

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS/MG**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**  
**JOÃO PEDRO BAPTISTA MARQUES BERNABÉ**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO EM UM PROJETO DE TANQUE INDUSTRIAL  
CONSTRUÍDO COM PRFV DIMENSIONADO DE ACORDO COM A NORMA  
ASME RTP-1 ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE COMPUTACIONAL  
POR ELEMENTOS FINITOS**

**VARGINHA/MG**

**2020**

**JOÃO PEDRO BAPTISTA MARQUES BERNABÉ**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO EM UM PROJETO DE TANQUE INDUSTRIAL  
CONSTRUÍDO COM PRFV DIMENSIONADO DE ACORDO COM A NORMA  
ASME RTP-1 ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE COMPUTACIONAL  
POR ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Jonathan O. Nery.

**VARGINHA/MG**

**2020**

**JOÃO PEDRO BAPTISTA MARQUES BERNABÉ**

**ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO EM UM PROJETO DE TANQUE INDUSTRIAL  
CONSTRUÍDO COM PRFV DIMENSIONADO DE ACORDO COM A NORMA  
ASME RTP-1 ATRAVÉS DE FERRAMENTAS DE ANÁLISE COMPUTACIONAL  
POR ELEMENTOS FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: / /

---

Prof.

---

Prof.

---

Prof.

Obs.:

Dedico este trabalho primeiramente à empresa FIBRAV, depois à minha família, amigos e colegas de trabalho, dos quais sem eles este trabalho não seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família por toda compreensão, apoio e investimento, aos meus amigos e colegas e aos professores que fizeram desta jornada de descobrimentos e aprendizado.

"Só é útil o conhecimento que nos torna  
melhores"

Sócrates

## RESUMO

O objetivo central do trabalho foi apresentar o método de obtenção da espessura estrutural de tanques construídos em fibra de vidro e apresentar as novas formas de otimização e criação de novos projetos com o uso de ferramentas de simulação computacional. Durante o trabalho, foi possível acompanhar o método de obtenção da espessura estrutural através da norma ASME RTP-1 e posteriormente a geração e simulação de um modelo 3D com o auxílio de ferramentas de análise de elementos finitos. A conclusão da pesquisa deu-se com a avaliação dos fatores de segurança gerados através dos resultados da simulação em comparação com a aplicabilidade dos equipamentos e as circunstâncias em que estes materiais são construídos.

**Palavras-chave:** Material Compósito, Fibra de Vidro, Elementos Finitos, *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 20.2.*

## ABSTRACT

*The main objective of the work was to present the method of obtaining the structural thickness of tanks built in fiberglass and to present the new forms of optimization and creation of new projects using computer simulation tools. During the work, it was possible to follow the method of obtaining the structural thickness through the ASME RTP-1 norm and later the generation and simulation of a 3D model with the aid of finite element analysis tools. The conclusion of the research was made with the evaluation of the safety factors generated through the results of the simulation in comparison with the applicability of the equipment and the circumstances in which these materials are built.*

**Keywords:** *Composite Material, Fiberglass, Finite Elements, Ansys® Academic Research Mechanical, Release 18.1.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema de classificação dos compósitos.....	15
Figura 02 – Geometrias da fase dispersa e suas configurações .....	15
Figura 03 – O padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração.....	16
Figura 04 – Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas.....	17
Figura 05 – Curvas esquemáticas tensão-deformação para materiais com fibra frágil e matriz dúctil .....	18
Figura 06 – Características de diversos materiais usados para reforço com fibras .....	20
Figura 07 – Corte transversal da parede de equipamentos de compósitos .....	22
Figura 08 – Laminação com pistola sendo executada por laminador.....	26
Figura 09 – Processo por laminação helicoidal sendo executado.....	27
Figura 10 – Fibras picadas e a resina sendo aplicadas com pistola.....	28
Figura 11 – Reservatório cilíndrico de fundo chato sob pressão hidrostática.....	30
Figura 12 – Modelo dimensional.....	32
Figura 13 – Divisões das seções .....	36
Figura 14 – Divisões das seções e suas espessuras.....	38
Figura 15 – Modelo 3D do cilindro.....	39
Figura 16 – Condições de contorno .....	40
Figura 17 – Pressão hidrostática aplicada ao modelo.....	40
Figura 18 – Propriedades mecânicas do laminado estrutural.....	41
Figura 19 – Resultados da deformação.....	42
Figura 20 – Tensão por Von-Mises.....	42
Figura 21 – Coeficiente de segurança por Von-Mises.....	43

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Espessura total dos tampos para tanques verticais cilíndricos.....	29
Quadro 02 – Espessura total do fundo plano totalmente apoiado sobre liga de concreto..	31
Quadro 03 – Características gerais do equipamento.....	33
Quadro 04 – Condições de operação do equipamento.....	34
Quadro 05 – Espessura dos tampos superiores em função do diâmetro.....	34

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	16
Equação 2 .....	18
Equação 3 .....	19
Equação 4 .....	19
Equação 5 .....	29
Equação 6 .....	29
Equação 7 .....	29
Equação 8 .....	30
Equação 9 .....	34

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Material Compósito.....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Compósitos Reforçados com Fibras.....	15
2.1.1.1 Influência do Comprimento da Fibra.....	16
2.1.1.2 Influência da Orientação e da Concentração da Fibra.....	17
2.1.1.2.1 Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas.....	17
2.1.1.2.2 Compósitos com Fibras Descontínuas e Aleatórias.....	19
2.1.2 Fase Fibra.....	20
2.1.3 Fase Matriz.....	21
2.1.4 Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV) .....	21
<b>2.2 Tanques Industriais em PRFV.....</b>	<b>22</b>
2.2.1 Laminados.....	22
2.2.1.1 Liner.....	23
2.2.1.2 Barreira de Corrosão.....	23
2.2.1.3 Laminado Estrutural.....	24
2.2.1.4 Top Coat.....	24
2.2.2 Processos de Fabricação dos Laminados.....	25
2.2.2.1 Spray-up.....	25
2.2.2.2 Hoop-Chop.....	26
2.2.3 Dimensionamento de Acordo com a Norma Regulamentadora ASME RTP-1.....	28
2.2.3.1 Calota.....	28
2.2.3.2 Costado.....	29
2.2.3.3 Fundo.....	31
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Dimensionamento Normatizado.....</b>	<b>33</b>
3.1.1 Tampo Superior.....	34
3.1.2 Seção Cilíndrica (Costado).....	35
3.1.3 Tamos.....	39
<b>3.2 Desenvolvimento da Simulação de Elementos Finitos.....</b>	<b>38</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de polímeros nos últimos cem anos foi impulsionado pelo crescimento da indústria do petróleo. Muitas das nossas tecnologias modernas requerem materiais com combinações bem peculiares de propriedades que não podem ser atendidas por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos, são exemplos de tecnologias indispensáveis em aplicações aeroespaciais, subaquáticas e de transporte.

Acompanhando este crescimento, a indústria de tanques industriais encontrou uma valiosa alternativa no uso da Fibra de Vidro enquanto componente de reforço nas matrizes dos laminados para o uso estrutural. Os tanques construídos em PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro) podem ser utilizados para armazenamento de água potável, produtos alimentícios, cosméticos, produtos químicos, entre outros. A resina utilizada na matriz dos laminados são específicas para cada tipo de produto, concentração e temperatura. Além disso, os tanques podem ser pintados e submetidos à aplicação de produtos contra raios UV (Ultra-Violeta) e intempéries do ambiente.

Afim de se estabelecer padrões, os diversos órgãos de normalização mundiais desenvolvem procedimentos e critérios a serem seguidos durante todo o processo de projeto, produção e inspeção dos equipamentos.

Para garantir a integridade e segurança do equipamento, os parâmetros presentes nas normas estão sujeitos à altos níveis de tolerância. Os projetistas que tomam como base de seus cálculos as normas regulamentadoras, estão sujeitos ao superdimensionamento dos seus projetos como preço do alto nível de segurança estabelecidos nas normas.

Por outro lado, o uso de ferramentas de modelagem computacional (CAD) juntamente com softwares de cálculos computacionais de engenharia são um poderoso recurso disponível aos engenheiros e projetistas. Essas ferramentas auxiliam os profissionais da área no desenvolvimento e na melhoria contínua de novos equipamentos e produtos. Como resultado, tem-se produtos e equipamentos cada vez mais tecnológicos, com baixos custos e tempo de projeto reduzido.

Este trabalho terá como objetivo verificar os níveis de segurança, com o auxílio de ferramentas computacionais, de um projeto de tanque vertical para armazenamento de água construído em PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro) dimensionado segundo a norma ASME RTP-1 e posteriormente verificar a viabilidade de redução da espessura do laminado estrutural para fins de economia de produção do equipamento mantendo um coeficiente de segurança aceitável. A realização do presente trabalho é de grande importância não só para o

setor da indústria de tanques em materiais compósitos como em todos os setores onde exista a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos. Na pesquisa será possível evidenciar que com ferramentas atuais de análises computacionais por elementos finitos, é possível realizar melhorias em projetos já existentes e a criação de protótipos em pouco tempo e sem a necessidade de grandes investimentos financeiros.

Neste trabalho, será tratada a possibilidade de otimização, com o auxílio de ferramentas computacionais de simulação, de um projeto além dos parâmetros presentes em normas regulamentadoras destinadas à padronização do dimensionamento de tanques construídos em plástico reforçado com fibra de vidro visando a redução de custos de produção do equipamento e garantindo sua integridade e segurança.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Material Compósito**

Os materiais denominados como compósitos são compostos por duas ou mais fases, sendo essas de diferentes propriedades químicas e físicas. Esses materiais se caracterizam por serem compostos por uma fase contínua (matriz) e uma fase dispersa (reforço ou modificador), contínua ou não, cuja as propriedades resultantes da mistura são compostas pelas propriedades dos constituintes individuais.

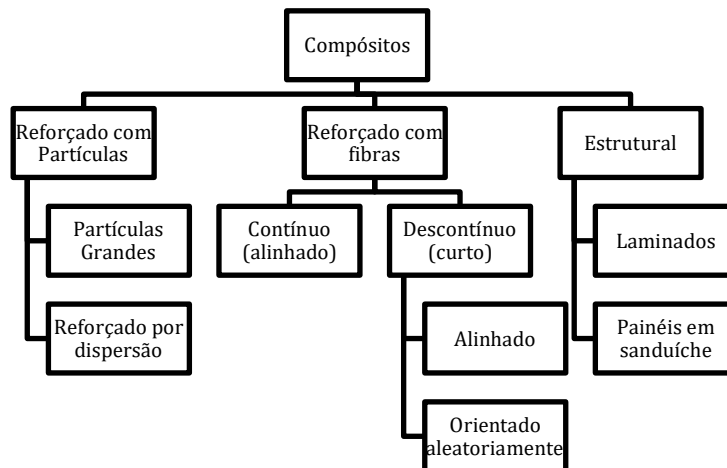
Smith (1998, p. 767-768) menciona em sua obra que não existe uma definição que seja aceita por todos os pesquisadores da área, e define compósito como sendo “um material formado por uma mistura ou combinação de dois ou mais micro ou macro constituintes que diferem na forma e na composição química e que, na sua essência são insolúveis uns nos outros”.

