperaturas e pressões nas quais vapor (gás) e água (líquido) podem coexistir, como mostra a linha preta no gráfico acima. Em outras palavras, isso acontece quando a taxa de evaporação da água é igual à taxa de condensação.

5.5.1.1.1 VANTAGENS DE USO DO VAPOR SATURADO PARA AQUECIMENTO

Vapor saturado tem muitas propriedades que o torna uma excelente fonte de calor, particularmente às temperaturas de 100 °C (212°F) e acima. Algumas destas propriedades são:

Tabela 3 – Vantagens do vapor Saturado

Propriedade	Vantagem
Aquecimento rápido e uniforme através de transferência do calor latente	Melhorou a qualidade e produtividade do produto
Pressão pode controlar temperatura	Temperatura pode ser rapidamente e precisamente estabelecida
Alto coeficiente de transferência de calor	Menor área superficial requerida para transferência de calor, possibilitando redução no gasto inicial do equipamento
Origina a partir de água	Seguro, limpo e baixo custo

Fonte: Acervo pessoal, 2022

Tendo dito isso, é necessário estar atento aos seguintes itens quando estiver aquecendo com vapor saturado:

Caso seja utilizado vapor diferente do vapor seco para o processo de aquecimento, a eficiência do aquecimento pode ser reduzida. Ao contrário da crença comum, quase todo vapor produzido por uma caldeira não é vapor saturado seco, mas vapor úmido, que contém algumas moléculas de água não evaporadas.

A perda de calor radiante faz com que parte do vapor se condense. O vapor úmido produzido nestas condições torna-se mais úmido e também forma condensado, que deve ser removido com a instalação de purgadores de vapor.

O condensado pesado que cai do fluxo de vapor pode ser removido por purgadores de vapor na capa de condensado. No entanto, o vapor úmido que entra reduz a eficiência do aquecimento e deve ser removido por meio de pontos de uso ou estações de separação de distribuição.

Vapor que tem queda de pressão devido ao atrito nas tubulações etc. também pode causar perdas correspondentes à temperatura do vapor.

5.5.1.2 VAPOR ÚMIDO

Esta é a forma mais comum de vapor encontrada nas plantas. Quando uma caldeira é usada para gerar vapor, geralmente contém umidade de moléculas de água não evaporadas que foram transportadas para o vapor distribuído. Mesmo as melhores caldeiras podem emitir vapor com um teor de umidade de 3% a 5%. À medida que a água se aproxima da saturação e começa a evaporar, parte da água, geralmente na forma de névoa ou gotículas, é puxada para o vapor ascendente e distribuída a jusante. Esta é uma das principais razões para usar separadores para remover o condensado do vapor distribuído (DISPARCO, 2022)

5.5.1.3 VAPOR SUPERAQUECIDO

De acordo com TLV (2022), o vapor superaquecido é produzido pelo aquecimento adicional do vapor úmido ou saturado acima do ponto de vapor saturado. Isso produz vapor com uma temperatura mais alta e densidade mais baixa do que o vapor saturado na mesma pressão. O vapor superaquecido é usado principalmente em aplicações de propulsão/movimento, como turbinas, e geralmente não é usado em aplicações de transferência de calor.

5.5.1.3.1 VANTAGENS DE USO DO VAPOR SUPERAQUECIDO PARA MOVIMENTAR TURBINAS:

- Para manter o nível seco do vapor para equipamento movido a vapor, do qual a performance é debilitada pela presença de condensado.

- Para melhorar a eficiência térmica e capacidade de trabalho, e.g. para alcançar mudanças maiores em volume específico a partir do estado superaquecido para pressões mais baixas, até mesmo de vácuo.

Tanto o fornecimento quanto a descarga de vapor em condições superaquecidas são vantajosos, pois nenhum condensado é gerado dentro da usina a vapor durante a operação normal, minimizando assim o risco de danos erosivos ou corrosão por ácido carbônico. Além disso, como a eficiência térmica teórica da turbina é calculada a partir dos valores de entalpia na entrada e na saída da turbina, aumentar o grau de superaquecimento e pressão aumenta a entalpia no lado de entrada da turbina e, portanto, é eficaz. na melhoria da eficiência térmica. (TLV, 2022)

5.5.1.3.2 DESVANTAGENS DE USO DO VAPOR SUPERAQUECIDO PARA AQUECIMENTO:

Tabela 4 - Desvantagens do uso do vapor superaquecido

Propriedade	Desvantagem
Baixo coeficiente de transferência de calor	Produtividade reduzida
	Maior área de superfície de transferência de calor necessária
Variação na temperatura do vapor mesmo em pressão constante	Vapor superaquecido precisa manter alta velocidade, senão a temperatura cairá à medida que o calor é perdido do sistema.
Calor sensível é usado para transferir calor	Queda de temperatura pode ter um impacto negativo sobre a qualidade do produto
Temperatura pode ser extremamente alta	Materiais de construção mais fortes podem ser necessários, requerendo um alto gasto inicial de equipamento.

Fonte: Acervo pessoal, 2022

De acordo com a TLV (2022), por essas e outras razões, o vapor saturado é preferível ao vapor superaquecido como meio de aquecimento em trocadores e outros equipamentos de transferência de calor. Por outro lado, como fonte de calor para aquecimento direto, como gás de alta temperatura, tem vantagens sobre o ar quente e pode ser usado como fonte de calor para aquecimento em condições livres de oxigênio. O uso de vapor superaquecido em aplicações de processamento de alimentos, como cozimento e secagem, também está sendo investigado.

5.5.1.4 ÁGUA SUPERCRÍTICA

A água supercrítica é a água que está em um estado além de seu ponto crítico. No ponto crítico, o calor latente do vapor é zero e seu volume específico é exatamente o mesmo, seja líquido ou gasoso. Em outras palavras, a água a uma pressão e temperatura acima do ponto crítico está em um estado indistinguível que não é líquido nem gasoso, e o ar circundante e as nuvens de vapor branco (pequenas gotículas de água) se formam. Quando o vapor contém essas pequenas gotas de água, é chamado de vapor úmido. (DISPARCO, 2022)

A água supercrítica é usada para acionar turbinas em usinas de energia que exigem eficiência máxima. Pesquisas sobre água supercrítica estão sendo realizadas com foco em seu uso como fluido com propriedades líquidas e gasosas, principalmente como solvente para reações químicas. Moléculas de vapor saturado são invisíveis. Quando o vapor saturado é canalizado para a atmosfera, parte dele se condensa transferindo calor para o ar circundante e forma uma nuvem de vapor branco (pequenas gotículas de água). Quando o vapor contém essas pequenas gotas de água, é chamado de vapor úmido. (DISPARCO, 2022)

6. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados todos os critérios escolhidos para orientar o projeto, considerando os critérios necessários para determinar os valores

6.1 MODELO ESCOLHIDO

O modelo escolhido foi uma caldeira flamotubular vertical, esse modelo foi adotado, pois pode ser adotado para diversas aplicações, pelo fato de ser uma caldeira de pequeno porte que ocupa um pequeno espaço para instalação da mesma e fornece mais rendimento com a fornalha interna.

Caldeiras flamotubulares modernas só utilizam combustíveis líquidos e gasosos devido a dificuldade de instalar grelhas para combustíveis sólidos, a partir desse fato a figura 15 foi analisada para a determinação do combustível, foi escolhido o gás GLP como combustível, devido ao seu alto poder calorífico inferior e sua facilidade de ser encontrado.

A figura 15 abaixo mostra uma comparação de poder calorífico inferior dos combustíveis que poderiam ser utilizados.

PODER CALORÍFICO INFERIOR				Inferior Heat Power	
COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI	COMBUSTÍVEL	PCI
Alcool de cana	5.500 kcal/l	Coque de lenha	7.600 kcal/kg	Óleo de algodão	8.050 kcal/l
Aparas vinilo	6.300 kcal/kg	Coque metalúrgico	7.200 kcal/kg	Óleo de amendoim	8.000 kcal/l
Bagaço de cana (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg	Fibras de palmeira (48% de água)	2.000 kcal/kg	Óleo de babaçu	7.770 kcal/l
Bagaço de cana (50% ÁGUA)	1.800 kcal/kg	Fibras de palmito	3.800 kcal/kg	Óleo de soja	8.125 kcal/l
Bambu (10% água)	3.700 kcal/kg	Filme polietileno	5.600 kcal/kg	Óleo diesel	8.620 kcal/l
Borra de café	1.570 kcal/kg	Gás de água	4.000 kcal/Nm³	Palha de amendoim (12% água)	3.100 kcal/kg
Carvão de babaçu	7.000 kcal/kg	Gás de água carburetado	6.000 kcal/Nm³	Palha de trigo (20% ÁGUA)	3.200 kcal/kg
Carvão mineral - Cambul/PR	6.200 kcal/kg	Gás de alto forno	700 kcal/Nm³	Papel	4.200 kcal/kg
Carvão mineral - Charqueadas/ RS	3.100 kcal/kg	Gás de biodigestor (biogás)	5.000 kcal/Nm³	Piche alcatrão	8.600 kcal/kg
Carvão mineral - Mina do leão/ RS	4.200 kcal/kg	Gás de coqueira	4.300 kcal/Nm³	Pó de linho	4.000 kcal/kg
Carvão mineral - Tubarão/ SC	4.500 kcal/kg	Gás de gasogênio	1.260 kcal/Nm³	Pó de madeira fino (seco)	4.000 kcal/kg
Carvão vegetal	7.500 kcal/kg	Gás de nafta	4.220 kcal/Nm³	Pó de madeira grosso (seco)	4.200 kcal/kg
Casca de árvore	2.200 kcal/kg	Gás GLP (50%)	11.025 kcal/kg	Pó de tabaco	2.300 kcal/kg
Casca de algodão	3.000 kcal/kg	Gás natural	9.065 kcal/Nm³	Querosene	8.300 kcal/l
Casca de amêndoa dende	4.800 kcal/kg	Lascas de madeira	3.300 kcal/kg	Recortes de couro (14% ÁGUA)	4.400 kcal/kg
Casca de arroz (12% água)	3.300 kcal/kg	Lenha (40% água)	2.400 kcal/kg	Resíduos de juta	3.800 kcal/kg
Casca de babaçu	4.000 kcal/kg	Lenha (seca) (12% água)	3.680 kcal/kg	Restos de borracha	4.000 kcal/kg
Casca de cacau (8% água)	3.900 kcal/kg	Madeira de calvotos	3.800 kcal/kg	Sementes de girassol (9,5% água)	4.300 kcal/kg
Casca de café	3.800 kcal/kg	Madeira muito seca	4.800 kcal/kg	Serragem de pinho (40% água)	2.000 kcal/kg
Casca de cajú	4.700 kcal/kg	Madeira pinho (seca ao ar)	3.500 kcal/kg	Serragem seca (20% água)	3.500 kcal/kg
Casca de coco	4.000 kcal/kg	Madeira verde	2.500 kcal/kg	Serragem + Cepilho (seco)	4.600 kcal/kg
Casca de eucalipto	3.750 kcal/kg	Óleo combustível 1A	9.750 kcal/kg	Sisal (11% água)	3.400 kcal/kg
Casca de tanino úmido (58% água)	800 kcal/kg	Óleo combustível 1B	9.940 kcal/kg	Sobra de serraria (pinho)	4.160 kcal/kg
Casca de soja	3.300 kcal/kg	Óleo combustível 2A	9.550 kcal/kg	Tecido nylon	7.300 kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 kcal/kg	Óleo combustível 2B	9.920 kcal/kg	Trapos de pano	4.200 kcal/kg
Cavacos de pinho	2.500 kcal/kg	Óleo combustível 3A	9.500 kcal/kg	Turfa (seca ao ar) (25 a 6% água)	3000 - 5000 kcal/kg
Coque de gás	5.400 kcal/kg	Óleo combustível 3B	9.870 kcal/kg		

Figura 16 - tabela de poder calorífico inferior
Fonte: LAVAL (2022)

6. 2 CÁLCULOS DE FUNCIONAMENTO

Por se tratar de um protótipo funcional, alguns valores já foram pré definidos para a execução do mesmo, como um diâmetro interno de 250mm e aço SAE 1045 para confecção estrutural.

A partir desses dados pré definidos as equações 01 e 02 são utilizadas para definição de espessura e tensão admissível do material respectivamente.

$$t \approx \frac{P \times R}{S} \quad (01)$$

Onde:

- T= Espessura;
- P= Pressão;
- R= Raio Interno;
- S= Tensão Admissível Do Material.

$$S = K \times \sigma \quad (02)$$

Onde:

- S= Tensão Admissível Do Material;
- K= Coeficiente De Segurança;
- σ = Coeficiente De Ruptura Do Material.

A partir desses dados as pressões podem ser definidas usando o código ASME para definição pelas equações 03 e 05.

$$PA = \frac{2 \times A \times E}{3 \times \left(\frac{Di}{T}\right)} \quad (03)$$

Onde:

- PA = Pressão Admissível;
- A= Fator Asme;
- E= Eficiência De Solda;
- Di= Diâmetro Interno;
- T= Espessura.

$$A = \frac{1,1}{\left(\frac{Di}{T}\right)^2} \quad (04)$$

Onde:

- A = Fator Asme;
- Di = Diâmetro Interno;
- T = Espessura.

$$PMTA = \frac{S \times E \times T}{R + 0,6T} \quad (05)$$

Onde:

- $PMTA$ = Pressão Máxima De Trabalho Admissível;
- E = Eficiência De Solda;
- R = Raio Interno;
- T = Espessura;
- S = Tensão Admissível Do Material.

A partir desses cálculos e definições, o próximo passo é a definição da taxa de evaporação e rendimento térmico, O primeiro representa a quantidade de vapor gerado. Representado na equação 06.

$$M_V = \frac{m_v}{M_{cb}} \quad (06)$$

Onde:

- M_V = taxa de evaporação;
- m_v = fluxo de vapor;
- M_{cb} = consumo de combustível.

O rendimento térmico representa a energia realmente aproveitada do total da energia disponibilizada no equipamento. Podendo ser referenciado ao poder calorífico inferior.

Conforme com a taxa de energia total disponível calculada na equação 06. O rendimento térmico pode ser obtido através das equações 07 ou 08.

$$\eta_C = 100 \times \left(\frac{q_u}{q_d} \right) \quad (07)$$

$$\eta_C = 100 \times \left(1 - \frac{q_p}{q_d} \right) \quad (08)$$

Onde:

- η_C = Rendimento Térmico Da Caldeira;
- q_p = É A Taxa De Energia Perdida No Equipamento;
- q_d = É A Taxa De Energia Disponível Na Fornalha;
- q_u = É A Taxa De Energia Absorvida Pelo Vapor.

