

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
GABRIEL DA SILVA GUERRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV DE 25 M³ PARA ÁGUA
POTÁVEL**

Varginha
2025

GABRIEL DA SILVA GUERRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV DE 25 M3 PARA
ÁGUA POTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do Grau de Bacharel, sob orientação do Prof. Me. Fabiano Farias de Oliveira

**Varginha
2025**

GABRIEL DA SILVA GUERRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV DE 25 M3 PARA
ÁGUA POTÁVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do Grau de Bacharel, pela banca avaliadora:

Aprovado ____/____/____.

Obs.:

Dedico este trabalho aos meus avós Otacir e Aparecida, aos meus pais Ademir e Antônia, aos meus padrinhos Paulo Vitor e Edvani e ao meu tio Ivair, que sempre me incentivaram e apoiaram, mesmo quando eu duvidei de mim.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos à empresa Fibrav, pela disponibilização da estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho e pelo suporte técnico oferecido pelos profissionais que, com paciência e dedicação, contribuíram significativamente para o meu aprendizado.

“Aquele que tem um porquê para viver pode suportar quase qualquer como.”

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um reservatório cilíndrico vertical com capacidade de 25 m³, confeccionado em Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), destinado ao armazenamento de água potável. O projeto teve como objetivo principal elaborar, fabricar e testar um equipamento que atendesse às normas ASME RTP-1, ASTM D3299, ASTM D4097 e ABNT NBR 16098, garantindo segurança estrutural e conformidade com os requisitos de potabilidade. Para isso, foram aplicados processos de laminação manual, *Spray-up* e *Filament winding*, além da execução de ensaios de qualidade, como testes de dureza Barcol, cinzas, estanqueidade e sensibilidade à acetona. O memorial de cálculo considerou as ações de pressão hidrostática e de vento conforme a ABNT NBR 6123, assegurando a integridade estrutural do costado e dos tampos. Os resultados demonstraram que o PRFV é uma alternativa tecnicamente viável para substituição de materiais metálicos, apresentando alta resistência mecânica, baixa densidade e excelente desempenho contra corrosão. O estudo proporcionou ganhos técnicos e práticos, evidenciando o potencial de aplicação dos materiais compósitos na fabricação de reservatórios para uso industrial e de saneamento.

Palavras-chave: PRFV. Reservatório. Materiais compósitos. Ensaios. Potabilidade.

ABSTRACT

The present work presents the development of a vertical cylindrical tank with a capacity of 25 m³, manufactured from Fiberglass Reinforced Plastic (FRP), intended for the storage of potable water. The main objective of the project was to design, manufacture, and test equipment that complies with the ASME RTP-1, ASTM D3299, ASTM D4097, and ABNT NBR 16098 standards, ensuring structural safety and compliance with potability requirements. To this end, manual lamination, spray-up, and filament winding processes were applied, in addition to performing quality tests such as Barcol hardness, ash content, leak tightness, and acetone sensitivity tests. The design report considered hydrostatic and wind loads according to ABNT NBR 6123, ensuring the structural integrity of the shell and heads. The results demonstrated that FRP is a technically feasible alternative to the replacement of metallic materials, presenting high mechanical strength, low density, and excellent corrosion resistance. The study provided technical and practical advancements, highlighting the potential application of composite materials in the manufacturing of tanks for industrial and sanitation use.

Keywords: FRP. Tank. Composite materials. Tests. Potability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Formato de vasos de pressão.....	12
Figura 2. Tipos de tampos	12
Figura 3. Laminação <i>Hand lay-up</i>	14
Figura 4. Laminação <i>Spray-up</i>	15
Figura 5. Laminação <i>Filament Winging</i>	16
Figura 6. Tecido em fibra de vidro	20
Figura 7. Manta em fibra de vidro	21
Figura 8. Fios de fibra de vidro	22
Figura 9. Durômetro Barcol.....	23
Figura 10. Mufla.....	24
Figura 11. Molde aberto	25
Figura 12. Gráfico de isopletras.....	30
Figura 13. Parâmetros meteorológicos	33
Figura 14. Fator S2	34
Figura 15. Pressão radial	36
Figura 16. Pressão axial.....	38
Figura 17. Especificações dos chumbadores	43
Figura 18. Detalhe da sapata de fixação do reservatório	44
Figura 19. Propriedade de tração da amostra	45
Figura 20. Direção preferencial dos em fibra de vidro.....	46
Figura 21. Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36	47
Figura 22. Propriedades físicas e mecânicas da resina.....	48
Figura 23. Peça em PRFV para teste	49
Figura 24. Laudo de conformidade	50
Figura 25. Fabricação do tampo inferior pelo método <i>Spray-up</i>	51
Figura 26. Fabricação do costado pelo método <i>Spray-up</i>	52
Figura 27. Fabricação do tampo superior <i>Spray-up</i>	53
Figura 28. Montagem dos tampos com o costado	54
Figura 29. Estruturação do reservatório	55
Figura 30. Montagem dos acessórios e conexões.....	55
Figura 31. Resultado do teste de cinzas.....	57
Figura 32. Resultado do teste de dureza Barcol	58

Figura 33. Resultado do teste de estanqueidade	59
Figura 34. Equipamento concluído.....	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	11
2.1	Reservatórios atmosféricos.....	11
2.1.1	Classificação.....	11
2.2	Confecção de um reservatório em PRFV	12
2.2.1	Processo de laminação <i>Hand Lay-up</i>	13
2.2.2	Processo de laminação por <i>Spray-up</i>	14
2.2.3	Processo de laminação por <i>Filament Winging</i>	15
2.3	Materiais compósitos.....	16
2.3.1	Matrizes poliméricas	17
2.3.2	Matrizes termorrígida	17
2.3.2.1	Resina poliéster	17
2.3.2.2	Resina éster vinílicas	18
2.3.2.3	Resina epóxi	18
2.3.3	Reforços fibrosos.....	19
2.3.3.1	Materiais compósitos fibrosos.....	19
2.3.3.2	Fibra de vidro	19
2.3.3.3	Tecidos	20
2.3.3.4	Mantas	21
2.3.3.5	Fios de fibra de vidro.....	22
2.3.3.6	Plástico reforçados com fibras de vidro	22
2.4	Inspeção e teste.....	23
2.5	Inspeção visual	23
2.6	Teste de dureza Barcol	23
2.7	Teste de cinzas.....	24
2.8	Teste de estanqueidade.....	24
2.9	Laudo de potabilidade	24
2.10	Utilização de moldes	25
2.11	Resistência à tração do material compósito de PRFV.....	26
2.11.1	Materiais isotrópicos e anisotrópicos	26
2.12	EPI's necessários para o manuseio da resina	26