Pelo fato do material compósito ser obtido a partir de dois materiais diferentes, ambos mantêm suas propriedades individuais, mas, quando são misturados apresentam comportamentos distintos dos apresentados quando não misturados. Para este fenômeno é dado o nome de princípio da ação combinada.

O compósito é “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades” (CALLISTER,2002, p. 359).

Segundo Callister (2002, p.360), os vários tipos de materiais compósitos apresentam um esquema de classificação de acordo com a figura 01:

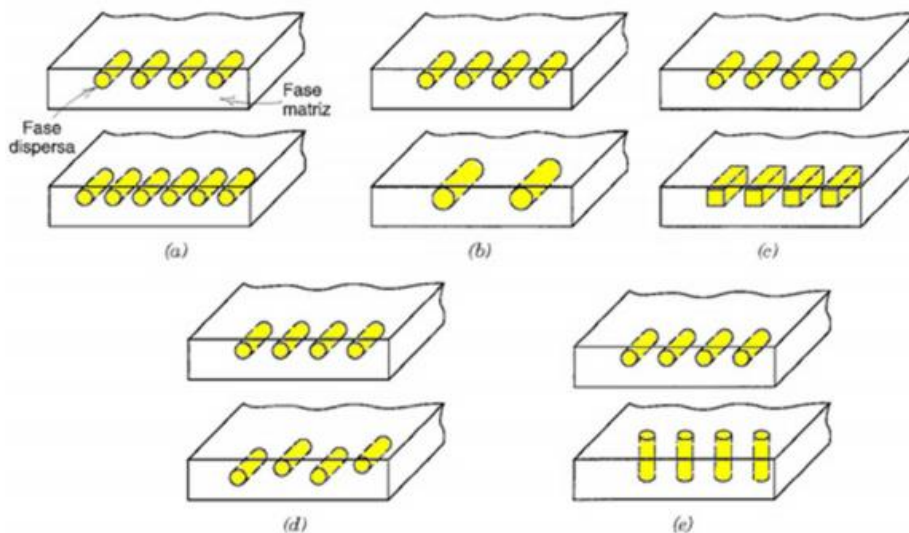
Figura 01 - Esquema de classificação dos compósitos.



Fonte: (CALLISTER, 2002, p.360)

As propriedades do compósito a ser criado depende diretamente das características individuais da fase matriz e da fase dispersa, da natureza da interface (fase matriz – fase dispersa) e também da geometria da fase dispersa, que podem apresentar diferentes tipos de configurações como mostra a figura 3.

Figura 02 - Geometrias da fase dispersas e suas configurações.



Fonte: (CALLISTER, 2002 p. 360)

### 2.1.1 Compósitos Reforçados com Fibras

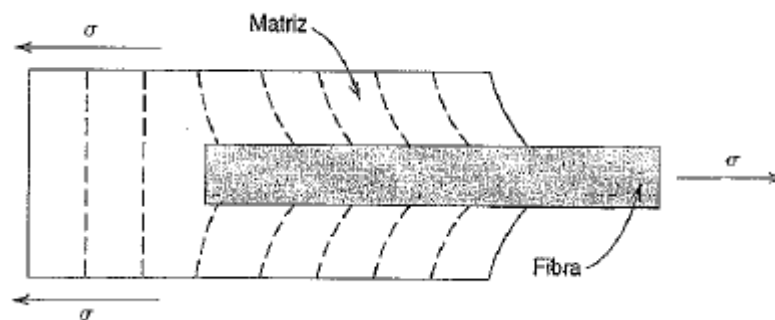
Dentre os objetivos de projeto ao se criar um compósito reforçado com fibras, os mais comuns são componentes capazes de elevada resistência mecânica e/ou rigidez em relação ao seu peso. Essas características mecânicas não dependem somente das propriedades da fibra,

mas também do seu comprimento, sua concentração e sua orientação da qual estão dispostas a partir de uma força da qual é transmitida pela fase matriz.

### 2.1.1.1 Influência do Comprimento da Fibra

Sob a aplicação de uma tensão, a ligação fibra-matriz se interrompe nas extremidades da fibra produzindo um padrão de deformação da matriz de acordo com a figura 03. Ou seja, não existe nenhum tipo de transmissão de carga a partir da matriz em cada extremidade da fibra.

Figura 03 – O padrão de deformação na matriz em volta de uma fibra que está sujeita à aplicação de uma carga de tração.



Fonte: (CALLISTER Pag. 363)

Ainda, segundo Callister (2002, p. 363), “um certo comprimento crítico de fibra é necessário para que exista um efetivo aumento da resistência e um enrijecimento do material composto. Esse comprimento crítico,  $l_c$ , depende do diâmetro da fibra,  $d$ , e da sua resistência final (ou limite de resistência à tração),  $\sigma_f$ , bem como da força da ligação entre a fibra e a matriz (ou da tensão limite de escoamento cisalhante da matriz, o que for menor),  $\tau_c$  de acordo com a relação”.

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2 \cdot \tau_c} \quad (1)$$

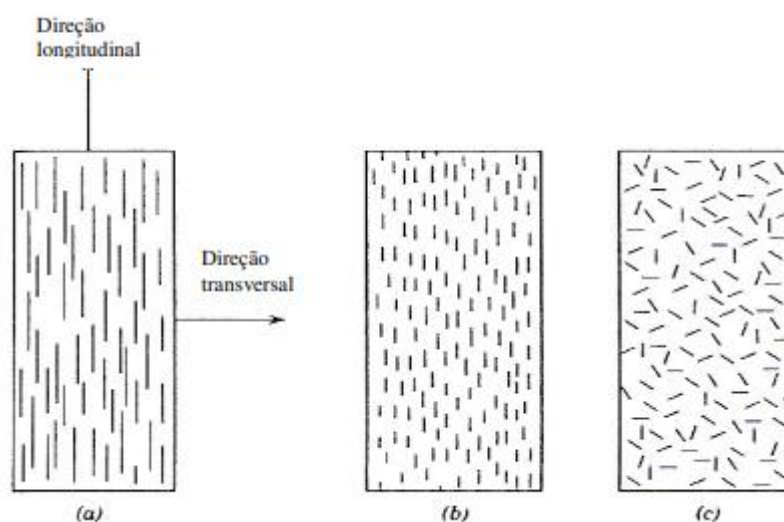
Em diversos tipos de combinações de matriz-fibra de vidro ou de carbono, esse comprimento crítico é da ordem de 1 mm, variando entre 20 e 150 vezes o diâmetro da fibra.



### 2.1.1.2 Influência da Orientação e da Concentração da Fibra

Outra influência que impacta diretamente nas propriedades mecânicas do material compósito é a orientação e concentração das fibras. Para as orientações das fibras, existem dois padrões comumente utilizados: Alinhamento paralelo do eixo longitudinal das fibras em uma única direção e um alinhamento composto por fibras orientadas aleatoriamente. Normalmente as fibras contínuas estão alinhadas (figura 04 (a)), enquanto as fibras descontínuas podem estar alinhadas (figura 04 (b)), orientadas aleatoriamente (figura 04 (c)) ou parcialmente orientadas.

Figura 04 – Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas.



Fonte: (CALLISTER, 2002, p. 365)

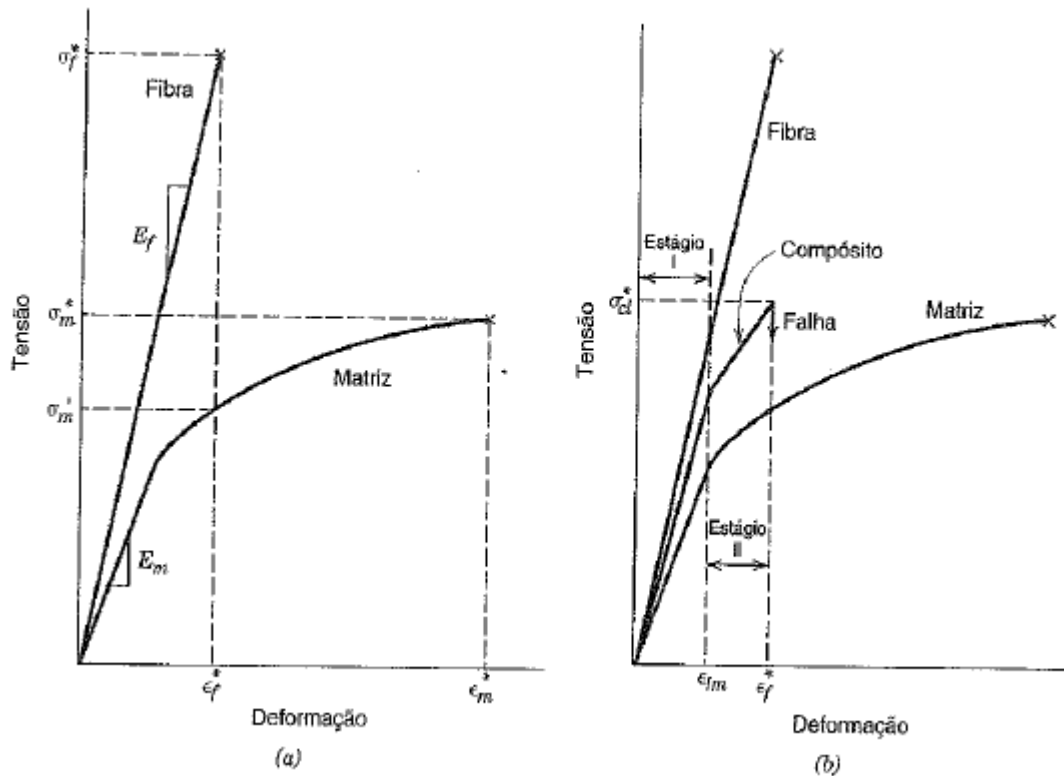
#### 2.1.1.2.1 Compósitos com Fibras Contínuas e Alinhadas

Dentre os fatores que afetam as respostas mecânicas para compósitos com fibras contínuas e alinhadas, os principais são os comportamentos tensão-deformação das fases fibra e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. Para os materiais com esta configuração, as propriedades dos materiais que possuem este tipo de arranjo são altamente anisotrópicas, ou seja, dependem diretamente da direção na qual as tensões estão sendo aplicadas.

