



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FELIPE BARROS MACHADO

**PROJETO BÁSICO DE UM REATOR DE PRÉ-TRATAMENTO ÁCIDO DE UMA  
PLANTA INDUSTRIAL DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

CRUZ DAS ALMAS  
2019

FELIPE BARROS MACHADO

**PROJETO BÁSICO DE UM REATOR DE PRÉ-TRATAMENTO ÁCIDO DE UMA  
PLANTA INDUSTRIAL DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentando à  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como  
requisito para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Msc. Vânio Vicente Santos de Souza

Cruz das Almas

2019

# PROJETO BÁSICO DE UM REATOR DE PRÉ-TRATAMENTO ÁCIDO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL DE ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Banca Examinadora:

---

Orientador: Msc. Vânio Vicente Santos de Souza

---

Examinador 1: Edilberto Andrade Silva

---

Examinador 2: Cliver da Rocha Silva

## AGRADECIMENTOS

*“Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar”.*

*Anatole France*

É com essa frase que inicio meus agradecimentos às pessoas que fizeram parte da minha graduação de qualquer forma possível. Primeiramente quero agradecer aos meus pais, Edson e Márcia, por amor incondicional, incentivo constante, por apostar todas as suas fichas em mim e por acreditar sempre no meu potencial mesmo, e principalmente, quando eu mesmo não conseguia enxergá-lo, essa conquista é de vocês também.

Gostaria de mencionar meus avós que, mesmo longe sempre estiveram pensando em mim e por ensinarem aos meus pais que a educação é o caminho para alcançar seus objetivos.

Gostaria de agradecer as pessoas que foram essenciais para a realização desse trabalho. Ao meu orientador Vânio pelos ensinamentos, conversas e correções que não foram poucas. À Elisa pelo companheirismo incentivo e ajuda de todas as formas possíveis serei eternamente grato.

Um dia, uma professora do ensino médio falou uma frase que levo comigo até hoje “Existem pessoas cometa e existem pessoas estrela na vida de todos. Os cometas passam, porém, as estrelas ficam e brilham por toda sua vida”. Assim, não poderia deixar de mencionar as estrelas que fiz durante minha vida.

Aos meus amigos do CPO, Ana, Suane, Karine, Krissia, Matheus, Maurício sou um cara de sorte por ter a amizade de vocês, do CPO para a vida.

Aos meus amigos que Cruz me deu Feeassis, Sadok, Matheus, Kinho, Gutão, Metal e Bruno por todas as horas de estudos, jogos e rangos, agradeço de coração.

Ao Engajamundo e as pessoas que fazem parte dele, principalmente o Engajafeira que é, e sempre será, o melhor nl do engaja. Agradeço por sempre acreditarem em mim.

Enfim, Engenheiro Mecânico!

## RESUMO

No mundo contemporâneo a busca por soluções mais eficientes, mais sustentáveis e que causem menos impactos ao meio ambiente é constante. O etanol de segunda geração é uma alternativa ao aumento exponencial do consumo dos combustíveis sem que necessite de aumentar a área de plantio de vegetais que fornecem açúcares fermentáveis. A tecnologia do E2G, como é chamado, é muito promissora, porém pouco difundida, estima-se que a produção de etanol celulósico tem a capacidade de aumentar em cerca de 50% a produção total desse combustível em plantas industriais sem demandar nenhuma área a mais de plantio. Nesse contexto, o projeto de um reator de pré-tratamento ácido visa tornar a produção de etanol, que até então é uma tecnologia cara e restrita a grandes indústrias, mais popular e acessível para pequenos produtores. O projeto tem como base um reator fabricado em aço inoxidável 316L, com camisa de aquecimento externa e um misturador operando em meio ácido. A capacidade total de produção desse reator é de 2,62 mil litros de produto por batelada e a temperatura e pressão de projeto é de 230°C e 15 Bar, respectivamente. O projeto permite observar a quantidade de variáveis a serem consideradas em um reator à batelada para pré-tratamento ácido, o material para fabricação de equipamentos estáticos para indústrias de pequeno porte operando nesse setor e os seus principais componentes e acessórios.

**Palavras chaves:** Vaso de Pressão, Indústria, Reator, Etanol Celulósico, Projeto.

## ABSTRACT

In the contemporary world the search for more efficient, more sustainable solutions that cause less impact on the environment is constant. Second generation ethanol is an alternative to the exponential increase in fuel consumption without the need to increase the area planted with vegetables that provide fermentable sugars. The E2G technology, as it is called, is very promising, but not very widespread; it is estimated that cellulosic ethanol production has the capacity to increase by about 50% the total production of this fuel in industrial plants without requiring any additional area of planting. In this context, the project for an acid pre-treatment reactor aims to make ethanol production, which until then has been an expensive technology restricted to large industries, more popular and accessible to small producers. The project is based on a reactor manufactured in 316L stainless steel, with an external heating jacket and a mixer operating in acidic medium. The total production capacity of this reactor is 2,200 liters of product per batch and the design temperature and pressure is 230°C and 15 Bar, respectively. The project allows to observe the quantity of variables to be considered in a batch reactor for acid pre-treatment, the material for the manufacture of static equipment for small industries operating in this sector and its main components and accessories.

**Keywords:** Pressure Vessel, Industry, Reactor, Cellulosic Ethanol, Project.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção Mundial de Etanol 2017 .....	18
Figura 2 - Diferentes rotas tecnológicas para produção de etanol .....	19
Figura 3 - Principais componentes dos materiais Lignocelulósico .....	21
Figura 4 - Fluxograma do E2G .....	22
Figura 5 - Reator a batelada com encamisamento.....	27
Figura 6 - Tipos de Tampos .....	29
Figura 7 - Tipos de Solda de Topo .....	30
Figura 8 - Gráfico de Teste Hidrostático.....	33
Figura 9 - Tipos de Flanges.....	35
Figura 10 - Tipos de Faces de Flanges.....	36
Figura 11 - Vaso de Pressão apoiado em colunas.....	37
Figura 12 - Tipos de Camisas Externas .....	39
Figura 13 - Fluxograma de construção do projeto.....	42
Figura 14 - Croqui do Reator de Pré-tratamento Ácido .....	44
Figura 15 - Tampo Elíptico .....	47
Figura 16 - Posicionamento dos Bocais .....	59
Figura 17 - Modelagem em 3d do reator .....	66
Figura 18 - Desenho em 2d da modelagem com detalhes .....	67
Figura 19 – Teste hidrostático no reator.....	69
Figura 20 Deformação durante o teste hidrostático.....	70
Figura 21 - Disposição de Chapas do Casco e Tampo .....	71
Figura 22 - Camisa de Vapor .....	72
Figura 23 - Bocais parte superior .....	73

Figura 24 - Bocais parte Inferior .....	73
Figura 25 - Bocal de Visita .....	74
Figura 26 - Suportes e Olhal de Içamento.....	74
Figura 27 Área colhida e produção da Cana de açúcar no Brasil .....	91
Figura 28 - Produção Mundial de Etanol entre 2007 - 2017 .....	94
Figura 29 Reforço de Bocais .....	96



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rendimento e produtividade por matéria-prima .....	20
Tabela 2 - Dados de Projeto.....	47
Tabela 3 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco .....	49
Tabela 4 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco .....	50
Tabela 5 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco .....	51
Tabela 6 - Bocais instalados no Reator.....	53
Tabela 7 - Resumo do dimensionamento dos bocais.....	58
Tabela 8 - Caldeiraria .....	60
Tabela 9 - Tubulação .....	61
Tabela 10 - Instrumentação.....	62
Tabela 11 - Dados do sistema do misturador.....	63
Tabela 12 - Dados do Redutor do Misturador .....	63
Tabela 13 - Dados e Especificação dos Acoplamentos .....	64
Tabela 14 - Especificação dos Rolamentos .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 15 – Dados dos testes no SolidWorks® .....	68
Tabela 16 - Projeção externa dos bocais .....	97

## LISTA DE SÍMBOLOS

MME – Ministério do Meio Ambiente  
EUA – Estados Unidos da América  
EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas  
MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento  
BEN – Balanço Energético Nacional  
E1G – Etanol Primeira Geração  
E2G – Etanol de Segunda Geração  
Tep – Tonelada equivalente de petróleo  
COP – Conferência de Partes  
ONU – Organizações das Nações Unidas  
ANP – Agência Nacional de Petróleo  
EHC – Etanol Hidratado Combustível  
EAC – Etanol Anidro Combustível  
PROALCOOL – Programa Nacional do Álcool  
CAE – *Computer – Aided Engineering*  
CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono  
SP – São Paulo  
HMF – Hidroximetilfurfural  
PFR – *Plug Flow Reactor*  
CSTR – *Continuous Stirred-tank Reactor.*  
ASME – *American Society Mechanical Engineers*  
ZTA – Zona Termicamente Afetada  
PMTA – Pressão Máxima de Trabalho Admissível  
Ø – Diâmetro Nominal  
Fe – Ferro  
Ni – Níquel  
Cr – Cromo  
CFC – Cúbica de Face Centrada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Etanol: o biocombustível do Brasil</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Processos Produtivos</b>	<b>18</b>
3.2.1	Etanol Celulósico (E2G)	20
<b>3.3</b>	<b>Etanol A Partir Da Biomassa Lignocelulósica</b>	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Pré-Tratamentos</b>	<b>23</b>
3.4.1	Pré-Tratamento Físico	23
3.4.2	Pré-Tratamento Químico	24
<b>3.5</b>	<b>Reatores Industriais</b>	<b>25</b>
3.5.1	Reatores Descontínuos Ou Batelada	26
<b>3.6</b>	<b>Projeto Geral de um Vaso de Pressão</b>	<b>27</b>
3.6.1	Espessura mínima de parede	27
3.6.2	Tampos	28
3.6.3	Soldas e coeficiente de eficiência de solda	29
3.6.4	Pressão de Operação e Projeto	30
3.6.5	PMTA e Válvulas de Segurança	31
3.6.6	Temperatura de Operação e Projeto	32
3.6.7	Testes no Vaso	33
3.6.8	Bocais para Vasos	34
3.6.9	Bocais de visita e Inspeção	34
3.6.10	Flanges	35
3.6.11	Suporte para Vasos	36
3.6.12	Camisas de Vapor e Purgadores	37
3.6.13	Materiais de Construção	39
3.6.14	Tensão Admissível dos Materiais	41

<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>42</b>
4.1	Fluxograma do Projeto	42
4.2	Normas utilizadas no Projeto	42
4.3	Parâmetros de Projeto	43
4.4	Projeto do Reator de Pré-Tratamento de E2G	44
4.5	Especificação do Projeto	45
4.5.1	Vida útil dos reatores e vasos de pressão	45
4.5.2	Dimensões gerais	45
4.5.3	Seleção do material para as condições de projeto	46
4.5.4	Tipo do Tampo	47
4.6	Resumo dos dados do Projeto	47
<b>5</b>	<b>CÁLCULOS DAS ESPESSURAS</b>	<b>48</b>
5.1	Cálculo da espessura e PMTA do Casco	48
5.2	Cálculo da espessura e PMTA do Tampo Elíptico por Forjamento	50
5.3	Cálculo da espessura e PMTA da Camisa de Vapor	51
5.4	Cálculo do reforço de bocais e outras aberturas	52
5.4.1	Cálculo do Bocal para Instrumentos $\frac{3}{4}$ "	54
5.4.2	Cálculo do Bocal de entrada de vapor na camisa $1 \frac{1}{2}$ "	54
5.4.3	Cálculo do Bocal de 2"	55
5.4.4	Cálculo do Bocal de 3"	56
5.4.5	Cálculo do Bocal de 4"	56
5.4.6	Cálculo do Bocal de 20"	57
5.5	Cálculo dos Suportes e Olhal de Içamento do Reator	58
5.6	Posicionamento dos bocais no Reator	59
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>60</b>
6.1	Caldeiraria e Usinagem	60
6.2	Tubulação	61
6.2.1	Instrumentação	62
6.3	Mecânica	62

6.3.1	Motor e Redutor.....	63
6.3.2	Acoplamentos.....	64
6.3.3	Selo Mecânico.....	65
<b>6.4</b>	<b>Modelagem em 3d software SolidWorks®.....</b>	<b>65</b>
6.4.1	Teste Hidrostático.....	68
6.4.2	Deformações do reator durante o TH.....	70
<b>6.5</b>	<b>Documentação Técnica do Reator.....</b>	<b>71</b>
6.5.1	Bocais.....	73
<b>6.6</b>	<b>Testes e inspeção para liberação do equipamento.....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE A - O PROGRAMA PROALCOOL.....</b>	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE B - ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G).....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A predominância dos combustíveis fósseis como fonte energética mundial é notória. Entretanto, a possível escassez dos derivados do petróleo nos próximos anos, os seus impactos ambientais e agravamento dos efeitos das mudanças climáticas tem mudado esse cenário (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Nesse contexto, houve uma intensa procura por fontes alternativas de energia que possibilitasse uma independência do petróleo e que não contribuísse com as mudanças climáticas, com isso, os biocombustíveis se tornaram uma alternativa para conquistar esse objetivo (ASSUMPÇÃO, 2015).

Fonte de energia abundante e renováveis, os biocombustíveis foram inseridos no mercado mundial com o intuito de reduzir as emissões dos combustíveis fósseis e frear a dependência mundial do petróleo proveniente das áreas de conflitos do Oriente Médio (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Os biocombustíveis são definidos, de forma geral, como todo combustível produzido a partir da biomassa (matéria orgânica), isto é, de fontes renováveis – produtos vegetais ou compostos de origem animal (MME, 2007). Dentre as fontes mais conhecidas no mundo estão: cana de açúcar, milho, soja, semente de girassol, madeira e celulose. A partir dessas fontes é possível produzir o etanol, álcoois e biodiesel.

A fabricação de etanol pela fermentação do caldo da cana de açúcar corresponde a 30% do potencial energético do vegetal sendo que os 70% restante encontra-se nos resíduos do processo de extração do caldo (palha e bagaço). No processo de produção de álcool da cana de açúcar, usualmente, utiliza-se o resíduo para geração de vapor em caldeiras. Entretanto, esses subprodutos do processo contêm alto teor de açúcares fermentescíveis o que possibilita a transformação desses resíduos em etanol de segunda geração (E2G) (ASSUMPÇÃO, 2015).

O uso do material celulósico da cana, que seria rejeitado do processo, para o uso em E2G aumentaria em cerca de 50% a produção de etanol nas plantas industriais sem que a área de plantio fosse aumentada, resultando numa maior produtividade sem que a monocultura de cana de açúcar compita com o plantio de

alimentos (ZACANER; SANTOS, 2013). Porém, a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica deve ser precedida de um pré-tratamento em reatores químicos que tem a finalidade de romper a barreira vegetal formada pela lignina e hemicelulose desestruturando a parede celular que posteriormente podem ser convertidos em etanol por microrganismos fermentadores.

Os reatores químicos são equipamentos estáticos que operam dentro de plantas industriais dos setores como petroquímica, química e farmacêutica. Por sua importância, os reatores são considerados o coração dos processos químicos dentro da planta industrial. Eles são os responsáveis garantir um tempo mínimo e estipulado de reação, homogeneização correta entre reagentes, temperatura e pressão específicas, possibilitando a obtenção de um produto (FABREGA, 2012).

Os reatores químicos são classificados de acordo com o tipo de processo que a planta opera: descontínuo ou batelada, contínuo e semi batelada. Pela forma que operam: Reator Tubular (PFR) ou reatores de mistura (CSTR). Ou ainda podem ser classificados pelo tipo de reação se ela é homogênea ou heterogênea (FLOGER, 2009)

Objetiva-se projetar um reator para o pré-tratamento da biomassa proveniente do bagaço da cana de açúcar de uma planta por batelada de produção de etanol para indústrias de pequeno porte, calculando e especificando os principais componentes de um reator para esse fim.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Projetar um reator para o pré-tratamento ácido de uma planta piloto de etanol de segunda geração.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Projetar um reator com capacidade de 2500 litros para indústrias de pequeno porte
- Especificar a lista de materiais necessários para fabricação do reator.
- Desenvolver um protótipo em software CAD do reator de pré-tratamento ácido.
- Realizar testes em plataforma CAE.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

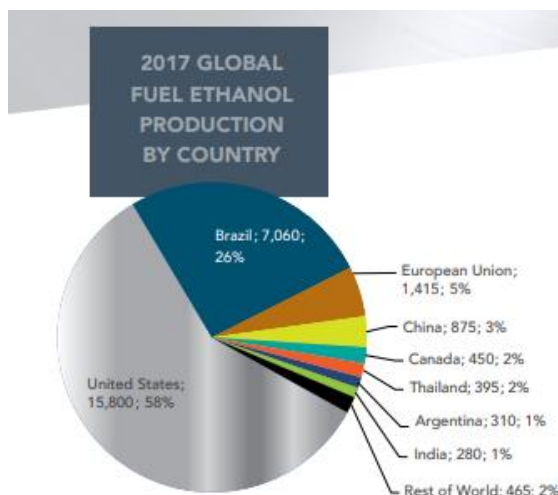
#### 3.1 Etanol: o biocombustível do Brasil

O etanol, também chamado de álcool etílico é um composto orgânico líquido, volátil, incolor, tóxico e inflamável fabricado em larga escala, através da fermentação alcoólica de açúcares presentes, principalmente, nos vegetais como milho, trigo, beterraba e a cana de açúcar (ASSUMPÇÃO, 2015). Esse combustível no Brasil é usado como substituto ou aditivo da gasolina e é regulamentado pela Agência Nacional de Petróleo – ANP, órgão que classifica e fiscaliza a produção e comercialização do combustível aqui no país (GALLO,1990).

A história desse combustível no Brasil é datada de meados dos anos 20, onde experiências com etanol combustível vinham sendo desenvolvidas no país. Cerca de 10 anos depois, o governo de Getúlio Vargas criou a lei nº 737 que tornava obrigatória a mistura de etanol anidro com a gasolina, essa mistura tem como o objetivo diminuir as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera além de aumentar a lubrificação, potência do motor e inserir na matriz energética um combustível de fonte alternativa e renovável (LEITE e CORTEZ, 2008). Porém, o etanol combustível só ganhou força e expressividade a partir do ano de 1975, quando o governo federal, até então governado pelo presidente Geisel, lançou o Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL (Apêndice A) com o objetivo de reduzir a dependência do petróleo estrangeiro e diminuir as sucessivas crises do setor sucroenergético (GALLO,1990).

Segundo a revista RFA (2018), a produção de etanol no Brasil, no ano de 2017, foi o equivalente a 26% da produção mundial, sendo que no EUA a produção de etanol correspondeu a 58%, esses dados são possíveis observar na figura 1. De toda produção norte americana, 33% é importado para o Brasil a fim de suprir o consumo desse combustível, principalmente, no período de alta nos preços do açúcar.

Figura 1 - Produção Mundial de Etanol 2017



Fonte - RFA (2018)

Entretanto, a demanda energética do Brasil no setor dos combustíveis sofreu mudanças significativas nas últimas décadas, com o aumento da frota de veículos leves impulsionados por políticas públicas, a redução da competitividade do etanol e a estagnação de investimentos em novas usinas fizeram com que o país se tornasse novamente dependente da importação da gasolina estrangeira. Nesse contexto surge o etanol 2G no Brasil (YABE et al, 2015).

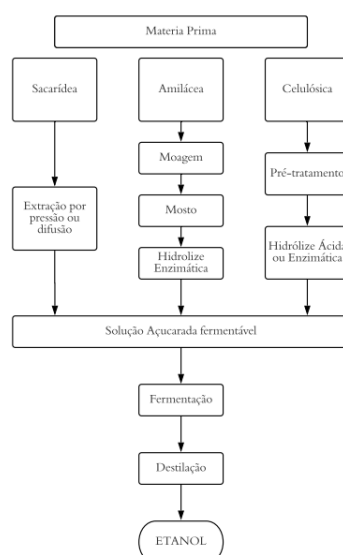
### 3.2 Processos Produtivos

Existem três principais processos produtivos de obtenção de etanol, eles são classificados de acordo com a matéria prima. Cada um deles são aplicadas de forma a garantir uma melhor viabilidade econômica e rendimento no processo (CARDONA e SÁNCHEZ, 2007).

- **Matéria-prima sacarídea:** São materiais que contém na sua composição açúcares, principalmente a sacarose, que podem ser diretamente consumidos. Ex: Cana de açúcar, beterraba, melão.

- **Matéria-prima amilácea:** materiais ricos em amido. Nesse processo o polissacarídeo deve ser primeiramente hidrolisado antes da etapa fermentativa.
- **Matéria-prima lignocelulósica:** nas biomassas lignocelulósicas (de madeira, bagaço da cana, resíduo de fábrica de papel), o açúcar encontra-se na forma de celulose. Para ser possível obter álcool é necessário que esses materiais passem por um tratamento para a quebra dos polissacarídeos e o acesso dos microrganismos aos monossacarídeos.

Figura 2 - Diferentes rotas tecnológicas para produção de etanol



Fonte – Adaptado de MANOCHIO (2014)

Na figura 2, é possível observar as diferentes rotas de obtenção do etanol de acordo com a matéria prima, seja ela sacarídea (cana, beterraba), amilácea (milho, trigo, etc.) ou celulósica (biomassa). Além disso, observa-se que a fermentação e a destilação são processos comuns a todas as matérias primas, o diferencial são as etapas anterior a obtenção da solução açucarada para fermentação. Na tabela 1, pode-se observar a comparação de rendimento do etanol de acordo com sua matéria-prima.

Tabela 1 - Rendimento e produtividade por matéria-prima

<b>Matéria-Prima</b>	<b>Tipo de biomassa</b>	<b>Produtividade média da biomassa (t/ha)</b>	<b>Rendimento médio do etanol (l/t)</b>
Cana-de-açúcar	Açucareira	60,00 – 120,00	90,00
Milho	Amilácea	7,50 – 10,00	460,00
Beterraba	Açucareira	50,00 – 100,00	100,00

Fonte - MANOCHIO (2014)

Atualmente existem duas formas de produção, a titulada de Etanol de Primeira Geração (E1G) (Apêndice B) que é a produção a partir da fermentação da sacarose (açúcar) presente nos alimentos. E a produção a partir dos rejeitos da primeira geração, como palha, bagaço, folhas e casca dos vegetais que antes eram usadas como combustível para geração de eletricidade agora pode ser utilizado para aumentar a produção do etanol a partir do processo titulado de Etanol de Segunda Geração, E2G ou etanol celulósico (MANOCHIO 2014).

### 3.2.1 Etanol Celulósico (E2G)

Etanol celulósico ou E2G é um método de produção de combustíveis que utiliza todas as formas de biomassa lignocelulósica em substituição aos açúcares e amidos da geração anterior. Diferente do etanol de primeira geração (E1G), o E2G necessita de etapas preliminares que tem a finalidade de diminuir a resistência do acesso de catalisadores na estrutura da celulose, onde encontra-se os açúcares fermentáveis (glicose). Todo tipo de matéria orgânica que contenha celulose pode ser transformado em matéria prima para a fabricação de E2G, espécies de gramas, árvores, resíduos agrícolas e industriais, palha de milho, bagaço da cana etc. (ASSUMPÇÃO, 2015)

No Brasil, existem atualmente 2 usinas de E2G implantada, uma é da GranBio, uma empresa brasileira que inaugurou em 2014 sendo ela a primeira planta industrial de E2G na América do Sul. Essa usina fica instalada na cidade de São Miguel dos

Campos, Alagoas e teria capacidade de produzir 82 milhões de litros de etanol de segunda geração por ano, com problemas no pré-tratamento das matérias lignocelulósicas, a produção foi interrompida na fábrica no ano de 2017. A Raízen detém uma usina na cidade de Piracicaba (SP) chamada de GranBio, segunda a empresa, a usina tinha capacidade de produção de 40 milhões de litros de E2G por ano, porém, essa usina ainda passa por dificuldades devido ao sistema de pré-tratamento da matéria prima.