3	METODOLOGIA	27
3.1	Desenho técnico	27
3.2	Memorial de cálculo	27
3.2.1	Cálculo do tampo inferior.....	28
3.2.2	Cálculo do casco cilíndrico (costado)	28
3.2.2.1	Carga de vento no costado.....	29
3.2.2.2	Determinação da força do vento.....	29
3.2.2.3	Determinação da velocidade básica do vento.....	30
3.2.2.4	Determinação do fator topográfico $S1$	31
3.2.2.5	Determinação do fator rugosidade do terreno $S2$	31
3.2.2.6	Determinação do fator estatístico $S3$	34
3.2.2.7	Resultados da carga do vento	35
3.2.2.8	Carga de vento no costado.....	35
3.2.2.9	Pressão radial exercida pelo vento	36
3.2.2.10	Determinação da pressão do vento no costado do reservatório.....	36
3.2.2.11	Determinação da força resultante da ação do vento no costado do reservatório.....	37
3.2.2.12	Tensão de compressão axial	37
3.2.2.13	Comprimento crítico.....	38
3.2.2.14	Pressão lateral crítica.....	39
3.2.2.15	Tensão compressão axial crítica.....	40
3.2.2.16	Flambagem por compressão axial	40
3.2.2.17	Instabilidade circunferencial	41
3.2.3	Cálculo do tampo superior	41
3.2.4	Espessura da emenda entre tampo e costado	41
3.2.5	Largura da emenda entre tampo e costado	42
3.2.6	Carregamento do tanque na base.....	42
3.2.6.1	Carregamento do tanque na base.....	42
3.2.6.2	Instalação do reservatório na base.....	44
3.3	Fabricação do equipamento.....	44
3.3.1	Propriedades físicas e mecânicas da resina	47
3.3.2	Laudo de potabilidade	48
3.3.3	Fabricação do tampo plano inferior.....	50
3.3.4	Fabricação do casco (costado).....	51
3.3.5	Fabricação do tampo elíptico superior	52

3.3.6	Montagem e estruturação	53
3.3.7	Instalação dos flanges e acessórios	55
3.4	Inspeção e teste.....	56
3.4.1	Teste de sensibilidade a acetona.....	56
3.4.2	Teste de cinzas.....	56
3.4.3	Teste de dureza Barcol	57
3.4.4	Teste de estanqueidade	58
3.4.5	Inspeção visual	59
3.5	Acabamento externo	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
	REFERÊNCIAS	62
	ANEXO A.....	65

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de água e a necessidade de armazenamento, principalmente durante os períodos de seca, têm impulsionado o desenvolvimento de sistemas de estocagem. Os reservatórios em aço carbono ou inox já não são unanimidade no mercado. Com o avanço dos materiais compósitos, o Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) surge como uma excelente alternativa para solucionar os desafios relacionados ao armazenamento de diversos tipos de fluidos, desde efluentes até produtos químicos, como, por exemplo, os ácidos.

O PRFV é um material compósito formado por uma matriz polimérica e fibras de vidro. Pode-se fazer uma analogia entre o PRFV e o coco, onde polpa interna, está em contato com água e responsável pela estanqueidade, corresponde ao *liner* e à barreira química; já a casca representa a camada estrutural, que garante resistência mecânica. O emprego de materiais compósitos tem prosperando na indústria, em setores que exigem alta confiabilidade e baixo custo de manutenção.

Os reservatórios em PRFV devem seguir normas nacionais e internacionais com a ASME RTP-1, ASTM D3299, ASTM D4097. Para os reservatórios de água a NBR 16098 que estabelece critérios para fabricação e potabilidade.

A motivação para este estudo, é apresentar os reservatórios em PRFV, são capazes de atender aos requisitos normativos, garantindo resistência estrutural e potabilidade. Dessa forma assegurar a segurança no armazenamento de 25 m³ de água potável. Além disso, buscou-se compreender as etapas de fabricação e inspeção do equipamento, a fim de assegurar sua conformidade técnica e funcional.

A relevância deste trabalho será buscar soluções de alta durabilidade para o armazenamento de água, em ambientes rurais, industriais, residenciais e químicos, entre outros. A resistência a corrosão e a facilidade de manutenção contribuem para a escolha desse material. O projeto também visa contribuir para o avanço do conhecimento técnico sobre o emprego de materiais compósitos em diversos setores industriais.

O objetivo geral deste estudo é desenvolver e fabricar um reservatório cilíndrico vertical, com tampo inferior plano e tampo superior elíptico, com capacidade total de 25m³ de água potável, seguindo todos os parâmetros normativos aplicáveis. Como objetivo específico se destacam:

- projetar o equipamento conforme as normas ASTM e NBR;
- selecionar os materiais adequados, garantindo compatibilidade da resina com o fluido armazenado;

- realizar a memória de cálculo conforme as normas NBR 6123, ASTM D3299, ASTM D4097 e ASME RTP-1;
- submeter o equipamento a ensaios de qualidade e estanqueidade.

A metodologia adotada fundamentou-se no acompanhamento pratico de todas as etapas de fabricação do reservatório, desde elaboração do projeto, até os testes de validações finais. Foram empregados métodos experimentais e análise normativas, que incluindo ensaios de tração, dureza Barcol, teste de cinzas e teste hidrostático, com o objetivo de comprovar o desempenho e conformidade do equipamento dentro dos padrões normativos.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Reservatórios atmosféricos

Conforme apresentado por Telles (2007), todo e qualquer recipiente estanque capaz de conter um fluido pressurizado, independentemente do tipo, dimensão, formato ou finalidade, são classificados genericamente, com um vaso de pressão.