Para Callister (2002, p. 365), considerando os comportamentos tensão-deformação para as fases fibra e matriz representados esquematicamente na figura 05 (a), foi considerado que a fibra fosse totalmente frágil e que a fase matriz fosse razoavelmente dúctil. Nesta figura, estão as resistências à fratura sob condições de tração para a fibra e para a matriz,  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$ ,

respectivamente, e suas correspondentes deformações no momento da fratura,  $\epsilon_f$  e  $\epsilon_m$ . Nos mais diversos casos, normamente é considerado que  $\epsilon_m > \epsilon_f$ .

Figura 05 – (a) Curvas esquemáticas tensão-deformação para materiais com fibra frágil e matriz dúctil. As tensões e deformações na fratura para ambos os materiais estão anotadas. (b) Curva esquemática tensão deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas que está exposto a uma tensão uniaxial que é aplicada na direção do alinhamento; as curvas para os materiais da fibra e da matriz apresentadas na parte (a) também estão superpostas.



Fonte: (CALLISTER. Pag. 365)

Sendo assim, considerando o comportamento elástico de materiais onde são carregados na direção do alinhamento das fibras, e admitindo-se que a ligação interfacial fibra-matriz é muito boa, de modo que a deformação tanto da matriz como das fibras sejam as mesmas, a carga total suportada pelo compósito,  $F_c$ , deve ser igual às cargas suportadas pela fase matriz,  $F_m$ , e pela fase fibra,  $F_f$ , ou seja,

$$F_c = F_m + F_f, (2)$$

Por outro lado, o comportamento elástico para compósitos com fibras contínuas e orientadas submetidos a carregamentos transversais, ou seja, a carga orientada a  $90^\circ$  do

alinhamento das fibras, a tensão  $\sigma$  da qual o material e ambas as fases estão expostos é a mesma, para este fenômeno é dado o nome de estado por isotensão, ou seja:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (3)$$

Os limites de resistência à tração longitudinal dos compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas é normalmente tomada como sendo a tensão máxima na curva tensão-deformação, figura 05 (b). Na maioria dos casos, esse ponto é o momento que normalmente ocorre à fratura da fibra e marca o surgimento da falha do material.

Callister reforça também que “a falha deste tipo de material compósito é um processo relativamente complexo, e várias modalidades de falha diferentes são possíveis. A modalidade que opera para um compósito específico dependerá das propriedades das fases fibra e matriz, bem como da natureza e da força da ligação interfacial entre a fibra e a matriz”.

Como já mencionado anteriormente, as resistências mecânicas de materiais compósitos fibrosos contínuos e unidirecionais são altamente anisotrópicas. Sabido disso, os projetistas normalmente dimensionam este tipo de material para serem submetidos a forças longitudinais. Por outro lado, cargas transversais podem estar presentes durante seu ciclo de serviço levando a falhas prematuras devido ao baixo limite de resistência à tração na direção transversal desses materiais.

#### 2.1.1.2.2 Compósito com Fibras Descontínuas e Aleatórias

Normalmente, para materiais compósitos onde as fibras estão dispostas aleatoriamente, são utilizadas fibras curtas e descontínuas de acordo com a figura 04 (c). O módulo de elasticidade para este tipo de compósito é baseado em uma expressão de “regra de misturas” onde K representa um parâmetro de eficiência da fibra, o qual depende de  $V_f$  e da razão  $E_f/E_m$  conforme mostra a expressão abaixo:

$$E_{cd} = K \cdot E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (4)$$

Sendo assim, para um material reforçado com fibras orientadas aleatoriamente, o módulo aumenta de acordo com uma proporção da fração volumétrica da fibra.

Para concluir, Callister reforça que “os compósitos fibrosos alinhados são inerentemente anisotrópicos, no sentido de que a resistência e o reforço máximos são obtidos

ao longo da direção do alinhamento (longitudinal). Na direção transversal, o reforço com fibras é virtualmente inexistente: a fratura ocorre normalmente em níveis de tensões de tração relativamente baixos. Para outras orientações de tensão, a resistência do compósito se encontra entre esses extremos. As eficiências dos reforços com fibras para várias situações é tomada como sendo igual à unidade para o caso de um compósito com fibras orientadas e tensão na direção do alinhamento, e igual a zero em uma direção perpendicular a essa”.

### 2.1.2 Fase Fibra

Uma importante peculiaridade da maioria dos materiais principalmente os frágeis é que um filamento com menor diâmetro se mostra muito mais resistente do que o material bruto. Na fase fibra esses materiais podem ser agrupados quanto ao diâmetro e à natureza e se distribuem nos grupos: uísqueres (whysker), fibras e arames.

Dos três grupos, as fibras são as quais nos interessa. Elas são materiais policristalinos ou amorfos com pequenos diâmetros e geralmente são polímeros ou cerâmicas. A figura 6 nos mostra as características de diversos materiais usados para reforço em compósitos fibrosos.

Figura 06 – Características de diversos materiais usados para reforço com fibras.

<i>Material</i>	<i>Densidade Relativa</i>	<i>Limite de Resistência à Tração [GPa (10<sup>8</sup> psi)]</i>	<i>Resistência Específica (GPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade [GPa (10<sup>8</sup> psi)]</i>	<i>Módulo Específico (GPa)</i>
<i>Uísqueres</i>					
Grafita	2,2	20 (3)	9,1	700 (100)	318
Nitreto de silício	3,2	5-7 (0,75-1,0)	1,56-2,2	350-380 (50-55)	109-118
Óxido de alumínio	4,0	10-20 (1-3)	2,5-5,0	700-1500 (100-220)	175-375
Carbeto de silício	3,2	20 (3)	6,25	480 (70)	150
<i>Fibras</i>					
Óxido de alumínio	3,95	1,38 (0,2)	0,35	379 (55)	96
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1 (0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Carbono*	1,78-2,15	1,5-4,8 (0,22-0,70)	0,70-2,70	228-724 (32-100)	106-407
Vidro E ( <i>E-Glass</i> )	2,58	3,45 (0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Boro	2,57	3,6 (0,52)	1,40	400 (60)	156
Carbeto de silício	3,0	3,9 (0,57)	1,30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900) (Polietileno com Peso Molecular Ultra-Alto)	0,97	2,6 (0,38)	2,68	117 (17)	121
<i>Arames Metálicos</i>					
Aço de alta resistência	7,9	2,39 (0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibdênio	10,2	2,2 (0,32)	0,22	324 (47)	31,8
Tungstênio	19,3	2,89 (0,42)	0,15	407 (58)	21,1

Fonte: (CALLISTER, Pag. 370)

### 2.1.3 Fase Matriz

Na maioria dos casos, a fase matriz de compósitos com fibras são feitas a partir de metais, polímeros ou cerâmicas. Por padrão, os metais e os polímeros são usados como materiais da matriz, devido a necessidade de ductilidade na aplicação. Por outro lado, em compósitos com base de cerâmica o reforço traz melhor tenacidade à fratura.

Dentre as mais diversas funções que a fase matriz exerce no material compósito, as principais são:

- a) Ligar as fibras umas as outras atuando como um meio para a tensão aplicada se propagar, transmitindo e distribuindo entre as fibras próximas os efeitos da carga;
- b) Proteção para as fibras contra danos superficiais externos, evitando a degradação e eventuais trincas gerando a falha prematura do compósito;
- c) Separar as fibras uma das outras resultando em uma barreira contra a propagação de trincas.

Callister menciona que “embora algumas das fibras individuais possam eventualmente falhar, a fratura total do compósito não irá ocorrer até que um grande número de fibras adjacentes, uma vez tenham falhado, forme um aglomerado com dimensões críticas”.

Para se ter um compósito de grande eficiência é essencial uma boa força de ligação entre as fibras e a matriz afim de evitar o desprendimento desses materiais e garantir que a transmitância de tensões durante a vida do componente seja a mais eficiente possível. Por isto, a escolha da combinação fibra-matriz deve levar principalmente este fator em conta pois o resultado da resistência final do material depende diretamente da eficiência deste fenômeno.

### 2.1.4 Plástico Reforçado com Fibras de Vidro (PRFV)

Os Plásticos reforçados com Fibras de Vidro, fazem parte do grupo dos compósitos com matriz polimérica reforçados com fibras de cerâmica. Esses materiais são utilizados nas mais amplas aplicações devido principalmente à sua grande facilidade de fabricação, custo e boa propriedades mecânicas à temperatura ambiente.

Os plásticos reforçados retêm todas as propriedades desejáveis dos não reforçados, como resistência à corrosão, baixo custo de processamento, liberdade de projeto e outras. As deficiências dos plásticos, como baixa estabilidade dimensional, baixa rigidez e, para alguns plásticos, baixa tenacidade, são atenuadas pela inclusão de fibras de vidro. Portanto, parece natural que os compósitos sejam feitos com fibras de vidro.

Normalmente o PRFV é construído a partir de fibras de vidro contínuas ou descontínuas ou a combinação dos dois e o diâmetro dessas fibras variam normalmente entre 3 e 20  $\mu\text{m}$ .

Podemos dizer que as modificações obtidas com a inclusão das fibras transformam os plásticos de baixo custo em materiais de engenharia, dotados de propriedades muito apreciadas, como:

- a) Alta Rigidez;
- b) Boa resistência a temperaturas;
- c) Excelente estabilidade dimensional;
- d) Excepcional resistência à fadiga.

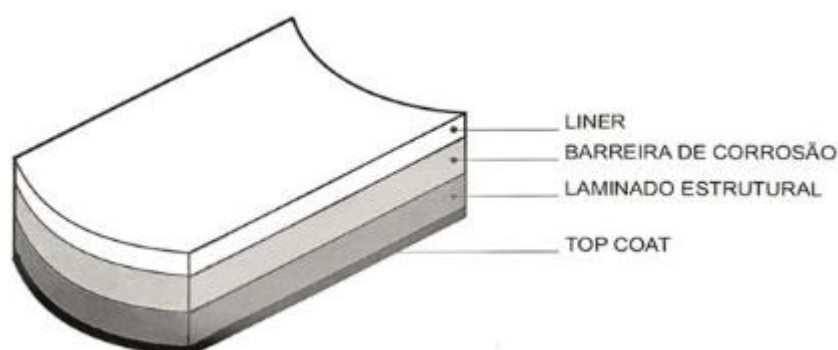
CARVALHO ainda reforça a grande importância do PRFV dizendo que “a inclusão das fibras de vidro expande o campo de aplicações dos plásticos, tornando possível seu uso em concorrência direta com os metais”. (CARVALHO, 2012, p.28).

## 2.2 Tanques Industriais em PRFV

### 2.2.1 Laminados

A figura 07 mostra a construção padrão da parede dos equipamentos usados em aplicações industriais evidenciando as posições e as espessuras relativas dos laminados do liner, da barreira de corrosão, da estrutura e do topcoat.