O rendimento e eficiência da produção de etanol a partir dos materiais lignocelulósicos dependem, principalmente, das etapas preliminares para que a biomassa se torne açúcares fermentáveis. Os componentes principais da biomassa da cana de açúcar é a celulose, a lignina e a hemicelulose, como é exemplificado na figura 3, observa-se que a molécula de açúcar está localizada dentro da estrutura celular e para que esses açúcares sejam expostos no processo, devem-se realizar algumas etapas para romper a ligação entre a lignina a celulose e a hemicelulose. (RITTER, 2008; SANTOS, 2012; STINGHELI, 2014).

Figura 3 - Principais componentes dos materiais Lignocelulósicos

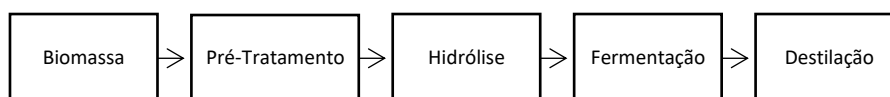


Fonte - Adaptado de RITTER (2008)

### 3.3 Etanol A Partir Da Biomassa Lignocelulósica

A produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica é feita a partir de etapas bem definidas e essenciais para o processo: o pré-tratamento, a hidrólise, a fermentação dos açúcares resultantes da hidrólise e a destilação do etanol. Cada etapa dessa detém métodos específicos que implicam diretamente no custo de produção do etanol celulósico. Inicialmente a biomassa passa por um pré-tratamento que tem a finalidade de romper a parede celular do vegetal, desestruturando as fibras para facilitar a hidrólise, que consiste na ação de um reagente que faz a conversão dos polissacarídeos em açúcares fermentáveis (SILVA, 2013).

Figura 4 - Fluxograma do E2G



Fonte – Adaptado de SILVA (2013)

A etapas descritas na figura 4 traz uma realidade ainda pouco exploradas no contexto das indústrias no Brasil, as biorefinarias. Esse termo é adotado às indústrias que a convertem biomassa, resultante ou dejetos da produção, em combustíveis, eletricidade, calor e produtos químicos diminuindo assim a dependência do setor petroquímico (CARVALHO, 2016). No Brasil, poucos setores têm esse conceito instalado em suas unidades, e o etanol de segunda geração pode auxiliar na disseminação e transformação de rejeitos industriais de característica celulósica em fonte de energia. (SILVA, 2013)

No item 3.4 a principal etapa para a obtenção de etanol de segunda geração, o pré-tratamento, que posteriormente a biomassa passa por outros processos para a transformação em açúcares fermentáveis.

### 3.4 Pré-Tratamentos

Os pré tratamentos fazem parte da primeira etapa do processo produtivo de etanol celulósico. Com o objetivo principal de garantir uma digestibilidade dos materiais lignocelulósico facilitando a bioconversão, o pré tratamento rompe a parede celular, perturbando as barreiras morfológicas, dinâmicas e mecânicas, fazendo com que as moléculas de celulose existentes se tornem acessíveis as enzimas que serão incorporadas no processo durante a hidrólise. Sem a etapa de pré tratamento a ação das enzimas é lenta e com rendimento inferior a 20%, com uma etapa de pré tratamento bem ajustado o rendimento pode chegar a ser superior a 80% (MORAIS, 2010).

Os pré-tratamentos podem ser baseados em processos químicos, físicos, biológicos ou uma combinação deles. Sendo que a eficiência do processo produtivo de etanol de segunda geração está intimamente ligada ao processo empregado.

Para um pré-tratamento ser considerado eficiente deve-se atender alguns parâmetros básicos tais como (CARVALHO, 2016):

- Ser eficiente em termos de rendimento;
- Apresentar elevada digestibilidade da celulose na hidrólise enzimática, garantindo acessibilidade aos agentes hidrolíticos;
- Segurança e simplicidade operacional;
- Após o processo, apresentar elevada concentração de açúcares fermentáveis;
- Produzir o mínimo de resíduo;
- Necessitar um baixo custo de insumos;

#### 3.4.1 Pré-Tratamento Físico

Consiste no rompimento da parede celular por meios mecânicos, moagem, extrusão, trituração. É utilizado para resíduos herbáceos e agroindustriais com a

finalidade de reduzir o tamanho da partícula e da cristalinidade geralmente é usado como forma de aumentar a superfície de contato com agente químico com a diminuição da granulometria do material celulósico. Uma grande desvantagem desse método é que a energia necessária para tratamento de materiais celulósicos grande, como a madeira, é alta (TOMÉ, 2014).

Esse tipo de método não remove a lignina em a hemicelulose, além disso, existe a formação de inibidores que dificultam a entrada das enzimas durante a etapa de hidrólise.

### 3.4.2 Pré-Tratamento Químico

Dentre todos os tipos de pré-tratamento, os químicos possuem o maior número de publicações devido a quantidade infinita de combinações possíveis. Podem diferir entre si pelos reagentes (quantidade e concentração) e pelo mecanismo envolvido para a modificação estrutural da parede celular. (ASSUMPÇÃO, 2015).

Como foi citado anteriormente, a combinação de pré-tratamentos químicos tem um amplo campo de estudos, porém, pode-se classificá-los a partir de três grupos gerais, os que utilizam ácidos, os que utilizam bases e a combinação dos dois reagentes. No presente trabalho será apresentado apenas o pré-tratamento ácido já que é o foco principal do projeto do reator.

#### a **Pré-Tratamento Ácido**

O pré-tratamento ácido consiste na utilização de soluções de ácidos inorgânicos, principalmente ácido Sulfúrico, Clorídrico e Fosfórico, responsáveis pela decomposição da hemicelulose. Dentre todos, o ácido sulfúrico é o mais amplamente utilizado devido ao baixo custo se comparado com os demais citados (RABELO, 2010).



A concentração, temperatura e o tempo de reação entre os reagentes ácidos são fatores cruciais no rendimento do pré-tratamento, pois, condições demasiadamente severas poderão favorecer a degradação da celulose e da hemicelulose com a formação do furfural, 5-hidroximetilfurfural (5-HMF) e ácido acético, substâncias altamente inibidoras da fermentação (ASSUMPÇÃO, 2015).

A utilização de ácidos concentrados no processo de pré-tratamento garante uma melhor digestibilidade da biomassa, porém, eles degradam fortemente a lignina por reações de condensação fazendo-a precipitar, além disso, o uso deste tipo de reagente requer equipamentos fabricados com ligas mais resistentes a corrosão. Já os ácidos diluídos promovem uma maior remoção da hemicelulose e baixa degradação da lignina e da celulose, além disso, tem um menor custo operacional e de instalação industrial. Estudos feitos por Bluhm e colaboradores (2012) indicaram que as concentrações dos ácidos mais usadas está entre 0,5 – 15%. Segundo Pitarelo (2013) etapas de moagem e lavagem são necessárias antes do pré-tratamento.

A moagem tem o objetivo de aumentar a superfície de contato entre a biomassa e o ácido. A lavagem tem a finalidade de retirar as impurezas e cinzas que a biomassa adquire durante o processo, essas cinzas funcionam como barreira para a ação do ácido no material celulósico aumentando o consumo do ácido durante o pré-tratamento (RABELO, 2010).

### **3.5 Reatores Industriais**

A cinética química em processos é o estudo das reações químicas e dos mecanismos de reação. A engenharia de reações químicas une a cinética química e o estudo dos reatores onde as reações ocorrem. A seleção de um sistema de reação economicamente viável seguro e eficiente é um fator crucial para o sucesso ou o fracasso econômico de uma planta química. Dentro desse escopo, o projeto de um reator deve ser cuidadosamente calculado para as operações específicas de cada planta (FLOGGER, 2009).

Os reatores químicos são classificados de acordo com o tipo de processo que a planta opera: descontínuo ou batelada, contínuo e semi batelada. Pela forma que operam: Reator Tubular (PFR) ou reatores de mistura (CSTR). Ou ainda podem ser classificados pelo tipo de reação se ela é homogênea ou heterogênea.

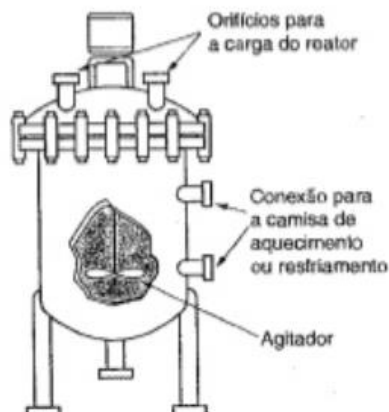
### 3.5.1 Reatores Descontínuos Ou Batelada

Reatores a batelada são tanques com agitação usados em operações de pequenas escalas, para testar novos processos, na fabricação de produtos de valor agregado alto ou para processos que as variáveis sejam de difícil controle em processos contínuos. Construídos geralmente de aço inox, ligas de aço carbono recoberto ou ligas especiais que contém sistemas de aquecimento ou resfriamento interno para controle da temperatura de reação (FLOGER, 2009).

Com a vantagem de ter altas conversões dentro do processo, os reatores a batelada têm altos custos operacionais, variabilidade de produto a cada batelada e por isso esse tipo de reator não é utilizado em produção de larga escala (FLOGER, 2009).

Na figura 5 é possível observar um reator a batelada com agitador e encamisamento para refrigeração ou aquecimento da solução interna

Figura 5 - Reator a batelada com encamisamento



Fonte - FLOGER (2009)

### 3.6 Projeto Geral de um Vaso de Pressão

Em projetos de vasos de pressão, existem alguns critérios, normas e especificações que devem ser seguidas para que se tenha o máximo de segurança, confiabilidade e disponibilidade do equipamento na planta industrial. Reatores de modo geral são vasos de pressão que, em seu interior, ocorre uma reação química.

Determinar a espessura mínima da parede do corpo, tampo e camisa, suportes, bocais, soldas, os testes que devem ocorrer no vaso são algumas etapas que devem ser rigorosamente seguidas, calculadas e inspecionadas a fim de que o vaso não tenha uma falha pré-matura ocasionando em acidentes muitas vezes fatais.

#### 3.6.1 Espessura mínima de parede

Vasos de pressão são equipamento estáticos que sofrem esforços devido a pressão externa (vácuo) ou interna. Para suportar esses esforços calcula-se a espessura da parede do vaso que suportará as pressões que o vaso está submetido, além do peso, ação do vento, intempéries, e todo tipo de força extra que o

equipamento estará submetido, além de uma sobresspesura para a corrosão que acontecerá em toda sua vida útil.

O uso de uma margem de corrosão é um acréscimo de espessura destinada a ser consumido pela corrosão ao longo da vida útil do equipamento. Na teoria, essa espessura é calculada a partir da taxa anual de corrosão (mm/ano) pelo tempo de vida útil do vaso, porém na prática são adotadas medidas para cada meio corrosivo.

- Meios poucos corrosivos: 1,5 mm
- Meios medianamente corrosivos: 3 mm
- Meios muito corrosivos: 4 a 6 mm

Com exceção de casos especiais, não é usual adotar margem de corrosão superior a 6 mm sendo geralmente substituído o material do vaso de pressão quando a sobre espessura de corrosão ultrapassa esse valor.

Segundo a ASME Seção VIII Divisão 1, as espessuras mínimas para vasos de pressão são:

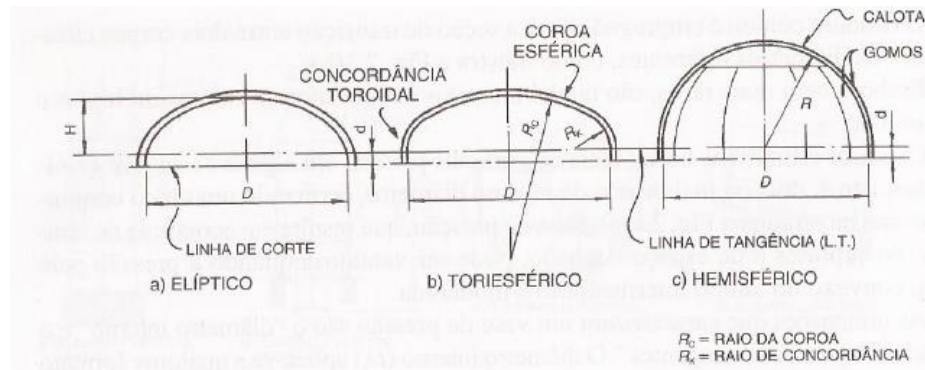
- Vasos de aço de alta resistência: 6,4 mm.
- Vasos para água, vapor ou ar comprimido: 2,4 mm.
- Vasos em geral, não incluídos nos casos acima: 1,6 mm.

### 3.6.2 Tampos

Em vasos de pressão a seleção do tampo mais aplicável para cada caso é algo de extrema relevância no projeto. Alinhar resistência mecânica, peso, facilidade de fabricação e disponibilidade de espaço físico é sempre um desafio em projetos desse tipo. Para aplicações em vasos de pressão, os tampos mais usualmente fabricados são: Elíptico, torisférico, hemisférico, cônico e plano como é mostrado na figura 6.

O tampo elíptico tem a seção transversal como uma elipse geométrica perfeita, sendo que o diâmetro do tampo é 4 vezes a altura dele. Esse tipo de tampo pode ser construído com a mesma chapa usada no corpo do vaso pois, a sua resistência à pressão interna é praticamente igual à do cilindro de mesmo diâmetro.

Figura 6 - Tipos de Tampos



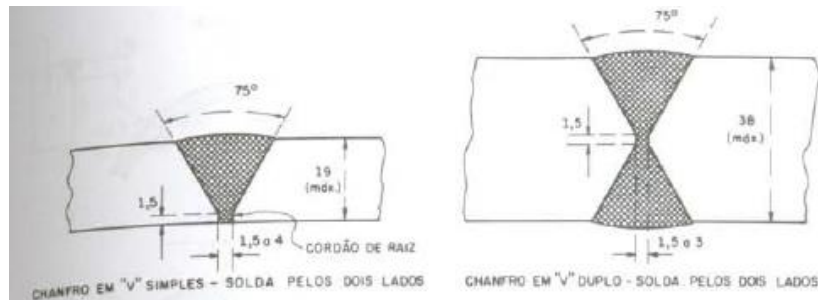
Fonte – Adaptada TELLES (1996)

### 3.6.3 Soldas e coeficiente de eficiência de solda.

Os vasos de pressão são construídos, na grande maioria das vezes, de chapas de aço ligadas entre si por soldagem. A solda é empregada não só no vaso propriamente dito, mas nos seus outros componentes como suportes, tubos, flanges e conexões. Segundo a norma da ASME, é obrigatório que todas as soldas de emenda de chapas no casco e tampo sejam soldas de topo, com penetração total e facilmente radiografadas, isso confere maior segurança na hora da fabricação e inspeção dos vasos. (TELLES, 1996)

A radiografia das soldas consiste em um teste de imagem feito durante a fabricação dos vasos para conferir a existência de trincas e descontinuidades no material que podem ocasionar uma falha precoce do vaso de pressão. A radiografia é amplamente utilizada por ser um ensaio não destrutivo e por ser um registro permanente do ensaio realizado, sendo anexado ao prontuário do vaso para verificação futura.

Figura 7 - Tipos de Solda de Topo



Fonte – Adaptada de TELLES (1996)

O coeficiente de solda (E) é destinado a compensar a menor resistência na região da solda, principalmente na ZTA, em relação ao restante da chapa. Segundo a norma da ASME Seção VIII, a determinação do coeficiente de solda vai depender da realização do teste de radiografia, se foi realizada solda em ambos os lados, o tipo de solda (exemplificado na figura 7) e o uso ou não de mata junta. No projeto foi utilizado o coeficiente de eficiência de solda igual a 1.00, seguindo os requisitos apresentados no anexo G.

#### 3.6.4 Pressão de Operação e Projeto

A pressão de operação do vaso é a condição no qual o equipamento estará submetido em condições normais de operação. A pressão de operação forma junto com a temperatura de operação um par de valores simultâneos com o qual o vaso irá trabalhar sendo definida por pressão medida no topo do vaso e a temperatura interna do equipamento.

A pressão de projeto, segundo Telles (1996), é a condição de projeto do vaso de pressão considerado para efeito de cálculo, ou seja, é o valor que será usado para calcular todos os componentes do sistema que compõe o vaso de pressão. Esses valores são confrontados com as normas que o vaso está submetido para realização do projeto, fabricação e montagem do vaso.

Usualmente, para vasos submetidos a pressão interna, são consideradas pressão de projeto o maior dos 3 valores abaixo:

- Pressão máxima de operação somada de 5% quando o dispositivo de alívio é operado por válvula piloto.
- Pressão máxima de operação somada de 10 % quando for usada válvula de alívio convencional ou balanceada.
- 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>

### 3.6.5 PMTA e Válvulas de Segurança

A PMTA ou Pressão Máxima de Trabalho Admissível nada mais é do que a pressão interna do vaso que causa uma tensão máxima igual à tensão admissível do material na temperatura de projeto. Ou seja, a PMTA é a maior pressão que a parte menos resistente do equipamento pode suportar para que se tenha segurança.

Segundo o código da ASME, a PMTA é o “maior valor permissível para pressão medida no topo do vaso na sua posição normal de trabalho na temperatura correspondente a pressão considerada tomando como referência o vaso com a espessura corroída”. Geralmente, por conta disso, a PMTA é usada como referência para abertura das válvulas de segurança, para que o equipamento não ultrapasse o valor da PMTA e venha entrar em colapso.

O uso de sistemas de segurança que visam garantir a integridade física dos equipamentos e das pessoas que trabalham próximos a vasos de pressão, além de necessária é obrigatória segundo a NR-13. Dispositivos de monitoramento e alívio de pressão devem ser instalados nos vasos de pressão a fim de evitar a falha desses equipamentos. A válvula de segurança tem o objetivo de permitir o escoamento de uma quantidade de fluido para que seja mantida a pressão no interior do vaso abaixo da PMTA.

Segundo a NR-13, todos os vasos de pressão devem constar em suas placas e prontuários os valores da pressão máxima de trabalho admissível.

### 3.6.6 Temperatura de Operação e Projeto

A temperatura de operação, nada mais é do que a condição de operação com o qual o vaso deverá operar em condições normais. Essa condição é levada em conta quando é feita o projeto do vaso para especificar o material de fabricação do equipamento.

As temperaturas nos vasos de pressão e reatores são um importante variável a ser controlada, visto que, as reações dentro desses equipamentos necessitam de uma faixa específica de pressão e temperatura para ocorrerem de forma mais eficiente possível. É importante ressaltar, que diferente da pressão de operação, onde existem válvulas de segurança, em vasos e reatores não existe nenhum instrumento completamente capaz de proteger o equipamento de uma súbita mudança de temperatura, sendo esse um dos fatores que devem ser levados em conta quando calculada a temperatura de projeto.

A temperatura de projeto, como o nome já diz, é uma condição feita para efeito de cálculo com base na temperatura e nas condições de operação do vaso. Segundo a ASME Seção VIII, a temperatura de projeto é a condição mais severa que o vaso possa a vim ser submetido em condições normais de operação. Sendo assim, a temperatura de projeto serve como parâmetro para realizar os cálculos de dimensionamento e especificação de um equipamento submetido a pressão.



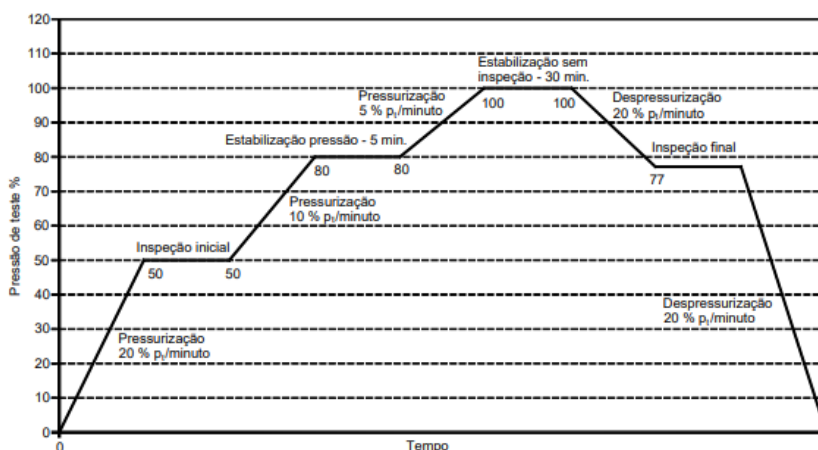
### 3.6.7 Testes no Vaso

#### a Teste Hidrostático

O teste hidrostático consiste no preenchimento completo do equipamento com água a temperatura ambiente, e submetendo esse vaso a uma pressão superior a PMTA ou superior a pressão de projeto. O objetivo principal desse teste é verificar falhas e defeitos de fabricação e montagem, principalmente nas partes soldadas, mandriladas, rosqueadas e acessórios do vaso.

Segundo a norma ASME Seção VIII Divisão 1, a pressão do teste hidrostático deve ser no mínimo 1,5 vezes a pressão máxima de trabalho admissível. Isso se dá, pois, o teste é realizado a temperatura ambiente e apenas uma única vez. É possível observar a duração média de um teste hidrostático, bem como os parâmetros observados durante o teste na figura 8.

Figura 8 - Gráfico de Teste Hidrostático



FONTE - Petrobrás 2014

Como é possível observar na figura 8, o teste hidrostático é realizado de forma gradual, sempre havendo inspeções e um tempo mínimo durante as mudanças de pressão interna do vaso testado.

### 3.6.8 Bocais para Vasos

Os bocais são as conexões por tubulação presentes nos vasos e reatores. Esses elementos são usados para realizar a entrada e saída de fluidos dos equipamentos de forma estanque possibilitando a desmontagem dos equipamentos para finalidades como manutenção e inspeção. (TELLES,1996)

Geralmente, devido a praticidade de desmontagem, as conexões presentes nos reatores são flangeadas, isso possibilita a retirada rápida e mais cômoda dos equipamentos que estão fixados por parafusos, porcas e juntas. É comum que os bocais de pequeno diâmetro (até 1 ½") sejam soldados, rosqueados ou com flange de pescoço. (TELLES,1996)

### 3.6.9 Bocais de visita e Inspeção

Os bocais de visita são aberturas presentes em vasos e reatores que tem como objetivo permitir a entrada para manutenção, inspeção, limpeza, montagem e retirada de peças internas desses equipamentos. São constituídos de tampos removíveis permitindo acesso de pessoas e máquinas dentro do vaso.

Segundo a ASME seção VIII Divisão 1, bocais de visita são obrigatórios em vasos de ar comprimido, de serviços que haja corrosão ou abrasão na sua parede interna. Segundo a ASME, os vasos com diâmetro interno:

- 300 a 450mm devem conter duas aberturas nominais de ½".
- 450 a 800mm devem conter duas aberturas nominais de 2".
- Maior que 900mm deve conter uma boca de visita, ou pelo menos duas aberturas de 6".

Usualmente é comum colocar bocais de visita em equipamentos com diâmetro nominal maior que 600mm, exceto, quando a geometria do equipamento impossibilita a instalação desse acessório. Para o acesso de pessoas na parte interno do vaso, o bocal deve conter no mínimo 16" de diâmetro, sendo que é comum adotar medidas

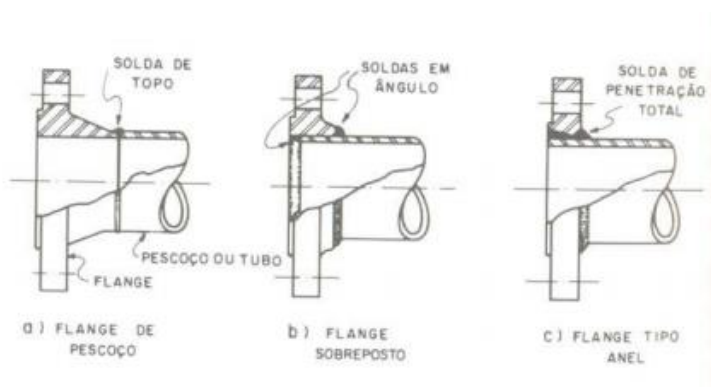
maior de acordo com a frequência de inspeção interna nesses equipamentos, chegando a adotar medidas em torno de 20" para equipamentos que necessitam de acesso constante ao seu interior.