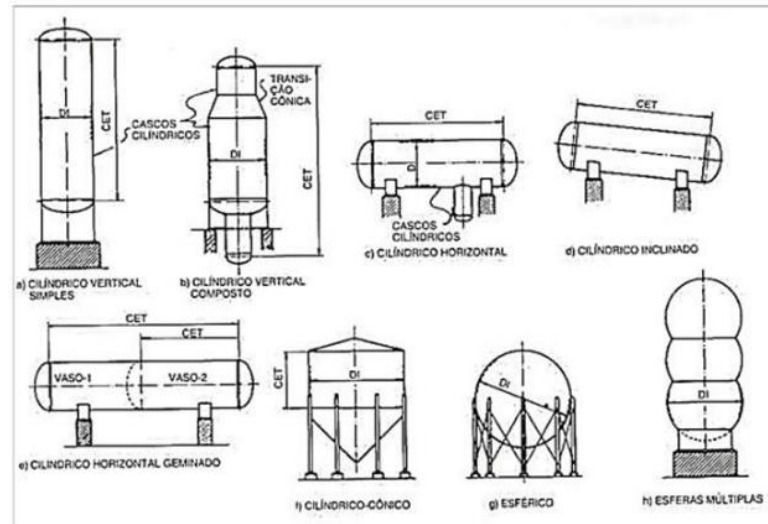
Entretanto, para Chattopadhyay (2005), conclui que, os vasos de pressão e tanques de armazenamentos, possui a finalidade de armazenar fluidos, seja a pressão atmosférica ou superiores a esta. Tais equipamentos, poderão apresentar grande variedade de dimensões desde poucos centímetros até 50m de diâmetro.

Contudo, Campos (2011), estabelece que os vasos de pressão, como sendo qualquer mecanismo de variado tamanho, forma ou utilizações, com capacidade para armazenar fluidos pressurizados e dimensionados para suportar com segurança pressões internas desiguais da pressão atmosférica, ou que sejam submetidos a pressões externas.

2.1.1 Classificação

Telles (2007) assegura que a estrutura de um vaso de pressão é composta pelo casco e tampos. Os cascos sempre irão possuir um formato de uma superfície de revolução, entretanto poderá com raras exceções, uma das três formas básicas, cilíndrica, cônica ou esférica (ou combinadas). Para a instalação os vasos podem ser verticais, horizontais ou inclinados.

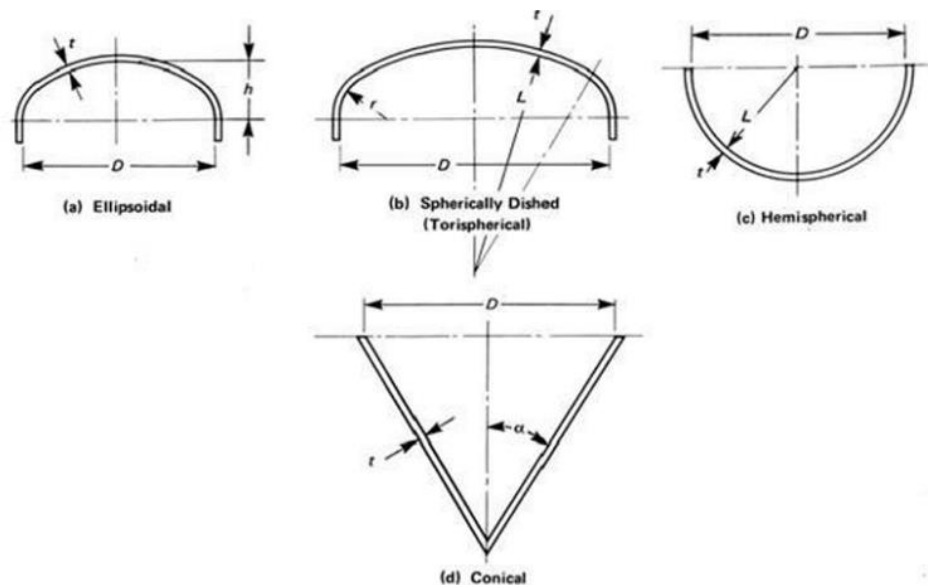
Figura 1. Formato de vasos de pressão.



Fonte: ASME, Seção VIII, Divisão 1

Segundo Telles (2007) é denominado tampos, as peças de fechamento do casco, da qual os formatos mais usuais são: elíptico, hemisférico, cônico, toriesférico ou plano.

Figura 2. Tipos de tampos



Fonte: ASME, Seção VIII, Divisão 1

2.2 Confeção de um reservatório em PRFV

Conforme o estudo de Cauhois, 2012, para a confecção de um reservatório em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro), podem-se aplicar diferentes maneiras de se laminar a

resina com a fibra de vidro, as escolhas estarão sujeitas a dimensão, quantidade e esforços que a peça irá sofrer durante sua vida útil.

Para Cauhois, (2012) as técnicas mais empregadas para a produção de lâminas de PRFV são *Hand Lay-up* (manual), que permite a aplicação de mantas, tecidos e véus de fibra de vidro. Por outro lado, o *Spray-up* (mecanizada) é qualificado pelo emprego do *rouving*, e finalmente o *Filament Winding* (semiautomática), é caracterizado pelo uso exclusivo do *rouving*.

2.2.1 Processo de laminação *Hand Lay-up*

Segundo Cauhois, 2012, a laminação manual é a forma clássica para a obtenção de produtos moldados em plástico reforçado com fibra de vidro. Este processo não exige investimento em equipamentos, podendo ser executado por rolos ou trinchas.

Conforme Al-Qureshi (2010), o primeiro passo para este método de laminação é a limpeza do molde, com a aplicação de um detergente ou solvente. Após a higienização deverá ser introduzido um desmoldante, como por exemplo, o álcool poli vinílico, cujo objetivo principal é impedir que a peça grude no molde, para evitar danos no desmolde. Na primeira camada pode-se utilizar o tecido, mantas ou *rouving*, inseridos de forma manual sobre a superfície do molde. É utilizado um pincel para incorporar a resina na fibra de vidro, e um rolo para a remoção das bolhas de ar da camada de reforço e garantir a permeabilidade e a unidade de fibra. Este processo deverá repetido até ser alcançado a espessura desejada.

Para Cauhois, 2012 o processo de laminação manual é largamente aplicado na produção de protótipos, dispositivos de controle e moldes. Também, abrange reparos e revestimentos de equipamentos *in loco*. As peças alcançadas apresentaram superfícies lisas e excelente acabamentos superficiais, normalmente com polimento em gel ou pintura posterior. Entretanto a parte oposta do molde, possui um acabamento rugoso, ainda que exista variações de processo, após a união de duas peças o acabamento dos dois lados será sobreposto.