Figura 07 – Corte transversal da parede de equipamentos de compósitos.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p.69).

Como menciona CARVALHO (2012, p. 69), o liner tem mais de 90% de resina e tem a função de retardar a penetração dos produtos químicos. A barreira de corrosão tem 70% de resina e é responsável pela vida funcional do equipamento. Os equipamentos podem trabalhar sem liner, mas não podem dispensar a barreira de corrosão. O laminado estrutural é feito com

fibras UD e é rapidamente infiltrado pelos produtos químicos. O laminado estrutural não deve ter contato com produtos químicos agressivos. O top-coat serve de proteção contra os raios solares e respingos externos. A vida funcional dos equipamentos é determinada pela barreira de corrosão.

#### 2.2.1.1 Liner

Independente do processo de fabricação, os equipamentos de compósitos devem ser providos de um laminado interno, rico em resina, conhecido como liner. O liner retarda a penetração dos produtos químicos e impede que as fibras de vidro tenham contato direto com o ambiente agressivo. O liner é feito impregnando véus de superfície com resina devidamente ativada para curar na temperatura ambiente. O véu de superfície é uma manta fina formada por fibras de poliéster ou de vidro. Ao contrário dos véus de vidro, os de poliéster não têm ligantes e por isso são mais difíceis de impregnar.

Os véus de superfície são usados pelas razões seguintes:

- Asseguram a uniformidade de espessura (mínimo 0,25 mm) do liner;
- Aumentam a resistência do liner à abrasão e ao impacto;
- Permitem a laminação imediata da barreira de corrosão, sem esperar pelo tempo de toque.

Para CARVALHO (2012, p. 70), Das três razões acima, a possibilidade de fazer a laminação sem esperar pelo tempo de toque é a mais importante principalmente pelo fato do tempo de processo ser reduzido. A lamina do liner é feita com mais de 90% de resina e não tem função estrutural.

#### 2.2.1.2 Barreira de Corrosão

A barreira de corrosão é feita com fibras de vidro picadas, impregnadas pela mesma resina usada no liner. A barreira de corrosão dos equipamentos industriais deve ter pelo menos 2,0 mm de espessura e é feita com 70% de resina e 30% de fibras de vidro picadas por peso. Sua grande espessura serve para isolar e proteger o laminado estrutural contra a ação do meio agressivo. A espessura da barreira de corrosão determina a vida funcional (intervalo entre paradas para manutenção) dos equipamentos. Em ambientes extremamente agressivos, como cloro ou dióxido de cloro, ou extremamente penetrantes, como ácido clorídrico, a espessura da barreira de corrosão deve ser maior que os 2,0 mm mínimos citados acima.

Para dar a espessura mínima de 2,0 mm, a barreira de corrosão deve ter pelo menos 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado. As fibras picadas podem ser laminadas manualmente, com mantes ou a pistola, com rovings.

#### 2.2.1.3 Laminado Estrutural

O laminado estrutural pode ser feito com fibras de vidro picadas, tecidas ou contínuas, dependendo do processo de fabricação. Sua espessura é determinada para resistir aos esforços atuantes no equipamento.

Segundo CARVALHO (2012, p. 72), os laminados estruturais são construídos para ter altas propriedades mecânicas (altos módulos de elasticidade) e não para ter baixa permeabilidade. Essa estratégia supõe que a resistência do equipamento ao ataque dos produtos químicos, a vida funcional, seja atribuída unicamente à barreira de corrosão. Assim, a vida funcional dos equipamentos é definida como o tempo que os produtos químicos levam para atravessar a barreira de corrosão e atingir o laminado estrutural. Essa definição supõe que os produtos químicos penetrem e destruam com rapidez o laminado estrutural. Muitas vezes isso não acontece. Por exemplo:

Os laminados estruturais feitos por laminação manual ou por hoop-chop, podem ter baixa permeabilidade a retardar a penetração dos produtos químicos, exatamente como faz a barreira de corrosão feita com fibras picadas.

#### 2.2.1.4 Top Coat

O topcoat é uma fina lâmina de resina pura, sem fibras, com 0,3 mm de espessura, que é aplicada na superfície externa dos equipamentos. Os topcoats protegem os equipamentos contra atmosferas agressivas e contra intemperismo. Geralmente eles são feitos com resina parafinada e sem véu de superfície. A aplicação da resina pode ser feita com pistola ou rolo.

A ausência do topcoat facilita o ataque do ambiente externo. Em alguns casos extremos, como em atmosferas ricas em cloro, ou onde a incidência solar for muito intensa, esse ataque pode remover a resina da superfície externa e deixar as fibras expostas. A exposição das fibras é conhecida como “mamutização” porque, segundo especialistas, as fibras expostas deixam os equipamentos de compósito com a aparência de mamute.



## 2.2.2 Processos de Fabricação dos Laminados

Dentre os mais diversos processos de fabricação de tanques construídos em PRFV existentes, abordaremos neste artigo a laminação com pistola (spray-up) e a laminação hoop-chop, processos esses que atualmente são exercidos na empresa em questão como método principal de fabricação.

### 2.2.2.1 Spray-Up

CARVALHO (2012, p. 74), explica que a laminação a pistola é feita com máquinas laminadoras especiais que cortam as fibras de roving contínuo e as atiram no molde simultaneamente com a resina. As fibras picadas são assentadas no molde e as bolhas de ar eliminadas usando roletes metálicos, rolos ou pincéis.

- a) Antes de iniciar a laminação, a superfície de molde deve ser coberta com desmoldante. Os desmoldantes mais usados são soluções de álcool polivinílico, cera e filmes de poliéster;
- b) O liner é aplicado sobre o desmoldante. O véu de superfície não pode ser aplicado com pistola e deve ser laminado manualmente, com resina devidamente catalisada e acelerada;
- c) Os catalisadores e os aceleradores devem ser usados em suas formas mais concentradas para evitar excesso de plastificantes. O fabricante deve semear na laminação do liner, espalhando a resina no molde antes de aplicar o véu;
- d) Os liners que trabalham em ambientes muito agressivos podem trincar e perder sua função protetora. Nesses casos eles devem ser protegidos com uma lâmina de fibras picadas ou de fibras tecidas aplicadas no molde antes deles. Essa tecnologia é conhecida como split-liner;
- e) A barreira de corrosão pode ser aplicada em seguida e sem esperar pela cura ou tempo de toque da resina do liner. A laminação é feita com pistola capaz de cortar as fibras de vidro e as atirar no molde simultaneamente com a resina ativada para curar na temperatura ambiente. O material aplicado é assentado com roletes e pincéis, enquanto a resina ainda está líquida. A barreira de corrosão tem espessura mínima de 2,0 mm, o que pode ser obtido aplicando 900 gramas de fibras picadas por metro quadrado;
- f) O laminado estrutural é feito como a barreira de corrosão. A roletagem deve ser feita imediatamente após a aplicação pela pistola, lâmina por lâmina, até ser atingida a espessura desejada. Como regra geral cada passagem da pistola acrescenta 1,5 mm à espessura. Espessuras muito grandes devem ser construídas em estágios, para permitir a dissipação do

calor. Não é aconselhável laminar mais que 6 mm de espessura por vez. A laminação deve ser feita esperando pelo esfriamento dos primeiros 6 mm, antes de prosseguir com a aplicação de outras lâminas;

g) O topcoat é feito com resina contendo parafina e absorvedor de raios UV. A parafina serve para impedir inibição da cura da resina exposta ao ar e é necessária para evitar degradação prematura causada pela ação das intempéries. Quando o ambiente externo é muito agressivo alguns fabricantes aplicam o topcoat manualmente usando véu de superfície. Depois da aplicação do topcoat, o equipamento permanece no molde até completar a cura. Na figura 08 é possível ver a aplicação do método de spray-up em um molde cilíndrico.

Figura 08 - Laminação com pistola sendo executada por laminador.



Fonte: (FIBRAV, 2016)

h) Terminado a cura, o laminado é desmoldado e preparado para receber as conexões ou ser unido a outras peças. A preparação é feita com ferramentas pneumáticas de lixamento e de corte.

#### 2.2.2.2 Hoop-Chop

Para a laminação por enrolamento helicoidal, circunferencial e hoop-chop o processo de construção do liner e da barreira química é exatamente como nos processos de laminação manual ou com pistola. O enrolamento é usado apenas na construção do laminado estrutural, que é feito com fibras UD. As fibras UD são impregnadas com resina e enroladas sobre o mandril.

O topcoat externo, a desmoldagem, a montagem, etc, são feitos como nos processos manual ou a pistola.

A figura 09 mostra o enrolamento das lâminas estruturais pelo processo de laminação helicoidal (filament winding). As fibras UD passam por uma banheira onde são impregnadas com resina líquida devidamente catalisada e acelerada. Depois de impregnadas as fibras UD passam em um pente onde são agrupadas em faixa de largura adequada. Essa faixa segue para o cabeçote de alimentação e é finalmente enrolada no mandril giratório. O conjunto formado pela banheira, pente e cabeçote é acoplado a um carro que executa movimento de vai e vem paralelo ao eixo do mandril. A combinação da rotação do mandril com a translação do carro faz com que as fibras UD descrevam uma hélice de passo constante sobre o mandril.

Figura 09 - Processo por laminação helicoidal sendo executado.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 75)

CARVALHO (2012, p. 75) explica que diferente do processo por enrolamento helicoidal e circunferencial, o processo por hoop-chop é indicado para grandes diâmetros. O motivo é o fato de que os laminados com fibras UD enroladas em ângulos próximos de  $90^\circ$  têm pouca resistência na direção axial e podem romper ou trincar durante o manuseio ou em uso. Para evitar isso, o hoop-chop trata de incluir fibras picadas no laminado estrutural. O teor de fibras picadas deve ser estabelecido para dar ao cilindro a resistência axial desejada.

Portanto, a aplicação simultânea de fibras picadas e de fibras UD permite a construção de estruturas de seção circular sem as complicações do enrolamento helicoidal. O processo de laminação que combina fibras picadas e fibras UD é conhecido em inglês como “hoop-chop”. No processo hoop-chop as fibras UD – contínuas – contribuem as propriedades circunferenciais do laminado, enquanto as fibras picadas resistem principalmente aos esforços axiais. O processo

“hoop-chop” é muito usado para produzir tubos e tanques verticais ou horizontais de grandes diâmetros. Na figura 10 é possível ver a aplicação de resina e fibra pelo método hoop-chop.

Figura 10 - Fibras picadas e a resina sendo aplicadas com pistola.