Devido ao elevado peso desses bocais, é usado elementos de manobra a fim de facilitar a remoção e manuseio do tampo, evitando assim acidentes na sua operação. Elementos como turco e dobradiças são extensamente utilizadas para este fim. (TELLES, 1996)

### 3.6.10 Flanges

Flanges são elementos de ligação entre partes removíveis de um equipamento. São amplamente utilizados em vasos e reatores para ligar tubulações, instrumentos e bocais ao corpo do equipamento. Na figura 9 é possível observar alguns tipos de flanges.

Figura 9 - Tipos de Flanges



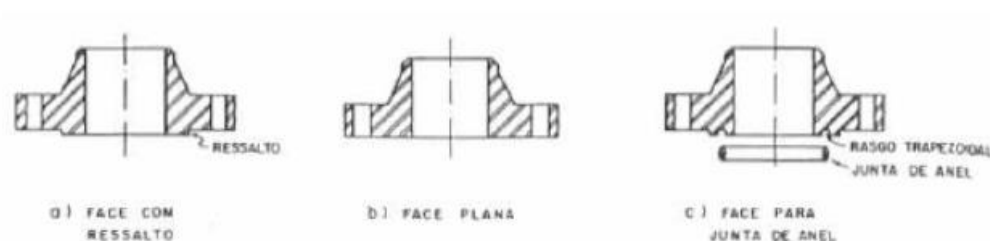
FONTE - TELLES (1996)

O flange de pescoço (fig. 9(a)) é o tipo com maior resistência mecânica e que dá maior distribuição de tensão. Seu corpo e construção tem o objetivo de transferir a tensão aplicada a ele para a tubulação, reduzindo assim a pressão na base do flange. Por ter maior custo agregado e maior dificuldade de obtenção, é pouco usado para

diâmetros maiores que 14" e não deve ser empregado em diâmetros menores que 1 ½". (TELLES,1996)

As faces dos flanges também podem ter vários tipos, sendo que três são os mais comumente usados, é possível observá-las na figura 10.

Figura 10 - Tipos de Faces de Flanges



Fonte - TELLES (1996)

A classe dos flanges é uma classificação segundo a ASME que define até qual pressão e temperatura o flange classificado suporta. Essa classificação é para flanges de aço carbono e vai de #150 até #600 (TELLES,1996). É possível observar as classes de flanges e suas respectivas temperaturas e pressão suportada no anexo H:

### 3.6.11 Suporte para Vasos

Todos os vasos de pressão devem conter suportes próprios para sustentação e fixação no solo, não se admitindo que esses equipamentos sejam suportados apenas pelas tubulações. De modo geral, os vasos de pressão são fixados por meio de saias fabricadas em aço estrutural, ou colunas e vigas de mesmo material.

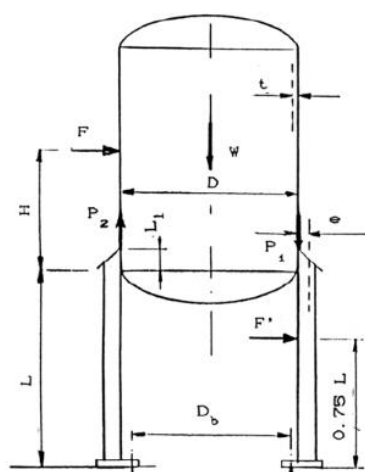
O suporte mais comum em vasos submetidos a pressão são as saias cilíndricas fixadas em uma base de concreto. Para melhor transmissão de esforços de pesos para a saia, o ideal é que o diâmetro da linha de centro da saia coincida com o diâmetro da linha de centro do casco, porém, essa construção é muito difícil, sendo

mais usual que o diâmetro da saia coincida com o diâmetro externo do vaso . É importante ressaltar que, a saia e as soldas aplicadas entre ela e o vaso deve estar posicionada de forma que não se sobreponha as soldas do casco do equipamento, permitindo a inspeção visual e radiográfica de ambas (TELLES,1996).

O material usado para saias em vasos e reatores geralmente é o aço-carbono estrutural, exceto quando o vaso é fabricado em aço carbono para baixas temperaturas.

Vasos verticais, devido ao seu tamanho, peso e local de instalação podem ser apoiados em colunas de sustentação. Essas colunas, geralmente são fabricadas como cantoneiras e perfis I, porém, devido a simetria e distribuição de cargas, algumas colunas são feitas de tubos (TELLES,1996). Na Figura 11 tem um exemplo de um vaso vertical sustentado por colunas.

Figura 11 - Vaso de Pressão apoiado em colunas



Fonte – FALCÃO (2008)

### 3.6.12 Camisas de Vapor e Purgadores

Muitos processos industriais necessitam que o fluido presente dentro de reatores e vasos de pressão sejam aquecidos para que as reações ocorram de forma

eficiente. Para isso, são instalados dispositivos de aquecimento externos dos vasos que proporcionam por condução o aquecimento do fluido, esses dispositivos são chamados de camisas externa de transferência de calor.

A grande vantagem do uso de camisas se comparadas com as serpentinas internas é que o aquecimento externo:

- Permite o uso de vários fluidos como meio de aquecimento
- O aquecimento é mais facilmente controlado
- Não a risco de contaminação com o fluido do reator
- Manutenção e limpeza do reator mais fácil.

Existem três tipos mais comuns de camisas externas, a camisa convencional de parede dupla, a serpentina helicoidal meia cana e a camisa com reentrâncias. A divergência entre elas é a construção, aplicação e controle de temperatura interna do vaso.

A camisa com serpentina helicoidal de meia cana é constituída de tubos cortados e soldados na parede do vaso, por onde o fluido de aquecimento irá passar e transferir calor por condução. Por ser mais rígido estruturalmente, e quase não submeter o vaso a pressão externa, esse tipo de aquecimento é indicado para vasos com grandes volumes e pressões elevadas do fluido de aquecimento, na ordem de 40kgf/cm<sup>2</sup>. Esse tipo de aquecimento pode ser subdividido em várias entradas e saídas para se ter um maior controle da temperatura interna do reator (TELLES,1996).

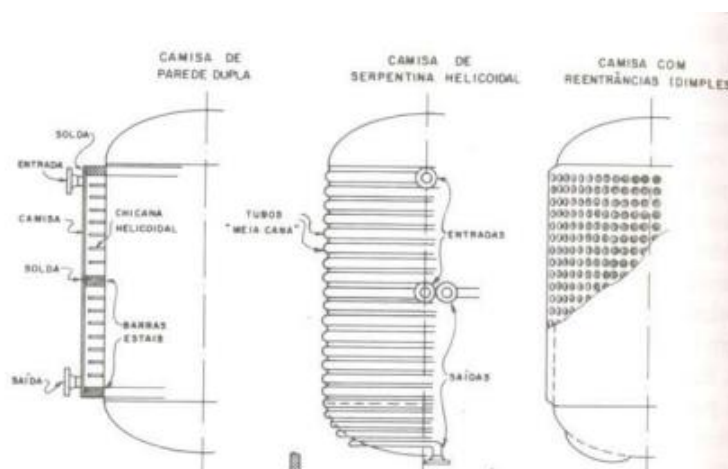
A camisa com reentrância é uma construção com chapa fina estampada em que as reentrâncias chamadas de *dimples* são soldados na parede do reator. A distancias entre os *dimples* está na ordem de 60-65mm e esse sistema deve ser empregado para pressões de camisa de até 20kgf/cm<sup>2</sup>.

A camisa de parede dupla é o tipo mais antigo, fácil e comum usado em equipamentos. Essa camisa é fabricada em paralelo com o vaso de forma que sua parede se permanece a uma certa distância da parede do vaso onde será deslocado o fluido para troca térmica. Esse tipo de camisa é conveniente ser usado para vasos

pequenos, de até  $5\text{m}^3$  e para pressões de camisa menores do que  $7\text{kgf/cm}^2$  (TELLES,1996).

Como é possível observar na figura 12, o modo de construção das camisas externas exemplificadas acima é bem distinto uma das outras e possuem características construtivas bem singulares.

Figura 12 - Tipos de Camisas Externas



Fonte - TELLES (1996)

### 3.6.13 Materiais de Construção

Existem uma infinidade de materiais que são utilizados para fabricação de vasos de pressão, de metálicos ferrosos e não ferrosos até materiais poliméricos reforçados. Dentre todos eles, o aço-carbono é o de maior uso na indústria de fabricação de vasos de pressão. Denominado de material de uso geral, os aços carbonos são empregados nos vasos de pressão em quase todas as ocasiões, exceto quando houver alguma circunstância que restrinja o seu uso.

O uso de aço carbono em reatores químicos está limitado ao tipo de operação e fluido que ele está operando. Em meios muito corrosivos, e em operações em que a finalidade do processo são para o consumo humano os reatores geralmente são fabricados em ligas de aços inoxidáveis. Em indústrias de etanol, o uso de reatores

fabricados dessa forma está restrito a área no qual são fabricados tanto o etanol como o açúcar.

#### a **Aço Inoxidável**

A grande maioria de vasos de pressão são construídos de aço carbono, denominado material de uso geral. Quando não é possível construir o equipamento com esse material emprega-se outras ligas, ou outras classes de materiais para vasos de pressão que suportem e atendam as características de projeto e operação do vaso.

Segundo Telles (1976) os aços inoxidáveis são aços de alta liga constituído de ferro cromo, níquel e molibdênio empregados principalmente devido à alta resistência a corrosão resultante do elemento de liga cromo presente no aço. Existem três classes principais de aços inoxidáveis, elas variam de acordo com a estrutura predominante na liga:

- Aços Austeníticos – Ligas de Fe-Cr-Ni, não-temperáveis.
- Aços Ferríticos – Ligas de Fe-Cr não-temperáveis
- Aços Martensíticos – Ligas de Fe-Cr Temperáveis

Pela facilidade da soldagem, somente os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados como material para construção de tampo, corpo, peças internas, tubos e espelhos em vasos e trocadores de calor. Os outros aços (martensíticos e ferríticos) devido a dificuldade na soldagem não são empregados para este fim, sendo utilizados como material para partes internas não soldadas como elementos de fixação e tubos de troca de calor. (TELLES,1976)

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam uma elevada resistência a fluência e à oxidação, como consequência disso, suas temperaturas limites de operação são bastante elevadas, exceto nos aços com baixo teor de carbono (tipos L e ELC), em que a temperatura limite de operação é de 400°C (TELLES,1976). Já a baixas temperaturas, todos os aços inox tem comportamento semelhante, sendo empregados até próximo ao zero absoluto.



Os aços inox são divididos por séries, cada uma delas tem características que distinguem entre si, e são aplicáveis pra cada situação particular. Um exemplo disso são os aços da série 300 e 400, o primeiro é um aço austenítico não magnéticos com estrutura CFC constituído de Fe-Cr-Ni, já o segundo são aços ferríticos ou martensíticos, magnéticos com estrutura CCC e constituído de Fe-Cr. (TELLES,1976)

Em reatores industriais, o uso de aços inoxidáveis é muito comum devido ao fluido operante na planta, a finalidade do produto no qual está sendo processado e os parâmetros de operação. No caso do pré-tratamento ácido, o fluido de trabalho é ácido sulfúrico diluído, nestes casos o uso de aço carbono se torna inviável, pois, o ácido sulfúrico em meio aquoso forma sulfato ferroso que é solúvel no ácido diluído, diminuindo consideravelmente a vida útil do equipamento. (TELLES,1976)

#### 3.6.14 Tensão Admissível dos Materiais

Tensão admissível são as tensões máximas que é adotada para efeito de cálculo do dimensionamento durante a etapa de projeto de um vaso de pressão. As tensões admissíveis variam de acordo com o material, o tratamento térmico realizado, o tipo de arranjo atômico, a estrutura e a temperatura no qual o vaso está operando.

As tensões admissíveis para equipamentos submetidos a pressão são definidas pelas normas de projeto para cada caso e para cada material adotado na sua construção. Como a resistência mecânica diminui com o aumento da temperatura, a tensão admissível dos materiais segue a mesma lógica até atingir a temperatura limite de uso prático do material. (TELLES,1976)

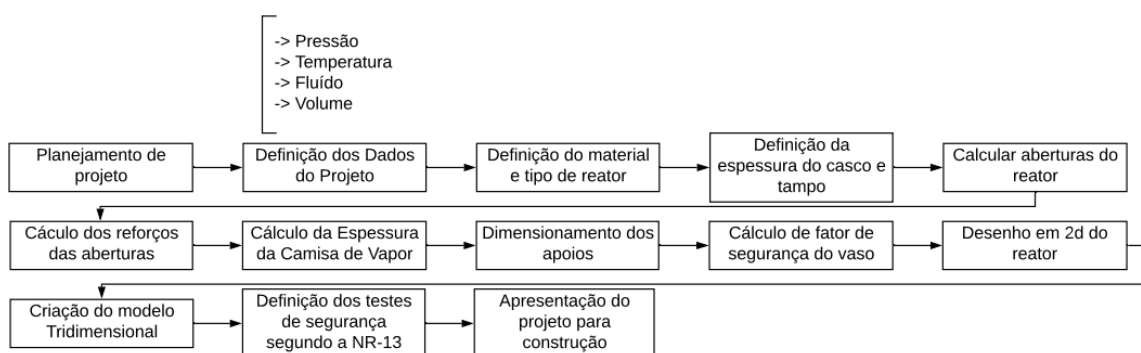
Em projetos mecânicos, existem tabelas que forcem as tensões admissíveis de cada material que constitui o vaso de pressão para as diversas faixas de temperaturas. Nos anexos A e B, é possível observar a variação da tensão admissível para aços carbonos e aços inoxidáveis de acordo com a temperatura na qual eles estão submetidos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Fluxograma do Projeto

Na figura 13 é possível observar todas as etapas de construção do projeto do reator, desde o planejamento até a apresentação final do projeto. As etapas que estão descritas no fluxograma são baseadas na norma ASME Divisão 1, e são definidas de acordo com os parâmetros de projeto, bem como temperatura de operação, pressão de operação e pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), o fluido contido no interior do vaso e o seu volume total.

Figura 13 - Fluxograma de construção do projeto



Fonte - Autor (2019)

### 4.2 Normas utilizadas no Projeto

Todo o projeto de construtivo, montagem e inspeção do reator de etanol 2G foi realizado conforme a norma da sociedade americana de engenharia mecânica, ou ASME seção VIII e Divisão 1.

O código da ASME seção VIII divisão 1 é a norma de vaso de pressão mais difundida aqui no Brasil, abrangendo desde a especificação dos materiais, projeto e cálculo, até a fabricação e inspeção do vaso. O presente projeto está dentro dos critérios da ASME seção VIII Divisão 1 por não ter as características dos itens abaixo:

- Vasos sujeitos a chama e vasos para ocupação humana

- Vasos com pressão de operação entre zero e 1 kgf/cm<sup>2</sup> ou acima de 200 kgf/cm<sup>2</sup>
- Vasos com diâmetro de 6" ou menores
- Vasos para água pressurizada com pressão de operação de até 20 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de até 99°C
- Vasos para água quente com capacidade de 0,454m<sup>3</sup>, temperatura de operação de 93°C e carga térmica de 200.000 btus.

### 4.3 Parâmetros de Projeto

Para realizar um projeto de vaso de pressão, o primeiro passo é definir os parâmetros de projeto: Tipo de fluido (composição química, concentração, densidade, impurezas), Temperatura e pressão de operação, temperatura e pressão de projeto, Volume armazenado e o tempo de residência, temperatura, viscosidade e peso molecular dos fluidos, perda de carga máxima admitida.

Sendo assim, segundo <sup>1</sup>KAZI et al (2010) (Anexo F), os parâmetros de operação de um sistema para pré-tratamento ácido de uma unidade de etanol de segunda geração é:

- Temperatura: 190°C
- Pressão: 13,17 bar
- Fluido: Ácido Sulfúrico diluído e particulado sólido
- Volume: 2.500 L
- Reator a Batelada

---

<sup>1</sup> KAZI, F. K. et al. **Techno-Economic Analysis of Biochemical Scenarios for Production of Cellulosic Ethanol**. National Renewable Energy Laboratory – NREL. 2010.

Para a ASME Seção VIII Divisão 1 a pressão de projeto é dada a partir da pressão de operação com acréscimo de 10% do seu valor. A temperatura de projeto tem um acréscimo de 30° a 50°C, isso é necessário para dar maior confiabilidade e segurança nos vasos de pressão. Sendo assim, os dados de projeto são:

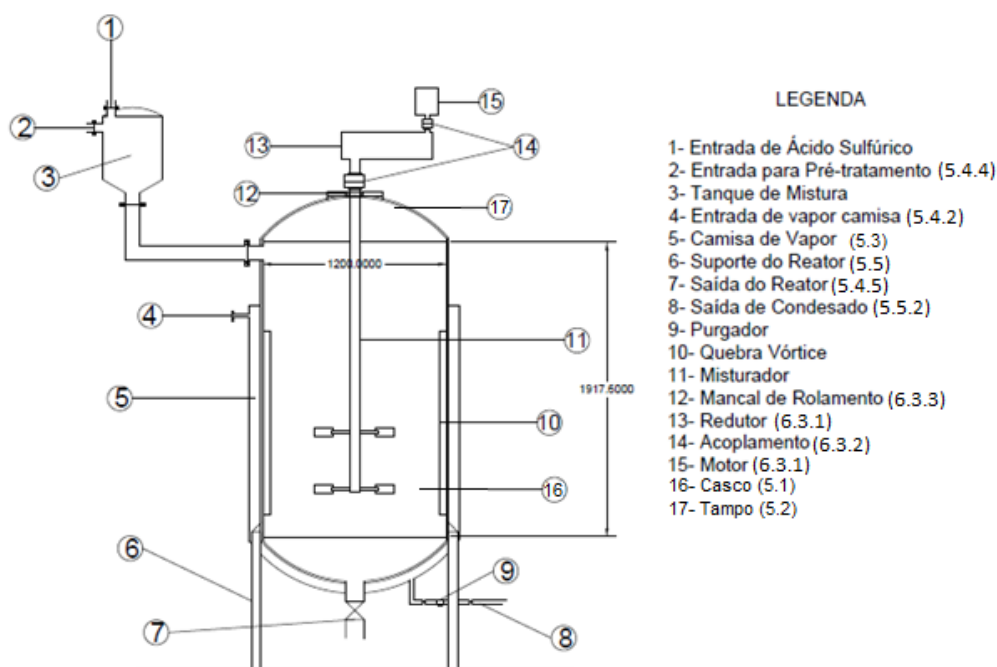
- Temperatura: 230°C
- Pressão: 15 bar

O fluxograma do processo produtivo encontra-se no anexo I na seção após as referências bibliográficas.

#### 4.4 Projeto do Reator de Pré-Tratamento de E2G

O projeto do reator reapresentado pela figura 14 apresenta os componentes do reator, bem como todos os seus acessórios. Neste croqui, pode-se identificar os componentes de caldeiraria (bocais, chapas e tampos), os componentes mecânicos (motor, redutor, acoplamentos e rolamentos), as tubulações e bocais.

Figura 14 - Croqui do Reator de Pré-tratamento Ácido



Fonte – Autor

## 4.5 Especificação do Projeto

As especificações do projeto do reator de etanol 2G é o início de todo o processo construtivo do equipamento, nesse tópico serão apresentados os dados de processo, os materiais de construção do reator, o aspecto físico e as dimensões do reator. É importante ressaltar que será um reator para pré-tratamento ácido a batelada, com misturador centrífugo, e toda a construção desse equipamento segue conforme a norma ASME seção VIII Divisão 1.

### 4.5.1 Vida útil dos reatores e vasos de pressão

Um dos principais parâmetros que são considerados na fabricação de reatores e outros equipamentos essenciais nos processos produtivos em indústrias é a sua vida útil. Muito se fala em custo benefício na hora de fabricação desses equipamentos, mas, com certeza, a vida útil é algo a ser considerado na hora do projeto de um reator químico.

Em indústrias químicas, reatores são o coração que faz todo o sistema funcionar, uma falha nesses equipamentos pode gerar milhões em prejuízos materiais, ambientais e financeiros. Por isso, uma vida útil longa, com confiabilidade e disponibilidade desses equipamentos é imprescindível durante todo o projeto e construção de reatores.

De acordo com a norma da Petrobrás N-253, a vida útil de vasos de pressão que são essenciais para os processos industriais gira em torno de 20 anos, ver tabela da norma no Anexo J.

### 4.5.2 Dimensões gerais

O projeto consiste em um reator de pré-tratamento ácido com um volume de 2.500L, sendo assim, temos as dimensões pré-definidas como:

Diâmetro  $D = 1,20$  m

Altura  $H = 1,920 \text{ m}$

Volume Total  $V = 2,62 \text{ m}^3$

#### 4.5.3 Seleção do material para as condições de projeto

Os fatores que foram considerados na escolha do material para a fabricação do reator foram:

- Fluido: Ácido Sulfúrico diluído 10% e Particulado Sólido
- Condição de Operação:
  - Pressão: 15 Bar
  - Temperatura: Máx. 230°C Min. 150°C
- Esforços Mecânicos: Tração, Compressão e vibração
- Custo

Com base nos fatores apresentados e nas informações contidas no item 3.11, o material escolhido para fabricação do reator foi o Aço Inoxidável 316 L devido a presença de ácido sulfúrico diluído no equipamento, a boa resistência mecânica e facilidade de montagem do aço inox austenítico. A camisa de vapor não entra em contato direto com o fluido corrosivo, sendo assim, o material de sua fabricação será aço carbono.

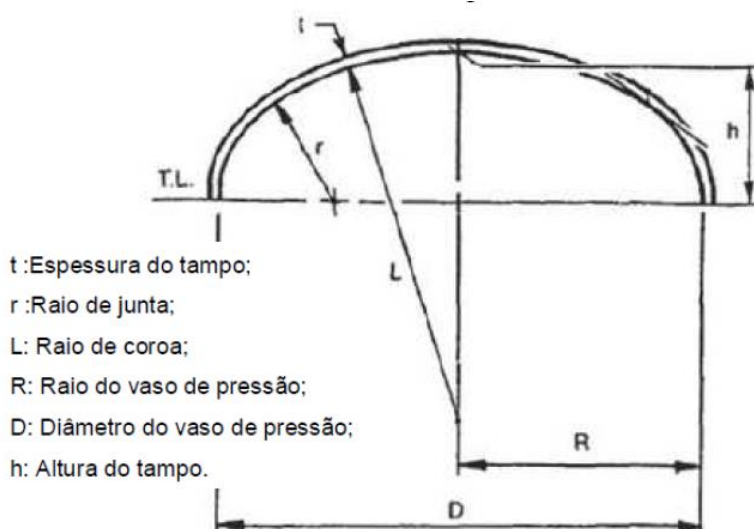
Os materiais foram escolhidos de acordo com o Anexo K, que exhibe os materiais para fabricação de vasos de pressão feitos de aço carbono, e o Anexo A com os materiais de aço inoxidável.

- Casco e Tampos: A-240 Gr 316 L
- Camisa: A-515 Gr 70
- Tubos: A-312 Gr 316 L
- Forjados: A-182 F 316 L

#### 4.5.4 Tipo do Tampo

Para o Projeto do reator de etanol 2g, foi escolhido o tampo elíptico (fig. 15) por apresentar uma relação custo benefício entre a resistência mecânica a esforços internos, a espessura da chapa do tampo e seu limite de escoamento. Nesse tipo de tampo, a relação entre o diâmetro do vaso e a altura do tampo é de 2:1.