De acordo com Cauhois, 2012, a principal vantagem do processo de laminação por *Hand Lay-up*, é o baixo investimento inicial. Por outro lado, a principal desvantagem em relação aos processos mecanizados ou semiautomáticos, com por exemplo a laminação do por filamento contínuo (*Filament Winding*), é a menor relação reforço/matriz, o que irá impactar na necessidade de uma maior quantidade de camadas para a obtenção de um bom reforço na estrutura.

Figura 3. Laminação *Hand lay-up*



Fonte: O autor

2.2.2 Processo de laminação por *Spray-up*

De acordo com o estudo de Cauhois, (2012), o processo de laminação por *Spray-up* é o aperfeiçoamento do processo de laminação manual (*Hand Lay-up*). A limpeza e aplicação do desmoldante irá permanecer da mesma forma, entretanto, a resina, catalizador e a fibra de vidro será aplicada de forma simultânea na superfície do molde. A figura 4, apresenta a injeção da fibra, resina e catalizador sobre o molde. A fibra será picotada na saída do revólver por um triturator pneumático. O revólver é a união de um cortador com uma pistola de pintura.

Após a aplicação conjunta dos itens listados acima com o revólver, um rolo é passado de forma manual sobre o laminado para a remoção de bolhas de ar, conforme o processo da laminação manual (*Hand Lay-up*), afim de encolher a fibra tornando-a mais densa e garantir o contato com o molde. Do mesmo modo que o processo de laminação manual, à cura pode ocorrer a temperatura ambiente se a peça for muito grande, entretanto o processo pode ser acelerado com a utilização de um soprador de ar quente em peças pequenas (Cauhois, 2012).

Conforme Cauhois (2012), a principal vantagem do processo de laminação por *Spray-up* em relação a laminação manual (*Hand Lay-up*) é produtividade e velocidade de aplicação da matéria prima no molde. Entretanto o processo de laminação por *Spray-up* possui uma

insuficiência na obtenção de um acabamento liso nos dois lados do laminado, acarretando na limitação do conteúdo volumétrico do reforço de fibra, tornando inadequado para peças com alto grau de estresse estrutural, dependendo da expertise do laminador.

Figura 4. Laminação *Spray-up*



Fonte: O autor

2.2.3 Processo de laminação por *Filament Winging*

Segundo Pierin (2005), a maioria dos reservatórios possuem corpo cilíndrico, pode-se empregar o processo de enrolamento de fios fibra de vidro contínuos. Em uma máquina semiautomática os fios de fibra irão abranger todo o molde cilíndrico, em formato estruturado, conforme a imagem 5.

De acordo com Pierin (2005), a singularidade de implementação contínua de reforços em um padrão combinado em altas velocidades, resulta em uma técnica atrativa para a confecção de peças com alta resistência e baixo peso. Isto é possível através da utilização de fios contínuos, ou fios com alta resistência à tração, revestidos por uma matriz de resina.

A laminação por *Filament Winging* (FW), possui uma proporção média de resina e fibra de vidro entre 30 e 70%, respectivamente. O que irá implicar de forma direta no seu peso final. Por essas propriedades do material compósito irá alterar a densidade comprado a outros processos (Pierin, 2005).

Figura 5. Laminação *Filament Winding*



Fonte: O autor

2.3 Materiais compósitos

Segundo Callister (2014), o compósito, constitui-se em um material multifásico confeccionado de forma sintética, em contra posição de um material que ocorre ou se forma naturalmente. Acrescenta-se que, as fases que compõem o material devem ser quimicamente distintas e devem ser segregadas por uma interface diferente. A grande maioria dos materiais compósitos são formados por apenas duas fases; a primeira que é denominada matriz, a qual é constante e abrange a outra fase, comumente chamada de fase dispersa. As características químicas dos compósitos são em consequência das propriedades das fases constituintes, de sua quantidade relativa e da geometria da fase dispersa.

Entretanto, para a norma ASTM D3878 (2018), os materiais compósitos, são determinados como aqueles que sua estruturação é gerada pela combinação de dois ou mais materiais, insolúveis entre si, da qual a coalizão acarretará em um outro material útil de propriedades diferentes das encontradas nos componentes isolados (ASTM D3878, 2018).

Os compósitos de acordo com Callister (2014), sucedem em quatro categorias principais: os compósitos reforçados por partículas, os compósitos reforçados com fibras, os compósitos estruturais e os nano compósitos.

Embora que exista uma ampla classificação dos materiais compósitos, é julgado por diversos autores, que os materiais compósitos são os materiais micro compósitos (CHIAVERINI, 1986; ANTEQUERA et al., 1991).

2.3.1 Matrizes poliméricas

É definida como matrizes poliméricas os componentes orgânicos de elevados pesos moleculares, produto de reações de polimerização por adição ou condensação de diferentes componentes básicos (CALLISTER, 2014).

Entretanto, Vasconcelos (2018) assegura que, normalmente, as matrizes poliméricas são classificadas conforme o método de preparação, estrutura química e comportamento mecânico. Os resultados da polimerização podem gerar diferentes cadeias poliméricas, que são definidas como: cadeias lineares sem ramificações; cadeias lineares com ramificações e cadeias com ligações cruzadas, tridimensionais ou em rede. Tais variações estruturais envolvem diretamente nas propriedades físico-químicas dos polímeros, sobretudo no que se refere à solubilidade e à fusão.

2.3.2 Matrizes termorrígida

O material termorrígido é formado pela reação química entre a resina e o catalisador, o qual resulta em um material rígido de reação química irreversível. No processo de cura, é gerada ligações moleculares tridimensionais, nomeadas ligações cruzadas. Em razão a essas ligações cruzadas, as moléculas não podem ser derretidas e remoldadas. Quanto maior o número de ligações cruzadas, mais rígido e termicamente estável será o material (MAZUMDAR, 2002).

2.3.2.1 Resina poliéster

Conforme estudo de Mazumdar (2002), as resinas poliéster é amplamente utilizada na indústria, oferecem notável resistência à corrosão e baixo custo.

Parta Levy; Pardini (2012), as resinas de poliéster pertencem a uma família de polímeros resultante da reação ácidos orgânicos di carboxílicos e glicóis, que, quando reagidos, originam moléculas de cadeias longas lineares, gerando um éster e água.

Segundo o estudo de Wiebeck e Harada (2005), a principal aplicação das resinas poliéster, é na confecção de compósitos reforçados com fibras de vidro. Desde o início dos anos 60 esses materiais são aplicados na fabricação de barcos.