Fonte: (CARVALHO, 2012, p. 74)

### 2.2.3 Dimensionamento de Acordo com a Norma Regulamentadora ASME RTP-1

Para esta etapa, será apresentado um dos métodos de cálculo da espessura de parede dos equipamentos de compósitos focando apenas no equipamento de interesse, tanques verticais cilíndricos de fundo chato e sob cargas hidrostáticas.

Será demonstrado o método de cálculo de acordo com a norma mundial ASME RTP-1 e será demonstrado as etapas de cima para baixo, começando pela tampa do tanque e terminando no fundo chato.

#### 2.2.3.1 Calota

A norma ASME RTP-1 estabelece que as calotas de tanques verticais cilíndricos devem suportar 110 kg distribuídos sobre uma área de 10 cm x 10 cm. Nessa condição, a calota (outro nome para tampo) não pode sofrer danos estruturais nem apresentar afundamento superior a 1/200 do diâmetro do tanque. A norma ASME RTP-1 não faz menção ao alongamento máximo admissível. Ela diz apenas que a calota não deve apresentar danos estruturais quando submetida a carga de 110 kg citada acima. O quadro 01 mostra as espessuras totais das calotas feitas com fibras picadas para atender as exigências da norma ASME RTP-1.

Quadro 01 - Espessura total dos tampos para tanques verticais cilíndricos.

Diâmetro (cm)	Raio da calota (cm)	Altura da Calota (cm)	Espessura Estrutural (mm)	Espessura Total (mm)
120	90	25	4,5	5,0
150	112	31	5,0	5,0
180	135	38	6,0	6,0
200	150	42	6,0	6,0
220	165	46	6,0	6,0
250	187	52	6,0	6,0
280	210	59	6,5	6,5
300	225	63	6,5	6,5

Fonte: ASME RTP-1

Como visto no quadro consideramos a espessura estrutural como espessura total. Isto é possível pelo fato do tampo não ter contato com o ambiente, portanto, o liner em conjunto com a barreira química pode ser considerada como estrutural.

### 2.2.3.2 Costado

A espessura estrutural  $t$  do costado de tanques verticais cilíndricos pode ser calculada pelas equações de Hooke.

$$t = \frac{N_x}{\varepsilon_x \cdot E_x} - \nu_{yx} \cdot \frac{N_y}{\varepsilon_x \cdot E_y} \quad (05)$$

$$t = \frac{N_y}{\varepsilon_y \cdot E_y} - \nu_{xy} \cdot \frac{N_x}{\varepsilon_y \cdot E_x} \quad (06)$$

Onde  $\varepsilon_x$  e  $\varepsilon_y$ , são os alongamentos respectivamente nas direções “x” e “y” do cilindro,  $t$  é a espessura estrutural e  $N_x$  e  $N_y$  são as forças externas por unidade de comprimento. Também nas direções “x” e “y”.

Para cilindros de extremidades abertas, como os tanques verticais sob pressão hidrostática, a força axial  $N_x$  é nula. Obtendo assim:

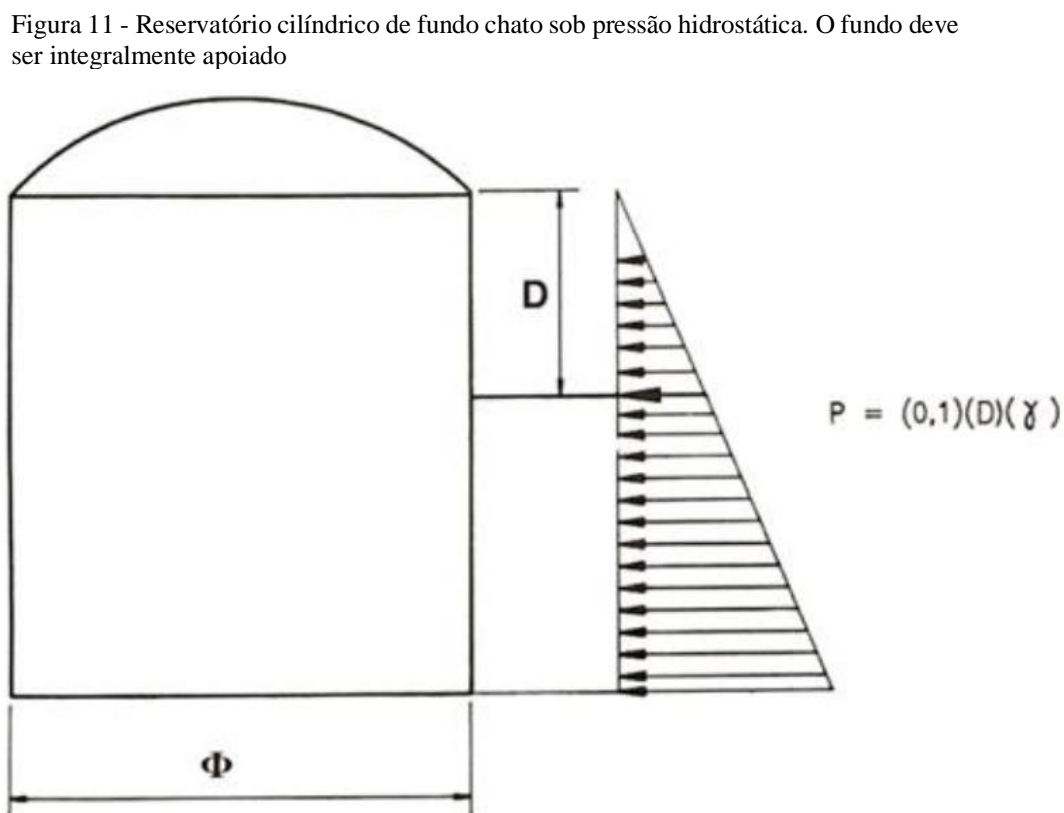
$$t = \frac{P \cdot \phi}{2 \cdot \varepsilon_y \cdot E_y} \quad (07)$$

Portanto, usamos a equação (07) para calcular a espessura estrutural “t” do costado de tanques cilíndricos sob pressão hidrostática. Sabendo que o módulo de elasticidade padrão  $E_y$  dos laminados comerciais é conhecido e o fato de que os módulos reais não são conhecidos – eles serão conhecidos apenas depois do laminado ser feito através de ensaios laboratoriais – não se torna um fator preocupante pois os valores usados para laminados comerciais padrão, valem para qualquer laminado. O alongamento admissível  $\epsilon_y$  também é conhecido.

A pressão hidrostática  $P$  varia com a profundidade como mostra a equação 08 a seguir:

$$P = 0,1. D. \gamma \quad (08)$$

Onde  $P$  é a pressão hidrostática ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ),  $D$  é a profundidade do ponto analisado (m) e  $\gamma$  é a densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) do fluido armazenado. A Figura 11 mostra um tanque nas condições de cargas hidrostática



Fonte: (CARVALHO, ano, p. 251)

### 2.2.3.3 Fundo

O fundo plano dos tanques é integralmente apoiado e não precisa ser calculado, devido ao peso do fluido ser transmitido diretamente à base de apoio. A ASME RTP-1 recomenda os valores para a espessura total do fundo de tanques nessas condições conforme o quadro abaixo:

Quadro 02 - Espessura total do fundo plano totalmente apoiado sobre liga de concreto. Essas espessuras incluem a barreira de corrosão e o liner.

Diâmetro (mm)	Espessura total do fundo plano (mm)
Até 1800	4,5
Entre 1800 e 3800	6,5
Maior que 3800	9,5

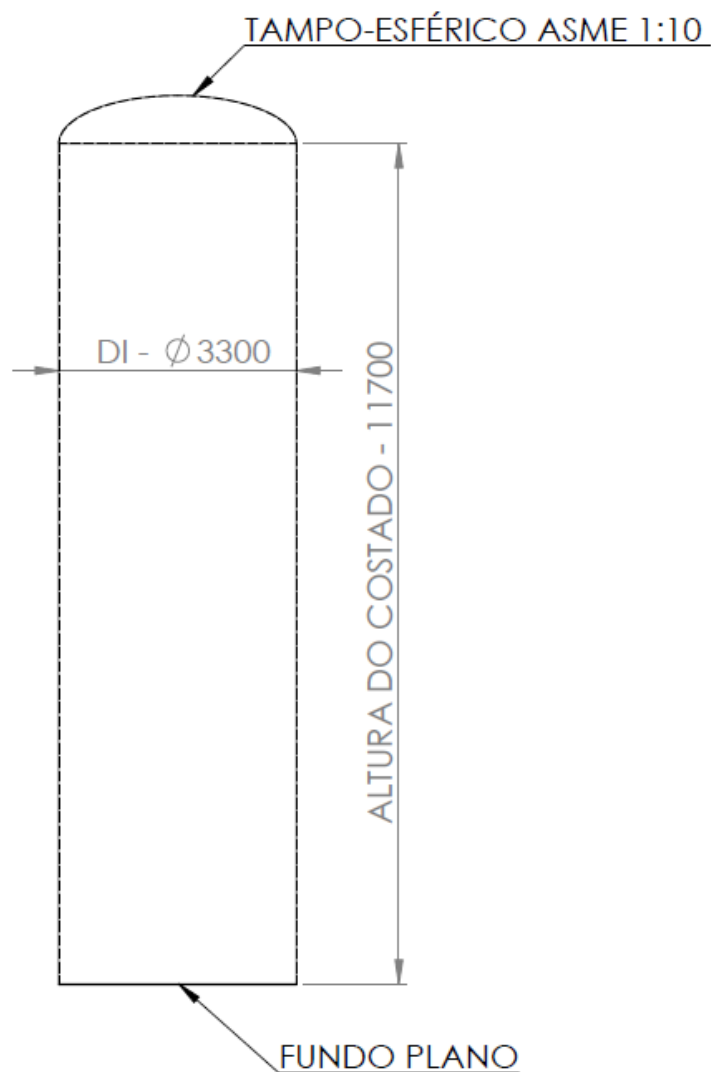
Fonte: ASME RTP-1

## 3 METODOLOGIA

A pesquisa descritiva deste trabalho foi direcionada a se obter valores quantitativos do problema. Como base para os cálculos de projeto foi utilizada a norma internacional *ASME Reinforced Thermoset Plastic-1* (RTP-1) que padroniza e caracteriza tanques construídos em fibra de vidro.

Como modelo de tanque à ser projetado, foi escolhido um tanque vertical com fundo plano e tampo tori-esférico ASME 1:10. Com capacidade de 200 m<sup>3</sup>, seu diâmetro interno foi limitado a 3,30 m e a altura do costado em 11,70 m conforme a figura 12. Como forma de conservadorismo, o liner e a camada estrutural do tanque foram desconsideradas da construção do tanque, sendo assim, foi suposto que o tanque seria construído apenas com a camada estrutural representada por um laminado de matriz polimérica de resina isoftálica reforçada com fibras de vidro.