Considerando o poder calorífico inferior como referência, o cálculo de rendimento pode ser obtido na equação 09.

$$\eta_C = 100 \times \frac{m_v \times (h_v - h_a)}{m_{cb} \times P_{ci}} \quad (09)$$

A partir desses dados obtidos, é necessário definir a potência do equipamento, pela equação 10.

$$Potência = m_v \times h_v - M_{\acute{a}gua} \times h_{\acute{a}gua} \quad (10)$$

Onde:

- m_v = Massa De Vapor Produzida;
- h_v = Entalpia Do Vapor;
- $M_{\acute{a}gua}$ = Massa De Água Consumida;
- $h_{\acute{a}gua}$ = Entalpia Da Água.

A partir desses dados definidos, é necessário verificar a segurança do equipamento, caldeiras são projetadas para suportar uma certa pressão. Se esta pressão for excedida, existe um risco real de explosão, a menos que esta pressão seja aliviada. Diante do enorme risco e consequências de uma explosão, toda caldeira deve estar equipada com uma válvula de segurança para manter a pressão dentro da faixa de projeto

A capacidade da(s) válvula(s) de segurança de cada caldeira deve ser tal que permita descarregar a vazão máxima de vapor que pode ser gerada pela caldeira sem permitir que a pressão atinja valor 6% acima da maior pressão de ajuste entre todas as válvulas e em nenhum caso 6% acima da pressão máxima de trabalho admissível da caldeira.

A partir disso deve-se calcular a capacidade de alívio requerida, pela equação 11.

$$\textit{capacidade de alívio requerida} = \frac{(C \times H \times \eta)}{1,6} \quad (11)$$

Onde:

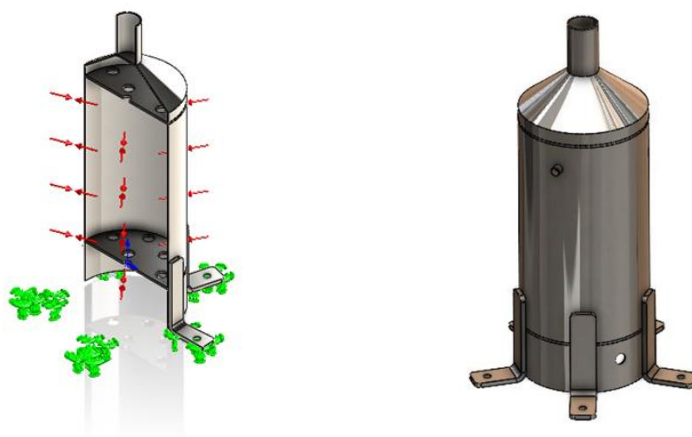
- C= Máxima Vazão Mássica De Combustível;
- H= Poder Calorífico Do Combustível;
- η = Rendimento Da Caldeira Para Condição De Máximo Aporte De Calor;
- 1,6 = Energia Necessária Para Gerar Vapor Saturado.

7. RESULTADOS

7.1. SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS – PRESSÃO

7.1.1 DADOS INICIAIS

Tabela 5 - Dados iniciais para simulação por elementos finitos



Nome do modelo: CFT-100-0000-A
Configuração atual: Valor predeterminado

Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
CFT-100-0005-A-1-solid1	Corpo sólido	Massa:0,947778 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000123088 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:9,28822 N	
CFT-100-0005-A-1-solid4	Corpo sólido	Massa:0,947778 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000123088 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:9,28822 N	
CFT-100-0002-A-2-solid1	Corpo sólido	Massa:1,69108 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000219621 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	

		Peso:16,5726 N	
CFT-100-0005-A-1-solid5	Corpo sólido	Massa:0,947778 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000123088 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:9,28822 N	
CFT-100-0002-A-1-solid1	Corpo sólido	Massa:1,69108 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000219621 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:16,5726 N	
CFT-100-0001-A-1-solid1	Corpo sólido	Massa:7,54754 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,0009802 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:73,9659 N	
CFT-100-0005-A-1-solid6	Corpo sólido	Massa:1,78371 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000231651 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:17,4804 N	
Peça7-1-solid1	Corpo sólido	Massa:0,413654 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:5,37212e-05 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:4,0538 N	
CFT-100-0005-A-1-solid2	Corpo sólido	Massa:0,947778 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000123088 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:9,28822 N	
CFT-100-0005-A-1-solid3	Corpo sólido	Massa:0,947778 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT
		Volume:0,000123088 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:9,28822 N	
CFT-100-0003-A-1-solid1	Corpo sólido	Massa:1,82816 kg	C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho\CFT-100-0000-A.SLDPRT

		Volume:0,000237424 m ³	01/06/2004 10:06
		Densidade:7.700 kg/m ³	
		Peso:17,916 N	

Fonte: Acervo Pessoal, 2022

7.1.2 PROPRIEDADES DO ESTUDO

Tabela 6 - Propriedades iniciais utilizados em software Solidworks 2021

Nome do estudo	Análise de pressão Interna
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do SOLIDWORKS Flow Simulation	Desativada
Tipo de Solver	Automático
Efeito no plano:	Desativada
Mola suave:	Desativada
Atenuação inercial:	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automático
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada
Pasta de resultados	Documento do SOLIDWORKS (C:\Users\Zaacc\OneDrive\Área de Trabalho)

Fonte: Acervo pessoal, 2022

7.1.3 UNIDADES

Tabela 7 - Unidades de medida utilizados

SISTEMA DE UNIDADES:	SI (MKS)
Comprimento/Deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão/Tensão	MPa

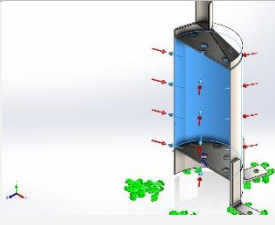
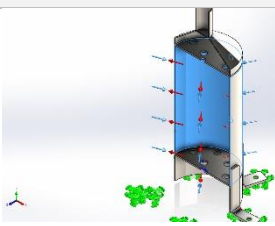
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

7.1.4 PROPRIEDADES DO MATERIAL

Tabela 8 - Propriedades do material utilizado na simulação

PROPRIEDADES		COMPONENTES
Nome:	Liga de aço	Corpo sólido 1(CFT-100-0005-A-1-solid1)(CFT-100-0000-A),
Tipo de modelo:	Isotrópico linear elástico	Corpo sólido 2(CFT-100-0005-A-1-solid4) (CFT-100-0000-A),
Critério de falha predeterminado:	Tensão de von Mises máxima	Corpo sólido 3(CFT-100-0002-A-2-solid1)(CFT-100-0000-A),
Limite de escoamento:	6,20422e+08 N/m ²	Corpo sólido 4(CFT-100-0005-A-1-solid5)(CFT-100-0000-A),
Resistência à tração:	7,23826e+08 N/m ²	Corpo sólido 5(CFT-100-0002-A-1-solid1)(CFT-100-0000-A),
Módulo elástico:	2,1e+11 N/m ²	Corpo sólido 6(CFT-100-0001-A-1-solid1)(CFT-100-0000-A),
Coeficiente de Poisson:	0,28	Corpo sólido 7(CFT-100-0005-A-1-solid6)(CFT-100-0000-A),
Massa específica:	7.700 kg/m ³	Corpo sólido 8(Peça7-1-solid1)(CFT-100-0000-A),
Módulo de cisalhamento:	7,9e+10 N/m ²	Corpo sólido 9(CFT-100-0005-A-1-solid2)(CFT-100-0000-A),
Coeficiente de expansão térmica:	1,3e-05 /Kelvin	Corpo sólido 10(CFT-100-0005-A-1-solid3)(CFT-100-0000-A),
		Corpo sólido 11(CFT-100-0003-A-1-solid1)(CFT-100-0000-A)

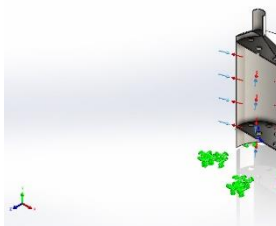
Tabela 9 - Condições de contorno realizado para a simulação

Nome da carga	Referência	Detalhes de carga
Pressão-1		Entidades: 1 face(s) Tipo: Normal à face selecionada Valor: 0,4 Unidades: N/mm ² (MPa) Ângulo de fase: 0 Unidades: deg
Pressão-2		Entidades: 1 face(s) Tipo: Normal à face selecionada Valor: 0,105 Unidades: N/mm ² (MPa) Ângulo de fase: 0 Unidades: deg

Fonte: SolidWorks Simulation, 2021

7.1.5 INFORMAÇÕES DE CONTATO

Tabela 10 - Interações de contato do modelo

Contato	Imagem do contato	Propriedades de contato
Interação global		Tipo: Unido Componentes: 1 componente Opções: Malha independente

Fonte: SolidWorks Simulation, 2021

7.1.6 INFORMAÇÕES DE MALHA

Tabela 11 - Condições da malha gerada no modelo

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos para malha de alta qualidade	16 Pontos

Tamanho do elemento	15,511 mm
Tolerância	0,77555 mm
Qualidade da malha	Alta

Fonte: SolidWorks Simulation, 2022

7.1.7 INFORMAÇÕES DE MALHA – DETALHES

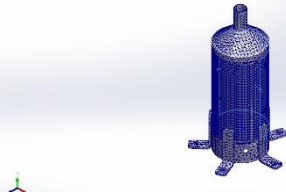
Tabela 12 - Qualidade dos nós e da malha gerada

Total de nós	67711
Total de elementos	31768
Proporção máxima	77,291
% de elementos com Proporção < 3	23,5
Porcentagem de elementos com Proporção > 10	0,573
Porcentagem de elementos distorcidos	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:14
Nome do computador:	

Fonte: SolidWorks, 2021

7.1.8 CONTROLE DE MALHA

Tabela 13 - Controle de malha aplicado ao modelo 3D em um de seus componentes

controle de malha	Imagem do controle de malha	Detalhes do controle de malha
Controle		Entidades: 1 face(s) Unidades: mm Tamanho: 7,17018 Relação: 7,17018

Fonte: SolidWorks Simulation, 2021

7.1.9 FORÇAS RESULTANTES

Tabela 14 - Forças de reações encontradas no resultado de FEA

Forças de reação						
Conjunto de seleção		Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro		N	0,312952	1,36728	24,1539	24,1945
Momentos de reação						
Conjunto de seleção		Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro		N.m	0	0	0	0
Forças de corpo livre						
Conjunto de seleção		Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro		N	9,46092	-10,9926	-0,175941	14,5044
Momentos de corpo livre						
Conjunto de seleção		Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro		N.m	0	0	0	1e-33

Fonte: Acervo Pessoal, 2022

7.1.10 RESULTADO DO ESTUDO

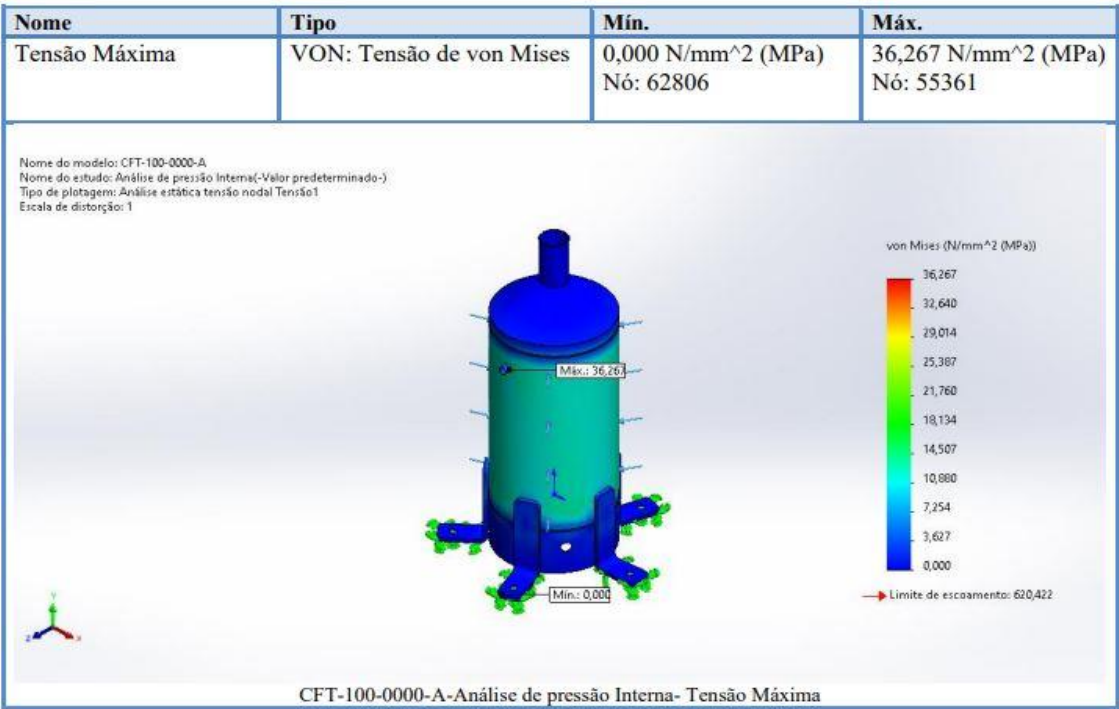


Figura 17 - Máxima tensão encontrada
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

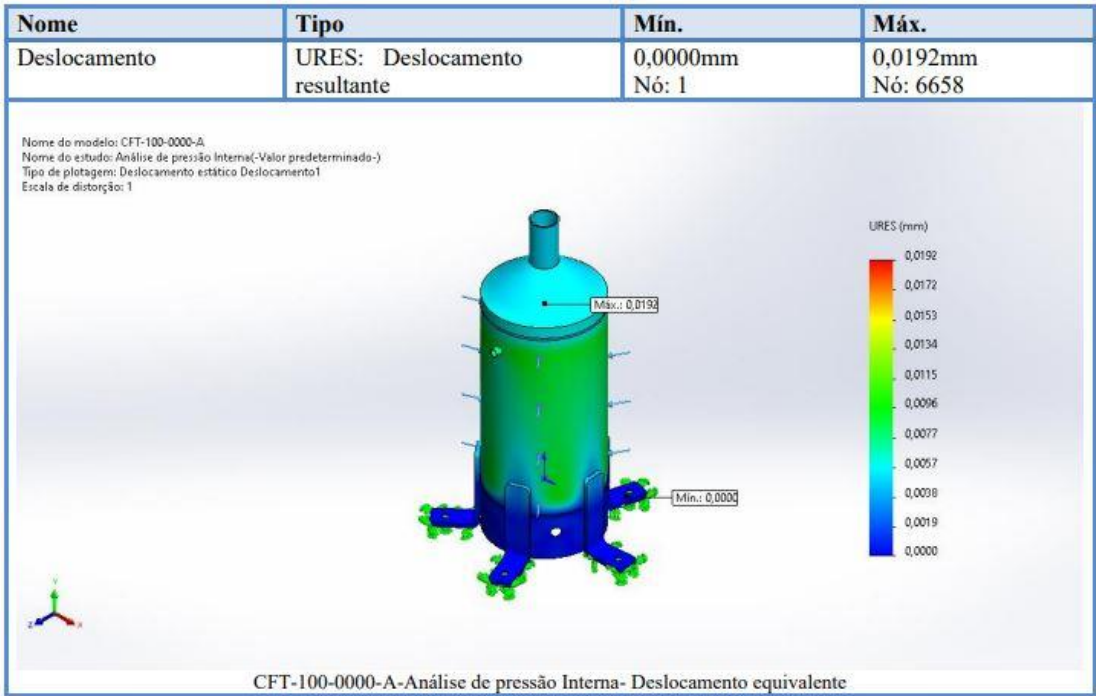


Figura 18 - Deslocamento máximo encontrado
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