Figura 15 - Tampo Elíptico



Fonte - MOSS (2004)

#### 4.6 Resumo dos dados do Projeto

Tabela 2 - Dados de Projeto

Tipo de Casco		Cilíndrico
Tipo de Tampo		Elíptico
Pressão de Operação (Máxima)		13,16 Bar
Pressão de Projeto		15 Bar
Temperatura de Operação		190 °C
Temperatura de Projeto		230 °C
Diâmetro Interno		1200 mm
Comprimento entre Tangentes		1917 mm
Volume Interno		2,62 m <sup>3</sup>

Sobre-espessura de Corrosão (Reator)		0,5 mm
Fluído		Ácido Sulfúrico 10%
Materiais	Casco e Tampo	A-240 Gr 316L
	Suportes	A-283 Gr C
	Pescoço de Bocais	A-403 WP 316L
	Boca de Visita	A-403 WP 316L
	Chapas Internas	A-240 Gr 316L
	Camisa	A-515 Gr 70
Juntas de topo		Tipo 1
Radiografia		Total
Eficiência de Junta do costado		1
Eficiência de junta do tampo		1
Fator do tampo elíptico		2

Fonte - Autor (2019)

## 5 CÁLCULOS DAS ESPESSURAS

### 5.1 Cálculo da espessura e PMTA do Casco

O código ASME distingue o cálculo entre cascos cilíndricos de pequena e grande espessura. Como o casco será fabricado em aço inox e a pressão de projeto descrita no item 4.5.3 não é alta, a espessura final dele será menor do que  $\frac{1}{2}$  raio, portanto o cálculo é feito a partir da equação:

$$e = \frac{PR}{SE - 0,6P} + C \quad \text{Eq. 7.1}$$

Onde:

e = espessura mínima para pressão interna

R = Raio interno

P = Pressão interna do projeto

S = Tensão Admissível do Material

E = Coeficiente de eficiência de solda



Tabela 3 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco

Espessura Casco	
R	600 mm
P	15 Mpa
S	1030 Mpa
E	1
C	0,5 mm

Fonte - Autor

Através dos dados exibidos na tabela 3, e utilizando a equação 7.1 é possível calcular a espessura do casco do reator.

$$e = 9,314mm$$

Segundo Telles (1994) a chapa será conformada com um processo a frio com uma perda de espessura de cerca de 25%. Portanto, a espessura da chapa para conformação é:

$$e = 9,314 * 1,25 = 11,64mm$$

Sendo assim, segundo a tabela de espessura padrão de chapa exibida no anexo C, a chapa para conformação do corpo do reator tem a espessura de **12,50mm**.

Após o cálculo da espessura da chapa é possível calcular a pressão máxima de trabalho admissível, admissível.

$$PMTA = \frac{SEe}{R+0,6e} \quad \text{Eq. 7.2}$$

$$PMTA = 21,21 \text{ Bar}$$

Relacionando com a pressão de operação do vaso, temos um fator de segurança na ordem de **1,50**. A partir da PMTA pode-se calcular a pressão de teste hidrostático que no casco é de **31,81 Bar**.

## 5.2 Cálculo da espessura e PMTA do Tampo Elíptico por Forjamento

O código ASME fornece fórmulas diferentes para os tampos elípticos com relação semieixos de 2:1 e para outras relações. No projeto do reator de pré-tratamento ácido será usado a relação 2:1, sendo assim, a espessura mínima do tampo é dada por:

$$e = \frac{PR}{SE-0,1P} + C \quad \text{Eq. 7.3}$$

Onde:

e = espessura mínima para pressão interna

R = Raio interno

P = Pressão interna do projeto

S = Tensão Admissível do Material

E = Coeficiente de eficiência de solda

Tabela 4 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco

R	600 mm
P	1,5 Mpa
S	103 Mpa
E	1
C	0,5 mm

Fonte - Autor

Sendo assim, a espessura mínima do tampo elíptico do vaso a partir dos dados disponíveis na tabela 4 e a partir da equação 7.3, é:

$$e = 9,25 \text{ mm}$$

De acordo com Telles (1994) chapa será conformada com um processo a frio com uma perda de espessura de cerca de 25%. Portanto, a espessura da chapa para conformação é:

$$e = 9,25 * 1,25 = 11,56mm$$

Segundo a tabela de espessura padrão de chapa exibida no anexo C, a chapa para conformação do corpo do reator tem a espessura de **12,50mm**.

Com a espessura do tampo calculada, é possível exibir o valor da pressão máxima de trabalho admissível para o tampo elíptico.

$$PMTA = \frac{SEe}{R+0,1e} \quad \text{Eq. 7.4}$$

$$PMTA = 19,81 \text{ Bar}$$

A partir dos dados de pressão de operação e PMTA, o fator de segurança para o tampo é de **1,51** e a pressão de teste hidrostático é de **29,71 bar**.

### 5.3 Cálculo da espessura e PMTA da Camisa de Vapor

A camisa de vapor vai fornecer a temperatura de operação do reator, para cálculo de sua espessura, utiliza-se a equação 7.1.

Tabela 5 - Dados para Cálculo da Espessura do Casco

R	620 mm
P	1,2 Mpa
S	132 Mpa
E	1
C	1 mm

Fonte - Autor

Sendo assim, a espessura mínima da camisa de vapor do vaso a partir dos dados disponíveis na tabela 5 é:

$$e = 6,66 \text{ mm}$$

De acordo com Telles (1994) a chapa será conformada com um processo a frio com uma perda de espessura de cerca de 25%. Portanto, a espessura da chapa para conformação é:

$$e = 6,66 * 1,25 = 8,33mm$$

De acordo com o anexo C, a chapa para conformação do corpo do reator tem a espessura de **9,5mm**.

Com a espessura da camisa calculada, é possível exibir o valor da pressão máxima de trabalho admissível a partir da equação 7.2, assim obtém-se:

$$PMTA = 17,60 \text{ Bar}$$

A partir dos dados de pressão de operação e PMTA, o fator de segurança para da camisa é de **1,46** e o valor da pressão do teste hidrostático é **26,4 Bar**.

#### 5.4 Cálculo do reforço de bocais e outras aberturas

O cálculo mecânico dos bocais é realizado para determinar:

- Espessura da parede do bocal
- Necessidade de reforços
- Dimensionamento dos reforços
- Seleção de flanges

A norma que regulamenta a espessura da parede do bocal e de seus respectivos reforços é o parágrafo UG-37 do código ASME, Seção VIII Divisão 1.

O cálculo da parede do bocal é dado pela equação:

$$e = \frac{PR}{SE+0,4P} + c \quad \text{Eq. 7.5}$$

Onde:

P = Pressão interna de Projeto.

R = Raio do bocal.

S = Tensão admissível para o material.

E = Coeficiente de eficiência de solda.

C = Sobre -espessura de corrosão.

Os bocais são basicamente aberturas realizadas no casco ou no tampo do vaso que configura regiões de fragilidade e concentração de tensões. Em alguns casos, é necessário projetar reforços para que a operação nesses equipamentos seja realizada com maior segurança.

O projeto dos reforços em bocais é realizado através de um método conhecido como compensação de áreas, onde a área do vaso retirada para instalação do bocal é compensada através do reforço, como é possível observar no Apêndice C.

A partir das informações apresentadas no apêndice, é possível dimensionar os bocais para o reator de pré-tratamento ácido, bem como, seus devidos reforços. Na tabela 6 será apresentado todos os bocais e seus respectivos diâmetro nominal.

Tabela 6 - Bocais instalados no Reator

Bocais	
Diâmetro	Quantidade
1 1/2"	2
2"	2
3"	1
4"	1
20"	1

Com o diâmetro nominal de cada bocal é possível calcular a espessura da parede mínima através da equação geral, eq. 7.5.

#### 5.4.1 Cálculo do Bocal para Instrumentos $\frac{3}{4}$ "

Os instrumentos do reator são equipamentos que monitoram os parâmetros internos para que a reação ocorra de forma mais eficiente possível. No reator de pré-tratamento ácido, tem-se dois instrumentos de medida, o primeiro é um termopar que monitora a temperatura interna do fluido, e o segundo é um medidor de pressão que nesse projeto serão dois, um analógico e um digital.

Os bocais para instrumentos, também chamados de tube, terão o diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " e serão confeccionados no mesmo material do reator. Seguindo a equação 7.9, tem-se que:

$$e = 3,13 \text{ mm}$$

A partir do valor da espessura mínima da parede, é possível verificar se existe a necessidade de reforço no bocal de  $\frac{3}{4}$ ". Para isso, calcula-se as áreas A1, A2 e A3 descritas no item 6.3. Fazendo o cálculo, tem-se que: A1 = 316,44 mm<sup>2</sup> A2 = 25,257 mm<sup>2</sup> A3 = 151,38 mm<sup>2</sup>.

A condição A2 + A3 > A1, não é satisfeita. Com isso, a partir do Apêndice C, a espessura do anel de reforço é de 6,3mm e a largura é: L = 22,23 mm

Com base no Anexo H, a classe de flange que atende os parâmetros de projeto é #300. De acordo com a espessura mínima para esse bocal o tubo de  $\frac{3}{4}$ " tem schedule 160.

#### 5.4.2 Cálculo do Bocal de entrada de vapor na camisa 1 $\frac{1}{2}$ "

No reator de pré-tratamento ácido o aquecimento é realizado a partir da camisa de vapor, que é alimentada a partir de bocais de 1 ½". A espessura desses bocais é dada pelos dados de projeto e a equação 7.9:

$$e = 3,27 \text{ mm}$$

A partir do valor obtido, é possível calcular as áreas A1, A2 e A3, especificadas acima para verificar se existe a necessidade de reforços nos bocais. Com base no valor de e obtido acima, é possível escolher uma espessura de chapa que atenda satisfatoriamente às exigências impostas pelos cálculos. Assim, para tubos de 1 ½", tem-se que: A1 = 481,89 mm<sup>2</sup> A2 = 88,99 mm<sup>2</sup> A3 = 112,76 mm<sup>2</sup>

A condição A2 + A3 > A1, não é satisfeita. A espessura da chapa de reforço para diâmetros pequenos de 6,3mm segundo a ASME.

Assim, a largura mínima para o reforço empregado nos bocais de 1 ½" é de: L = 7,37 mm

Como foi visto no capítulo 3.6.10, e de acordo com os parâmetros de projeto da camisa de vapor, o flange recomendado para esse bocal é um flange de pescoço com face de ressalto e classe #150 schedule 80.

#### 5.4.3 Cálculo do Bocal de 2".

O bocal de 2" será usado para passagem do eixo do misturador da parte externa do vaso, onde ficará um redutor de velocidade, para a parte interna. Nesse bocal estão alocados um rolamento cônico, um mancal e um selo mecânico. O flange desse bocal será configurado para alocar o mancal do rolamento.

Sendo assim, primeiro é calculado a espessura mínima do bocal de acordo com a equação 7.9

$$e = 3,36 \text{ mm}$$

Com o cálculo da espessura mínima, é possível calcular as áreas A1, A2 e A3 para verificar a necessidade de reforço nesse bocal. Realizando os cálculos tem-se que: A1 = 605,68 mm<sup>2</sup> A2 = 129,78 mm<sup>2</sup> A3 = 128,89 mm<sup>2</sup>

A condição  $A2 + A3 > A1$ , não é satisfeita. Com isso, a partir do Apêndice C, a espessura do anel de reforço é de 12,5mm e a largura é:  $L = 27,54 \text{ mm}$

A partir do que foi apresentado no capítulo 3.6.10, o flange que melhor se aplica aos bocais de 2" é um flange de pescoço com face de ressalto e classe #300 schedule 80.

#### 5.4.4 Cálculo do Bocal de 3"

Os bocais de 3" são alocados direto no reator, eles fazem parte da alimentação do material lignocelulósico para o interior do vaso juntamente com o ácido que foi previamente misturado à biomassa. De acordo com a equação 7.5 a espessura do bocal é:

$$e = 3,5516 \text{ mm}$$

A partir desse valor é possível calcular as áreas  $A1$ ,  $A2$  e  $A3$ , para verificar se existe a necessidade de reforço nesse bocal. Assim, calculando-se as áreas chega-se aos valores:  $A1 = 988,04 \text{ mm}^2$   $A2 = 171,805 \text{ mm}^2$   $A3 = 473,647 \text{ mm}^2$

A condição  $A2 + A3 > A1$ , não é satisfeita. Com isso, a partir do Apêndice C, a espessura do anel de reforço é de 6,3mm e a largura é:  $L = 27,19 \text{ mm}$

A partir do que foi apresentado no capítulo 3.6.10, o flange que melhor se aplica aos bocais de 3" é um flange de pescoço com face de ressalto e classe #300 schedule 40.

#### 5.4.5 Cálculo do Bocal de 4".

O bocal de 4" é a saída do reator, como existe material particulado, o diâmetro de saída deverá ser maior que o diâmetro de entrada para facilitar a remoção do material sólido. A espessura desse bocal de acordo com a equação 7.5 é:



$$e = 3,735 \text{ mm}$$

Sendo assim, é possível calcular as áreas A1, A2 e A3 para que então verificar se existe a necessidade de reforço no bocal. A partir dos dados de projeto, os valores das áreas para bocais de 4" são: A1 = 609,15 mm<sup>2</sup> A2 = 89,63 mm<sup>2</sup> A3 = 132,08 mm<sup>2</sup>

A condição A2 + A3 > A1, não é satisfeita. Com isso, a partir do Apêndice C, a espessura do anel de reforço é de 6,3mm e a largura é: L = 30,75 mm

A partir do que foi apresentado no capítulo 3.6.10, o flange que melhor se aplica aos bocais de 4" é um flange de pescoço com face de ressalto e classe #300 schedule 40.

#### 5.4.6 Cálculo do Bocal de 20".

O bocal de 20" será instalado ao centro do reator para ser usado como bocal de visita e inspeção, algo exigido pela norma NR -13 e a ASME. Sendo assim, a espessura mínima do bocal de 20" com base na equação 7.5:

$$e = 6,677 \text{ mm}$$

Com a espessura mínima, pode-se calcular as áreas A1, A2 e A3 utilizando a regra da compensação das áreas para verificar se existe a necessidade de reforço nesse bocal: A1 = 6160,71 mm<sup>2</sup> A2 = 331,84 mm<sup>2</sup> A3 = 20,47 mm<sup>2</sup>

A condição A2 + A3 > A1, não é satisfeita. Com isso, a partir do Apêndice C, a espessura do anel de reforço é de 8 mm e a largura é: L = 287,62 mm

A partir do que foi apresentado no capítulo 3.6.10, o flange que melhor se aplica aos bocais de 20" é um flange de pescoço com face de ressalto e classe #300 schedule 20.

A partir da tabela 7, tem-se uma síntese do capítulo 5.4, com a quantidade dos bocais, a utilidade de cada um, a espessura do tubo, classe dos flanges e a espessura dos reforços.

Tabela 7 - Resumo do dimensionamento dos bocais

Acessório	Quantidade	Bocal DIN	Reforço	SCH TUBO	Espessura do Tubo	Tipo de Flange	Classe do Flange
Bocal Camisa Vapor	2	1 ½"	19 mm	80	5,08 mm	Pescoço com Ressalto	#150
Bocal de Instrumento	2	¾"	-	160	5,56 mm	Pescoço com Ressalto	#300
Bocal do Misturador	1	2"	19 mm	80	5,43 mm	Pescoço com Ressalto	#300
Bocal de Entrada	1	3"	6,3 mm	40	5,49 mm	Pescoço com Ressalto	#300
Bocal de Saída	1	4"	6,3 mm	40	6,02 mm	Pescoço com Ressalto	#300
Bocal de Visita	1	20"	8 mm	20	9,53 mm	Pescoço com Ressalto	#300

Fonte – Autor

### 5.5 Cálculo dos Suportes e Olhal de Içamento do Reator

Para o cálculo dos suportes e olhal de içamento é necessário saber qual o peso total do reator supondo que ele esteja completamente cheio de água. Como a densidade da água é 1g/cm<sup>3</sup>, e o reator tem um volume total de 2,62m<sup>3</sup>, o peso líquido do reator é de 2.620kg, a massa do equipamento vazio, de acordo com a simulação no SolidWorks® é de 2.062 kg, totalizando uma massa total de 4.682 kg.

Para a quantidade de colunas que o reator deve ter, a principal dimensão que deve-se observar é o diâmetro do equipamento. Para vasos com diâmetro entre 1041mm e 1350mm a quantidade de colunas de sustentação é 4 fabricadas em chapas de 3/8" com seção quadrada de 3". A chapa da base deve ter a dimensão de 155x155x12,5 e o diâmetro do parafuso é de ¾".

Já o olhal de içamento, que é fabricado em aço carbono forjado, o parâmetro observado é o peso total do vaso, para equipamentos com peso de até 20 toneladas, usa-se o olhal tipo 0 de acordo com o Anexo L:

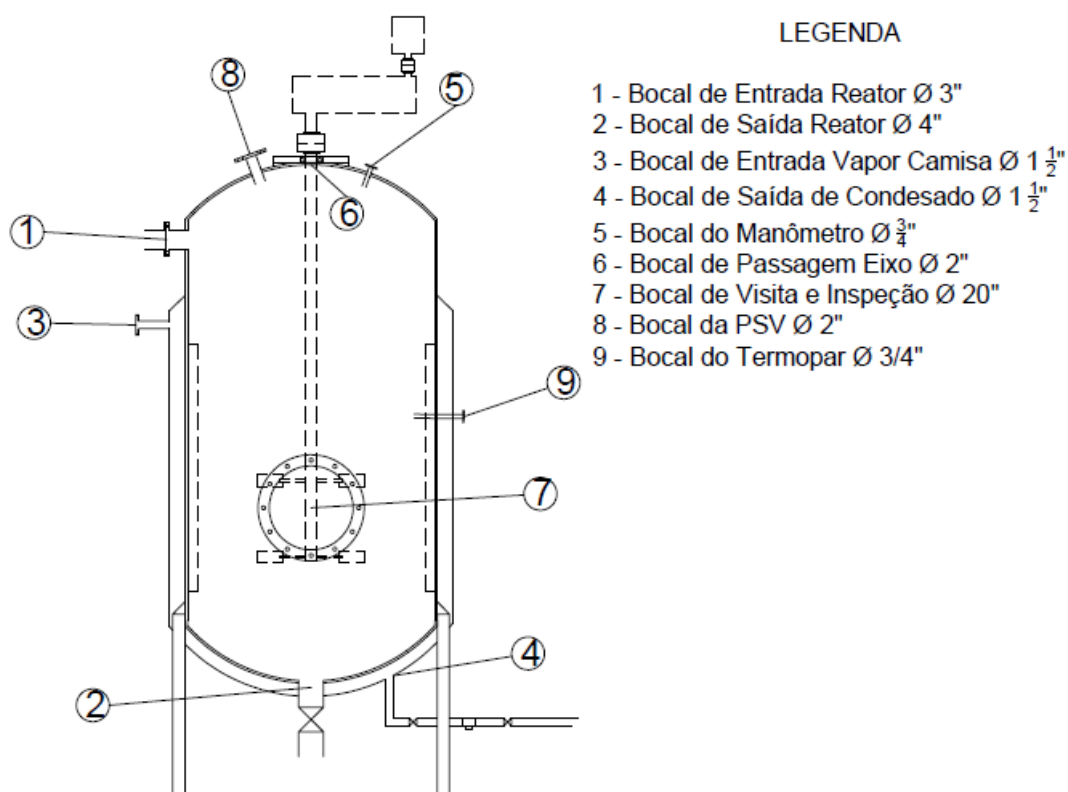
## 5.6 Posicionamento dos bocais no Reator.

Os bocais em reatores são posicionados de forma estratégica para que o peso relativo esteja o mais próximo do centro inferior do reator, para que a ação do peso da tubulação conectada não influencie e danifique os suportes dos reatores. Além disso, deve-se garantir que a alimentação seja na parte lateral e a saída do reator seja no fundo com um diâmetro maior devido à presença de material particulado.

No reator de pré-tratamento ácido existem bocais para a passagem do fluido de trabalho (1 e 2), bocais para passagem do vapor e condensado da camisa (3 e 4), bocais para instrumentos (5, 8 e 9), bocal de visita (7) e o bocal para a passagem do eixo do misturador (6).

Sendo assim, é possível mapear os bocais presentes no reator e na sua camisa de vapor, através da figura 16:

Figura 16 - Posicionamento dos Bocais



Fonte – Autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados em três seções, a primeira é a lista de materiais que está dividida em caldeiraria e usinagem, tubulação, instrumentação e mecânica, a segunda serão apresentados os desenhos em 3d seguido dos testes no equipamento em software CAE, e por fim a documentação técnica com os desenhos em detalhes em plataforma CAD.

No reator de pré-tratamento ácido, existe materiais e equipamentos de caldeiraria que são as chapas e suas respectivas soldas. Tem a área de mecânica que abrange os rolamentos, motor e o redutor do misturados, assim como as juntas, flanges e válvulas do equipamento. Na tubulação, será abordado os diâmetros dos tubos e suas respectivas espessuras de paredes e por fim para monitoramento e controle do reator está a área de instrumentação.

### 6.1 Caldeiraria e Usinagem

A caldeiraria é a etapa inicial da construção do reator, ela é responsável por dar forma as chapas e realizar as soldas para fabricação do equipamento. Na tabela 8 tem-se uma síntese dos materiais, soldas, espessuras de chapas e atividades da caldeiraria para a fabricação do reator.

Tabela 8 - Caldeiraria

Item	Material	Espessura de Chapa	Eletrodo	Calandragem
Casco	A-240 Gr	1/2"	6330	Sim
	316L			
Tampo	A-240 Gr	1/2"	6330	Sim
	316L			
Camisa	A-515 Gr 70	3/8"	6773	Sim
Quebra Vórtice	A-240 Gr	1/8"	6330	Não
	316L			

Pás Misturador	A-240 Gr 316L	1/8"	6330	Sim
Suportes	A-283 Gr C	6,3 mm	6773	Não
Reforço Bocal 1 ½"	A-240 Gr 316L	19 mm	6330	Sim
Reforço Bocal 2"	A-240 Gr 316L	19 mm	6330	Sim
Reforço Bocal 3"	A-240 Gr 316L	6,3 mm	6330	Sim
Reforço Bocal 4"	A-240 Gr 316L	6,3 mm	6330	Sim
Reforço Bocal 20"	A-240 Gr 316L	8 mm	6330	Sim

Fonte - Autor

## 6.2 Tubulação

A tubulação presente no reator tem a finalidade de transportar os fluidos para a parte interna e externa do equipamento, servir como acesso ao interior do reator e servir como base para instalação de instrumentos de medição e controle.

Uma síntese das tubulações presentes no equipamento é dada pela tabela 9, que mostra todas as tubulações e seus respectivos diâmetro nominal, espessura de parede, schedule, material e conexão.

Tabela 9 - Tubulação

Item	Diâmetro	Schedule	Material	Eletrodo
Entrada Reator	3"	40	Aço Inox 316L	6330
Saída Reator	4"	40	Aço Inox 316L	6330
Entrada da Camisa	1 1/2"	80	Aço Carbono	6773
Saída da Camisa (purgador)	1 1/2"	80	Aço Carbono	6773
Passagem Eixo Misturador	2"	40	Aço Inox 316L	6330
Entrada do Termopar	3/4"	160	Aço Inox 316L	6330
Bocal de Visita	20"	20	Aço Inox 316L	6330

Fonte – Autor

### 6.2.1 Instrumentação

Para supervisionar o reator na pressão e temperatura adequada para o pré-tratamento ácido é necessário que haja instrumentos que monitorem esses parâmetros na parte interna do equipamento. Para isso, foi selecionado um termopar rosqueado tipo T com um diâmetro de  $\frac{3}{4}$ " e a haste alongada. Para que seja monitorada a temperatura interna.

Na operação do reator, é necessário também monitorar a pressão interna do equipamento, a fim de que a pressão fique sempre próxima a de operação e se ocorrer algo atípico seja acionada a psv como medida de segurança. Para medir a pressão no interior do vaso, será usado um manômetro analógico para visualização do operador e um manômetro digital para monitoramento na central de comando. Sendo assim, é possível observar a lista de instrumentos na tabela 10.