2.3.2.2 Resina éster vinílicas

Para Garay *et al.* ([s.d.]), as resinas éster-vinílicas são oligômeros gerados da reação entre bisfenol A à base de oligômeros epóxi e ácidos carboxílicos insaturados, tais como ácido acrílico e metacrílico. A reação de reticulação das resinas éster vinílicas é extremamente exotérmica e é gerada por polimerização radicalar, tal reação pode ser facilmente controlada, apenas com o ajuste das condições de cura e conhecimento da cinética da reação de cura.

De acordo com Dias (2009), a resina éster vinílica, possui algumas vantagens operacionais em relação a resina epóxi, a cura no processo de fabricação das lâminas, pode ser feito em temperatura ambiente, diminuído o custo de fabricação, e a manutenção de uma das principais propriedades do processo de cura da resina epóxi, também possui uma baixa variação dimensional, a superfície de contato entre a resina líquida e os aderentes não sofrem perturbação, gerando uma boa capacidade de impregnação.

2.3.2.3 Resina epóxi

De acordo com Osamu Hara (1990), a resina epóxi é a matriz termo fixa mais em empregada, pois existem vários tipos de endurecedores para o processo de cura, o que faz com que as mesmas consigam curar em diversas situações, como em temperatura ambiente, temperaturas medianas e altas temperaturas.

Entretanto, Shahbaz (2016), retrata como epóxi as resinas poliméricas termo fixas que possuem um ou mais grupos epóxi dos. A química pode ser customizada pelo peso molecular ou viscosidade, conforme exigida pela aplicabilidade mais adequada. São disponíveis dois tipos principais de epóxios, glicidil epóxi e não glicidil.

As resinas epóxios necessitam um agente de cura, normalmente denominado de endurecedor. Habitualmente, o agente de cura mais comum é a base de amina. Nas resinas poliéster ou éster vinílicas, é catalisada por uma pequena adição (até 3%) de um catalizador, enquanto as resinas epóxi carecem da adição do catalizador em proporção muito maior. (SHAHBAZ,2016)

2.3.3 Reforços fibrosos

Segundo Hage (1989), as fibras são os componentes que geram aos compósitos propriedades mecânicas: rigidez, resistência mecânica. Para a confecção de plástico reforçado, o tipo de reforço mais utilizado é o fibroso, que pode ocorrer em formato de fibras contínuas, fibras curtas e na maioria dos casos em tecidos.

Segundo Kar (2017), as fibras com material de reforço possuem as seguintes vantagens:

- A resistência do material produzido por fibras de pequeno diâmetro, é sempre mais elevada quando comparadas a outras com diâmetros maiores;
- Direcionamento das propriedades em direções específicas;

De acordo com as propriedades requeridas e desejadas no produto, o material de reforço será selecionado. Existem várias configurações de fibras, tais como fios, *rovings*, fios picados, tecidos e esteiras são aplicadas no composto avançado. Cada um deles possui sua própria aplicação (Kar, 2017).

2.3.3.1 Materiais compósitos fibrosos

De acordo com Vasconcelos (2018), os compósitos fibrosos se constituem em fibras com alto módulo de elasticidade e alta resistência mecânica, aderida a uma matriz. Desta forma, tanto a fibra quanto a matriz manterão suas propriedades, acarretando em um conjunto de propriedades não disponíveis individualmente (Matthews; Rawlings, 1994).

Segundo Vasconcelos (2018), podem ou não ser distribuídas aleatoriamente na utilização dos compósitos, podem ser longas ou curtas, dependendo da peça desejada. Também podem ser apresentadas na forma de tecidos, dos quais o tipo mais comum são os uniaxiais e biaxiais.

2.3.3.2 Fibra de vidro

Conforme Abmaco (2009), a variação dos componentes minerais do vidro, podem ser produzidos diversos tipos de fibras com composição química, propriedades e custos específicos. Na indústria o Vidro E (*E-glass, electrical glass*), é tipo de fibra de vidro mais utilizada, apresenta baixo teor de álcalis e é mais resistente que tipo-A (o vidro alcalino utilizado em garrafas e janelas). O vidro E, tem como característica boas propriedades dielétricas, sua grande

popularidade nos materiais compósitos decorre de seu baixo custo aliado a excelentes propriedades mecânicas que proporciona.

2.3.3.3 Tecidos

De acordo com Levy e Pardini (2012), os tecidos mais populares na indústria possui duas direções principais: urdume e trama. O urdume é referente à direção do comprimento do tecido, e a trama possui direção transversal ao urdume. Com a exceção dos tecidos especialmente triaxiais, os tecidos podem ser determinados como um conjunto de cabos interlaçados à ângulos retos em determinada sequência padrão ou tela.

Entretanto, para Askeland; Phulé (2008), uma das principais características dos compósitos reforçados com fibras, é adaptação de suas propriedades para a satisfação de diferentes tipos de carregamentos. Fibras longas e contínuas podem ser organizadas em várias direções dentro da matriz em arranjos ortogonais e sua resistência mecânica elevada é alcançada em duas direções perpendiculares.

Figura 6. Tecido em fibra de vidro



Fonte: O autor

2.3.3.4 Mantas

Para Abmaco (2009), as fibras são picotadas e unidas quimicamente com ligantes solúveis. Existem no mercado dois tipos de mantas, as fibras picadas e de filamentos contínuos. As mantas de fibras picadas são confeccionadas a partir de várias bobinas de fios de fibra, que são picotados e distribuídos sobre uma esteira. Os ligantes são pulverizados na superfície superior da manta e distribuídos pela sua espessura por meio de água e vibradores. Então a manta vai para a secagem em uma estufa e posteriormente, amolecer e curar o ligante. Rolos compactadores aplicam pressão para promover o contato do ligante com as fibras e então a manta é enrolada. Entretanto para as mantas de filamento contínuo se diferem em alguns pontos essenciais que são a geometria da fibra e seus ligantes à base de resina poliéster em pó, que são curados e, portanto, insolúveis no estireno e apresentam espessura e porosidade maiores do que as mantas de fibras picadas.

Figura 7. Manta em fibra de vidro



Fonte: O autor

2.3.3.5 Fios de fibra de vidro

De acordo com Kaw (1997), a bitola da fibra necessita ser de pelo menos dez vezes menor que seu comprimento. As fibras que possuem diâmetro de filamento menor, possuirá melhor aderência entre a fibra e matriz e, como resultado, maior resistência do material.