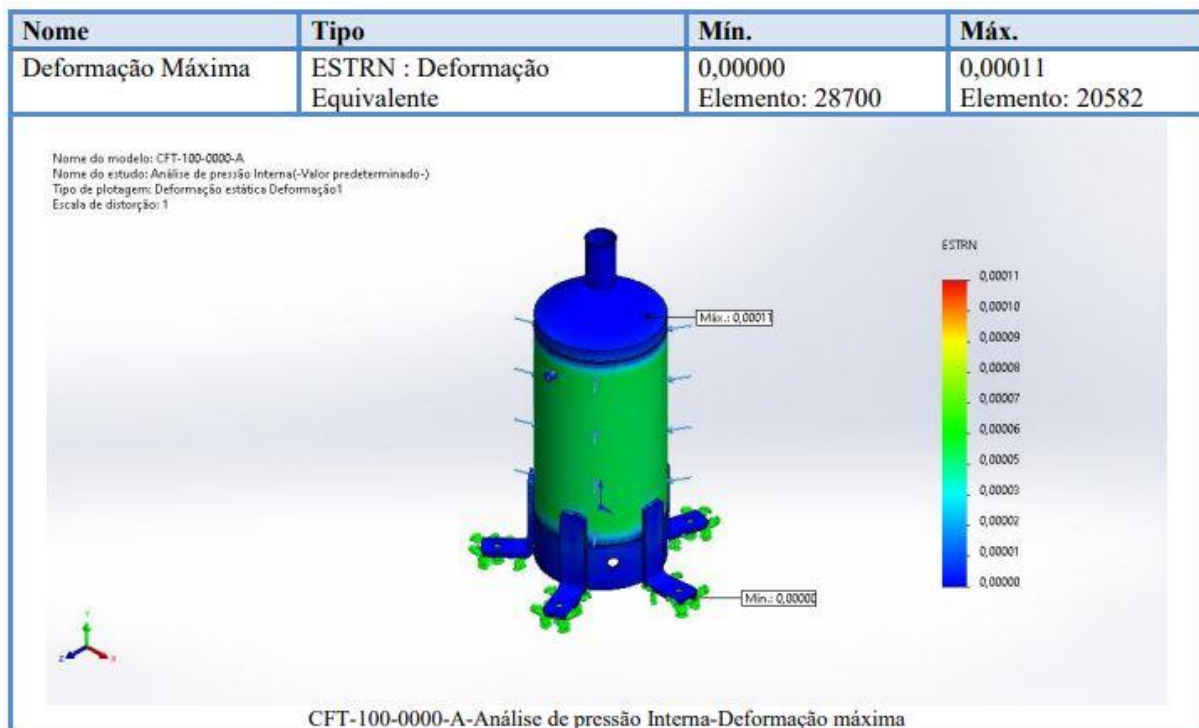


Figura 19 - Deformação Máxima encontrada
 Fonte: Acervo Pessoal, 2022

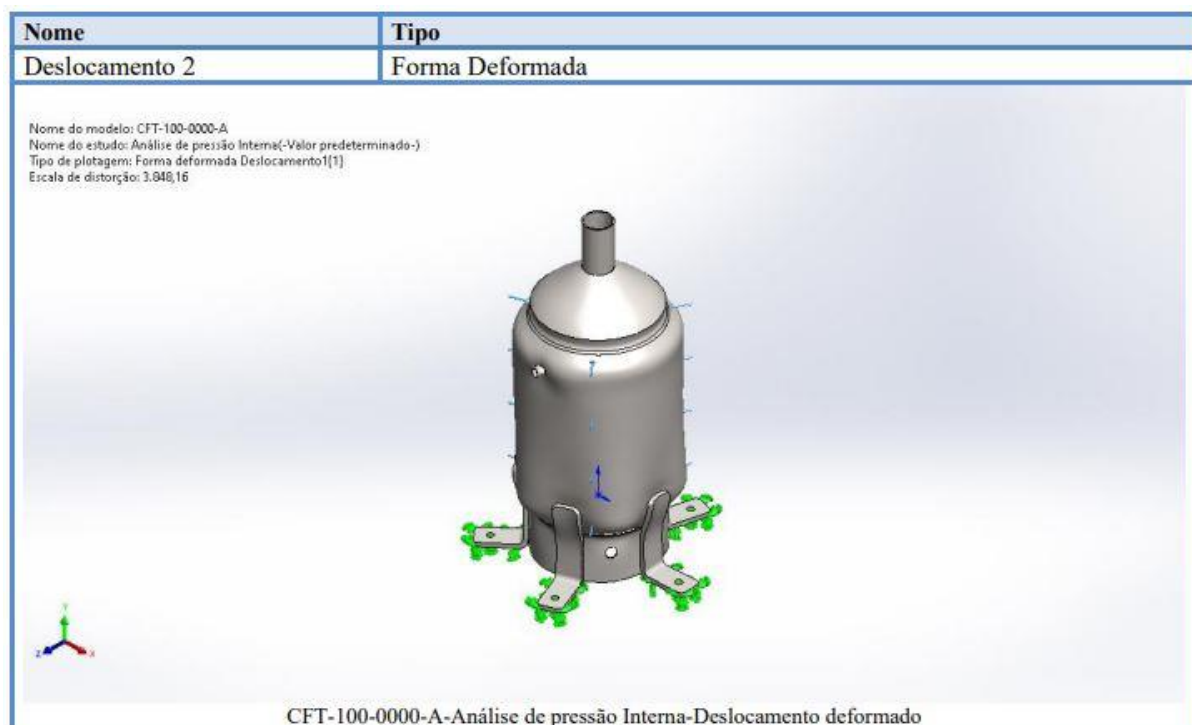
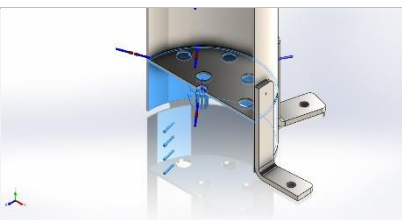
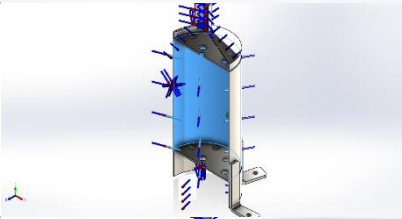
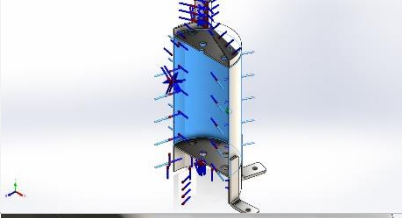
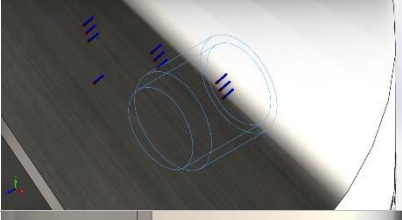
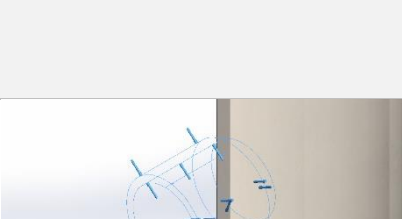
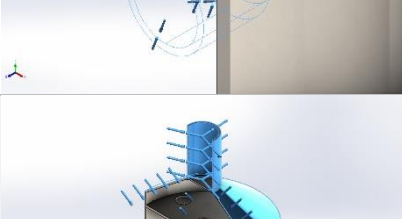


Figura 20 - Deslocamento com deformação
 Fonte: Acervo Pessoal, 2022

7.2 CARGAS TÉRMICAS

Tabela 15 - Condições de contorno para análise térmica do modelo

Nome da carga		Detalhes de carga
Temperatura-1		Entidades: 2 face(s) Temperatura: 200 Celsius
Temperatura-2		Entidades: 1 face(s) Temperatura: 150 Celsius
Temperatura-3		Entidades: 1 face(s) Temperatura: 100 Celsius
Fluxo térmico-1		Entidades: 2 face(s) Fluxo térmico Valor: 10 W/m ²
Convecção-1		Entidades: 1 face(s) Coeficiente de convecção: 20 W/(m ² .K) Variação de tempo: Desativada Variação de temperatura: Desativada Temperatura ambiente de mistura: 371 Kelvin Variação de tempo: Desativada
Temperatura-4		Entidades: 2 face(s) Temperatura: 50 Celsius
Temperatura-5		Entidades: 3 face(s) Temperatura: 80 Celsius

Fonte: SolidWorks Simulation, 2021

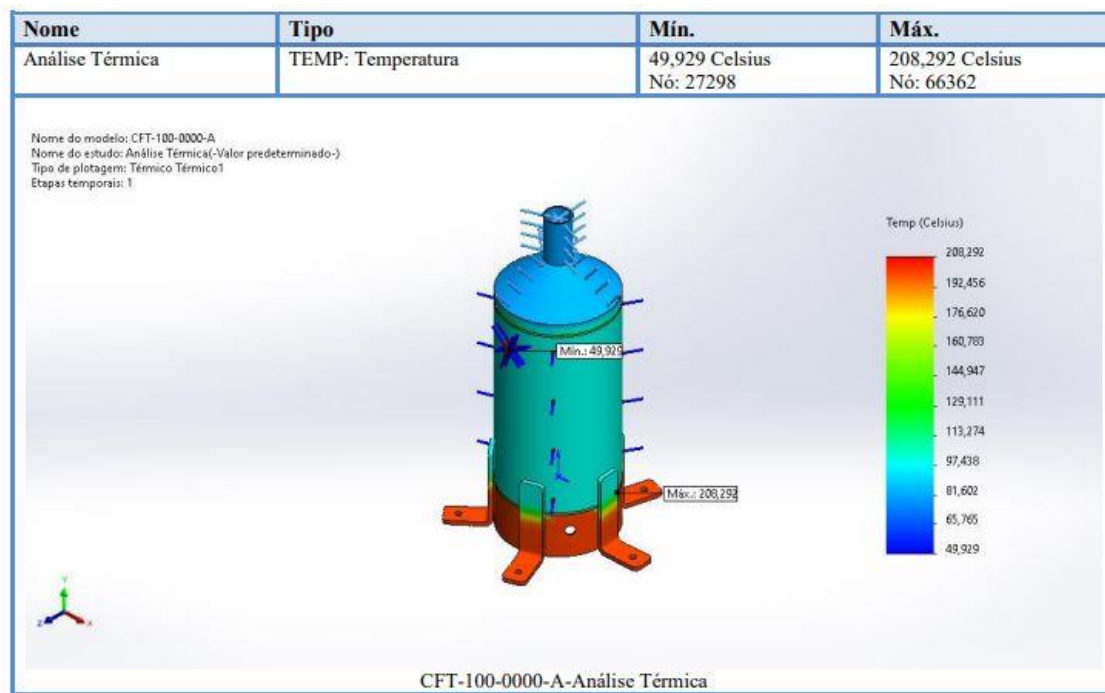


Figura 21 - Simulação térmica realizada no modelo
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

7.3 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO

Por se tratar de um protótipo funcional, alguns valores já foram pré definidos para a execução do mesmo, como um diâmetro interno de 240mm e aço SAE 1020 para confecção estrutural.

A partir desses dados pré definidos as equações 01 e 02 são utilizadas para definição de espessura e tensão admissível do material respectivamente.

$$t \approx \frac{P \times R}{s}$$

$$t \approx \frac{0,4 \times 120}{1568}$$

$$t \approx 0,0306 \text{ mm}$$

(01)

Onde:

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	0,0612	mm
Pressão	P	0,4	Bar
Raio interno	R	120	mm
Tensão admissível do material	S	1568	MPa

$$S = K \times \sigma$$

$$S = 4 \times 392$$

$$S = 1568 \text{ Mpa}$$

Onde:

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão admissível do material	S	1568	MPa
Coeficiente de segurança	K	4	-
Coeficiente de ruptura do material	σ	392	MPa

A partir desses dados as pressões podem ser definidas usando o código ASME para definição pelas equações 03 e 05.

$$PA = \frac{2 \times A \times E}{3 \times \left(\frac{Di}{T}\right)}$$

$$PA = \frac{2 \times 7,335 \times 10^{-8} \times 0,7}{3 \times \left(\frac{23,7}{0,0612}\right)}$$

$$PA = 8,779 \times 10^{-11} \quad (03)$$

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	0,0612	mm
Pressão admissível	P	$8,779 \times 10^{-11}$	MPa
Diâmetro interno	D	240	mm
Fator ASME	A	$7,335 \times 10^{-11}$	-
Eficiência de solda (sem radiografia)	E	0,7	-

$$A = \frac{1,1}{\left(\frac{Di}{T}\right)^2}$$

$$A = \frac{1,1}{\left(\frac{237}{0,0612}\right)^2} \quad A = 7,335 \times 10^{-11} \quad (04)$$

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	0,0612	mm
Diâmetro interno	D	240	mm
Fator ASME	A	$7,335 \times 10^{-11}$	-

$$PMTA = \frac{S \times E \times T}{R + 0,6T}$$

$$PMTA = \frac{1568 \times 0,7 \times 0,0612}{120 + 0,6 \times 0,0612}$$

$$PMTA = 0,558 \text{ Mpa} \quad (05)$$

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	0,0612	mm
Pressão máxima de trabalho admissível	Pmta	0,558	MPa
Raio interno	R	120	mm
Tensão admissível do material	S	1568	MPa
Eficiência de solda (sem radiografia)	E	0,7	-

- ESPESSURA DO COSTADO**

Definição da espessura mínima do costado segundo o código ASME– Section 1 -ed. 2007- pg 27.2.2

$$T = \left[\frac{P \times R}{S \times E - (1 - Y) \times P} \right] + C$$

$$T = \left[\frac{4 \times 120}{3997,29 \times 0,7 - (1 - 0,4) \times 4} \right] + 0$$

$$T = 0,1717 \text{ MM}$$

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	0,1717	mm
Pressão admissível	P	4	Bar
Raio interno	R	120	mm
Tensão admissível do material	S	1568	MPa
Eficiência de solda (sem radiografia)	E	0,7	-
Coefficiente de temperatura	Y	0,4	--
Sobreespesura de corrosão	C	0	mm

- TUBOS FORNALHA**

Definição da espessura mínima dos tubos da fornalha segundo o código ASME – section 1 -ed. 2007- Pg 27.2.1