Figura 12 – Modelo dimensional.



Fonte: Autor.

Durante a metodologia será demonstrado o processo de projeto, através de cálculos abertos, de um tanque de armazenamento de água respeitando os padrões e critérios da norma ASME RTP-1. Posteriormente será construído um modelo em CAD do equipamento projetado respeitando os valores encontrados no cálculos anteriores. Em seguida, através do auxílio de ferramentas de cálculo computacionais, realizar uma análise estrutural estática do modelo e após isso interpretar os resultados obtidos através do pós-processamento dos cálculos da análise e identificar a possibilidade da redução de material de reforço estrutural do equipamento com base no fator de segurança encontrado.

Em um cenário de altos coeficientes de segurança encontrados nos resultados da análise, realizar a redução gradativa da espessura estrutural do equipamento e novamente a análise



estática do modelo. Este processo deverá ser repetido até o momento em que for atendido o nível de segurança a ser pré-estipulado. Encontrada as dimensões ideais para o projeto melhorado do equipamento, concluir a pesquisa quantificando em valores monetários a economia gerada pelo processo de melhoria do equipamento. Por sua vez, no caso da não viabilidade de melhorias no projeto, o trabalho se dará por concluído.

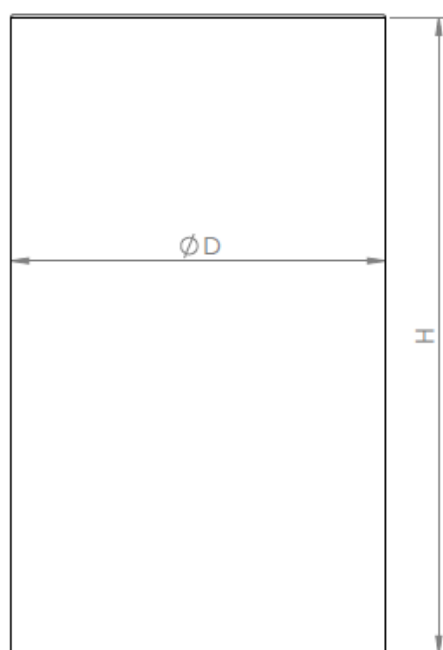
O método de fabricação dos laminados, foi baseado em duas formas distintas. O método Hoop-chop foi aplicado na construção do costado e o Spray-up como forma de obtenção dos tampos e fundos. Devido ao fato deste trabalho se limitar a estudar apenas o costado do equipamento, as junções fundo-costado e costado-tampo foram desconsideradas.

Para a modelagem computacional 3D do equipamento foi utilizado o software SpaceClaim versão 2019 da empresa ANSYS Inc., e como forma de validação e análise estrutural foi utilizado o método de análise por elementos finitos usando a ferramenta *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 20.2*.

### 3.1 Dimensionamento Normalizado

O quadro 03 e 04 a seguir, exhibe os dados referentes às características gerais e as condições gerais de operação do equipamento respectivamente.

Quadro 03 – Características gerais do equipamento



<b>Características Gerais</b>		
Volume útil:	200	m <sup>3</sup>
Diâmetro interno (D):	3.300	mm
Altura cilíndrica total (H):	23000	mm
Formato do tampo:	Plano	
Formato do fundo:	Plano	

Quadro 04 – Condições de operação do equipamento.

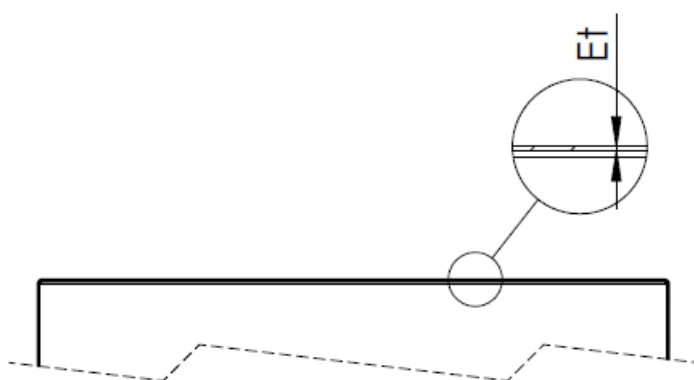
<b>Condições de Operação</b>		
Fluído armazenado:	Água Potável	
Densidade do fluído:	1,0	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura máx. de projeto:	40	°C
Temperatura de operação:	25	°C
Pressão de projeto:	atm	
Pressão de operação:	atm	

Fonte: Autor.

### 3.1.1 Tampo Superior

De acordo com a norma ASME RTP-1, o tampo superior deve ser capaz de suportar uma carga de  $\pm 110$  kg em uma área quadrada de 10 cm x 10 cm, podendo apresentar uma deflexão máxima de até 0,5% do diâmetro interno do tanque. Sendo assim, a espessura da calota superior pode ser encontrada em função do diâmetro interno do equipamento conforme o quadro 05 abaixo:

Quadro 05 – Espessura dos tampos superiores em função do diâmetro.



### **Espessura de Tampos Elípticos**

Diâmetro Interno (D) [m]	Espessura ( $E_t$ ) [mm]
1,2	4,5
1,5	5,0
1,8	6,0
2,0	6,0
2,2	6,0
2,5	6,0
2,8	6,5
3,0	6,5
<b>3,3</b>	<b>6,5</b>
3,5	6,5
3,8	6,5
4,0	7,0
4,2	7,0
4,5	8,0

Fonte: Autor.

### 3.1.2 Seção Cilíndrica (Costado)

De acordo com a norma ASME RTP-1, a espessura estrutural mínima exigida para suportar a pressão hidrostática no tanque é calculada pela fórmula abaixo:

$$t_{estrutural} = \frac{(0,1 \times H \times \gamma) \times D}{2 \times E_y \times \varepsilon_{adm}} \quad (09)$$

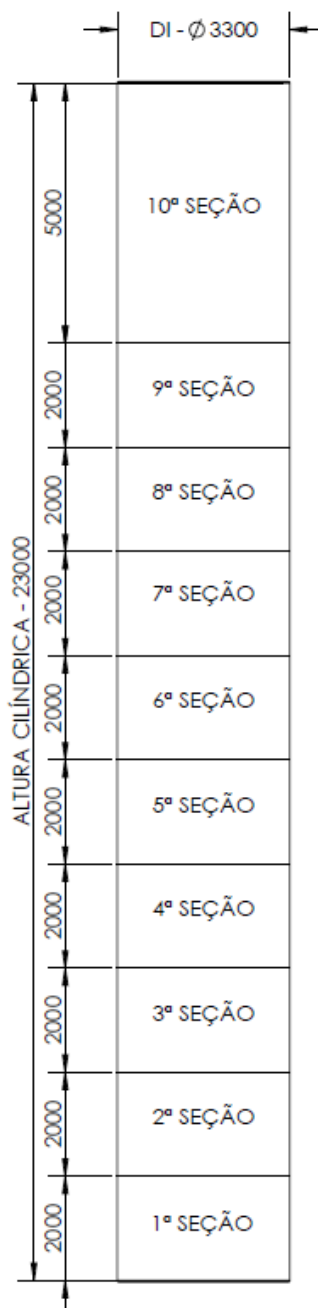
$t_{estrutural}$  = Espessura estrutural [mm]  
 $H$  = Altura da seção analisada [m];  
 $\gamma$  = Densidade do fluído [g/cm<sup>3</sup>];  
 $D$  = Diâmetro interno do cilindro [mm];  
 $E_y$  = Módulo de tração circunferencial do laminado (160.000) [kg/cm<sup>2</sup>];  
 $\varepsilon_{adm}$  = Alongamento admissível;

Obs.: A espessura estrutural mínima deverá ser maior ou igual a 4,77 mm, ou seja, se:

$$t_{estrutural} < 4,77 \text{ mm}, \quad t_{estrutural} = 4,77 \text{ mm}$$

Sendo assim, devido à variação da pressão hidrostática ao longo do tanque, o costado será dividido em 10 seções para efeitos de cálculo conforme mostra a figura 13

Figura 13 – Divisões das seções.



Fonte: Autor.

a) 1ª Seção:

$$t_1 = \frac{(0,1 \times 23,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_1 = 11,86 \text{ mm}$$

b) 2ª Seção:

$$t_2 = \frac{(0,1 \times 21,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_2 = 10,83 \text{ mm}$$

c) 3ª Seção:

$$t_3 = \frac{(0,1 \times 19,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_3 = 9,80 \text{ mm}$$

d) 4ª Seção:

$$t_4 = \frac{(0,1 \times 17,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_4 = 8,77 \text{ mm}$$

e) 5ª Seção:

$$t_5 = \frac{(0,1 \times 15,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_5 = 7,73 \text{ mm}$$

f) 6ª Seção:

$$t_6 = \frac{(0,1 \times 13,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_6 = 6,70 \text{ mm}$$

g) 7ª Seção:

$$t_7 = \frac{(0,1 \times 11,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 180.000 \times 0,002} \rightarrow t_7 = 5,67 \text{ mm}$$

h) 8ª Seção:

$$t_8 = \frac{(0,1 \times 9,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_8 = 4,64 \text{ mm}$$

i) 9ª Seção:

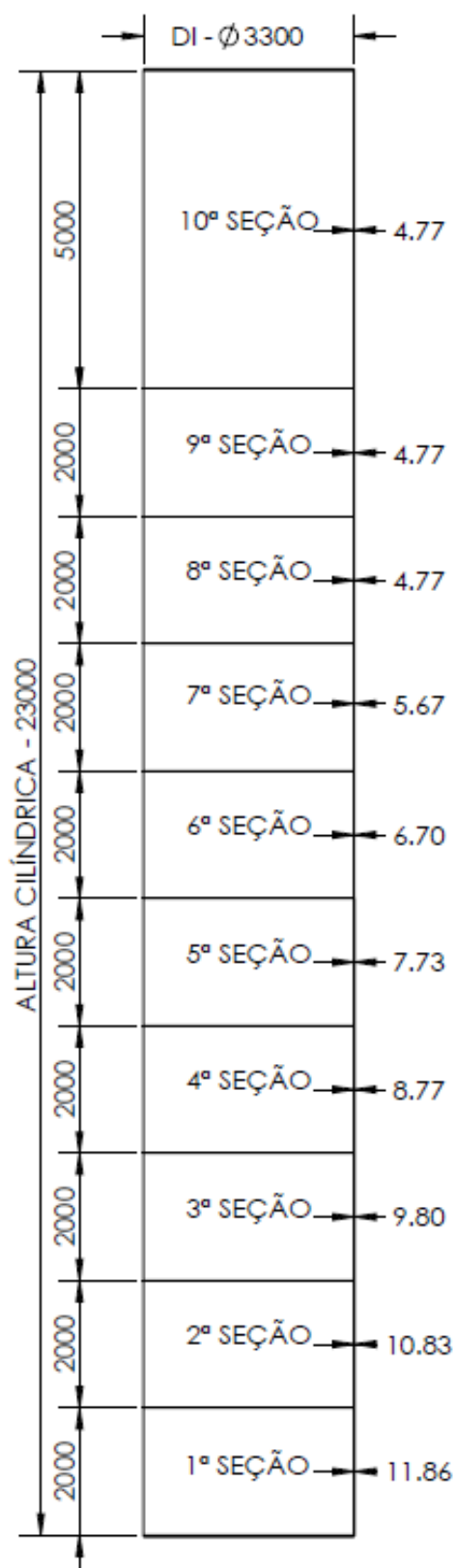
$$t_9 = \frac{(0,1 \times 7,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_9 = 3,61 \text{ mm}$$

j) 10ª Seção:

$$t_{10} = \frac{(0,1 \times 5,0 \times 1,0) \times 3.300}{2 \times 160.000 \times 0,002} \rightarrow t_{10} = 2,58 \text{ mm}$$

Sendo assim, a figura 14 mostra os valores das espessuras estruturais:

Figura 14 – Divisões das seções e suas espessuras.