Tabela 10 - Instrumentação

Item	Tipo	Diâmetro	Material Corpo	Range
Manômetro Analógico	Bourdon	3/4"	Aço Inox	0 - 25 kgf/cm <sup>2</sup>
Manômetro Digital	D100PS	3/4"	Aço Inox	0 - 700 kgf/cm <sup>2</sup>
Termopar	T	3/4"	Aço Inox	-210°C a 400°C
PSV	Mola	2"	Aço Inox	19kgf/cm <sup>2</sup> (Set Point)

Fonte - Autor

### 6.3 Mecânica

A mecânica foi dividida em 4 partes para facilitar o entendimento do projeto. Sabe-se que a área mecânica tem um papel fundamental dentro do processo de obtenção de etanol 2G no reator, e que é nela que é focada a manutenção preventiva nesse equipamento.

Sendo assim, essa seção foi dividida em motor e redutor, acoplamentos (motor e redutor, redutor e eixo), rolamentos do eixo do misturador e o selo mecânico para que os fluídos e a pressão interna se mantenha dentro dos parâmetros de processo.

### 6.3.1 Motor e Redutor

A parte mecânica do reator se resume ao misturador e seus componentes mecânicos como motor, redutor, acoplamento, rolamentos e mancais. O projeto dos componentes mecânicos se baseou em um misturador com eixo de 1" com rotação de 150 RPM, sendo que os dados mais completos de operação são possíveis observar na tabela 11:

Tabela 11 - Dados do sistema do misturador

<b>Equipamento – Misturador</b>		
<b>Item</b>	<b>Dados</b>	
Rotação Misturador	100	Rpm
Comprimento	1650	mm
Motor	10	CV
Rotação Motor	1750	Rpm
Serviço	Moderado	
Fator de Serviço	1,5	
Potência Consumida	0,75	KW
Tempo de Operação	24	H
Temperatura	230	°C
Redução	1:18	
Torque Requerido	7,1625	Nm

Fonte - Autor

De acordo com os dados apresentados na tabela 11, e consultando a tabela do anexo L e M para redutores, tem-se que o equipamento que melhor se adequa a exigência do reator de pré-tratamento ácido é um redutor rosca sem fim tamanho 6 com redução 1:20, e torque de saída de 14,4 Nm. Com o dimensionamento do redutor é possível especificar o motor para esse redutor.

Tabela 12 - Dados do Redutor do Misturador

<b>Motor do Redutor</b>		
Potência Consumida	0,75	Kw
Rendimento do Redutor	72	%
Potência Necessária na Entrada	1,0416667	kw

Potência do Motor 1,4172336 Cv

Fonte - Autor

Seguindo os dados apresentados na tabela 12, o motor mais adequado para ser acoplado ao misturador é um motor de 1,5CV de 4 polos.

### 6.3.2 Acoplamentos

Os acoplamentos são elementos de máquinas que a união entre eixos de equipamentos diferentes. No misturador existem dois acoplamentos que unem o motor ao redutor e o redutor ao eixo do misturador. Assim, pode-se calcular a partir dos dados de projeto, os dados apresentados no item 6.3.1 e o Anexo O, os acoplamentos que melhor se adequa no reator.

Para fazer os cálculos para dimensionamento do acoplamento é necessário que sejam estipulados os parâmetros exibidos na tabela 13.

Tabela 13 - Dados e Especificação dos Acoplamentos

<b>Acoplamento - Motor - Redutor</b>	<b>Dados</b>
Fator T - 24h/dia	1,12
Fator R (Misturador)	1,6
Fator F	1,792
N*F/n	0,01024
Acoplamento Teteflex	D-3

<b>Acoplamento Redutor - Misturador</b>	<b>Dados</b>
Fator T - 24h/dia	1,12
Fator R	1,6
Fator F	1,792
N*F/n	0,1792
Acoplamento Teteflex	D-9

Fonte - Autor



### 6.3.3 Selo Mecânico

Os selos mecânicos são usados para impedir a passagem ou vazamento de fluido em equipamentos rotativos. No reator, será usado um selo mecânico na saída do misturador para que a pressão interna do reator não caia devido a vazamento durante a operação.

Por operar com um fluido corrosivo o selo mecânico não pode ser fabricado com qualquer material, sendo um equipamento especial para atuar a pressões de até 15kgf/cm<sup>2</sup>, meio corrosivo e temperatura de cerca de 230°C. Sendo assim, a melhor alternativa que atende os requisitos de projeto é o selo mecânico de silício com sede monolítica em tungstênio, com diâmetro de 1”.

## 6.4 Modelagem em 3d software SolidWorks®

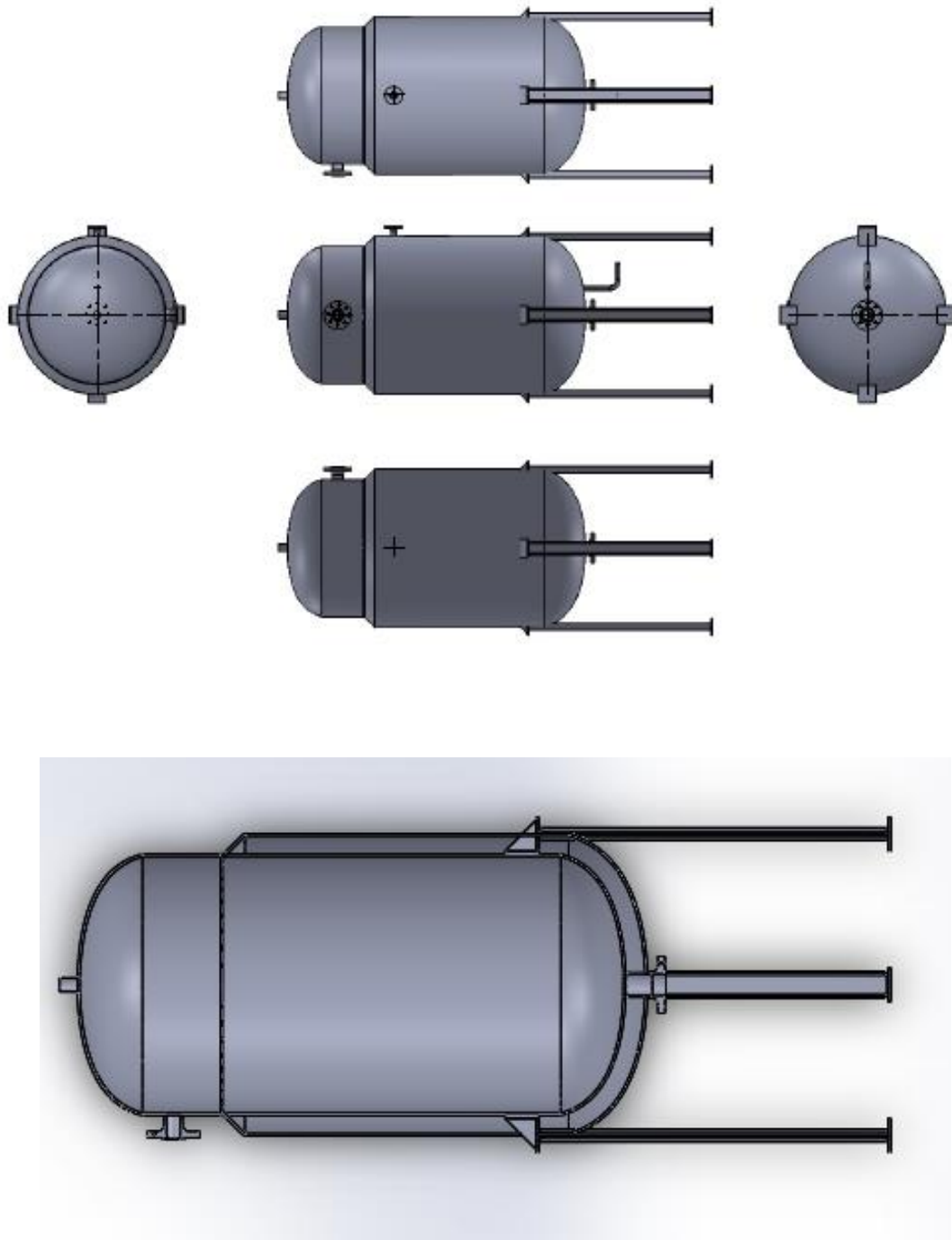
A modelagem em 3d tem o objetivo de facilitar a visualização geral do reator de pré-tratamento ácido de etanol 2G e identificar os pontos mais relevantes do projeto.

Na figura 17 é possível observar as vistas lateral, superior e inferior do reator, com todos os acessórios e a camisa de vapor. A visão em corte dá uma noção do volume do reator e da camisa de vapor, assim como a espessura das chapas de cada um deles.

Na figura 18, é possível identificar os acessórios com maior precisão através das vistas em detalhes dos flanges, soldas caimento das chapas. No detalhe G e K é possível identificar as chapas da camisa de vapor e a solda aplicada unir a camisa de vapor no corpo do reator. Os detalhes I, J e H tem uma visão dos bocais e flanges presentes no reator.

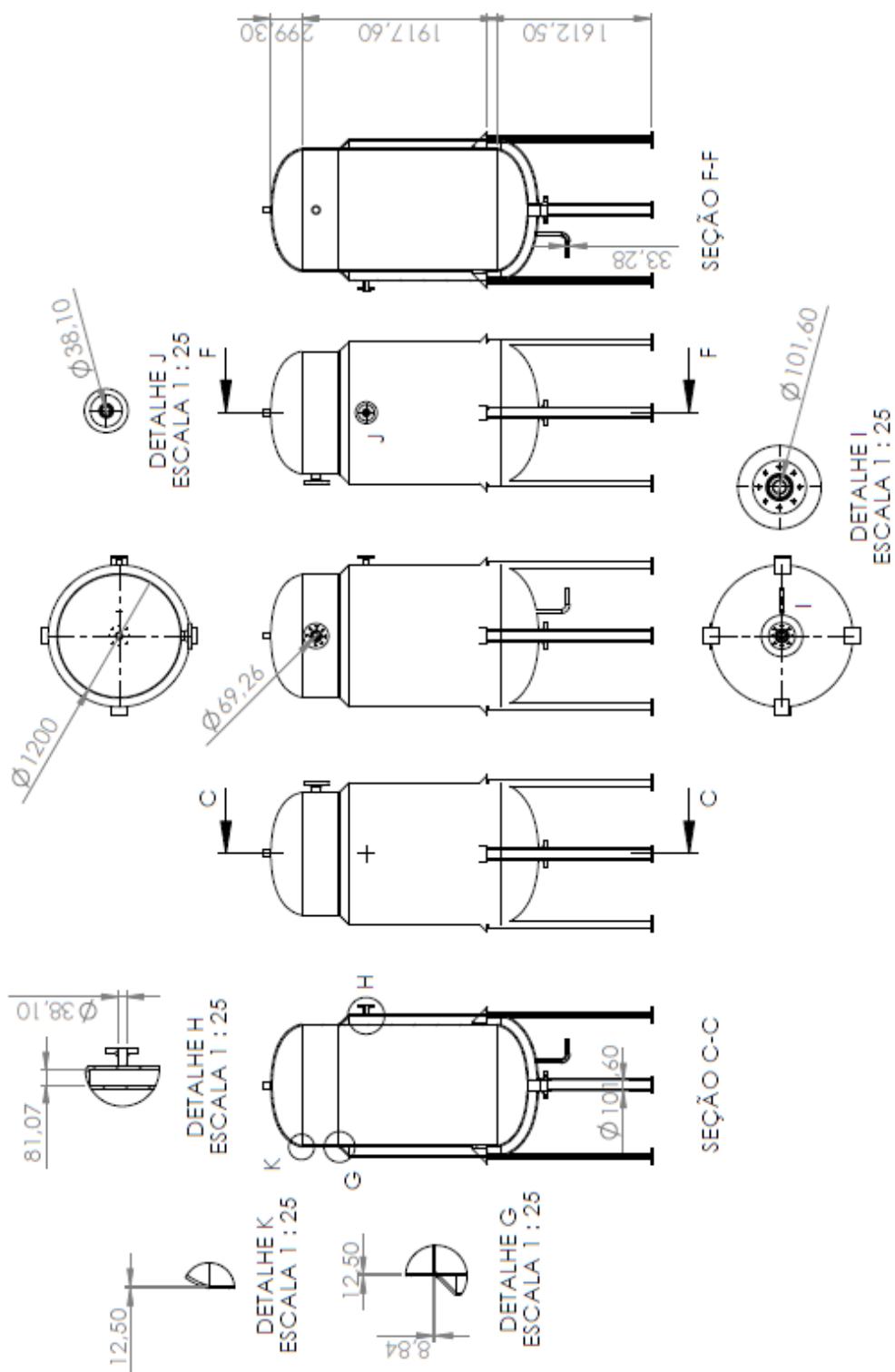
A partir desses desenhos foi realizado o teste hidrostático (TH) e o teste de deformação durante o TH, esses testes serão apresentados na seção 6.5.

Figura 17 - Modelagem em 3d do reator



Fonte – Autor

Figura 18 - Desenho em 2d da modelagem com detalhes



Fonte – Autor

#### 6.4.1 Teste Hidrostático.

O teste hidrostático tem como finalidade verificar se o equipamento possui alguma imperfeição de projeto ou montagem que possa ocasionar o seu colapso. Através do software SolidWorks® é possível realizar um teste para identificar os pontos de fragilidade do vaso de pressão, verificar se a espessura da chapa suporta a pressão de teste hidrostático. Sendo que os parâmetros, espessura de chapa, material, suportes, bocais e elementos de fixação foram modelados de acordo com os cálculos realizados nos itens 4 e 5.

No TH não foram considerados os flanges, bocais e camisa de vapor, porém, sabe-se que esses elementos causam grande influência na espessura da chapa e conseqüentemente na pressão máxima de trabalho admissível.

Os dados dos testes estão na tabela 15.

Tabela 14 – Dados dos testes no SolidWorks®

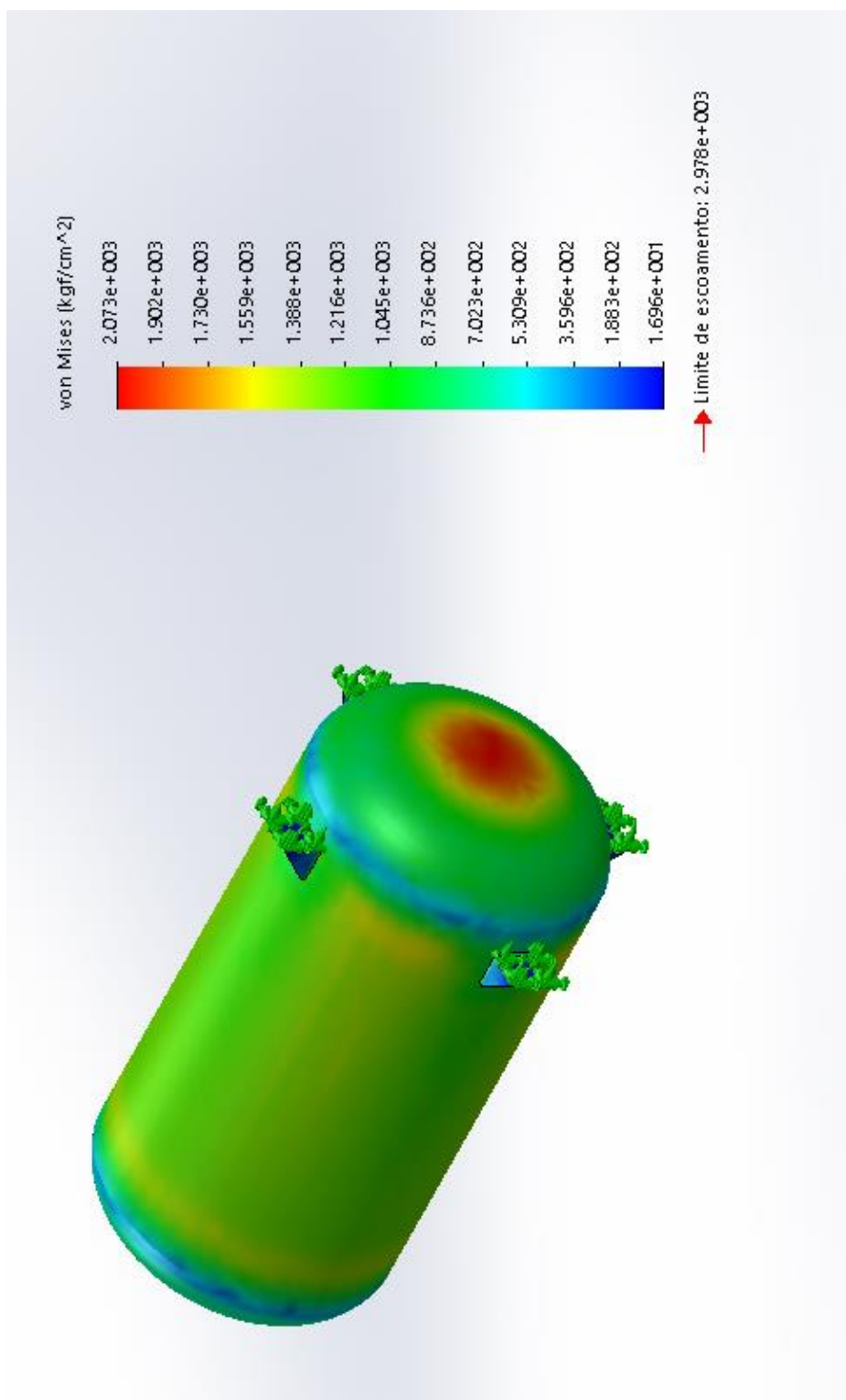
Dados do Teste Hidrostático	
Temperatura	20 °C
Pressão	31,5 Bar
Elementos de fixação	Geometria Fixa
Tensão Máxima de Escoamento	2978 Kgf/cm <sup>2</sup>
Material	Aço Inox 316 L

Fonte – Autor

Verificou-se que, a pressão de teste é inferior a tensão máxima admissível pelo material mesmo no tampo, onde o esforço de tensão foi superior ao resto do equipamento. É possível verificar também que as zonas onde têm soldas do tampo com o casco, está submetido à um esforço menor que o restante do reator.

Para o material, aço inox SA 316L, o limite de escoamento na temperatura ambiente, ou seja, 20°C, é de 2938 kgf/cm<sup>2</sup> e de acordo com o teste realizado no software, a maior carga que o reator está submetido é no topo do tampo elíptico com um valor de, aproximadamente, 2073 kgf/cm<sup>2</sup>. É possível observar na figura 19.

Figura 19 – Teste hidrostático no reator



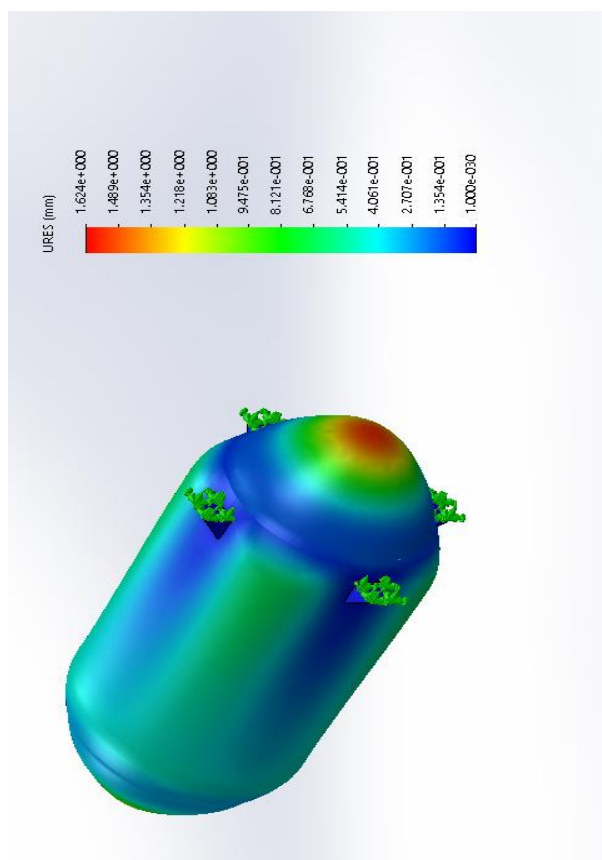
Fonte – Autor

#### 6.4.2 Deformações do reator durante o TH.

Durante o teste hidrostático, o reator sofreu uma deformação considerável das chapas metálicas. Essa deformação é algo esperado, visto que o equipamento está submetido a uma pressão maior que a pressão de projeto, porém, caso a deformação seja maior que o limite de escoamento do material, o equipamento acaba deformando plasticamente modificando sua estrutura física podendo ocasionar no colapso do reator.

Durante o teste, a maior deformação foi no tampo elíptico, com uma deformação de, aproximadamente, 1,624mm, na figura 20 é possível observar essa deformação de uma forma exagerada para melhorar a visualização da deformação no vaso.