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura	T	2,58	Mm
Pressão admissível	P	4	Bar
Diâmetro interno	D	240	Mm
Tensão admissível do material	S	15989,15	KGF/CM^2

$$T = \frac{P \times D}{2 \times S + P} + 0,005 \times D + e$$

$$T = \frac{4 \times 32}{2 \times 3997,29 + 4} + 0,005 \times 32 + 1$$

$$T = 1,176 \text{ MM}$$

Grandeza	Símbolo	Valor	Unidade
Espessura mínima requerida	T	1,176	mm
Pressão de projeto	P	4	Bar
Diâmetro externo do tubo	D	32	mm
Tensão admissível do material	S	1568	MPa
Eficiência de solda (sem radiografia)	E	0,7	-
Fator para tubos soldados	E	1	--
Sobreespessura de corrosão	C	0	mm

Espessura mínima dos espelhos para uma pmta de 4 bar= $4,078 \text{ } KGF/CM^2$

$$T = \sqrt{\frac{P}{2,2 \times S}} \times D$$

$$T = \sqrt{\frac{4,078}{2,2 \times 15989,15}} \times 240$$

$$\mathbf{T = 2,58\ MM}$$

- **ÁREAS E VOLUMES**

- ÁREA DO CILINDRO= ÁREA LATERAL + 2 * ÁREA DA BASE

$$\mathit{ÁREA\ LATERAL} = 2\pi RH = 2\pi \times 0,24 \times 0,4 = \mathbf{0,603M^2}$$

$$\mathit{ÁREA\ DA\ BASE} = \pi R^2 = \pi \times 0,12^2 = \mathbf{0,045M^2}$$

$$\mathit{ÁREA\ DO\ CILINDRO} = \mathit{ÁREA\ LATERAL} + 2 * \mathit{ÁREA\ DA\ BASE} = 0,693M^2$$

$$\mathit{VOLUME\ DO\ CILINDRO} = \mathit{ÁREA\ DA\ BASE} \times \mathit{ALTURA} = AB \times H = 0,045 \times 0,4 = \mathbf{0,018M^3}$$

- **TUBOS**

$$\mathit{ÁREA\ TOTAL} = 2\pi RH + 2\pi R^2 = 2 \times \pi \times 0,016 \times 0,4 + 2 \times \pi \times 0,016^2 = 0,0416M^2$$

$$\mathit{VOLUME} = \pi R^2 \times H = \pi \times 0,016^2 \times 0,4 = 3,217 \times 10^{-4} M^3$$

$$\mathit{ÁREA\ TOTAL\ DOS\ 12\ TUBOS} = 12 \times \mathit{ÁREA\ TOTAL} = \mathbf{0,499M^2}$$

$$\mathit{VOLUME\ TOTAL\ DOS\ 12\ TUBOS} = \mathit{VOLUME\ TOTAL} \times 12 = \mathbf{0,0386M^3}$$

- **ÁREA E VOLUME DE ÁGUA DENTRO DO EQUIPAMENTO**

$$\mathit{ÁREA\ ÚTIL} = \mathit{ÁREA\ TOTAL\ CORPO} - \mathit{ÁREA\ TOTAL\ TUBOS} = \mathbf{0,192\ M^2}$$

$$\mathit{VOLUME\ ÚTIL} = \mathit{VOLUME\ DO\ CORPO} - \mathit{VOLUME\ TOTAL\ DOS\ TUBOS} = 0,01414M^3 = \mathbf{14,14\ LITROS.}$$

8. RESULTADO ESPERADO



Figura 22- Renderização final do resultado final do modelo, realizado em KeyShot Pro 10
Fonte: Acervo pessoal, 2022



Figura 23 - Detalhe interno da saída da tubulação da caldeira
Fonte: Acervo pessoal, 2022



Figura 24 - Detalhe no manômetro utilizado no projeto.
Fonte: Acervo pessoal, 2022

9. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos durante o presente estudo, podemos concluir que perante aos diversos tipos de caldeiras, a que se destaca por seu custo benefício, é a caldeira a gás. Sendo a mesma utilizada durante o desenvolvimento do protótipo mencionado no trabalho. Com isso, podemos afirmar que o projeto foi extremamente benéfico, logo pode-se observar que durante seu funcionamento para atingir sua pressão máxima de 4 Bar recomendada, foram necessários 20 minutos, e quando se comparado ao modelo de caldeira que se utiliza lenha como combustível, obtivemos resultados satisfatórios em relação ao fornecimento e consumo energético.



Figura 25 - Protótipo real desenvolvido durante o presente trabalho
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS, Biotec - **Soluções em Tratamento de Sistema de Filtração**. 2021. Disponível em: <http://biotecsantec.com.br/sistema-de-filtracao.php>. Acesso em: 26 abr. 2022.

ALTAFINI, Carlos R. **Curso de engenharia mecânica – disciplina de máquinas**.

AMBIENTALI, Torino Soluzioni. **Incrustação: o que é e como eliminá-la das tubulações?** 2019. Disponível em: <http://www.tsambientali.com.br/incrustacao-o-que-e-e-como-elimina-la-das-tubulacoes/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

BAGGIO, Rodrigo Willian de Oliveira. **MODELAGEM DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR COM FORNALHA AQUATUBULAR**. 2018. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2018.

BAZZO, E. Geração de Vapor. Florianópolis, Brasil: UFSC, 1995.

BIZZO, W. A. Geração, Distribuição e Utilização do Vapor. UNICAMP, 2003.

BRASIL - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Secretaria de Segurança e Medicina do Trabalho**. Portaria n. 3214, de 08 de junho de 1978. Norma Regulamentadora NR-13: **Caldeiras e Vasos de Pressão**.

BRUMAZZI SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Caldeira Aquatubular**. 1 Figura (Figura 9). Disponível em . Acesso em 25 de Março de 2022.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; ROQUE, K. A. **Termodinâmica**. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil, 2007.

CHD, Válvulas. **Caldeiras Flamotubulares** – Artigos técnicos. Disponível em < http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/caldeiras/flamotubulares.html > Acesso em: 25 de Março de 2022.

CORPORATION, 2002-2022 Dassault Systèmes Solidworks. **SolidWorks 2021- 2022**. São Paulo: Ss, 2022. Disponível em: <https://www.solidworks.com/pt-br>. Acesso em: 05 jun. 2022.

DISPARCO. Tipos de Vapor. Disponível em: <https://disparco.com.br/index.php/cursos/tipos-de-vapor-2?curso=teoria-do-vapor#:~:text=Se%20água%20for%20aquecida%20além,na%20qual%20ele%20está%20sujeito..> Acesso em: 02 maio 2022.

ELETROBRÁS/PROCE EDUCAÇÃO. Eficiência Energética no Uso de Vapor. Itajuba: FUPAI, 2007.

FERRAZ, Abc. **CORROSÃO EM CALDEIRAS: QUAIS SÃO AS MAIS COMUNS E COMO PREVENIR.** 2020. Disponível em: <https://abcferraz.com.br/corrosao-em-caldeiras/>. Acesso em: 26 abr. 2022.

FOLETTTO, E. L. **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz.** Química Nova.

GANAPATY V., 1987, “Steam Plant Calculations Manual”, 2nd edition, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc.

LAVAL, Alfa. **Poder calorífico Inferior.** 2022. Disponível em: <https://www.alfalaval.com.br>. Acesso em: 25 maio 2022.

LEITE, N.R. e MILITÃO, R.A. **Tipos e aplicações de caldeiras - Apostila Petrobrás** 2008

MACINTYRE, A.J. **Equipamentos industriais e de processo** – [Reimpr.].- Rio de Janeiro: LTC, 2014.

NORMA REGULAMENTADORA NR-13: **Caldeiras e Vasos de Pressão.** Disponível em: Norma Regulamentadora No. 13 (NR-13) — Português (Brasil) (www.gov.br). Acesso em 26/04/2022.

PADILHA, C.L., ARAÚJO, P.B. e SOUZA, R.B. Noções de vasos, fornos e caldeiras

PARIKKA, M. **Global biomass fuel resources.** *Biomass and Bioenergy*, v.27, n.6, p.613-620, 2004.

PERA, H. **Geradores de Vapor.** São Paulo, Brasil: Fama, 1990.

SANTA MARIA – RS. p. 1055-1060, 2005.Vk.

SANTOS, Enock Jabes do Nascimento; FRAGA, Francisco Edson. **A IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO E CUIDADOS COM A ÁGUA DE CALDEIRA.** 2017. 10 f. TCC

(Doutorado) - Curso de E Ciência e Tecnologia, Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2017.

SEGUNDO, Valdir Bernardino da Silva. **PRINCÍPIO DE BALANÇOS TERMOENERGÉTICOS EM CALDEIRAS GERADORAS DE VAPOR NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS**. 2014. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia Sucroalcooleira., Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional –Ctdr Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira - Dts, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2014.

SGSGROUP (São Paulo). **OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTO**. 2022. Disponível em: <https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/construction/services-related-to-machinery-and-equipment/equipment-optimization>. Acesso em: 01 mar. 2022.

TLV. Teoria do vapor. Disponível em: <https://www.tlv.com/global/BR/steam-theory/what-is-steam.html#:~:text=Vapor%20seco%20aplica-se%20ao,formar%20pequenas%20gotículas%20de%20água..> Acesso em: 01 maio 2022.

11. APÊNDICE 1

RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

Figura 1 - Reservatório para confecção do corpo.	72
Figura 2 - Materiais para confecção do corpo e tampos.	72
Figura 3 - Fogareiro Caullins 8 bocas.....	73
Figura 4 - Materiais para confecção estrutural.	73
Figura 5 - Dimensionamento dos tubos nos tampos.	74
Figura 6 - Ajuste da altura dos tubos nos tampos.	74
Figura 7 - Posicionamento dos tubos nos tampos.....	75
Figura 8 - Parâmetros de soldagem utilizados.	75
Figura 9 - Tampo inferior após soldagem.....	76
Figura 10 - Tampo superior após soldagem.....	76
Figura 11 - Parte estrutural do equipamento.....	77
Figura 12 - Limpeza da parte estrutural do equipamento.	78
Figura 13 - Produtos para o ensaio de Líquido Penetrante	78
Figura 14 - Aplicação do Líquido Penetrante na parte superior	79
Figura 15 - Tampo superior após a aplicação do revelador.	80
Figura 16 - Imperfeição no contorno da solda no tampo superior.....	80
Figura 17: Imperfeição no contorno da solda do tubo 05 no tampo superior.	81
Figura 18 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 07 no tampo superior.....	81
Figura 19 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 09 no tampo superior.....	82
Figura 20 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 12 no tampo superior.....	82
Figura 21 - Aplicação do Líquido Penetrante na parte inferior.	83
Figura 22 - Tampo inferior após a aplicação do revelador.	83
Figura 23 - Imperfeição no contorno da solda no tampo inferior.	84
Figura 24 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 08 no tampo inferior.....	84
Figura 25 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 09 no tampo inferior.....	85
Figura 26 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 10 no tampo inferior.....	85
Figura 27 - Manômetro Luferco.	86

Figura 28 - Válvula de segurança 01.	86
Figura 29 - Válvula de segurança 02.	87
Figura 30 - Dispositivo para calibração.	88
Figura 31 - Calibração do manômetro.	89
Figura 32 - Calibração da válvula de segurança 01.	89
Figura 33 - Calibração da válvula de segurança 02.	90
Figura 34 - Aplicação do fundo protetor.....	90
Figura 35 - Aplicação da camada de proteção no tampo superior	91
Figura 36 - Aplicação da camada de proteção no tampo inferior	91
Figura 37 - Confeção da proteção para o fogareiro.....	92
Figura 38 - Proteção para o fogareiro	92
Figura 39 - Equipamento montado	93

1. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a escolha dos materiais para confecção do equipamento, foram escolhidos de acordo com as propriedades mecânicas a serem atendidas e a disponibilidade dos materiais na região.

Para a confecção do corpo do equipamento foi utilizado um reservatório de ar comprimido fabricado em aço A36, com espessura de 3 milímetros e com volume de 24 litros, como mostra a figura 01:



Figura 26 - Reservatório para confecção do corpo.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

A figura 02 mostra o corte do reservatório para a utilização na confecção do protótipo, e as chapas para utilização no tampo superior e inferior.



Figura 27 - Materiais para confecção do corpo e tampos.

Fonte: Acervo Pessoal, 2022

O fogareiro escolhido foi o da marca Caullins, com 8 bocas com diâmetro de 15 centímetros, cobrindo 60% da área do tampo inferior, a figura abaixo mostra o fogareiro.



Figura 28 - Fogareiro Caullins 8 bocas.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

A figura abaixo mostra os materiais escolhidos para a confecção estrutural do equipamento, chapas, tubos e corpos em aço A36 com espessura de 3 milímetros.



Figura 29 - Materiais para confecção estrutural.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

2. CONFECÇÃO ESTRUTURAL

Após a escolha dos materiais, a próxima parte foi o dimensionamento dos tubos nos tampos e posições de acordo com o projeto, as figuras 05, 06 e 07 mostram o dimensionamento igualitários dos tubos para uma melhor troca térmica.

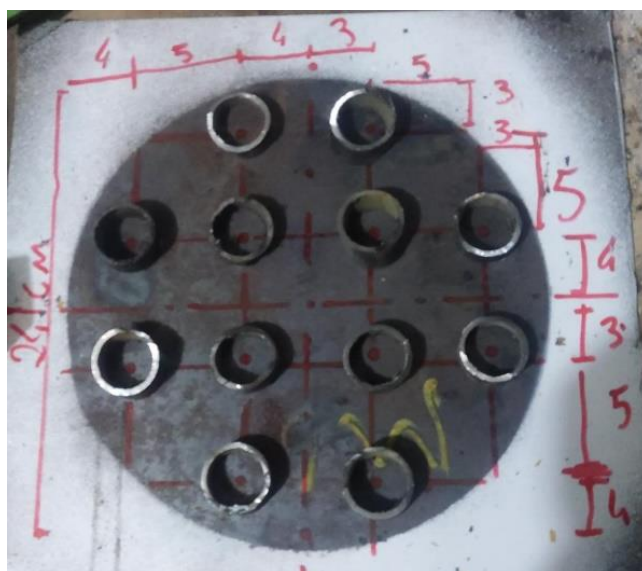


Figura 30 - Dimensionamento dos tubos nos tampos.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 31 - Ajuste da altura dos tubos nos tampos.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 32 - Posicionamento dos tubos nos tampos.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

O processo de soldagem escolhido foi o TIG, devido a alta qualidade dos cordões de solda, sem escória e sem respingos a figura abaixo mostra a amperagem e as correntes selecionadas.



Figura 33 - Parâmetros de soldagem utilizados.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Após o processo de soldagem foi realizado um teste de estanqueidade, afim de validar a integridade das soldas, as figuras 09 e 10, mostram, respectivamente os tampos inferior e superior.



Figura 34 - Tampo inferior após soldagem.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 35 - Tampo superior após soldagem.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Após esse processo ser realizado, foram soldados os pés, 3 (três) pés em uma angulação de 120 graus, concluindo a parte estrutural do equipamento, como mostrado na figura 11.