Para Jones (1975), devido ao pequeno diâmetro da seção transversal da fibra, elas são envolvidas em uma matriz, cuja função é suportar e proteger as fibras, além de transmitir de forma distribuída os esforços solicitados entre os reforços constituintes, principalmente quando ocorrer a quebra de algum reforço.

Figura 8. Fios de fibra de vidro



Fonte: O autor

2.3.3.6 Plástico reforçados com fibras de vidro

Segundo Liao *et al.* (1998), os plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV), são compósitos à base de uma matriz polimérica reforçada com fibras de vidro, ressaltam-se como os compósitos mais utilizados. Sua excepcional relação desempenho/ peso lhes confere uma ampla utilização em diversas áreas como indústria marítima, aeronáutica, etc. Com grande ênfase na utilização dos compósitos na fabricação de tubulações e reservatórios de grande e médio porte.

2.4 Inspeção e teste

Segundo a ASTM D2584, é suma importância qualquer reservatório ser submetido a inspeções visuais e testes (ASTM D2584, 2018).

2.5 Inspeção visual

Para a ASTM D2562, a inspeção visual deverá abranger diversos critérios de aceitação para as peças a serem confeccionadas. A inspeção visual visa detectar possíveis não conformidades ou desvios no processo de produtivo das peças (ASTM D2562, 2018).

2.6 Teste de dureza Barcol

Conforme Kunrath (2013), para uma inspeção de qualidade, o índice de cura da resina poliéster deverá ser monitorado. Para este exame deverá ser utilizado um medidor durômetro Barcol conforme apresentado na figura 9, que faz sua medição através de uma agulha que contabiliza a resistência a penetração que irá variar de 0 a 100, as resinas normalmente tendem a ficar por volta de 40 Barcol, entretanto é obrigatório verificar o boletim técnico do fabricante para conferência da cura de 100% do polímero.

Figura 9. Durômetro Barcol

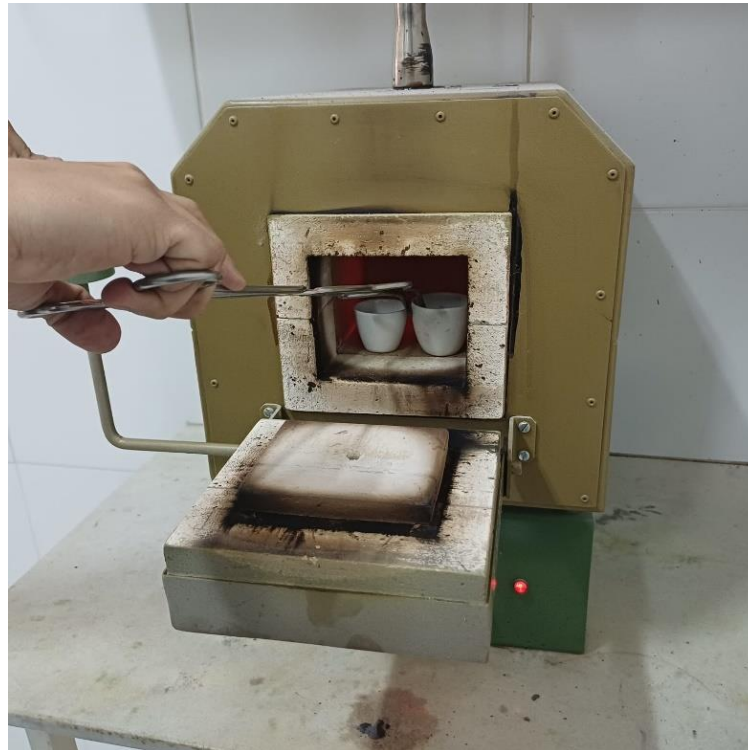


Fonte: O autor

2.7 Teste de cinzas

Conforme a ASTM D2584, o teste de cinzas é um ensaio destrutivo que visa determinar a perda de ignição da resina reforçada e curada (ASTM D2584, 2018).

Figura 10. Mufla



Fonte: O autor

2.8 Teste de estanqueidade

De acordo com a ASME RTP-1, o teste de estanqueidade consiste em abastecer o reservatório com água limpa em um período mínimo de duas horas para a detecção de vazamentos. Se ocorrer algum tipo de escape de água o equipamento deverá ser reparado e teste deve ser repetido (ASME RTP-1, 2017).

2.9 Laudo de potabilidade

Conforme a NBR 16098, os equipamentos, cuja principal função seja melhorar a qualidade da água para consumo humano, deverá passar por testes específicos afim de

autorizar a utilização da resina na fabricação do equipamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012).

2.10 Utilização de moldes

Segundo Oliveira (2017), para a laminação do PRFV é necessário um molde ou forma para que seja feita a aplicação da matéria prima. Existem dois tipos de moldes, o aberto e o fechado. Para a laminação utilizando molde fechado, será obtida uma peça com boa qualidade superficial, ou seja, lisa e sem rugosidade em ambos os lados. Entretanto para a laminação utilizando o molde aberto, apenas um lado da peça irá ficar em contato com o molde, e o outro lado possuirá um aspecto rústico. Normalmente é utilizado moldes abertos por possuírem um menor investimento de produção e fácil correção de erros, entretanto irá produzir uma quantidade maior de estireno e resíduos em comparação com o molde fechado.

Figura 11. Molde aberto



Fonte: O autor

2.11 Resistência à tração do material compósito de PRFV

De acordo com Broutman (1980), a carga máxima aplicada em compósitos reforçados com fibra de vidro irá depender de vários fatores. O PRFV é um material anisotrópico, o qual, sua principal resistência a propriedade física irá depender da direção em que for submetida ao esforço. Já o aço carbono é um material isotrópico, o qual a sua resistência a tração sempre será a mesma independente da direção. O costado de um reservatório em PRFV possui menor resistência a tração no sentido axial do que no sentido circunferencial, isso será gerado pelo fato das fibras contínuas serem enroladas de forma circunferencial ao costado do reservatório então convertendo essa orientação preferencial da fibra, a tensão circunferencial é submetida a carga hidrostática do fluido do equipamento, enquanto a carga axial irá sofrer a pressão do vento.