Figura 20 Deformação durante o teste hidrostático

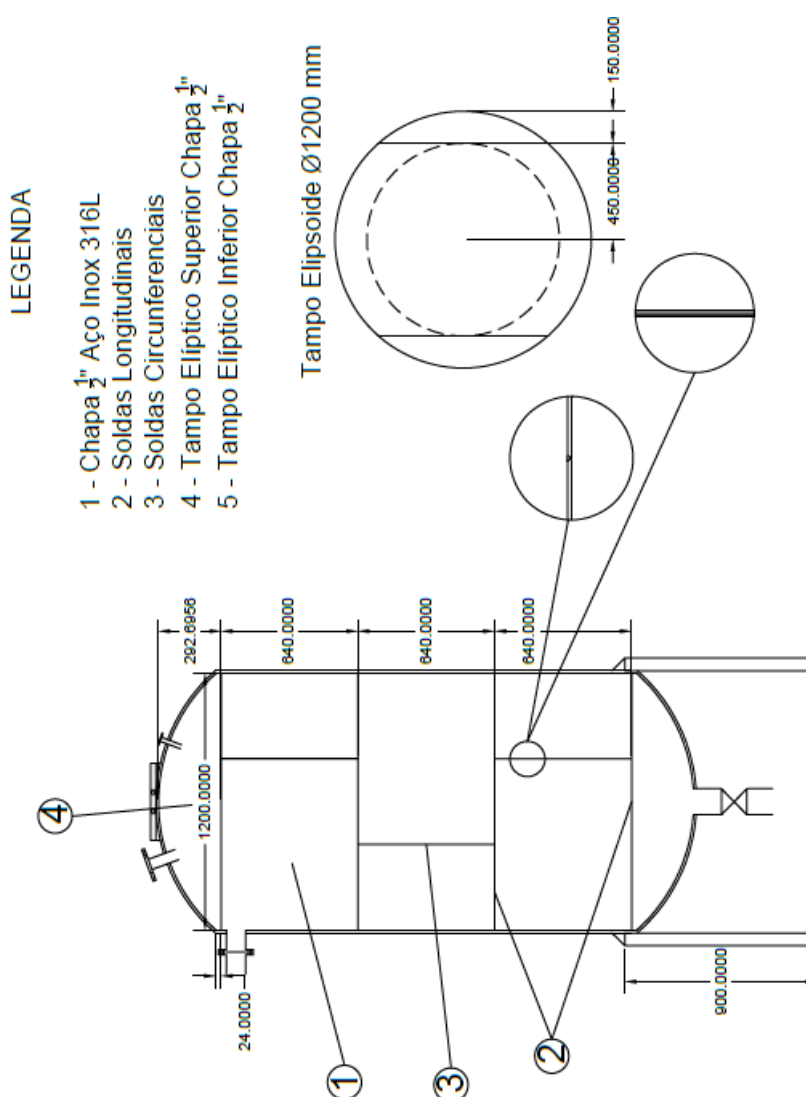


Fonte - Autor

## 6.5 Documentação Técnica do Reator

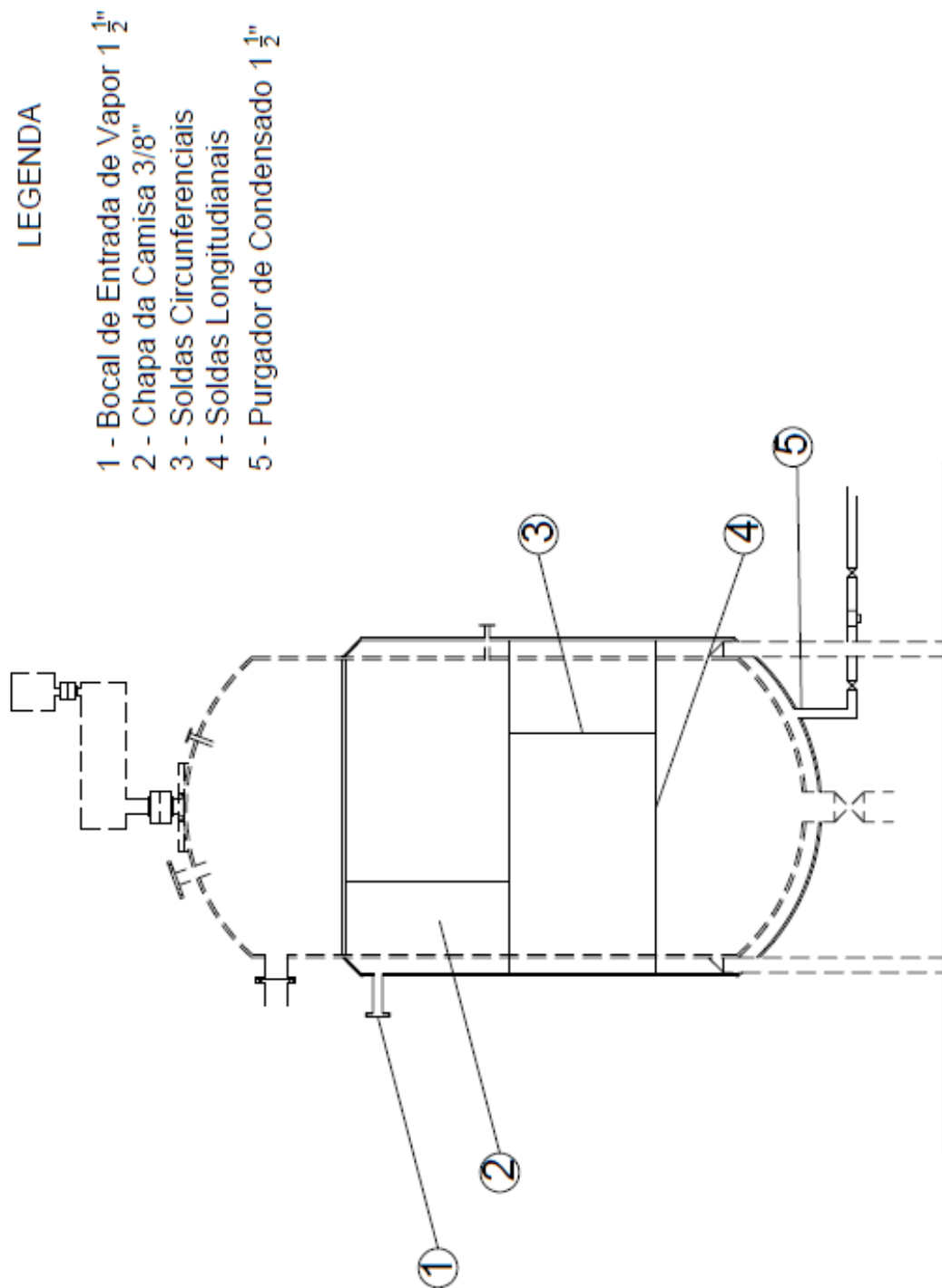
Nessa seção serão apresentados os desenhos técnicos realizados no AutoCAD para a visualização em 2d do equipamento bem como uma visão mais detalhadas de cada parte do equipamento, desde a disposição das chapas do casco e tampo, até as dimensões dos bocais.

Figura 21 - Disposição de Chapas do Casco e Tampo



Fonte - Autor

Figura 22 - Camisa de Vapor

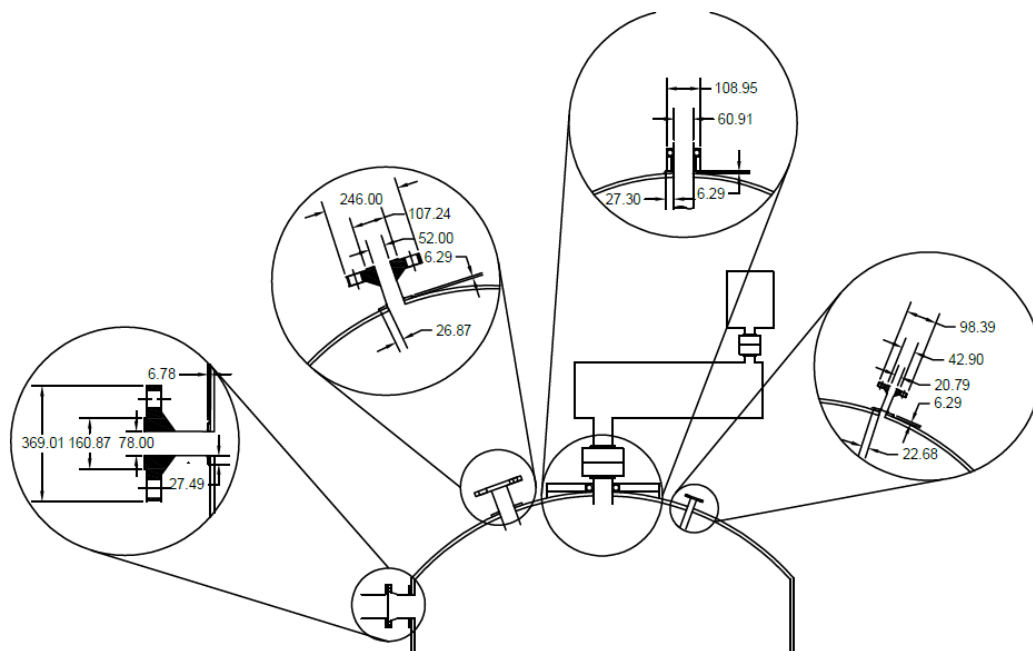


Fonte - Autor



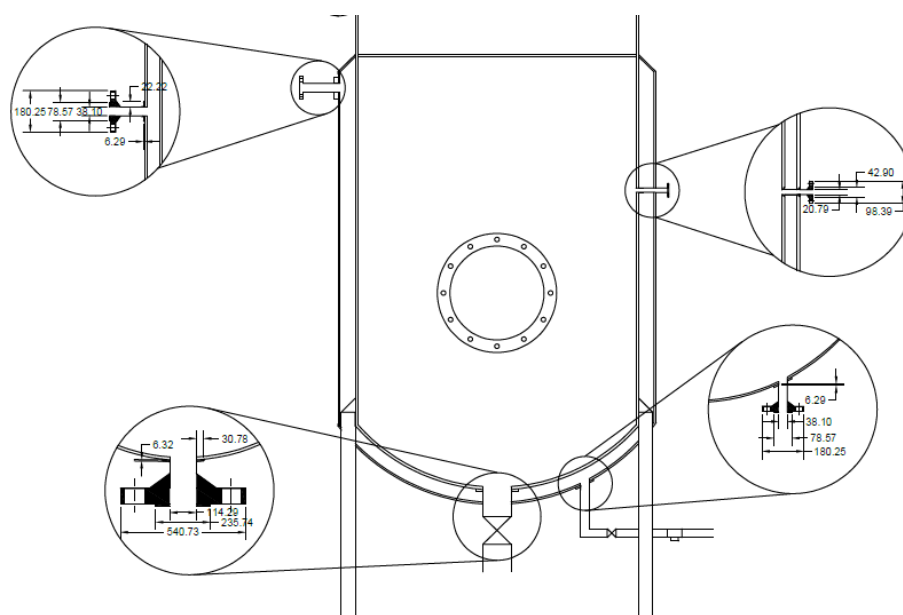
## 6.5.1 Bocais

Figura 23 - Bocais parte superior



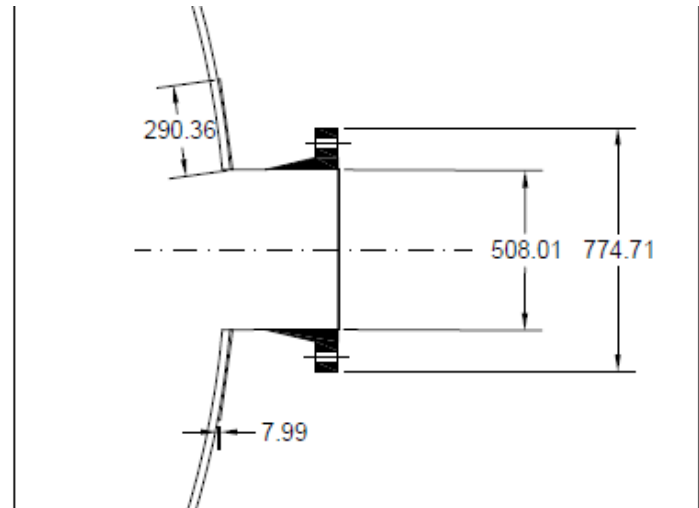
Fonte - Autor

Figura 24 - Bocais parte Inferior



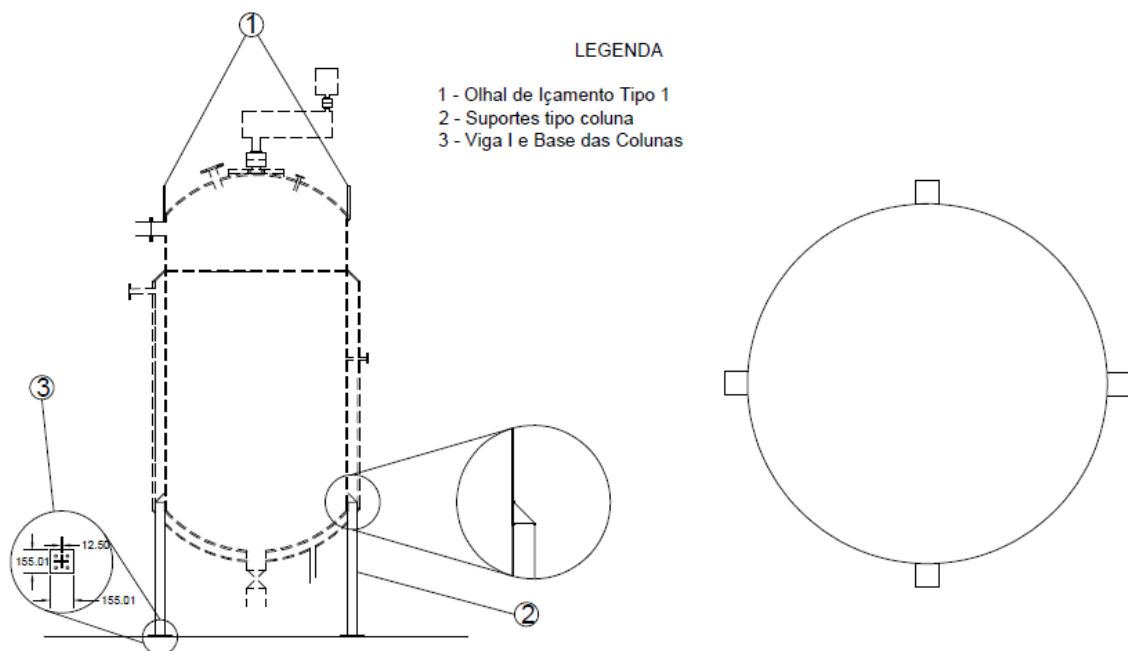
Fonte - Autor

Figura 25 - Bocal de Visita



Fonte – Autor

Figura 26 - Suportes e Olhal de Içamento



Fonte - Autor

## **6.6 Testes e inspeção para liberação do equipamento**

Antes de dar o start operacional em vasos de pressão recém-fabricados é necessário que sejam realizados alguns testes para verificar possíveis defeitos e falhas durante a fabricação e montagem do equipamento. O primeiro passo é realizar um raio X total de todas as soldas que foram realizadas no equipamento, principalmente, as soldas dos tampos e casco, assim como as soldas da camisa de vapor.

Estando as soldas em conformidade com as normas vigentes pela ASME seção VIII Divisão 1, o próximo passo é realizar um teste de estanqueidade a fim de verificar se existe algum vazamento no equipamento, isso levando em consideração o equipamento propriamente dito e seus acessórios.

O próximo passo é o teste hidrostático, como foi apresentado no capítulo X, o teste hidrostático é uma verificação se o vaso suporta a pressão superior a PMTA a fim de dar maior segurança durante a operação. Esse teste é obrigatório segundo a NR-13 para todos os vasos recém-fabricados e o esse teste deve ser registrado no prontuário do vaso de pressão assim como na sua placa de identificação.

Por fim, é feito uma inspeção visual interna e externa a fim de verificar possíveis falhas de montagem durante a instalação do equipamento na planta industrial.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O projeto do reator de etanol de segunda geração apresentou resultados satisfatórios e dentro do que condiz com equipamentos estáticos de natureza semelhante. A espessura de 12,5mm para a parede do reator está dentro dos padrões normais para a pressão e temperatura de projeto delimitada e para o tipo de aço que foi utilizado.

O uso de um reator com capacidade de 2,5m<sup>3</sup> foi baseado em indústrias de pequeno e médio porte, com a finalidade de dinamizar e fomentar a produção de etanol 2G para pequenos produtores, já que, a tecnologia está restrita as grades multinacionais do ramo.

A lista de materiais necessários para construção não é grande, porém necessária para o bom funcionamento do reato, principalmente no que diz respeito ao material de fabricação e os instrumentos de medição e controle.

A simulação no software SolidWorks® provou que as espessuras de chapas e o material suportam os parâmetros de projeto, e as deformações que ocorreram no reator estão dentro da normalidade da tensão admissível do aço inox 316L.

Não foram consideradas os custos reais da confecção desse equipamento, sendo esse uma sugestão de trabalho futuro.

Vale ressaltar que parâmetros químicos de reação, velocidade de troca térmica, dosagem de reagentes e produtos e todos os efeitos de caráter das reações químicas presentes dentro do reator não foram consideradas, tendo como base para definições desse parâmetro o anexo F retirada de um fluxograma de processo de uma planta real de produção de etanol 2g.

## **8 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS**

- Buscar formas de revestimento interno para diminuir a espessura de chapa.
- Realizar a fabricação e montagem das peças do projeto descritas.
- Projeto executivo da construção do reator
- Planta piloto para obtenção do Etanol 2G em escala reduzida.
- Teste do reator em industriais de pequeno porte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, V. SADDLER, J.N. **Access to cellulose limits the efficiency of enzymatic hydrolysis: the role of amorphogenesis. *Biotechnology for Biofuels***. v. 3, n. 4.

ASSUMPÇÃO, S. M. N.; **Pré-tratamento Químico Combinado do Bagaço da Cana Visando a Produção de Etanol de Segunda Geração**. UFBA 2015.

BALCOME, K., & RAPSOMANIKIS, G. (2008). **Bayesian estimation and selection of nonlinear vector error correction models: The case of the sugar-ethanol-oil nexus in Brazil.*American Journal of Agricultural Economics*.**

BARUFI, C. B.; DOS SANTOS, Edmilson Moutinho; IDE, C. R. **Auto-suficiência energética e desenvolvimento: o comércio de gás natural entre Brasil e Bolívia. *Cadernos PROLAM/USP***, v. 5, n. 9, p. 183-208, 2006.

BLUHUM, K. et al. Assessment of the ecotoxicological and environment effects of biorefineries. In: **\_\_\_\_\_ The role of green chemistry in biomass processing and conversion**. eds H. Xie and N. Gathergood), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9781118449400.ch15, 2012.

CARDONA, C. A. e SÁNCHEZ, Ó. J. **Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks**. *Bioresource Technology*, v.99, n.13, p.5270-5295. 2007.

CARVALHO, Livia L. M.; **Estudo da hidrólise e fermentação dos resíduos de milho (*Zea mays*) para produção de etanol de segunda geração**. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFAL. 2016.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (Ed.). **Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. Editora Blucher, 2018.

Coyle, W. T. (2007). **The future of biofuels: a global perspective** (No. 1490-2016-127657, p. 24).

CRIVELLARI, C. Augusto; **Caracterização estrutural das hemiceluloses de parede celulares de cana-de-açúcar**. USP – São Paulo. 2012.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis**. 2017 – MME

FABREGA, F. M.; **Cálculo de Reatores I**. Faculdade Pitágoras de Jundiaí. Curso de Engenharia Química. 1º Edição. 2012

FALCÃO, C. **Projeto de Vasos de Pressão e Trocadores de Calor**. UERJ. 2008.

FLOGER, H. S.; **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4ª edição. 2009. Editora LTC.

GALLO, W. L. R. **Análise exergética de motores a gasolina e a álcool**. Tese de Doutorado.1990

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energias renováveis: um futuro sustentável. *Revista USP***, n. 72, p. 6-15, 2007.

HAMELINCK, C. N., HOOIJDONK, G. V., FAAIJ, A. P. C. **Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term.** *Biomass Bioenergy*, 28:384-410, 2005.

JUNIOR, J. B. C.; **Tecnologia e Fabricação do Alcool.** IFGO – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Goiás. Campus Inhumas. 2012.

KAZI, F. K. et al. **Techno-Economic Analysis of Biochemical Scenarios for Production of Cellulosic Ethanol.** National Renewable Energy Laboratory – NREL. 2010.

KOHLHEPP, Gerd. **Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil.** São Paulo , v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010 .

LEITE, Rogério Cerqueira; CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. O etanol combustível no Brasil. **Revista Biocombustíveis no Brasil: Realidades e Perspectivas, Ministério das Relações Exteriores**, 2008.

LIMA, Ivo Andrei de Oliveira Lino et al. **Comparação de modelos de análise das normas ASME e EN 1591 para o projeto de flanges com juntas circulares.** 2005.

MACRELLI, S.; MOGENSEN, J.; ZACCHI, G. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with sugarbased ethanol process. **Biotechnology for Biofuels**, v. 5, p. 22, 2012.

MANOCHIO, C.; **Produção de Bioetanol de cana -de-açúcar, milho e beterraba: Uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos.**

MATTOS, I. L. et al. **Peróxido de Hidrogênio: Importância e Determinação.** *Química Nova*, v. 26, n. 3, p. 373 – 380, 2003.

MILANEZ, A. Y., et al. "De promessa a realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar: uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública." (2015).

MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional.** Brasília, DF, 2018.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Biocombustíveis, 50 perguntas e repostas sobre este novo mercado.** 2017.

MORAIS, A. P. da S.. **Estudo do pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar e caracterização físico-química.** 2010. xi,47 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2010.

MOSS, D. R. **Pressure-Vessel Design and construction.** Gul Professional Publishing. 3 ed USA, 2004

PETROBRÁS. **Teste de Pressão em Serviço de Vasos de Pressão e Caldeiras.** CONTEC – Comissão de Normalização Técnica. 2014.

PITARELO, A.P. **Produção de etanol celulósico a partir do bagaço de cana pré-tratado por explosão a vapor.** 2013.162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RABELO, S. C.; **Avaliação e otimização de pré-tratamento e hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol de segunda geração.** Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. 2010.

RFA; Renewable Fuels Association; **Ethanol Strong**, 2018 Ethanol Industry Outlook.

RITTER, S. K. (2008) **Calling All Chemists: Chemists and chemical engineers will be providing the thousands of technologies needed to achieve a more sustainable world**. Disponível em <<http://www.jomar.pro.br/portal/modules>>. Acessado em: 02/2019.

SANTOS, Danielle S.; **Produção de Etanol de segunda geração por Zymomonas mobilis Naturalmente ocorrente e recombinante, empregando biomassa celulósica**.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J.H. DE; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A.; GUIMARÃES, V.M. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol**. Química Nova, v.35, n.5, p.1004-1010, 2012.

SILVA, S. Ayla. **Pré-tratamento do bagaço de cana-de-açúcar com líquidos iônicos: Efeito na desestruturação da parede celular e na eficiência da hidrólise enzimática**. Rio de Janeiro UFRJ. 2013.

TELLES, P.C. S. **Vasos de Pressão**. 2ª Edição Atualizada. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1996.

TELLES, P.C. S. **Materiais para equipamentos de processo**. Interciência, 1976.

TOMÉ, J.A.T.R.; **Desenvolvimento do pré-tratamento por explosão com vapor da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração via hidrólise enzimática**. UNICAMP. 2014

ZACANER, M. G.; SANTOS, T.B.S. Cogeração: ampliação da oferta de energia elétrica com a biomassa. (Bagaço da cana de açúcar). **Revista Diálogo Interdisciplinares**, v.2, n.2, 2013.