Figura 36 - Parte estrutural do equipamento.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

3. ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

Após a soldagem da estrutura foi realizado uma limpeza da estrutura, retirando toda a tinta e impurezas, afim de uma realização exata de um ensaio de líquido penetrante, a figura abaixo mostra o primeiro passo do ensaio.



Figura 37 - Limpeza da parte estrutural do equipamento.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Para a realização do ensaio de líquido penetrante, foi utilizado o Líquido penetrante visível VP30 da Metal-check e o revelador D70 do mesmo fabricante, a figura 13 mostra os produtos.



Figura 38 - Produtos para o ensaio de Líquido Penetrante
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

3.1. TAMPO SUPERIOR

Após a limpeza da estrutura, foi realizado a aplicação do penetrante visível na parte superior.



Figura 39 - Aplicação do Líquido Penetrante na parte superior
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Após a espera de 30 (trinta) minutos para a penetração do líquido, foi realizada a limpeza com água corrente, e após a secagem, foi aplicado o revelador em toda a superfície, a figura 15 mostra o revelador após 10 (dez) minutos da aplicação



Figura 40 - Tampo superior após a aplicação do revelador.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Após 30 (trinta) minutos da aplicação do revelador, foi constatado alguns poros nas soldas do tampo superior, as figuras 16, 17, 18, 19 e 20 mostram as imperfeições e o local que ocorreu.



Figura 41 - Imperfeição no contorno da solda no tampo superior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

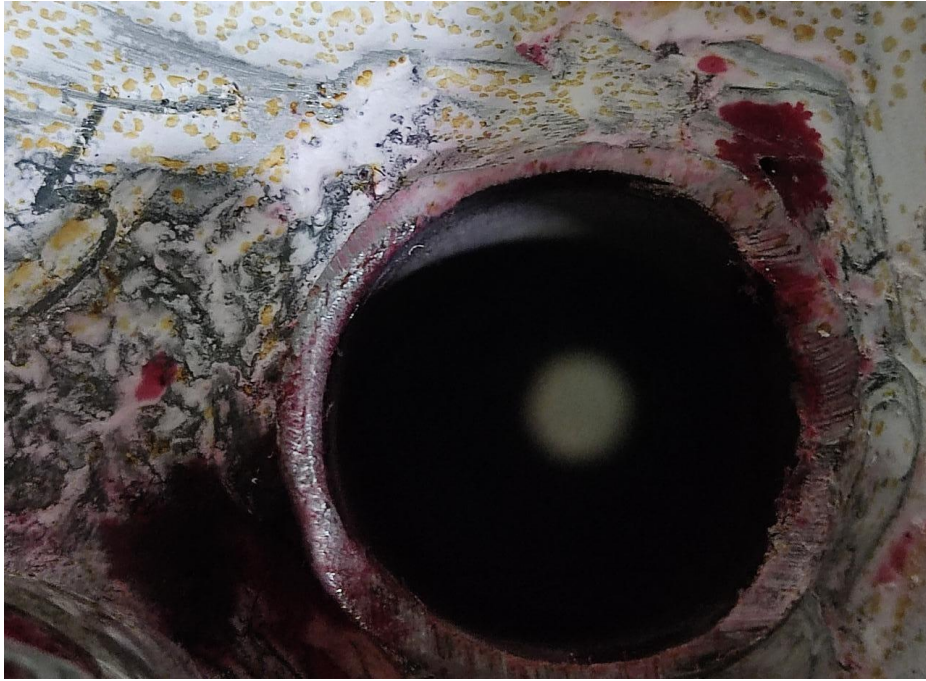


Figura 42: Imperfeição no contorno da solda do tubo 05 no tampo superior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 43 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 07 no tampo superior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

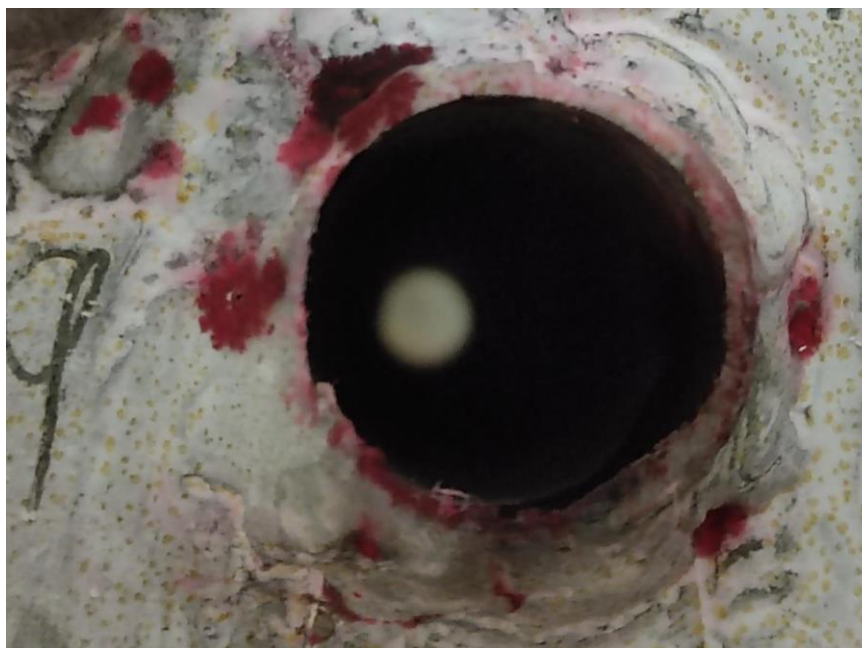


Figura 44 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 09 no tampo superior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 45 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 12 no tampo superior
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

3.2. TAMPO INFERIOR

Após a limpeza da estrutura, foi realizado a aplicação do penetrante visível na parte inferior.



Figura 46 - Aplicação do Líquido Penetrante na parte inferior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Após a espera de 30 (trinta) minutos para a penetração do líquido, foi realizada a limpeza com água corrente, e após a secagem, foi aplicado o revelador em toda a superfície, a figura 22 mostra o revelador após 10 (dez) minutos da aplicação.



Figura 47 - Tampo inferior após a aplicação do revelador.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

30 (trinta) minutos da aplicação do revelador, foi constatado alguns poros nas soldas do tampo inferior, as figuras 23,24,25 e 26 mostram as imperfeições e o local que ocorreu.



Figura 48 - Imperfeição no contorno da solda no tampo inferior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 49 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 08 no tampo inferior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

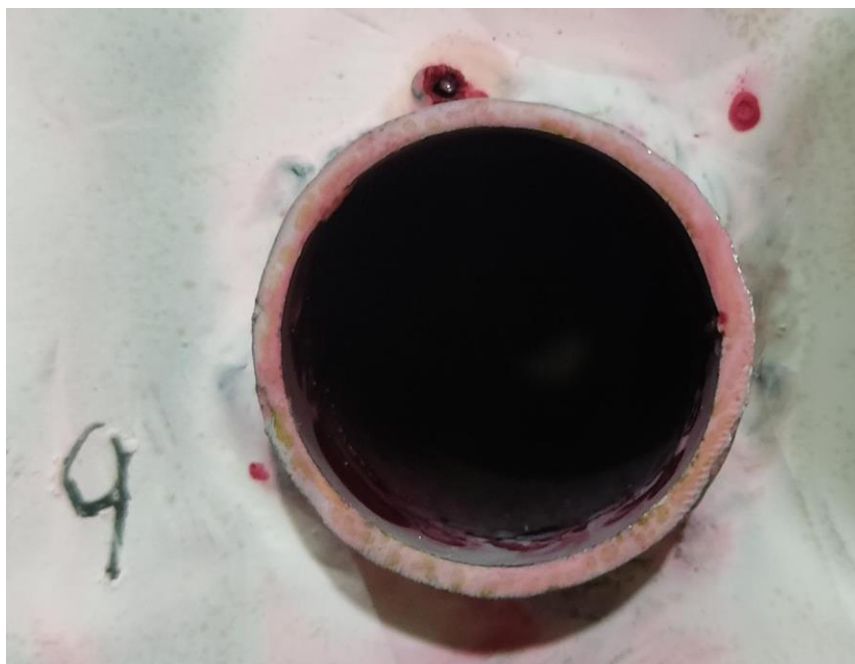


Figura 50 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 09 no tampo inferior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 51 - Imperfeição no contorno da solda do tubo 10 no tampo inferior.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

4. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E SEGURANÇA

Para a medição da pressão do equipamento, foi escolhido um manômetro de medição Luferco, com 6 (seis) centímetros de diâmetro, com medição de até 5 (cinco) kgf/cm^2 , com engate do tipo rosca de $\frac{1}{4}$ ".



Figura 52 - Manômetro Luferco.

Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Para os dispositivos de segurança, foi escolhido duas válvulas de segurança, modelo RVS52 da marca Apollo Valves, pelo fato de, as mesmas atenderem as especificações de projeto, as figuras 28 e 29, mostram, respectivamente as válvulas de segurança 01 e 02.



Figura 53 - Válvula de segurança 01.

Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 54 - Válvula de segurança 02.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

5. CALIBRAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E SEGURANÇA

Para a validação dos dispositivos de segurança, os mesmos passaram por uma calibração com um outro manômetro graduado e devidamente calibrado de acordo com a NR 13, para a calibração dos dispositivos, foi utilizado um filtro regulador graduado, como mostra a figura 30, as figuras 31,32 e 33 relatam a calibração dos mesmos.



Figura 55 - Dispositivo para calibração.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 56 - Calibração do manômetro.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 57 - Calibração da válvula de segurança 01.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 58 - Calibração da válvula de segurança 02.
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

6. ACABAMENTO E PINTURA

Para realizar o acabamento no equipamento, o mesmo foi revestido com uma camada de fundo protetor, para a proteção contra a corrosão do mesmo, a figura abaixo mostra o processo.



Figura 59 - Aplicação do fundo protetor
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

Nos tampos inferior e superior, foram revestidos com uma outra camada de proteção com tinta preta, resistente a altas temperaturas, como mostram as figuras 35 e 36.



Figura 60 - Aplicação da camada de proteção no tampo superior
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 61 - Aplicação da camada de proteção no tampo inferior
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

A cor escolhida para o corpo foi o azul zafiro mostrada na figura 36 a mesma figura mostra a confecção da proteção em chapas de alumínio para o fogareiro, a figura 37 mostra a proteção do fogareiro.



Figura 62 - Confecção da proteção para o fogareiro
Fonte: Acervo Pessoal, 2022



Figura 63 - Proteção para o fogareiro
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

A figura abaixo mostra o equipamento finalizado, com todos os itens devidamente instalados e o equipamento pronto para uso.



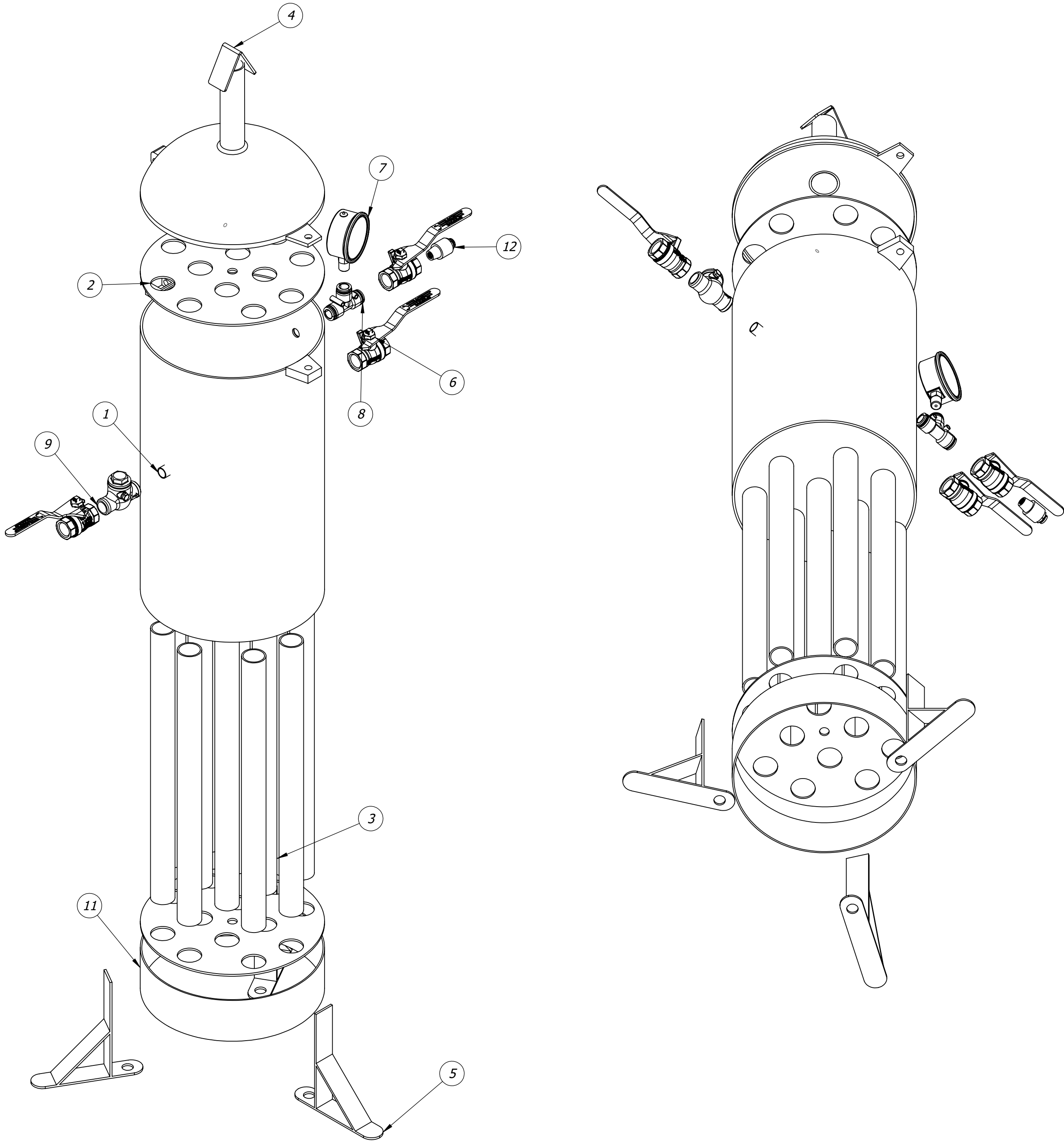
Figura 64 - Equipamento montado
Fonte: Acervo Pessoal, 2022

12. APÊNDICE 2



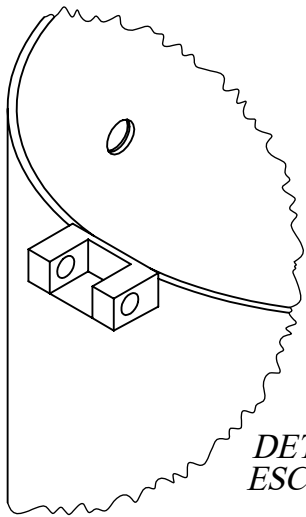
* Todas as especificações de solda, Conforme SAG Ø1.2