Fonte: Autor.

### 3.1.3 Tampos

O fundo plano dos tanques é integralmente apoiado, sendo assim, o peso do fluido é transmitido diretamente à base.

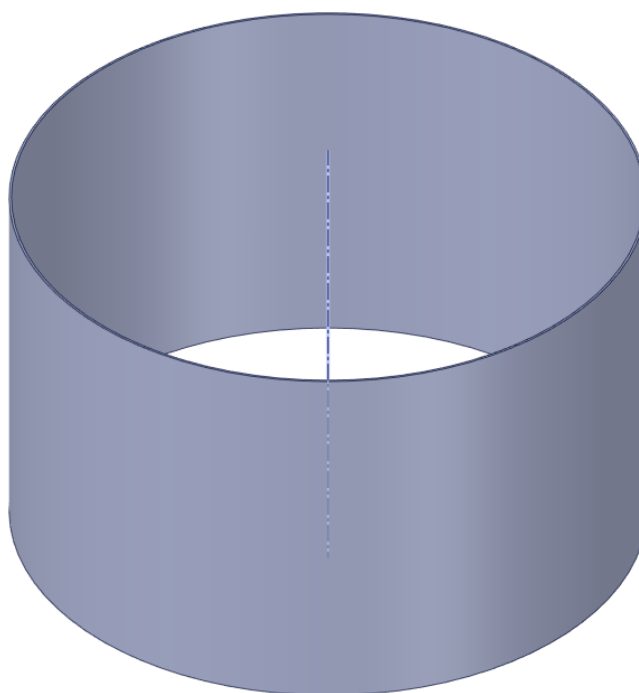
A norma ASME RTP-1, recomenda que tanques com diâmetros entre 1,8 m e 3,7 m devem ter  $t_f = 6,4 \text{ mm}$  de espessura mínima total de fundo.

### 3.2 Desenvolvimento da Simulação de Elementos Finitos

O estudo dos resultados será focado apenas na 1ª seção do costado do equipamento. O motivo dá-se pelo fato de que esta parte é a de maior volume de material necessário para estruturação e conseqüentemente de maior valor monetário agregado e também pelas limitações do software *Ansys® Academic Research Mechanical, Release 20.2* devido à sua restrição quanto ao número de nós e elementos de malha.

Sendo assim, conforme a figura 15, foi construído um modelo 3D computacional respeitando a espessura estrutural e o comprimento da seção conforme encontrado anteriormente.

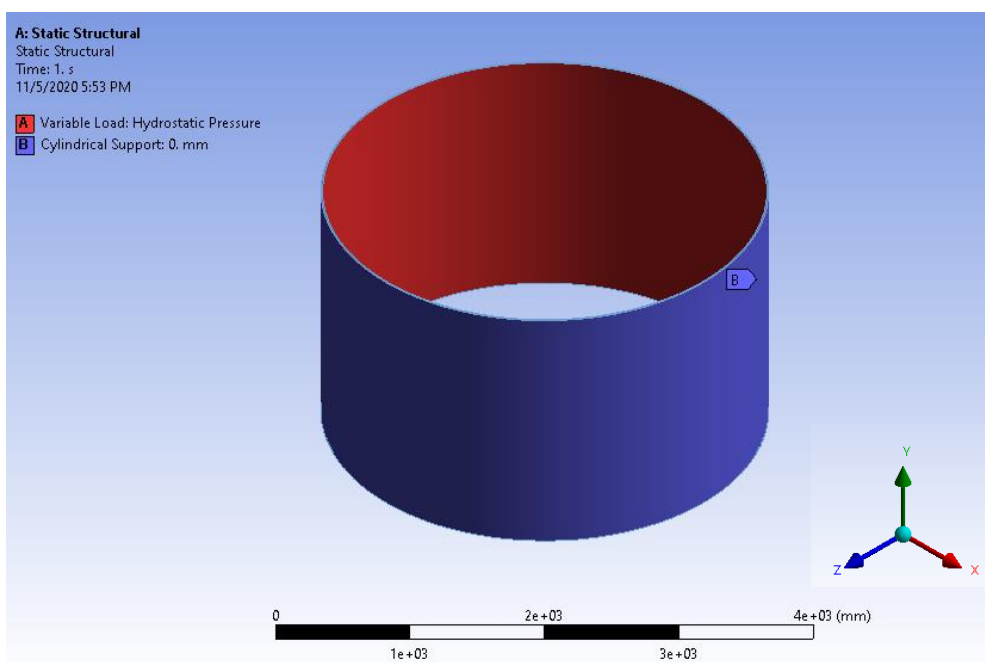
Figura 15 – Modelo 3D do cilindro.



Fonte: Autor.

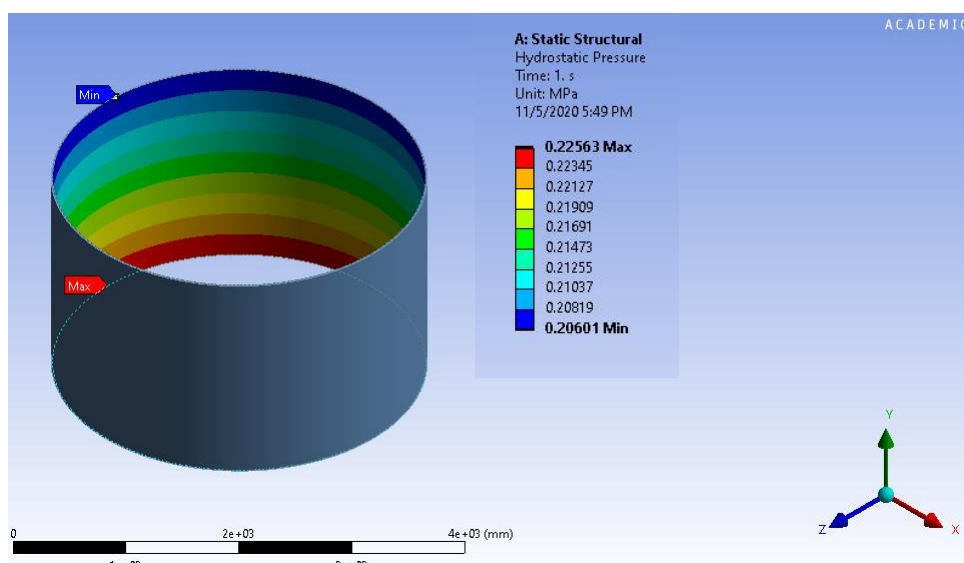
No próximo passo, foi gerada a malha e estabelecidas as condições de contorno do modelo (figura 16) afim de se representar um cenário onde o cilindro esteja sujeito a apenas deformações nas direções circunferenciais (x e z), impossibilitando na direção axial (y) e sendo submetido a esforços vindos da pressão hidrostática atuante, conforme figura 17.

Figura 16 – Condições de contorno.



Fonte: Autor.

Figura 17 – Pressão hidrostática aplicada ao modelo.



Fonte: Autor.



Na etapa de seleção de material, foi configurado um novo material com as propriedades mecânicas de laminados poliméricos de resina isoftálica e reforçados com fibras de vidro através do método de fabricação hoop-chop. Os dados já conhecidos, podem ser vistos na figura 18:

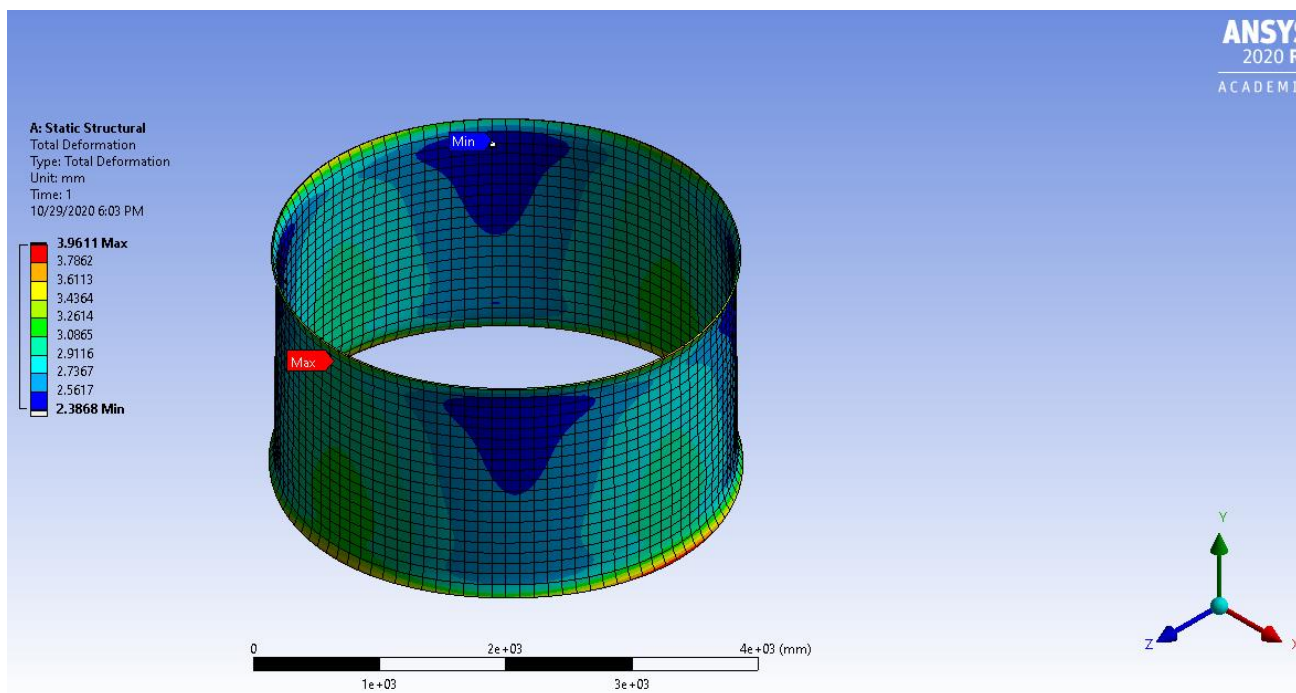
Figura 18 – Propriedades mecânicas do laminado estrutural.