## ANEXOS

### ANEXO A - Tabela de Tensão Admissível x Temperatura

#### Aço Carbono

Classe de material	Formas de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (Mpa) @ temperatura (°C)													
			30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	108,0	108,0	108,0	108,0	106,0	104,0	101,0	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6		
	Tubos	A-53-A	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	78,8	71,6	62,3	54,4	47,5	40,0		
	Tubos	A-53-B	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	101,0	98,4	89,5	75,9	63,4	52,9	38,7		
	Tubos	A-179	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3		
	Forjados	A-181-60	92,3	92,3	92,3	92,3	91,8	90,4	87,5	83,8	73,3	63,4	55,8	47,3	33,7	22,0
Aço-carbono para altas temperaturas	Chapas	A-515-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Chapas	A-515-65	128,1	128,1	128,1	128,6	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0
	Chapas	A-515-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0
	Tubos	A-105-A	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	94,4	92,4	84,4	73,3	64,0	56,0	47,3	36,0	23,6
	Tubos	A-105-B	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	47,3	36,0	23,6
	Tubos	A-210-A1	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Forjados	A-105	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,2	34,2	22,0
	Fundidos	A-216-WC1	137,7	137,7	137,7	137,7	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,2	34,2	22,0
Aço-carbono para baixas temperaturas	Chapas	A-516-60	117,8	117,8	117,8	117,8	114,3	111,5	108,0	103,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Chapas	A-516-65	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9	118,2	112,3	95,0	78,5	62,2	45,6	32,3	22,0
	Chapas	A-516-70	137,7	137,7	137,7	137,7	134,8	132,2	128,3	121,5	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0
	Tubos	A-333-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Tubos	A-334-6	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	117,8	115,3	104,9	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Forjados	A-350-LF1	117,8	117,8	117,8	117,8	107,3	104,2	101,1	97,2	88,9	74,4	62,2	45,6	32,3	22,0
	Forjados	A-350-LF2	137,7	137,7	135,5	135,0	129,0	125,3	121,6	116,1	101,2	82,6	67,0	50,8	34,2	22,0
	Fundidos	A-352-LCB	128,1	128,1	128,1	128,1	124,6	121,9								
Aço-liga 1/2 Mn	Chapas	A-204-A	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,0	126,7	123,8	101,9	70,1	43,8
	Chapas	A-204-B	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	133,6	104,4	70,1	43,8
	Tubos	A-335-F1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8
	Tubos	A-209-T1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	107,8	105,9	102,6	100,3	95,8	70,1	43,8
	Forjados	A-182F1	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	137,7	133,6	104,4	70,1
Fundidos	A-217-WC1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1	128,1

Fonte: ASME, Seção VIII, Divisão 1

## Aço Inoxidável

Tipo de material	Especificação de material e grau (de acordo com ASTM)	Temperatura do metal (°C)																	
		38	93	149	204	260	316	343	371	399	427	454	482	510	538	566	593	621	649
Aços inoxidáveis (sem costura)	A - 312 TP 304, TP 304H	1.322	1.251	1.167	1.139	1.118	1.118	1.118	1.097	1.059	1.048	1.033	1.012	970	858	689	641	429	
	A - 312 TP 304L	1.104	1.104	1.076	1.033	1.012	984	963	949	935	914								
	A - 312 TP 310	1.322	1.209	1.153	1.118	1.090	1.076	1.069	1.062	1.055	1.048	1.026	977	879	773	669	598	513	422
	A - 312 TP 316, TP 316H	1.322	1.322	1.294	1.273	1.265	1.195	1.174	1.146	1.132	1.118	1.104	1.097	1.083	1.076	1.019	872	689	520
	A - 312 TP 316L	1.104	1.104	1.104	1.090	1.012	949	928	907	866	872	851							
	A - 312 TP 321	1.322	1.294	1.216	1.202	1.202	1.153	1.132	1.111	1.104	1.080	1.083	1.076	1.059	970	675	485	351	253
	A - 312 TP 347	1.322	1.258	1.163	1.090	1.048	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	1.033	1.026	984	851	640	429	309
	A - 268 TP 405, TP 430	1.055	1.005	970	935	907	872	865	851										
A - 268 TP 410	1.055	1.005	970	935	907	872	865	851											
A - 268 TP 446	1.230	1.132	1.132	1.097	1.055	1.019	1.005	991											
Aços inoxidáveis (solda elétrica por arco protegido)	A - 312 TP 304, TP 304H	1.125	1.062	991	970	949	949	949	928	907	893	879	858	823	731	563	464	366	
	A - 312 TP 304L	935	935	914	879	865	837	823	808	794	780								
	A - 312 TP 310	1.188	1.026	984	949	928	914	907	907	900	893	872	830	745	661	422			
	A - 312 TP 316, TP 316H	1.125	1.125	1.097	1.083	1.076	1.019	996	977	963	949	942	928	921	914	865	745	583	443
	A - 312 TP 316L	935	935	935	928	865	808	787	766	752	738	724							
	A - 312 TP 321	1.125	1.097	1.033	1.025	1.026	977	963	949	935	928	921	914	907	830	576	415	302	218
	A - 312 TP 347	1.125	1.059	984	928	893	879	879	879	879	879	879	879	872	837	724	548	366	267
	A - 268 TP 405, TP 410, TP430	900	858	830	794	766	745	731	724										
A - 268 TP 446	1.048	998	963	935	900	865	858	844											

## ANEXO B – SCHEDULE E ESPESSURA DA PAREDE DOS TUBOS

Diâmetro Externo		Espessura de Parede (mm)									
Polegadas (")	mm	5-S		10-S		40-S		80-S		160-S	
		Parede	Peso	Parede	Peso	Parede	Peso	Parede	Peso	Parede	Peso
1/8"	10,20	-	-	1,24	0,28	1,73	0,37	2,41	0,46	-	-
1/4"	13,72	-	-	1,65	0,50	2,24	0,63	3,02	0,81	-	-
3/8"	17,15	-	-	1,65	0,64	2,31	0,86	3,20	1,12	-	-
1/2"	21,34	1,65	0,81	2,11	1,02	2,77	1,29	3,73	1,64	4,75	1,94
3/4"	26,67	1,65	1,03	2,11	1,30	2,87	1,71	3,91	2,22	5,54	2,88
1"	33,40	1,65	1,31	2,77	2,12	3,38	2,54	4,55	3,29	6,35	4,24
1.1/4"	42,16	1,65	1,67	2,77	2,73	3,56	3,44	4,85	4,54	6,35	5,60
1.1/2"	48,26	1,65	1,93	2,77	3,16	3,68	4,11	5,08	5,48	7,14	7,24
2"	60,33	1,65	2,42	2,77	3,98	3,91	5,53	5,54	7,58	8,71	11,08
2.1/2"	73,03	2,11	3,75	3,05	5,33	5,16	8,75	7,01	11,57	9,53	14,92
3"	88,90	2,11	4,51	3,05	6,45	5,49	11,45	7,62	15,48	11,13	21,30
3.1/2"	101,60	2,11	5,17	3,05	7,40	5,74	13,76	8,08	18,90	12,70	27,80
4"	114,30	2,11	5,83	3,05	8,35	6,02	16,30	8,56	22,62	13,49	33,50
5"	141,30	2,77	9,45	3,40	11,60	6,55	22,09	9,53	31,38	15,88	49,10
6"	168,28	2,77	11,30	3,40	13,80	7,11	28,65	10,97	43,16	18,24	67,40
8"	219,08	2,77	14,80	3,76	19,90	8,18	42,97	12,70	64,57	23,02	111,30
10"	273,05	3,40	22,60	4,19	27,80	9,27	60,30	12,70	81,50	28,57	171,20
12"	323,85	3,96	31,40	4,57	36,00	9,53	71,90	12,70	97,40	33,34	238,80
14"	355,60	3,96	34,40	4,78	41,30	-	-	-	-	-	-
16"	406,40	4,20	42,40	4,78	47,30	-	-	-	-	-	-
18"	457,20	4,20	46,80	4,78	53,20	-	-	-	-	-	-
20"	508,00	4,78	59,30	5,54	68,60	-	-	-	-	-	-
24"	609,60	5,54	82,50	6,35	94,50	-	-	-	-	-	-

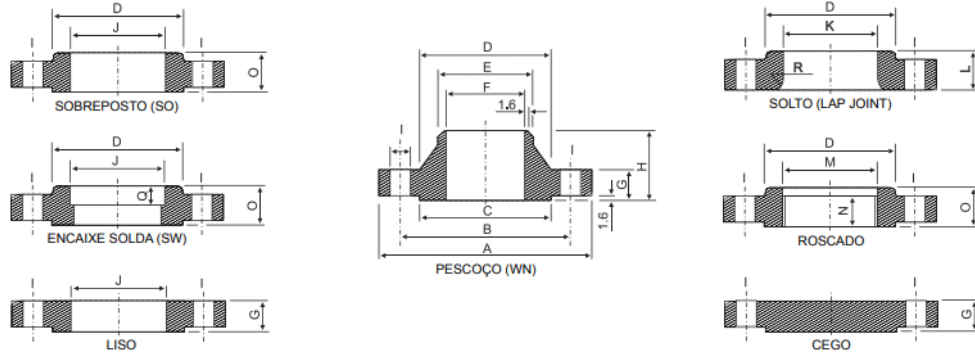


## ANEXO C – ESPESSURA PADRÃO DE CHAPAS

ESPESSURAS PADRÃO (mm)
6,30
8,00
9,50
12,50
16,00
19,00
22,40
25,40
28,50
32,50
35,00
37,50
44,50
50,00
57,00
70,00
75,00
89,00
100,00

## ANEXO D – Classificação dos Flanges de acordo com a ANSI B16.5

## Flanges conforme ANSI B16.5



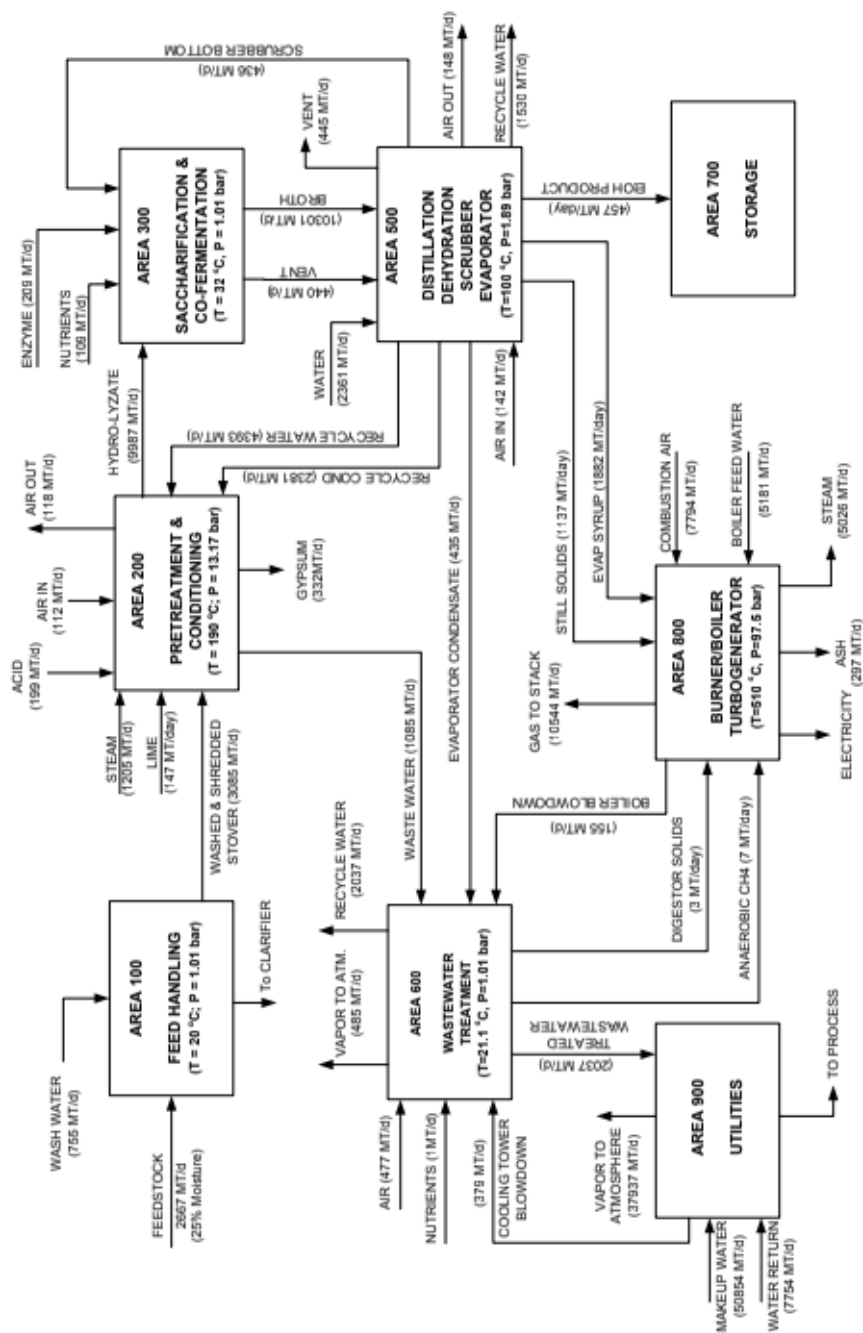
Classe 150#																				Peso kg/pc			
Bitola	A	B	C	D	E	F	G	Nº Furos	H	I	J	K	L	M	N	O	Q	R	SO	WN	LJ	Cego	
1/2	88,9	60,3	34,9	30,2	21,3	15,7	11,1	4	47,6	15,9	22,4	22,9	15,9	-	15,9	15,9	9,5	3,2	0,5	0,9	0,5	0,5	
3/4	98,4	69,9	42,9	38,1	26,6	20,8	12,7	4	52,4	15,9	27,7	28,2	15,9	-	15,9	15,9	11,1	3,2	0,9	0,9	0,9	0,9	
1	108,0	79,4	50,8	49,2	33,5	26,6	14,3	4	55,5	15,9	34,5	35,0	17,5	-	17,5	17,5	12,7	3,2	0,9	1,4	0,9	0,9	
1.1/4	117,5	88,9	63,5	58,7	42,2	35,1	15,9	4	57,2	15,9	43,2	43,7	20,6	-	20,6	20,6	14,3	4,8	1,4	1,4	1,4	1,4	
1.1/2	127,0	98,4	73,0	65,1	48,3	40,9	17,5	4	61,9	15,9	49,5	50,0	22,2	-	22,2	22,2	15,9	6,4	1,4	1,8	1,4	1,8	
2	152,4	120,7	92,1	77,8	60,5	52,5	19,0	4	63,5	19,0	62,0	62,5	25,4	-	25,4	25,4	17,5	7,9	2,3	2,7	2,3	2,3	
2.1/2	177,8	139,7	104,8	90,5	73,2	62,7	22,2	4	69,9	19,0	74,7	75,4	28,6	-	28,6	28,6	19,0	7,9	3,2	3,6	3,2	3,2	
3	190,5	152,4	127,0	108,0	88,9	78,0	23,8	4	69,9	19,0	90,7	91,4	30,2	-	30,2	30,2	20,6	9,5	3,6	4,5	3,6	4,1	
3.1/2	215,9	177,8	139,7	122,2	101,6	90,2	23,8	8	71,4	19,0	103,4	104,2	31,8	-	31,8	31,8	22,2	9,5	5,0	5,4	5,0	5,9	
4	228,6	190,5	157,2	134,9	114,3	102,4	23,8	8	76,2	19,0	116,1	116,8	33,3	-	33,3	33,3	23,8	11,1	5,9	6,8	5,9	7,7	
5	254,0	215,9	185,7	163,5	141,2	128,3	23,8	8	88,9	22,2	143,8	144,5	36,5	-	36,5	36,5	23,8	11,1	6,8	8,6	6,8	9,1	
6	279,4	241,3	215,9	192,1	168,4	154,2	25,4	8	88,9	22,2	170,7	171,5	39,7	-	39,7	39,7	27,0	12,7	8,6	10,9	8,6	11,8	
8	342,9	298,5	269,9	246,1	219,2	202,7	28,6	8	101,6	22,2	221,5	222,2	44,5	-	44,5	44,5	31,8	12,7	13,6	17,7	13,6	20,4	
10	406,4	362,0	323,9	304,8	273,1	254,5	30,2	12	101,6	25,4	276,4	277,4	49,2	-	49,2	49,2	33,3	12,7	19,5	23,6	19,5	31,8	
12	482,6	431,8	381,0	365,1	323,9	304,8	31,8	12	114,3	25,4	327,2	328,2	55,5	-	55,5	55,5	39,7	12,7	29,0	36,2	29,0	49,9	
14	533,4	476,3	412,8	400,1	355,6	336,5	34,9	12	127,0	28,6	359,2	360,2	79,4	-	57,2	57,2	41,3	12,7	41,0	50,0	47,6	63,5	
16	596,9	539,8	469,9	457,2	406,4	387,4	36,5	16	127,0	28,6	410,5	411,2	87,3	-	63,5	63,5	44,5	12,7	44,5	64,0	63,5	81,6	
18	635,0	577,9	533,4	504,8	457,2	438,2	39,7	16	139,7	31,8	461,8	462,3	96,8	-	68,3	68,3	49,2	12,7	59,0	68,0	72,6	99,8	
20	696,5	635,0	584,2	558,8	508,0	489,0	42,9	20	144,5	31,8	513,1	514,4	103,2	-	73,0	73,0	54,0	12,7	75,0	81,6	88,5	129,0	
24	812,8	749,3	692,2	663,5	609,6	590,5	47,6	20	152,4	34,9	616,0	616,0	111,1	-	82,5	82,5	63,5	12,7	99,8	181,0	125,0	195,0	

Classe 300#																				Peso kg/pc			
Bitola	A	B	C	D	E	F	G	Nº Furos	H	I	J	K	L	M	N	O	Q	R	SO	WN	LJ	Cego	
1/2	95,3	66,7	34,9	38,1	21,3	15,7	14,3	4	52,4	15,9	22,4	22,9	22,2	23,6	15,9	22,2	9,5	3,2	0,9	0,9	0,9	0,9	
3/4	117,5	82,5	42,9	47,6	26,6	20,8	15,9	4	57,2	19,0	27,7	28,2	25,4	29,0	15,9	25,4	11,1	3,2	1,4	1,4	1,4	1,4	
1	123,8	88,9	50,8	54,0	33,5	26,6	17,5	4	61,9	19,0	34,5	35,0	27,0	35,8	17,5	27,0	12,7	3,2	1,4	1,8	1,4	1,4	
1.1/4	133,4	98,4	63,5	63,5	42,2	35,1	19,0	4	65,0	19,0	43,2	43,7	27,0	44,5	20,6	27,0	14,3	4,8	1,8	2,3	1,8	1,8	
1.1/2	155,6	114,3	73,0	69,9	48,3	40,9	20,6	4	68,3	19,0	49,5	50,0	30,2	50,5	22,2	30,2	15,9	6,4	2,7	3,2	2,7	2,7	
2	165,1	127,0	92,1	84,1	60,5	52,5	22,2	8	69,9	19,0	62,0	62,5	33,3	63,5	28,6	33,3	17,5	7,9	3,2	4,1	3,2	3,6	
2.1/2	190,5	149,2	104,8	100,0	73,2	62,7	25,4	8	76,2	22,2	74,7	75,4	38,1	76,2	31,8	38,1	19,0	7,9	4,5	5,4	4,5	5,4	
3	209,5	168,3	127,0	117,5	88,9	78,0	28,6	8	79,4	22,2	90,7	91,4	42,9	92,2	31,8	42,9	20,6	9,5	5,9	6,8	5,9	7,3	
3.1/2	228,6	184,2	139,7	133,4	101,6	90,2	30,2	8	81,0	22,2	103,4	104,2	44,5	104,9	36,5	44,5	22,2	9,5	7,7	8,2	7,7	9,5	
4	254,0	200,0	157,2	146,0	114,3	102,4	31,8	8	85,7	22,2	116,1	116,8	47,6	117,6	36,5	47,6	23,8	11,1	10,0	11,3	10,0	12,2	
5	279,4	235,0	185,7	117,8	141,2	128,3	34,9	8	98,4	22,2	143,8	144,5	50,8	144,5	42,9	50,8	-	11,1	12,7	14,5	12,7	15,9	
6	317,5	269,9	215,9	206,4	168,4	154,2	36,5	12	98,4	22,2	170,7	171,5	52,4	171,5	46,0	52,4	-	12,7	17,7	19,0	17,7	22,7	
8	381,0	330,2	269,9	260,4	219,2	202,7	41,3	12	111,1	25,4	221,5	222,2	61,9	222,2	50,8	61,9	-	12,7	26,3	30,4	26,3	36,7	
10	444,5	387,4	323,9	320,7	273,1	254,5	47,6	16	117,5	28,6	276,4	277,4	95,3	276,4	55,5	66,7	-	12,7	36,7	41,3	41,3	56,7	
12	520,7	450,9	381,0	374,7	323,9	304,8	50,8	16	130,2	31,8	327,2	328,2	101,6	328,7	60,3	73,0	-	12,7	52,2	63,5	63,5	83,9	
14	584,2	514,4	412,8	425,5	355,6	336,5	54,0	20	142,9	31,8	359,2	360,2	111,1	360,4	63,5	76,2	-	12,7	74,8	81,6	86,2	113,0	
16	647,7	571,5	469,9	482,6	406,4	387,4	57,2	20	146,0	34,9	410,5	411,2	120,7	411,2	68,3	82,5	-	12,7	96,2	113,0	113,0	134,0	
18	711,2	626,7	533,4	533,4	457,2	438,2	60,3	24	158,8	34,9	461,8	462,3	130,2	462,0	69,9	88,9	-	12,7	113,0	145,0	134,0	179,0	
20	774,7	685,8	584,2	587,4	508,0	489,0	63,5	24	161,9	34,9	513,1	514,4	139,7	512,8	73,0	95,3	-	12,7	143,0	181,0	168,0	229,0	
24	914,4	812,8	692,2	701,7	609,6	590,5	69,9	24	168,3	41,3	616,0	616,0	152,4	614,4	82,5	106,4	-	12,7	215,0	263,0	249,0	358,0	

## ANEXO E – Placa de identificação do Reator

<b>Identificação do Vaso</b>			
Reator de Etanol de Segunda Geração			
<b>Nome de Projeto</b>	Reator E2G	<b>Sobreespessura de Corrosão</b>	0,5 mm
<b>Temp. de Projeto</b>	230 °C	<b>Temp. Mínima de Trab.</b>	-200 °C
<b>Pressão de Projeto</b>	15 Bar	<b>Pressão de T. H.</b>	31,7 Bar
<b>PMTA</b>	19,75 Bar	<b>Medida em:</b>	
<b>Classe NR-13</b>	3	<b>Parcial</b>	<b>Total</b>
		<b>Alívio de Tens.</b>	X
		<b>Raio X</b>	X
<b>Pressão Camisa</b>	17,60 Bar	<b>Teste Hidrostático Camisa</b>	26,40 Bar
<b>Fabricante e Local</b>	Cruz das Almas		
<b>Montador</b>	UFRB		
<b>Número de Série</b>	000001	<b>Ano de Fabricação:</b>	2019

ANEXO F – Fluxograma de planta Industrial de Etanol 2G

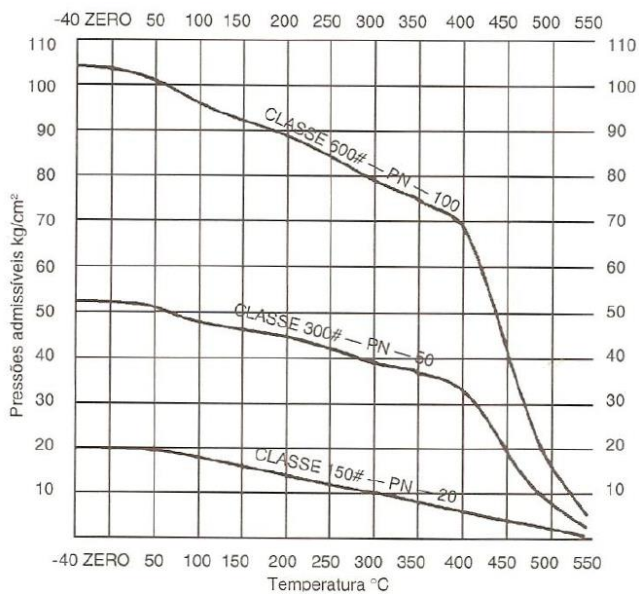


## ANEXO G – Coeficiente de Soldagem (E)

TIPO DE SOLDA	LIMITAÇÕES	GRAU DE INSPEÇÃO		
		RADIOGRAFIA TOTAL	RADIOGRAFIA PARCIAL (por amostragem)	NÃO RADIOGRAFADA
Solda de topo, feita por ambos os lados, ou por procedimento equivalente, de forma a obter penetração e fusão totais.	Nenhuma	1,00	0,85	0,70
Solda de topo, feita por um só lado, com mata junta permanente.	Nenhuma	0,90	0,80	0,65
Solda de topo, feita por um só lado, sem mata junta.	Uso permitido somente para soldas circunferenciais, para espessuras inferiores a 15mm e diâmetro do vaso	-	-	0,60
Solda sobreposta, com filete duplo de altura total	Uso permitido para soldas longitudinais em espessuras inferiores a 10 mm e para soldas circunferenciais em espessuras inferiores a 15 mm.	-	-	0,55

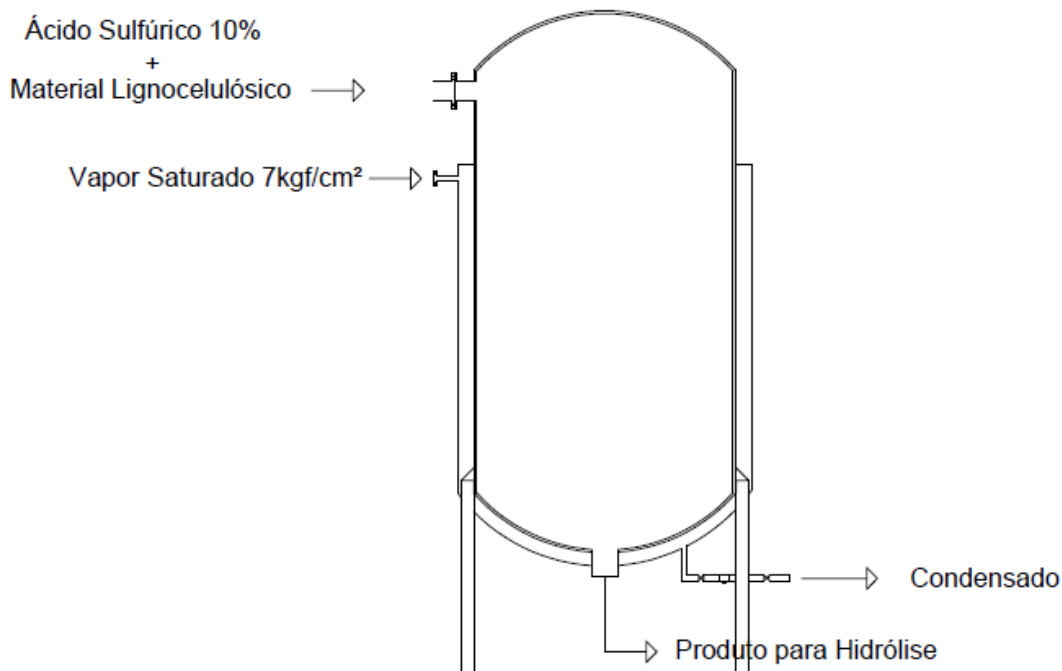
Fonte - Adaptado de TELLES (1996)