REV	DESCRIÇÃO	DESENHISTA	DATA	APROVADO
-----	-----------	------------	------	----------

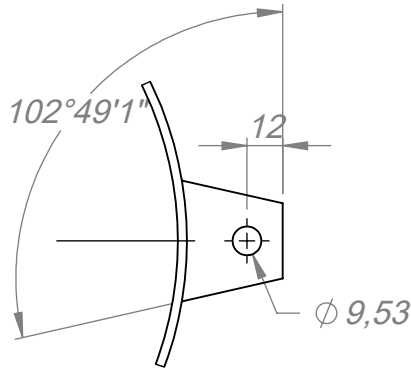
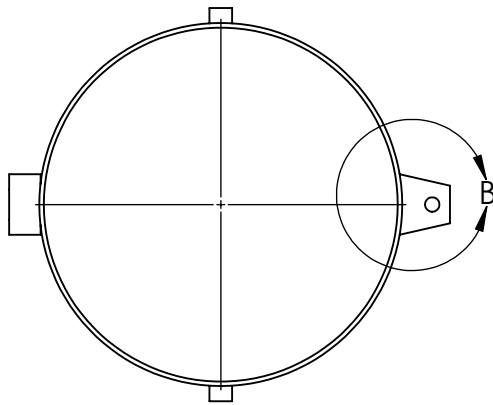


Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	CFT-100-0001-A	TUBO PRINCIPAL	1
2	CFT-100-0002-A	TAMPO SUPERIOR	2
3	CFT-100-0003-A	TUBO 32mm x 430mm	12
4	CFT-100-0004-A	TAMPO DE FECHAMENTO	1
5	CFT-100-0005-A	SISTEMA DE FIXAÇÃO	3
6	VALV. ESF. MONO 1_2" BSP INOX 304.stp	COMERCIAL	3
7	MANOMETRO 1.4	6 BAR X 1/2"	1
8	Ø12 UNIÃO T (C00601200)	Ø12 UNIÃO T	1
9	VALVULA DE RETENÇÃO	1/2"	1
10	Hot Max 24209 Brass	REGISTRO 1/2"	1
11	CFT-100-0006-A	PROTEÇÃO DO FOGAREIRO	1
12	Válvula de Segurança	HORIZONTAL 1/2"	1

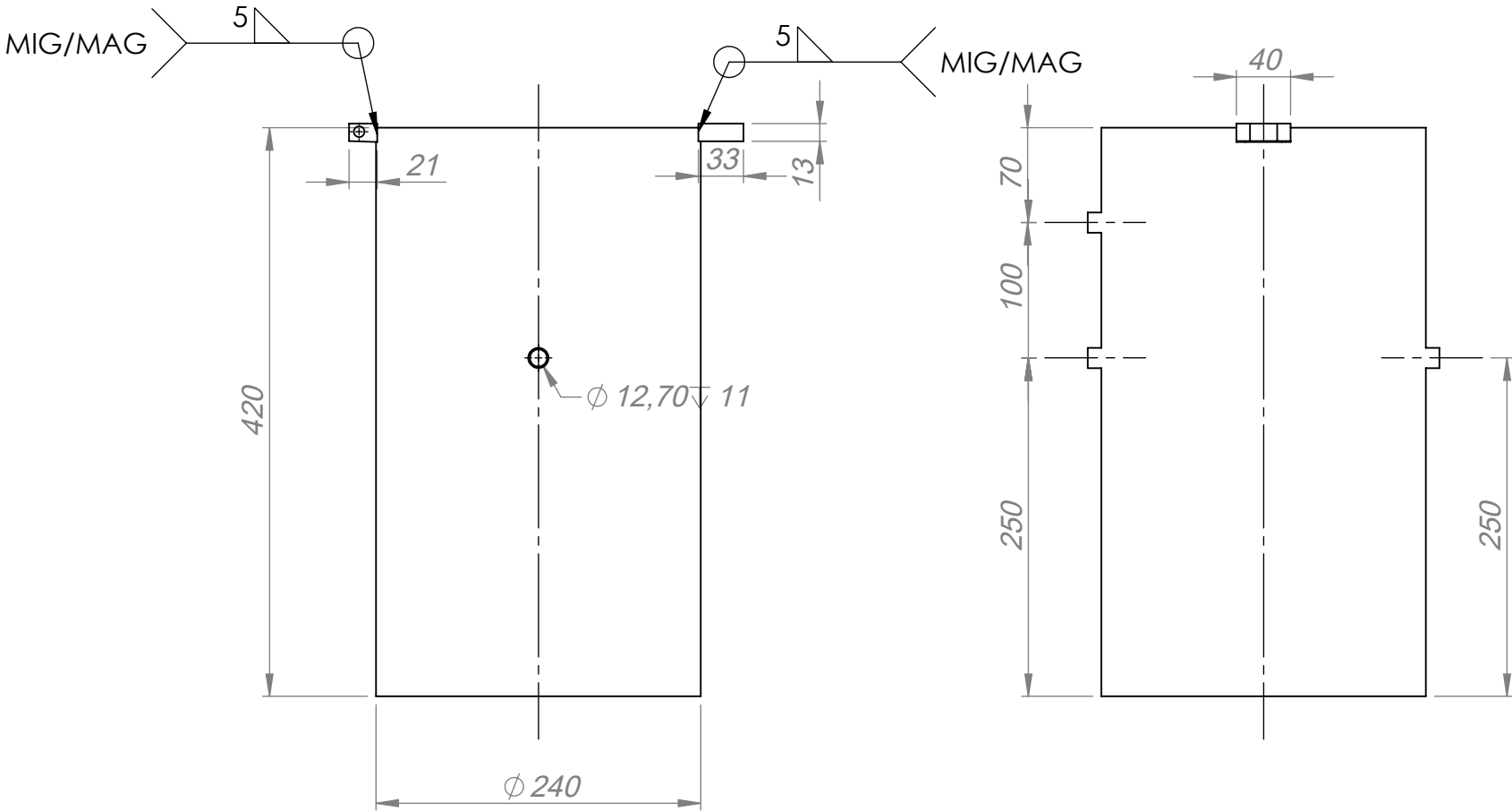
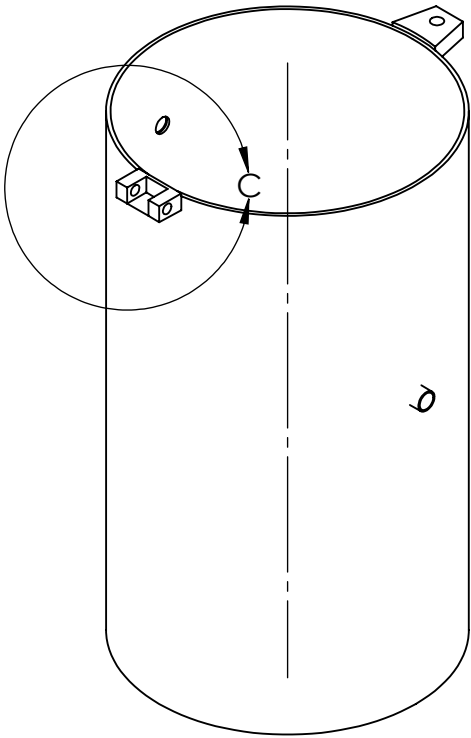
Tolerâncias DIN 7168						
Grau de Precisão	> 0 a 6	> 6 a 30	> 30 a 120	> 120 a 315	> 315 a 1000	> 1000
Fino-usinagem	± 0,05	± 0,10	± 0,15	± 0,20	± 0,30	
Grosso-Geral	+ 0,20	+ 0,50	+ 0,80	+ 1,20	+ 1,50	+ 1,75
Desenhado	Data: 00/00/0000		Aprovado	Data: 00/00/0000		Revisão
ISAAC CHILESE		ISAAC CHILESE				
Código Conjunto	Código Peça	Descrição da Peça				
000.000.000	CFT-100-0000-A	VISTA EXPLODIDA				
P. Bruto (KG)	Código Material	Descrição do Material			Escala	Folha
21064.7	000000	VIDE TABELA			1:20	1/1
P. Acab. (KG)	Maquina - Equipamento				Projeção	Formato
21064.7	VISTA EXPLODIDA CALDEIRA FLAMOTUBULAR					A2



DETALHE C
ESCALA 2 : 5



DETALHE B
ESCALA 2 : 5



ÚLTIMA IMPRESSÃO

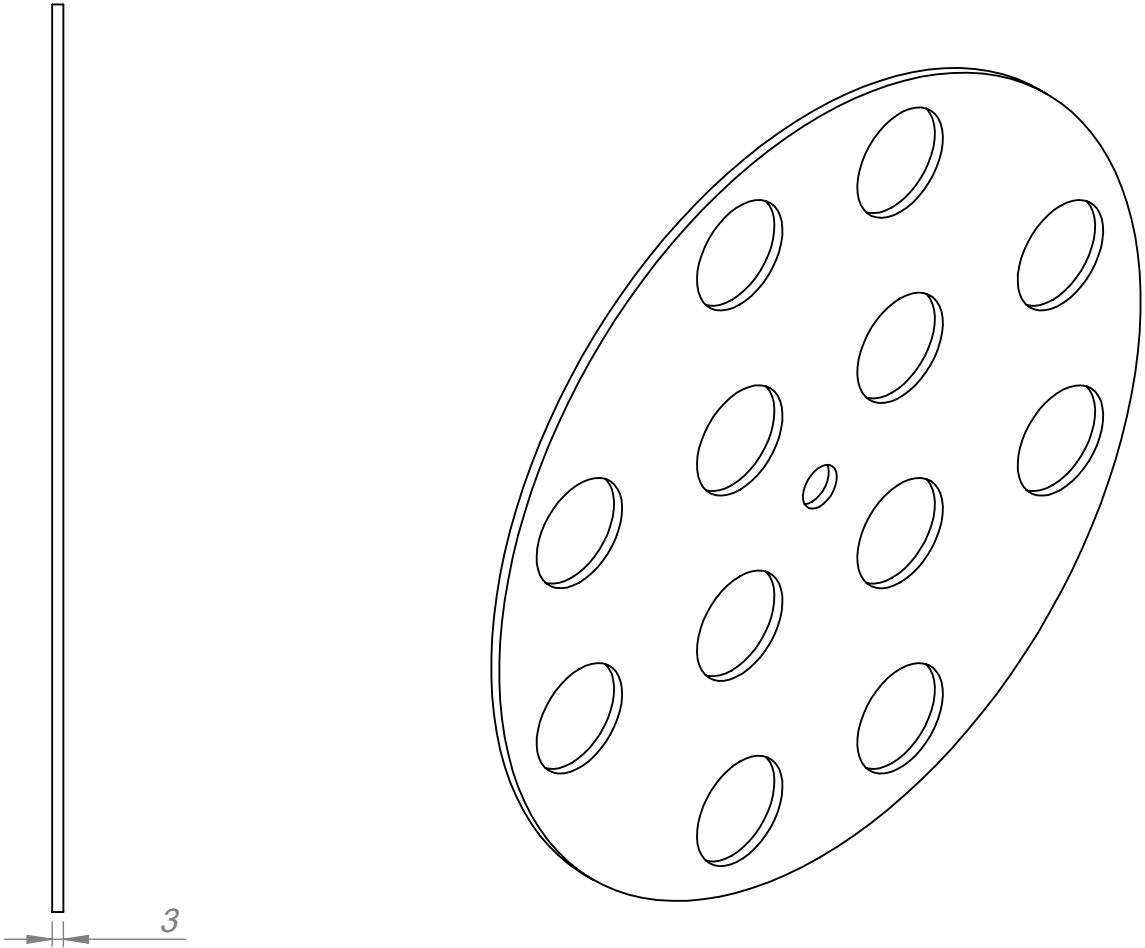
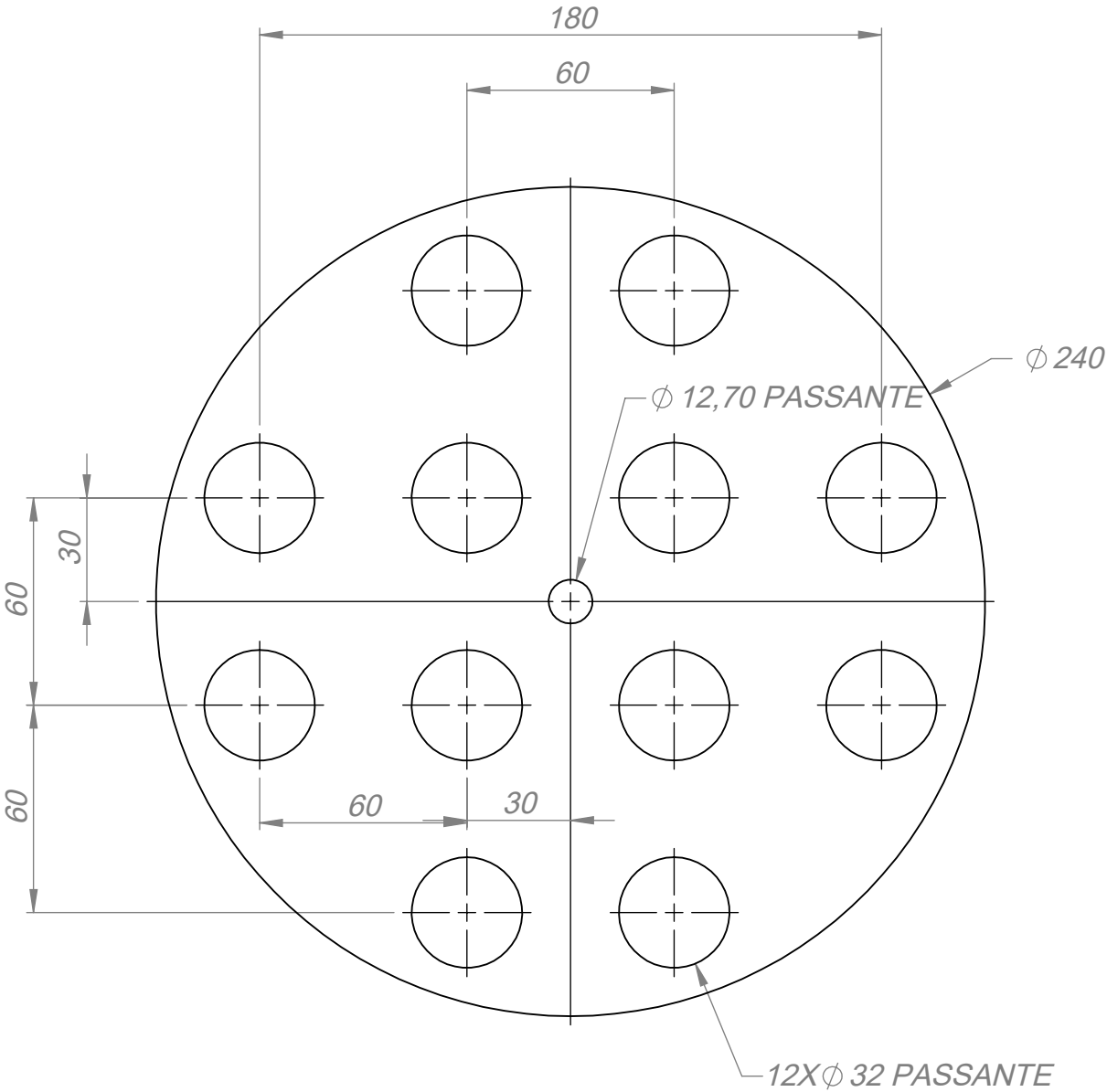
20/11/2022

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	0.8	0.8	N06
	0.4	0.4	N05
	0.2	0.2	N04
	0.1	0.1	N03
	0.05	0.05	N02
	0.025	0.025	N01
COMPARATIVO - USINAGEM NORMA ABNT 8404			

Tol. Geométrica
ABNT NBR 645/1988

Tolerância Geral:
DIN 7168m

CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO	Data: 00/00/0000		
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE			
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000		
CFT-100-0001-A	7558.1	7558.1	ISAAC CHILESE			
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000		
TUBO PRINCIPAL			NOME			
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO	PROJEÇÃO	DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/05/1996)
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:5	A3		A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTE PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILÍCITO PENAL SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABÍVEIS.