2.11.1 Materiais isotrópicos e anisotrópicos

Para Broutman (1980), o fenômeno da anisotropia consiste na mudança das propriedades dos materiais dependendo da direção que são medidos. Essa diretriz não poderá ser aplicada em propriedades volumétricas como a densidade e o calor específico que são denominados escalares. Entretanto para os metais, os aspectos mais importantes da anisotropia estão relacionados às propriedades mecânicas e às propriedades magnéticas.

Segundo Broutman (1980), o oposto da anisotropia é o material isotrópico, ou seja, o material irá exibir as mesmas propriedades em todas as direções da medida. Esse é um comportamento típico de materiais amorfos, onde os átomos ou molécula não estão regularmente arranjados no período regular, que é naturalmente isotrópico.

2.12 EPI's necessários para o manuseio da resina

Segundo Geron (2022), para a produção de reservatórios em PRFV é indispensável a utilização de equipamentos individuais de proteção, isso ocorre porque a resina poliéster libera vapores tóxicos para o organismo humano, conforme a FISPQ da resina poliéster, para o seu manuseio é necessário a utilização de máscara com filtro de vapores orgânicos e gases ácidos, óculos de proteção, luva, avental, mangote, calçados de segurança para evitar contato com a pele e os olhos.

3 METODOLOGIA

O propósito deste estudo é apresentar o projeto e confecção de um reservatório para armazenamento de água potável em PRFV.

O reservatório será fornecido à uma empresa do seguimento agro industrial, terá capacidade de 25m³, diâmetro interno de 2500mm e comprimento cilíndrico de 5100mm. O formato de seu casco será cilíndrico vertical, já o seu tampo inferior será do modelo plano e tampo superior será torisferico.

3.1 Desenho técnico

Segundo a norma ABNT/NBR 10647, referente à nomenclatura e detalhamento, o projeto possui uma folha em formato A1, na qual estão representados todos os dimensões e *layout* do reservatório. A partir deste desenho técnico, será elaborada a lista de materiais e reunidas todas as informações necessárias para a confecção do reservatório. É importante ressaltar que o projeto foi desenvolvido pela empresa contratada e posteriormente aprovado pela empresa contratante, conforme anexo A (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014).

3.2 Memorial de cálculo

O projeto e fabricação do reservatório seguem as seguintes normas técnicas e referências bibliografias específicas: ASTM D3299; ASTM D409; ABNT NBR 6123 e o livro Compósitos para uso industrial – Antônio Carvalho Filho.

Para a elaboração do memorial de cálculo é importante considerar, que o processo de fabricação utiliza distintos tipos de laminação, pode variar conforme o tipo de camada a ser fabricada e o formato da peça.

A fabricação das camadas mais internas do reservatório (*Liner* e Barreira Química), os tampos inferior e superior, as soldas, uniões e acoplamentos (bocais, sapatas e demais acessórios) serão confeccionadas pelo processo de laminação manual e *spray-up*. Já a camada estrutural do corpo cilíndrico (casco), será confeccionada pelo processo de *filament winding*.

3.2.1 Cálculo do tampo inferior

O tampo inferior plano será integralmente apoiado na base (radier), conseqüentemente, não será necessário calcular, pois a carga hidrostática será transferida diretamente à base.

De acordo com a norma ASTM D4097-2018, é recomendado que reservatórios com diâmetros entre 1,8M e 3,7M possuam espessura mínima total de $T_f = 6,4\text{mm}$ (ASTM D4097, 2018).

3.2.2 Cálculo do casco cilíndrico (costado)

Conforme a norma ASTM D3299, o casco cilíndrico (costado) apresenta espessura mínima de 4,77 mm correspondente a 3/16". A espessura mínima exigida para suportar a carga hidrostática do reservatório será calcula pela equação 01 (ASTM D3299, 2018).

$$t = \frac{(0,1 \times H \times \gamma) \times D}{2 \times E_y \times \epsilon_{adm}} \quad (01)$$

Onde:

H é a altura da seção analisada em metros: 5,1M;

D é o diâmetro em milímetros: 2500mm;

γ é a densidade do fluído armazenado em g/cm^3 : $1,0g/cm^3$;

E γ é o módulo de tração circunferencial em kg/cm^2 : $298200kg/cm^2$;

ϵ_{ADM} é o alongamento admissível: 0,001.

A espessura total mínima será calculada pela equação 02 a seguir:

$$t_f = [T_{estrutural} + (T_{liner} + T_{barreira\ química} + T_{top\ coalt})] \quad (02)$$

Sendo que: $(t_{liner} + t_{barreira\ química} + T_{top\ coalt}) = 2,8\text{mm}$

Para efeito de cálculo o casco cilíndrico possuirá espessura constante conforme a equação 03.

$$t_{estrutural} = \frac{(0,1 \times 5,1 \times 1,00) \times 2500}{2 \times 298200 \times 0,001} = 2,14\text{mm} \quad (03)$$

$$t_{total} = [t_{estrutural} + (t_{liner} + t_{barreira\ química} + t_{top\ coalt})] = 2,14 + 2,8 = 4,94\text{mm}$$

$$4,94 > 4,77$$

3.2.2.1 Carga de vento no costado

Conforme a NBR 6123, o vento irá provocar pressões no equipamento de forma variada, contínua ou intermitente gerando efeitos indesejáveis. Em estruturas de até 6M de altura o vento produzirá cargas de até $50kgf/m^2$. A formação do vento depende de uma série de fenômenos meteorológicos, que neste trabalho não será abordada, entretanto, é importante levar em consideração no cálculo estrutural do equipamento que o vento possui caráter aleatório. Dessa forma para a carga de vento, será considerada a direção mais desfavorável para a estrutura. Segundo o teorema de Bernoulli a pressão de obstrução causada pelo vento é pela equação 04 (Associação de Brasileira de Normas Técnicas, 1988).

$$q_{vento} = 0,613 \times V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (04)$$

Onde:

V_k : é a velocidade característica do vento expressa em m/s .

A velocidade característica do vento é obtida, em referência a valores medidos próximos a região em que o reservatório ficará instalado. Dessa forma será necessário padronizar a forma de mensurar a velocidade do vento ao longo do tempo, e transformar este valor em ação que irá atuar no equipamento. Desse modo a velocidade do vento será analisada considerando os critérios listados abaixo:

- a) Local de instalação;
- b) Tipo de terreno se plano, em aclave, morro ou etc.;
- c) Altura do equipamento, rugosidade do terreno (tipo e altura dos obstáculos na vizinhança próximas ao local onde o equipamento foi instalado);
- d) Finalidade do local de instalação.