## ANEXO H – Classe de Pressões de Flanges



Fonte - TELLES (1996)

## ANEXO I – Fluxograma de Processo



Fonte - Autor

## ANEXO J – Vida Útil dos Vasos de Pressão

Classes de equipamentos	Refinarias, terminais e outras instalações não petroquímicas	Unidades petroquímicas
Equipamentos de grande porte, grande custo ou essenciais ao funcionamento da unidade industrial (reatores, torres, trocadores de calor ou vasos importantes).	20 anos	15 anos
Outros equipamentos não incluídos na classe acima.	15 anos	10 anos
Peças desmontáveis ou de reposição (feixes tubulares, internos removíveis de torres, e outros).	8 anos	5 anos

Fonte - Petrobrás N – 253

## ANEXO K - Classes de Aço-carbono

Formas de apresentação	Classes de aço-carbono				
	Aços de baixo carbono	Aços de médio carbono	Aços de médio carbono acalmados	Aços de médio carbono acalmados	Aços de qualidade estrutural
Chapas grossas	A-285 Gr A	A-285 Gr B,C	A-515 Gr 55,60,65 e 70	A-516 Gr 55,60,65 e 70 A-442 Gr 55,60	A-283 Gr.C
Chapas finas					A-570 Gr C
Tubos sem costura	A-106 Gr A		A-106 Gr B		
Tubos com ou sem costura	A-53 Gr A API-5L Gr A	A-53 Gr B API-5L Gr B		A-333 Gr 6	A-120
Tubos com solda por eletrodo	A-139 Gr A	A-134 A-139 Gr B A-671 (285 B)	A-672	A-671	
Tubos com solda por resistência elétrica	A-135				
Tubo para trocadores	A-179 A-214			A-334 Gr 6	
Tubo para caldeiras	A-178		A-210 A-192		
Peças forjadas		A-181	A-105	A-350 Gr. LF1	
Peças fundidas		A-216 Gr WCB		A-352 Gr LCB	
Acessórios de tubulação	A-234 Gr WPA	A-234 Gr WPB		A-420 Gr WPL6	

Fonte - TELLES (1996)

## ANEXO L – TABELA DE SERVIÇO REDUTOR DE VELOCIDADE

Acionamento por	Tempo de Trabalho	Classificação de cargas		
		Uniforme U	Choques moderados M	Choques fortes F
Motor Elétrico ou Turbina à Vapor	Intermitente, 3h/dia	0,80	1,00	1,50
	Até e incluindo 10h/dia	1,00	1,25	1,75
	Acima de 10h/dia	1,25	1,50	2,00
Motor à Explotão Multicilíndrico ou Motor Hidráulico	Intermitente, 3h/dia	1,00	1,25	1,75
	Até e incluindo 10h/dia	1,25	1,50	2,00
	Acima de 10h/dia	1,50	1,75	2,25

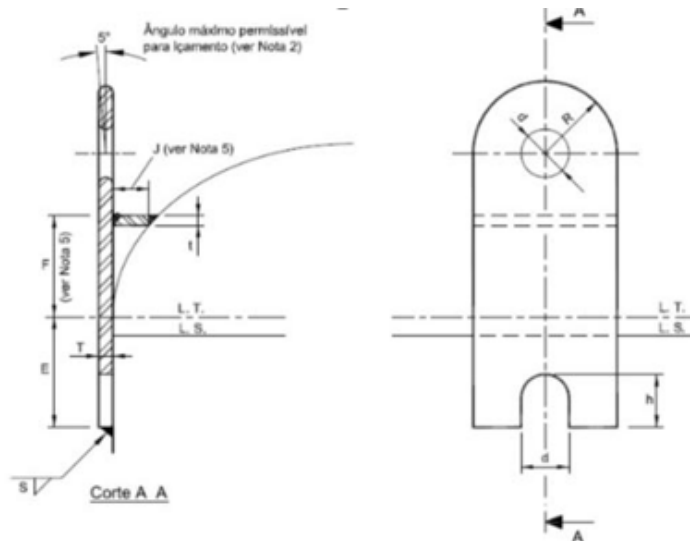
Fonte - Catálogo Transmotécnica

## ANEXO M – TABELA DE REDUTORES TRANSMOTÉCNICA

Tamanho	$n_1$ [min. <sup>-1</sup> ] - 1750								
	Redução $i_n$								
	10	15	20	25	30	40	50	60	
04	$P1_N$ [kW]	0,824	0,640	0,588	0,544	0,485	0,456	0,382	0,294
	$T_2$ [daNm]	3,5	3,7	4,4	4,9	4,6	5,4	4,9	4,2
	$\eta$ [%]	78	70	68	68	56	54	49	45
	$i_e$	10,0	15,0	20,0	25,0	31,0	40,0	48,0	59,0
	$n_2$ [min. <sup>-1</sup> ]	175,0	116,7	87,5	70,0	56,5	43,8	36,5	29,7
05	$P1_N$ [kW]	1,72	1,35	1,25	1,15	1,03	0,956	0,809	0,625
	$T_2$ [daNm]	7,5	7,9	9,5	10,3	10,1	11,4	10,8	9,6
	$\eta$ [%]	80	72	70	68	58	56	51	47
	$i_e$	10,0	15,0	20,0	24,0	31,0	39,0	48,0	60,0
	$n_2$ [min. <sup>-1</sup> ]	175,0	116,7	87,5	72,9	56,5	44,9	36,5	29,2
06	$P1_N$ [kW]	2,81	2,02	1,84	1,71	1,52	1,41	1,21	0,93
	$T_2$ [daNm]	11,5	12,2	14,4	16,1	15,0	17,9	17,1	15,2
	$\eta$ [%]	81	74	72	69	60	58	53	50
	$i_e$	10,0	15,0	20,0	25,0	31,0	40,0	49,0	60,0
	$n_2$ [min. <sup>-1</sup> ]	175,0	116,7	87,5	70,0	56,5	43,8	35,7	29,2
07	$P1_N$ [kW]	3,97	3,04	2,78	2,60	2,29	2,07	1,74	1,38
	$T_2$ [daNm]	18,0	18,9	22	25	24	28	26	24
	$\eta$ [%]	83	76	74	72	64	61	55	53
	$i_e$	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	49,0	60,0
	$n_2$ [min. <sup>-1</sup> ]	175,0	116,7	87,5	70,0	58,3	43,8	35,7	29,2
09	$P1_N$ [kW]	5,86	4,60	4,20	3,86	3,32	3,12	2,60	1,99
	$T_2$ [daNm]	27	29	35	39	36	42	40	36
	$\eta$ [%]	84	78	76	74	67	64	58	55
	$i_e$	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	39,0	49,0	61,0
	$n_2$ [min. <sup>-1</sup> ]	175,0	116,7	87,5	70,0	58,3	44,9	35,7	28,7

Fonte - Catálogo Transmotécnica

## ANEXO N – Olhal de Içamento



Tipo	Peso máximo de fabricação do vaso kN (toneladas)	T	t	d	R	h	E	S (Ver nota 3)
0	98 (10)	19,0	9,5	55	60	60	160	10
1	196 (20)	22,4	12,5	70	100	110	220	12
2	245 (25)	25,0	16,0	80	120	130	260	15

Fonte - TELLES (1996)



## ANEXO O – TABELAS E DADOS PARA ACOPLAMENTOS

D	Furo (T)		d	D <sup>(R)</sup>	L	C	m	a	i	b	Y REL. (I)	Z REL. (I)	GD9 (kgm <sup>2</sup> )	M F	M <sub>1</sub> (kg)	M <sub>2</sub> (kg)
	max.	min.														
D - 3	35		58	112	50	104	25	54	4±1,5	27	0,4	1°00'	0,0126	0,02	14,2	3,6
D - 4	40		68	125	55	114	30	54	4±1,5	27	0,4	1°00'	0,027	0,03	22,5	5,2
D - 5	45		74	140	60	124	30	64	4±1,5	35	0,4	1°00'	0,050	0,05	36	6,6
D - 6	50		85	160	70	144	37	70	4±1,5	35	0,4	1°00'	0,098	0,08	55	9,9
D - 7	60		98	170	80	164	45	74	4±1,5	35	0,4	1°00'	0,15	0,13	90	13,1
D - 9	76		125	225	95	197	50	97	7±2	48	0,4	1°00'	0,51	0,25	180	28,4
D - 11	100		170	270	115	237	65	107	7±2	48	0,8	1°00'	1,5	0,5	360	54
D - 13	130	55	220	360	145	300	80	140	10±2	67	0,8	1°00'	5,5	1	720	117
D - 15	160	75	270	450	185	380	95	190	10±2	80	0,8	1°00'	17,5	2	1430	228
D - 17	195	90	330	560	225	462	115	232	12±2	100	0,8	1°00'	55	4	2860	430
D - 18	225	100	380	630	265	542	155	232	12±2	100	0,8	1°00'	97	5,6	4000	615

FATOR T		Fator de Serviço (R)	
aplica-se para tempo de serviço.		Misturadores	1,6
até 2 h/dia = 0,9		Guinchos	
2 — 8 h/dia = 1,0		Maqs. para madeiras	
8 — 16 h/dia = 1,06		Monta-cargas	
16 — 24 h/dia = 1,12		Fornos e cilindros rotativos	
		Betoneiras	

Fonte - Catálogo Acoplamento Teteflex

## APÊNDICE A - O PROGRAMA PROALCOOL

O programa Proálcool foi um marco para o combustível oriundo da cana de açúcar no Brasil ser difundido e produzido em larga escala pelas empresas sucroalcooleiras. Porém, alguns fatos que sucederam o programa foram de grande relevância para o incremento do etanol na matriz energética nacional. Em 1931, motivado principalmente pelas sucessivas crises do setor açucareiro, o governo determinou o incremento de 5% de etanol na gasolina importada, isso resultou em uma pequena redução do consumo de gasolina importada no país. Em 1942, com a Segunda Guerra Mundial no seu ápice, o abastecimento mundial de petróleo teve uma série de crises, isso refletiu diretamente no produto aqui no Brasil, onde o etanol passou a ser tratado com mais atenção pelo governo estipulando preços mínimos para o produto. (CORTEZ, 2018)

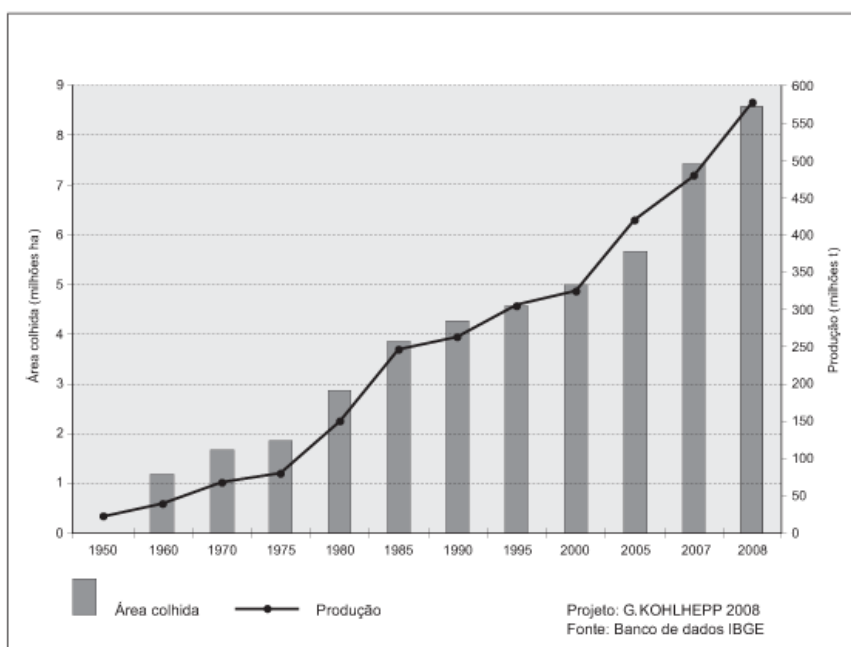
Após a crise sofrida pelo país durante a segunda guerra medida deveriam ser tomadas para evitar a escassez energética oriunda da falta de petróleo e derivados, sendo assim, em 1953, o então presidente Getúlio Vargas cria a Petrobrás, indústria responsável pelo monopólio de extração, transporte e refino de petróleo nacional e estrangeiro. A Petrobras tinha a missão de tornar o Brasil autossuficiente em petróleo, essa conquista só iria ser realizada oficialmente em 2006. (BARUFI, SANTOS e IDE, 2006)

Na década de 70 foi criado um órgão considerado o embrião para o programa Proálcool, o Plano Nacional de Melhoramento da Cana-de-açúcar (Planalsucar) foi um órgão responsável por desenvolver novas variedades da cana com o objetivo de aumentar a produtividade da atividade açucareira no país. Foi nessa década também que o petróleo sofreu um aumento exorbitante, passando de U\$\$ 1,90 em 1972 para U\$\$ 11,20 em 1974, esse aumento teve um impacto muito grande na economia brasileira visto que o país importava cerca de 80% do petróleo, sendo que esse número representava 50% de tudo que o país importava. (CORTEZ, 2018).

Com as sucessivas crises e aumentos nos preços do petróleo estrangeiro algo deveria ser feito para reduzir a dependência brasileira desse combustível, além disso o setor açucareiro vivia momentos de crise devido a constante queda no preço do mercado internacional do açúcar. E em 14 de novembro de 1975 o governo cria o Proálcool.

O programa em si foi dividido em duas partes, a primeira que deu início no ano de 1975 foi quando houve um grande investimento em pesquisas principalmente na área agrônômica e tecnológica do plantio, produção e utilização do etanol como combustível. Já a segunda etapa (1979 – 1985) foi caracterizada pelo aumento da produção de etanol (11,8 bilhões de litros em 85-86) devido a produção em destilarias autônomas (indústrias sem associação com a produção de açúcar). Foi na segunda etapa também que montadoras entraram em acordo com o governo para produção e comercialização de veículos movidos a etanol como é o caso do *FIAT*<sup>®</sup> 147 que foi um marco de vendas desse tipo de veículo no Brasil.

Figura 27 Área colhida e produção da Cana de açúcar no Brasil



Fonte - Apud KOHLHEPP (2010)

Como é possível observar na figura 7, o programa PROALCOOL teve impacto direto na produção da cana de açúcar no Brasil com o aumento da produção a partir de 1960, além disso, observa-se um aumento ainda maior entre os anos de 2000 e 2005, impulsionados principalmente pela fabricação em massa de veículos Flex Fuel (KOHLHEPP, 2010).

Além de incentivos e investimentos em plantas industriais o programa fomentou pesquisas que foram muito relevantes para o processo de aprimoramento da produção de etanol no país. A Dedini indústria de base apresentou no seminário em 1984 uma pesquisa intitulada de “Projeto Acid Catalysed Organosolv Saccharification (ACOS)” esse projeto apresentava uma interação entre o processo convencional e a obtenção do etanol celulósico, sendo que, a usina convencional era projetada para haver o máximo de sobra de bagaço para ser utilizado na planta de E2G. (apud CORTEZ, 2018). Esse projeto demonstrava já um interesse na busca por alternativas para o aumento da produção do etanol sem demandar maiores áreas de plantio, sendo um grande passo para as novas usinas nacionais de etanol celulósico.

Nos meados da década de 80, com o final do Regime Militar e o começo da Nova República alguns projetos foram extintos dentre eles o Proálcool, porém, incentivos à produção de etanol combustível não foram cessados visto que a demanda pelo líquido estava em constante aumento devido ao aumento da produção de veículos a álcool pela indústria automobilística.

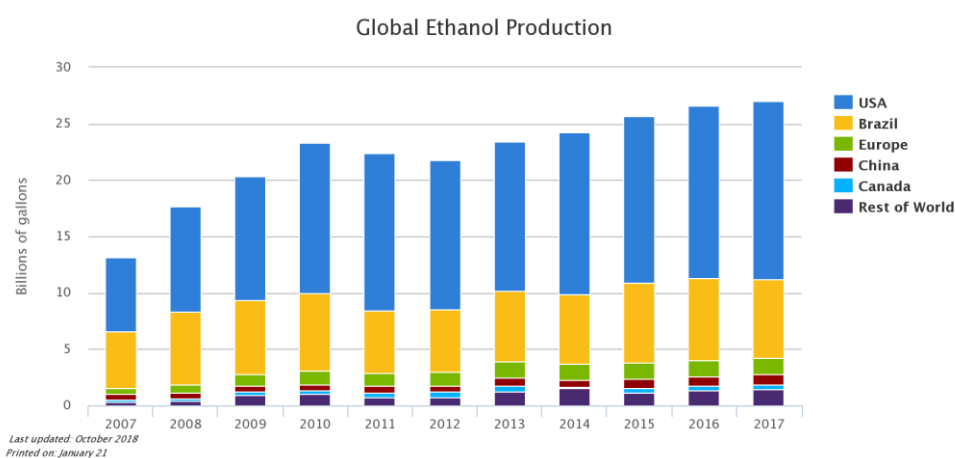
## APÊNDICE B - ETANOL DE PRIMEIRA GERAÇÃO (E1G)

A obtenção de etanol a partir da destilação de líquidos alcoólicos (cerveja, sidras, resíduos de vinificação, aguardentes) é um processo no qual o líquido que passou por um processo geralmente de fermentação é destilado até a obtenção do etanol, esse processo é inviável para produção industrial ficando restrita a processos artesanais de produção (JUNIOR, 2012).

Outra forma de se produzir etanol é através da síntese de hidrocarbonetos não saturados como o etino, eteno, gases de petróleo. Essa forma de produção é economicamente inviável para a maioria dos países e só é praticada nos locais onde há uma grande oferta de petróleo. Mesmo assim, a produção de etanol a partir da síntese dos hidrocarbonetos é muito pequena se comparada com a fermentação que é praticada no Brasil e no EUA, que juntos somaram mais de 22 bilhões de galões de um total de 27,5, ou seja 80% da produção mundial como é possível observar no gráfico 2.

A última e mais comum forma de produção de etanol é a partir da fermentação dos açúcares presentes nos vegetais. Comumente utilizado no Brasil e EUA a fermentação é um processo no qual é utilizado levedura *Saccharomyces cerevisiae*, seguida da bactéria *Zymomonas mobilis*. A combinação dessas duas substâncias em ambiente controlado de temperatura pressão, faz com que o produto fermente e produza pouca biomassa e muito etanol.

Figura 28 - Produção Mundial de Etanol entre 2007 - 2017



Fonte - Alternatives Fuel Data Center

O processo produtivo convencional passa por etapas bem definidas, desde o recebimento da matéria prima que no caso do Brasil é a cana de açúcar até a obtenção do etanol hidratado ou anidro.

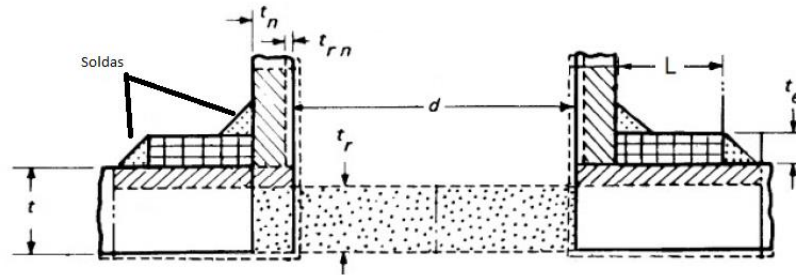
1. A cana é coletada, recebida, lavada e desfibrada para melhorar o processo de moagem
2. A cana então é moída e extraído o caldo para processo, separando o bagaço para ser utilizado posteriormente. Essa etapa inicia-se o processo de produção de etanol, açúcar e energia.
3. O bagaço é utilizado como combustível em termoelétricas instaladas dentro das unidades fabris. Cerca de 35% da energia é utilizada no processo e o restante é inserida na rede para abastecer o sistema energético nacional, gerando receita para a indústria.
4. O caldo, com elevado nível de impurezas é levado a tanques e filtros para remoção dos minerais resultando em um caldo clarificado.
5. O caldo clarificado é então colocado em um conjunto de evaporadores de múltiplo efeitos para retirada da água presente no caldo. No final dessa etapa o caldo se torna mais denso, tomando uma consistência de um xarope.
6. A próxima etapa consiste na obtenção do açúcar, o xarope do caldo é enviado a centrifugas que separam os cristais de açúcar do líquido açucarado, denominado de

mel ou melaço. Posteriormente o açúcar passa por um processo de secagem para retirada da umidade e é armazenado para ensaque.

7. A obtenção do etanol é feita a partir dessa etapa, o caldo é colocado em reatores e tratado com leveduras (fermento). A reação transforma o açúcar presente no caldo em etanol e gás carbônico, esse caldo agora é chamado de vinho e contém cerca de 9% de álcool.
8. O vinho agora, sem leveduras e com 9% de etanol é destilado onde o álcool é separado, concentrado e purificado a 96% se for hidratado ou 99,6% se for anidro.

## APÊNDICE C – CÁLCULO DO REFORÇO DOS BOCAIS

Figura 29 Reforço de Bocais



Fonte - TELLES (1996)

Onde:

$t_n$  = Espessura nominal da parede do tubo

$t_r$  = Espessura mínima do casco/tampo

$t_e$  = Espessura do anel de reforço





$t_{rn}$  = Espessura mínima da parede do tubo

$t$  = Espessura nominal do casco/tampo

$d$  = Diâmetro do bocal

$L$  = Largura do anel de reforço

A partir da figura 21 é pode-se calcular 4 tipos diferentes de áreas no cálculo dos reforços:

	$A_1 = d \cdot t_r + 2 \cdot t \cdot t_n$	→ Área requerida
	$A_2 = d \cdot (t - t_r) - 2 \cdot t_n(t - t_r)$	→ Área disponível no casco/tampo
	$A_3 = 5 \cdot t \cdot (t_n - t_{rn})$	→ Área disponível da projeção externa do bocal
	$A_4 = 2 \cdot L \cdot t_e$	→ Área disponível pelo anel de reforço



A partir das áreas determinadas acima é possível verificar se existe a necessidade de reforço ou não, nos bocais do reator através das condições, se:

- $A_2 + A_3 > A_1$  (eq. 7.7) então o bocal não necessita de reforço, caso contrário, é necessário instalar um anel de reforço no bocal.

Sendo a área do anel de reforço dada por  $A_4$ , o anel só estará bem dimensionado se atender a condição de:

- $A_2 + A_3 + A_4 > A_1$  (eq. 7.8) caso contrário é necessário recalcular o reforço do bocal.

No dimensionamento dos bocais, existem algumas exigências para tornar a operação segura e evitar acidentes e falhas precoces nesses locais, dentre elas:

- Para efeito de cálculo a projeção externa máxima deve ser de 2,5 vezes a espessura.
- A espessura máxima da chapa do anel de reforço é igual a espessura da chapa onde o bocal está sendo instalado.
- A largura máxima do anel de reforço não deve exceder o diâmetro interno do bocal.

Dentro dessas exigências, a Petrobras criou uma norma (N-253) que regulamenta a projeção externa dos bocais, e é dada pela tabela 9.

Tabela 15 - Projeção externa dos bocais

D.N. Tubo	Classe do flange (ANSI B16.5)						
	150	300	400	600	900	1500	2500
1 1/2"							
2"							
2 1/2"							
3"			200				250
4"							300
6"							350
8"						300	400
10"						350	500
12"						300	550
14"							
16"		250					
18"				300			
20"				350		450	
24"				400		500	

Fonte - Petrobras N – 253