Laminado Hoop-Chop	
Density	1570 kg/m <sup>3</sup>
Structural	
Orthotropic Elasticity	
Young's Modulus X direction	8.92e+09 Pa
Young's Modulus Y direction	1.581e+10 Pa
Young's Modulus Z direction	8.92e+09 Pa
Poisson's Ratio XY	-0.2
Poisson's Ratio YZ	-0.2
Poisson's Ratio XZ	-0.2
Shear Modulus XY	1.5e+10 Pa
Shear Modulus YZ	1.5e+10 Pa
Shear Modulus XZ	1.5e+10 Pa
Tensile Yield Strength	2.6e+08 Pa

Fonte: Autor.

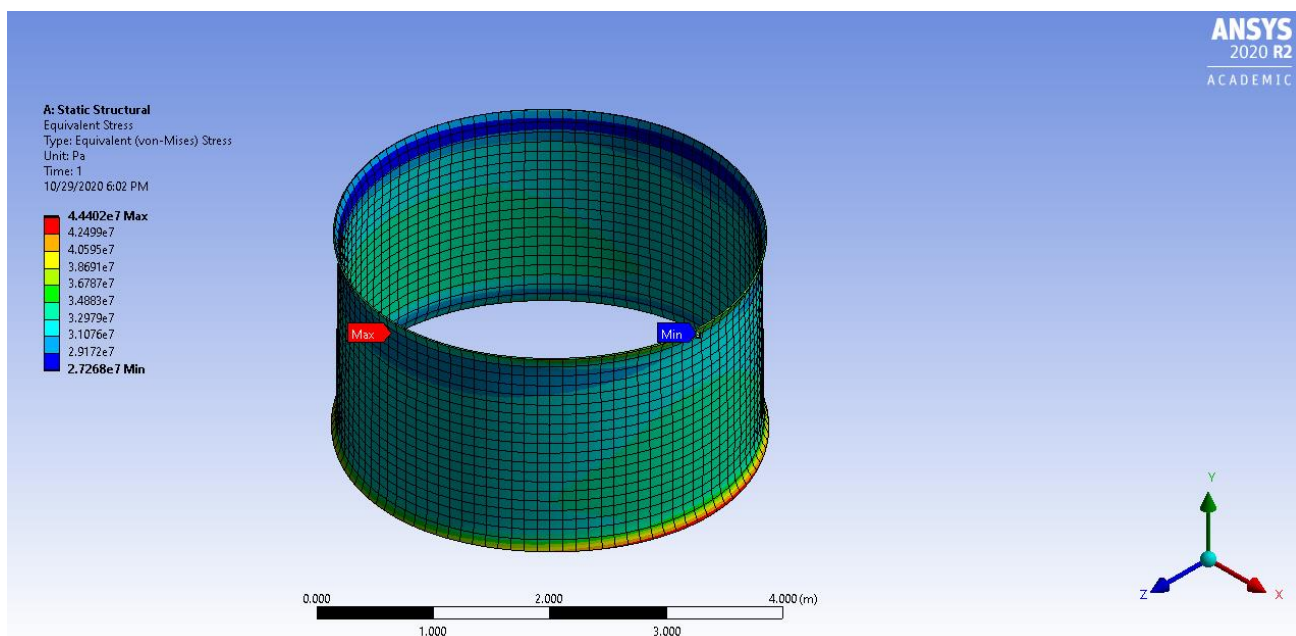
Após as definições citadas anteriormente, o modelo matemático foi executado e após isto foi gerado os resultados da simulação computacional estrutural. Nas figuras 19, 20 e 21, são mostrados os resultados de deformação, tensão por Von-Mises e valores do fator de segurança (Von-Mises) respectivamente:

Figura 19 – Resultados da deformação.



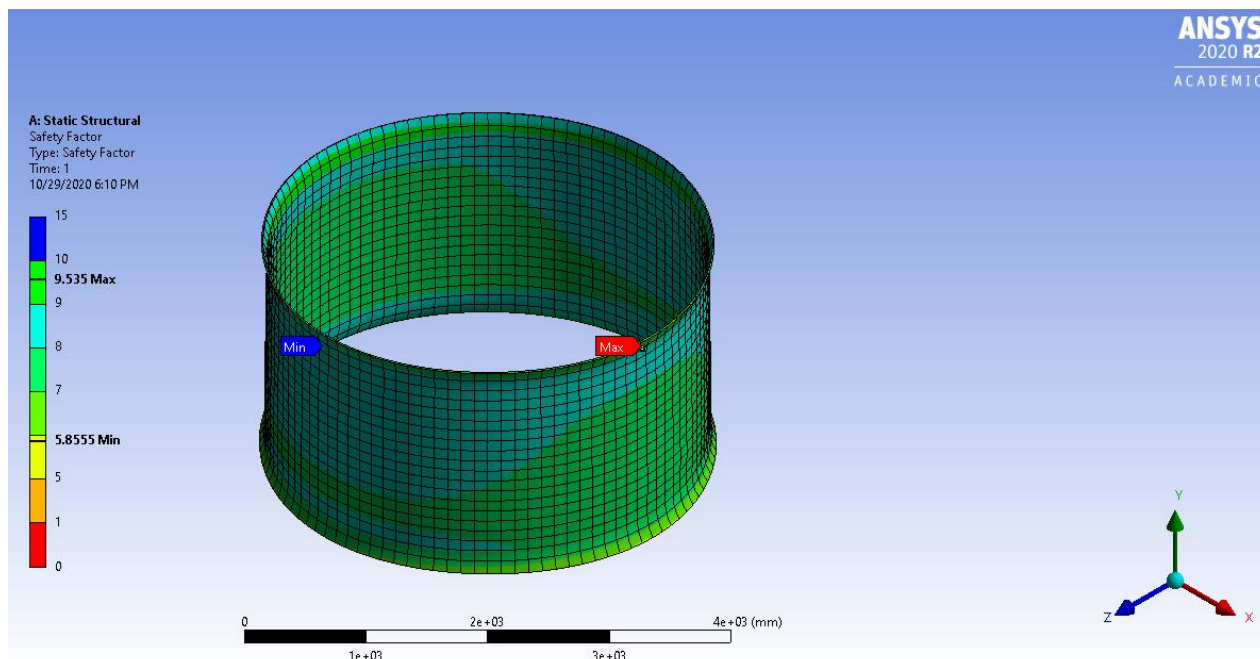
Fonte: Autor.

Figura 20 – Tensão por Von-Mises.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Coeficiente de segurança por Von-Mises.



Fonte: Autor.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados gerados pelo software, foi possível identificar os locais críticos para este cenário.

Primeiramente, foi observado que a ocorrência de maior tensão é nos pontos extremos do cilindro. No modelo real, este ponto é onde se localizam as junções entre uma seção e outra, neste caso em específico, o extremo superior representa a junção com a 2ª seção e o ponto inferior a junção entre a 1ª seção do costado com o fundo do reservatório. Sabendo-se disso, a devem norma prevê que as transições entre seções apresentar “juntas”. Essas juntas são sobre espessuras normalmente fabricadas através do método de spray-up e com o intuito de reforçar as transições.

Por outro lado, com os resultados de Von-Mises (imagens 19 e 20) é possível identificar nível de segurança entre 8 e 9. Esses números se apresentam satisfatórios para a conclusão deste trabalho e os fatos que levam à esta conclusão são:

- a) Não padronização de métodos produtivos;
- b) Laminados com diferentes propriedades mecânicas devido aos métodos de obtenção da matéria prima através de produtos químicos;

- c) Obtenção da espessura correta no processo produtivo;
- d) Na maioria das vezes o processo produtivo depende de mão de obra humana, sujeitando-se assim a elevadas chances de erros;
- e) Muitas vezes estes laminados estão em contato com produtos químicos.

## **5 CONCLUSÃO**

Conclui-se que este trabalho apresentou resultados satisfatórios para a aplicação da norma ASME RTP-1 quanto ao processo de definição da espessura estrutural de tanques industriais construídos em PRFV (Plástico Reforçado com Fibras de Vidro).

Apesar dos valores de segurança terem se apresentado elevados, foi interpretado que estes números estão dentro de um valor aceitável devido às circunstâncias tanto do uso do equipamento quanto do seu processo produtivo e por isso não foi viável a otimização da sua espessura estrutural e conseqüentemente a redução do custo de produção.

Além do aprendizado adquirido com o decorrer do presente trabalho, foi possível demonstrar o processo de projeto e produção de equipamentos construídos em fibras de vidro e divulgar o meio dos materiais poliméricos, do qual há um grande potencial ainda a ser explorado.

## **REFERÊNCIAS**

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *ASME* RTP-1: Reinforced Thermoset Plastic Corrosion. 2017

ARFELLI, Silvio Luiz. **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UNESP – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Campus Bauru, Bauru, São Paulo, 2009 .

CARVALHO, Antonio. **Compósitos Para Uso Industrial**. Minas Gerais: A. Carvalho, 2012

IDEHARA, Sérgio Junichi. **Identificação de parâmetros modais de estruturas e máquinas rotativas através da filtragem adaptativa**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas – Campinas, São Paulo, 2007.

SIMSCALE. **What is CFD | Computational Fluid Dynamics?**, 2020. Disponível em: <<https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>>. Acesso em: 10 mar. 2020.

UFMS. **MATERIAIS COMPÓSITOS, NOTAS DE ESTUDO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 2013. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/materiais-compositos-6/4882035/>>. Acesso em: 25 mar. 2020.

ESSS. **O que é material compósito?**, 2020. Disponível em:< <https://www.esss.co/blog/o-que-e-material-composito/>>. Acesso em: 08 jun. 2020.

HIGGINS, R. A. **MATERIALS FOR ENGINEERS AND TECHNICIANS**. 4<sup>a</sup> ed Routledge, 2006.

SMITH, W.; HASHEMI, J. **FOUNDATIONS OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**. 6<sup>a</sup> ed, McGraw-Hill Education, 2018.

CALLISTER, W. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**. 8<sup>a</sup> ed. LTC, 2012.

HIBBELER, R. C. **RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS**. 7<sup>a</sup> ed, São Paulo: PEARSON, 2010.