ÚLTIMA IMPRESSÃO
20/11/2022

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	0.8	0.8	N06
	0.4	0.4	N05
	0.2	0.2	N04
	0.1	0.1	N03
	0.05	0.05	N02
	0.025	0.025	N01

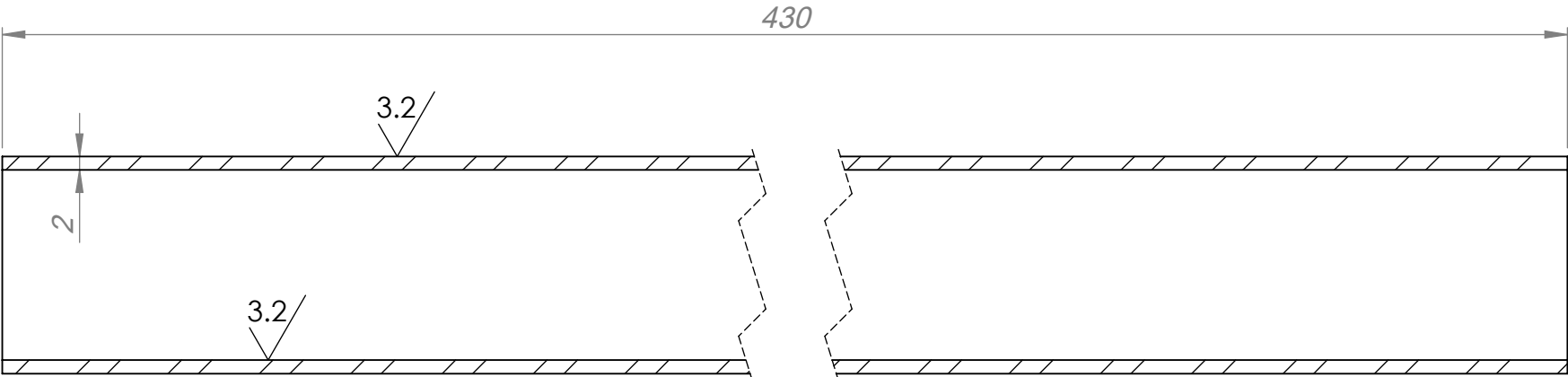
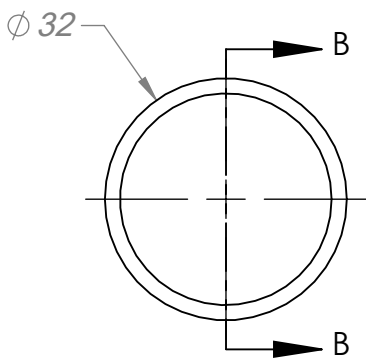
COMPARATIVO - USINAGEM
NORMA ABNT 8404

ANTIGO	RUG.	CLASSE
	50	N12
	25	N11
	12.5	N10
	6.3	N09
	3.2	N08
	1.6	N07

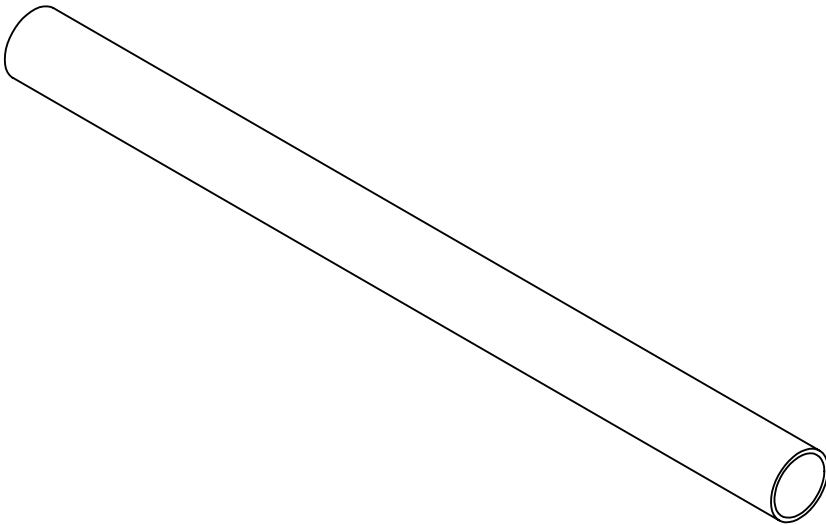
Tol. Geométrica
ABNT NBR 645/1988

Tolerância Geral:
DIN 7168m

CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO	Data: 00/00/0000					
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE						
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000					
CFT-100-0002-A	840.4	840.4	ISAAC CHILESE						
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000					
TAMPO SUPERIOR			NOME		FOLHA	REVISÃO	SW/CAD		
					1/1	00	NÃO É PERMITIDO QUALQUER TIPO DE ALTERAÇÃO MANUAL		
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO	PROJEÇÃO		DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/06/1996)		
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:5	A3			A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTE PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILÍCITO PENAL, SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABÍVEIS.		

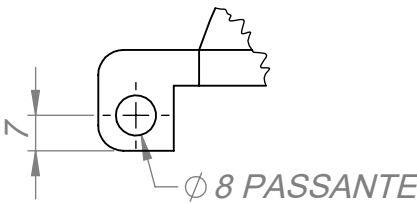
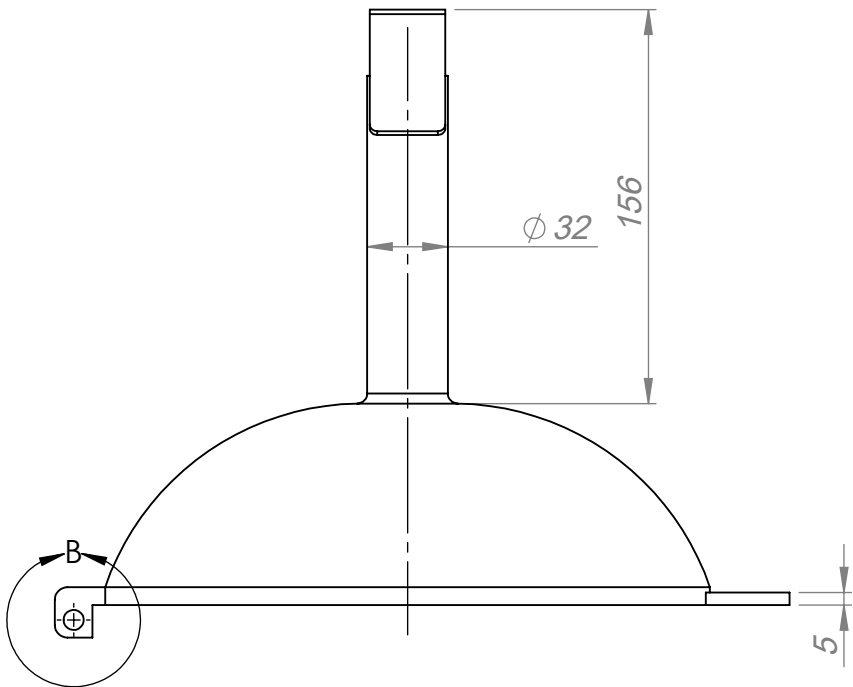
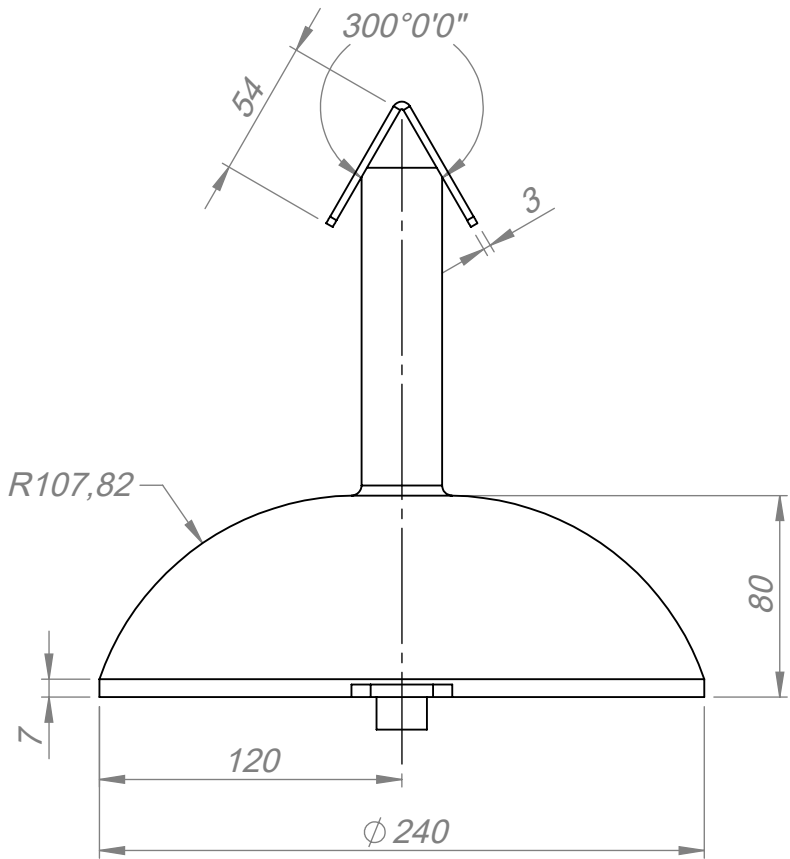


SEÇÃO B-B
ESCALA 1 : 1

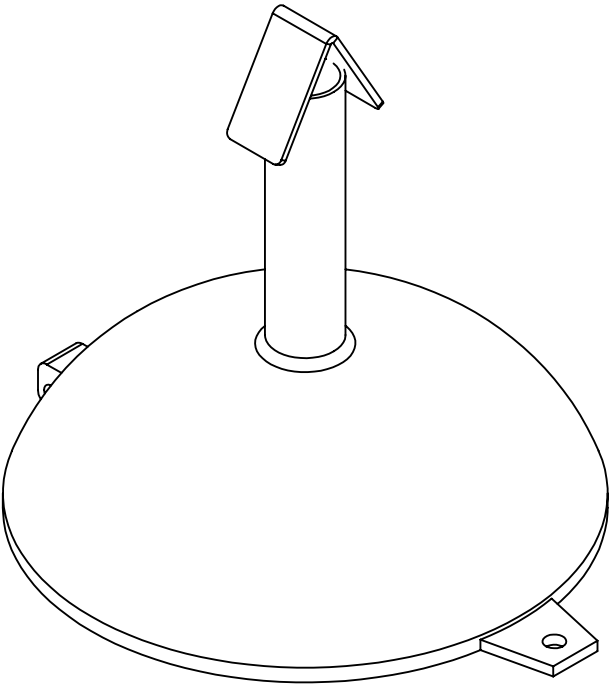
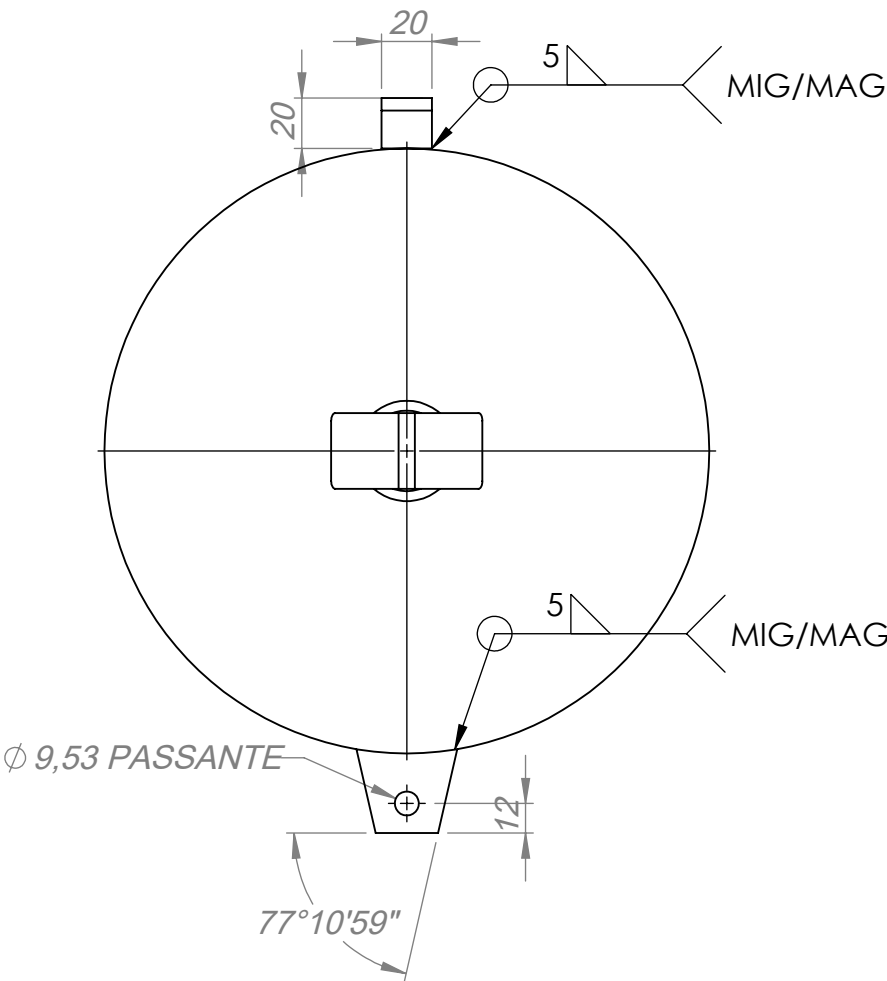


ÚLTIMA IMPRESSÃO			
20/11/2022			
ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	0.8	0.8	N06
	0.2	0.4	N05
	0.1	0.2	N04
	0.05	0.1	N03
	0.025	0.05	N02
	0.01	0.025	N01
COMPARATIVO - USINAGEM			
NORMA ABNT 8404			
ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	100	50	N12
	50	25	N11
	25	12.5	N10
	12.5	6.3	N09
	6.3	3.2	N08
	3.2	1.6	N07
Tol. Geométrica			
ABNT NBR 645/1988			
Tolerância Geral:			
DIN 7168m			

CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO	Data: 00/00/0000				
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE					
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000				
CFT-100-0003-A	640.3	640.3	ISAAC CHILESE					
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000		FOLHA	REVISÃO	SW/CAD NÃO É PERMITIDO QUALQUER TIPO DE ALTERAÇÃO MANUAL
TUBO 32mm			NOME		1/1	00		
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO		PROJEÇÃO	DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/05/1996)	
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:5	A3			A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTE PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILÍCITO PENAL, SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABÍVEIS.	



DETALHE B
ESCALA 2 : 3



CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO		Data: 00/00/0000			
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE					
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000				
CFT-100-0004-A	1989.0	1989.0	ISAAC CHILESE					
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000		FOLHA	REVISÃO	SW/CAD NÃO É PERMITIDO QUALQUER TIPO DE ALTERAÇÃO MANUAL
TAMPO DE FECHAMENTO			NOME		1/1	00		
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO		PROJEÇÃO	DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/06/1996)	
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:5	A3			A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTA PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILICITO PENAL SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABIVEIS.	

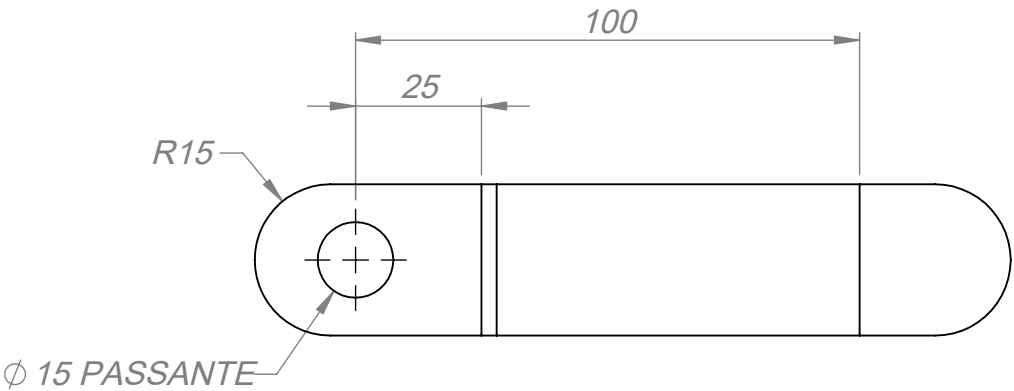
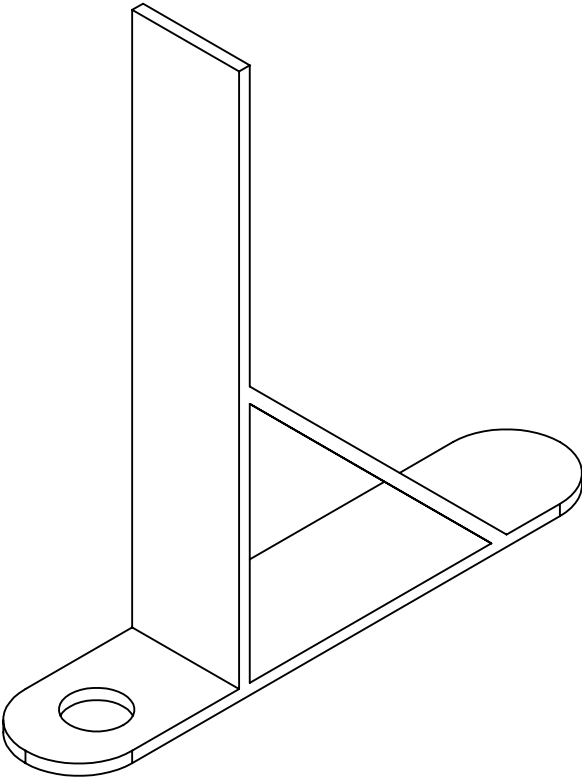
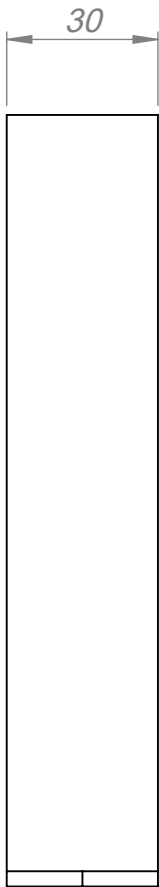
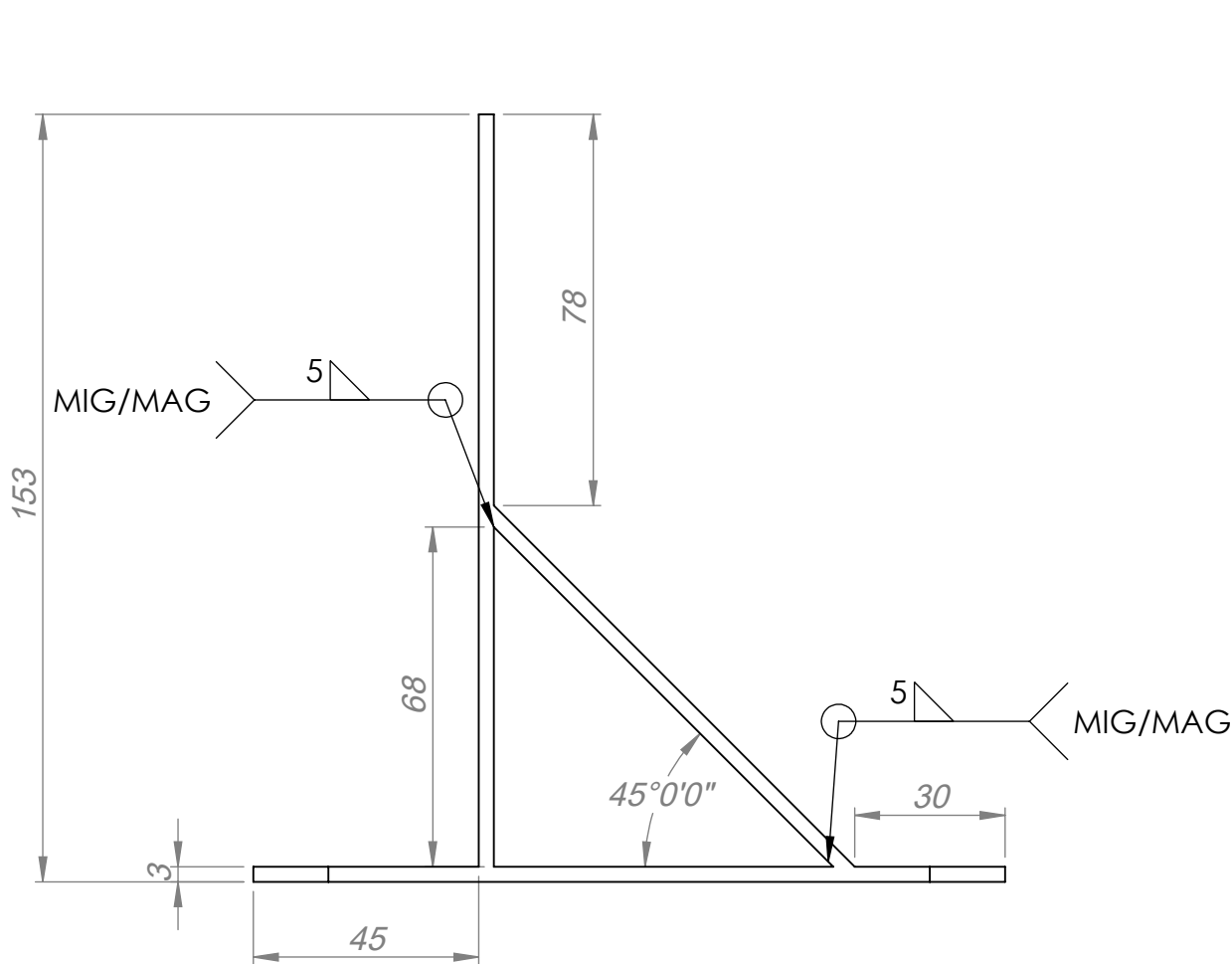
ÚLTIMA IMPRESSÃO
20/11/2022

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	0.8	0.8	N06
	0.4	0.2	N05
	0.1	0.05	N04
	0.025	0.01	N03
COMPARATIVO - USINAGEM			
NORMA ABNT 8404			

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	100	50	N12
	50	25	N11
	6.3	3.2	N10
	6.3	1.6	N09
	6.3	1.6	N08
	6.3	1.6	N07

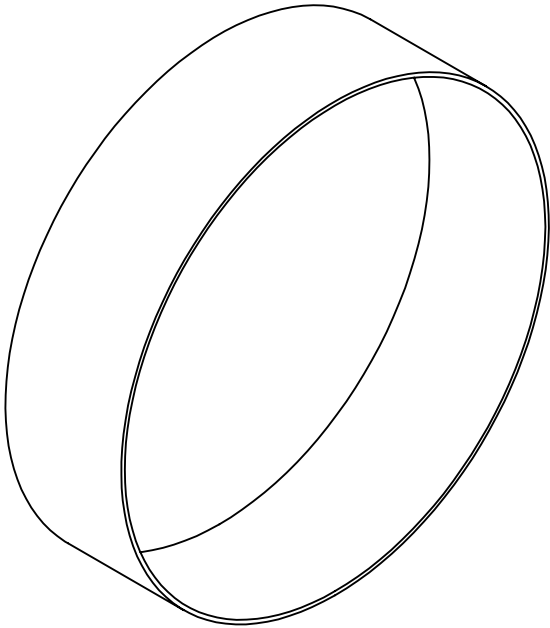
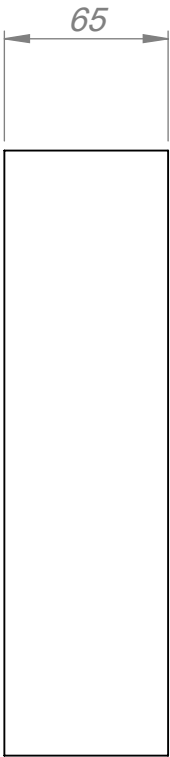
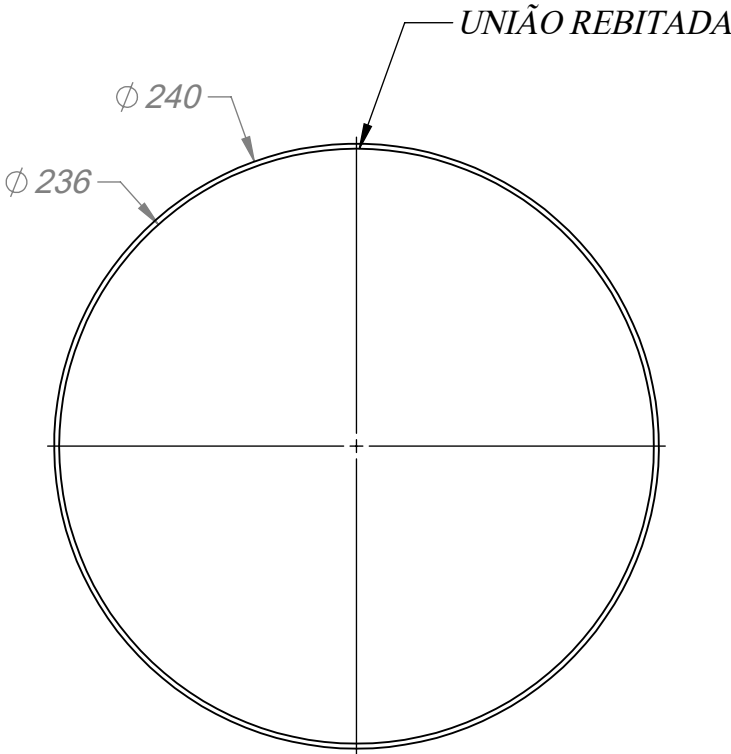
Tol.Geométrica
ABNT NBR 645/1988

Tolerância Geral:
DIN 7168m



CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO	Data: 00/00/0000			
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE				
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000			
CFT-100-0005-A	274.8	274.8	ISAAC CHILESE				
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000	FOLHA	REVISÃO	SW/CAD NÃO É PERMITIDO QUALQUER TIPO DE ALTERAÇÃO MANUAL
SISTEMA DE FIXAÇÃO			NOME		1/1	00	
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO	PROJEÇÃO	DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/05/1996)	
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:2	A3		A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTE PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILICITO PENAL SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABIVEIS.	

ÚLTIMA IMPRESSÃO			
20/11/2022			
ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	0.8	0.8	N06
	0.4	0.4	N05
	0.2	0.2	N04
	0.1	0.1	N03
	0.05	0.05	N02
	0.025	0.025	N01
COMPARATIVO - USINAGEM			
NORMA ABNT 8404			
ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
	100	50	N12
	50	25	N11
	25	12.5	N10
	12.5	6.3	N09
	6.3	3.2	N08
	3.2	1.6	N07
Tol.Geométrica ABNT NBR 645/1988			
Tolerância Geral: DIN 7168m			



ÚLTIMA IMPRESSÃO
20/11/2022

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
		0.8	N06
		0.4	N05
		0.2	N04
		0.1	N03
		0.05	N02
		0.025	N01
COMPARATIVO - USINAGEM NORMA ABNT 8404			

ANTIGO	APROX.	RUG.	CLASSE
		100	N12
		50	N11
		25	N10
		12.5	N09
		6.3	N08
		3.2	N07
		1.6	N06

Tol. Geométrica
ABNT NBR 645/1988

Tolerância Geral:
DIN 7168m

CÓDIGO MATERIAL	DESCRIÇÃO DO MATERIAL		PROJETADO		Data: 00/00/0000				
000000	AISI 1020		ISAAC CHILESE						
CÓDIGO DA PEÇA	P. BRUTO (KG)	P. ACAB. (KG)	VERIFICADO	Data: 00/00/0000					
CFT-100-0006-A	767.9	767.9	ISAAC CHILESE						
DESCRIÇÃO DA PEÇA			ELABORADO	Data: 00/00/0000		FOLHA	REVISÃO	SW/CAD	
PROTEÇÃO DO FOGAREIRO			NOME		1/1		00		NÃO É PERMITIDO QUALQUER TIPO DE ALTERAÇÃO MANUAL
MÁQUINA - EQUIPAMENTO			ESCALA	FORMATO		PROJEÇÃO	DIREITOS RESERVADOS - (LEI N.9279 DE 14/06/1996)		
CALDEIRA FLAMOTUBULAR			1:5	A3			A REPRODUÇÃO OU EXECUÇÃO DESTE PROJETO SEM PREVIA AUTORIZAÇÃO DA MELLO INDUSTRIA. CONSTITUI ILICITO PENAL SUJEITANDO SEU AUTOR MEDIDAS LEGAIS CABIVEIS.		