3.2.2.2 Determinação da força do vento

Segundo a NBR 6123, o cálculo da velocidade característica do vento é determinado pela equação 05 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

$$V_k = V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (05)$$

Onde:

V_0 : velocidade básica (obtida em um gráfico de isopletas);

S_1 : fator topográfico;

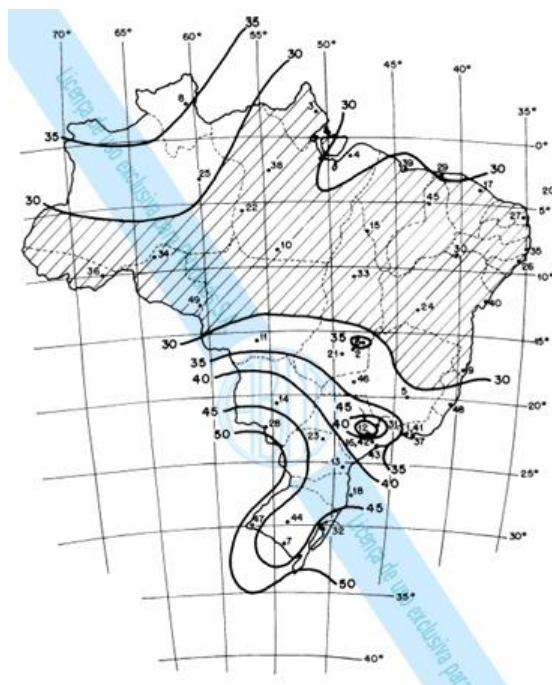
S_2 : fator rugosidade do terreno (dimensões e altura da edificação;

S_3 : fator estatístico.

3.2.2.3 Determinação da velocidade básica do vento

De acordo com NBR 6123, o primeiro passo para a determinação da carga de vento no costado do reservatório será analisar a velocidade básica (V_0) obtida através do gráfico de isopletas, conforme imagem 12 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

Figura 12. Gráfico de isopletas



Fonte: ABNT/NBR 6123

Conforme representado na figura 13, a cidade de Abadia dos Dourados localizada no estado de Minas Gerais, encontra-se na região do Triângulo Mineiro, área de transição onde a velocidade básica do vento varia entre 30 a 35m/s. A NBR 6123, recomenda a realização de interpolação linear para a determinação precisa da velocidade básica. Entretanto, para otimizar

o processo, adotou-se o valor mais elevado, correspondente a $35m/s$ (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988).

3.2.2.4 Determinação do fator topográfico S_1

De acordo com ABNT NBR 6123, o fator topográfico considera as variações do relevo do terreno em um raio de 5km, e é determinado do seguinte modo (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

- a. Terreno plano ou fracamente acidentado $S_1=1$;
- b. Taludes e morros;
- c. Vales profundos, protegidos de ventos de qualquer direção $S_2=0,9$.

De acordo com as informações fornecidas pelo cliente, o reservatório será implantado, em uma área desprotegida, caracterizada por relevo fracamente acidentado. Dessa forma conforme os critérios estabelecidos pela NBR 6123, adota-se o fator topográfico $S_1=1$ (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

3.2.2.5 Determinação do fator rugosidade do terreno S_2

Conforme a NBR 6123, o fator S_2 , considera o efeito combinado da rugosidade do terreno, da variação da velocidade do vento com altura acima do terreno e das dimensões da edificação ou parte da edificação em consideração. Em ventos fortes em estabilidade neutra, a velocidade do vento aumenta com a altura acima do terreno. Este efeito irá depender da rugosidade do terreno e do intervalo de tempo considerado na determinação da velocidade. A rugosidade do terreno é classificada em cinco categorias (Associação Brasileira de Normas Técnicas):

- I. Superfícies lisas de grandes dimensões, com de 5km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente;
- II. Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas;
- III. Terrenos planos ou ondulados, com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra ventos de árvores, edificações baixas e esparsas;

- IV. Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada;
- V. Terrenos coberto por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados.

Segundo a NBR 6123, a velocidade do vento, varia continuamente, seu valor médio pode ser calculado sobre qualquer intervalo de tempo. Foi verificado que o intervalo mais curto das medidas usuais (3s) correspondem a rajadas cujas as dimensões envolvem obstáculos de até 20m na direção do vento médio. Para a definição das partes da edificação a considerar nas ações do vento, é necessário considerar características construtivas ou estruturais que originem pouco ou nenhuma continuidade estrutural ao longo da edificação. Dessa forma, as edificações podem ser classificadas em três categorias, conforme listado a seguir (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

- Classe A: Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical não exceda 20m;
- Classe B: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre 20m e 50m;
- Classe C: Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda 50m.

De acordo com as informações fornecidas pelo cliente, a Categoria III é a que melhor representa as condições do entorno para a situação de projeto. Dessa forma, considera-se a cota média do topo dos obstáculos igual de 3,0m de altura, em conformidade com a NBR 6123. O cálculo do fator S_2 será dado pela equação 06 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

$$S_2 = b \times F_r \times \left(\frac{Z}{10}\right)^p \quad (06)$$

Onde:

Z: altura acima do terreno 350;

F_r : fator de rajada correspondente a classe B;

b: parâmetro de correção da classe de edificação 0,94;

p : parâmetro meteorológico 0,105.

Figura 13. Parâmetros meteorológicos

Tabela 1 - Parâmetros meteorológicos

Categoria	z_g (m)	Parâmetro	Classes		
			A	B	C
I	250	b	1,10	1,11	1,12
		p	0,06	0,065	0,07
II	300	b	1,00	1,00	1,00
		F_r	1,00	0,98	0,95
		p	0,085	0,09	0,10
III	350	b	0,94	0,94	0,93
		p	0,10	0,105	0,115
IV	420	b	0,86	0,85	0,84
		p	0,12	0,125	0,135
V	500	b	0,74	0,73	0,71
		p	0,15	0,16	0,175

Fonte: ABNT/NBR 6123

Conforme a NBR 6123, o fator S_2 , referente à rugosidade do terreno e às dimensões da edificação, será determinado a partir da Figura 15. O valor correspondente à altura (Z) deve ser obtido por interpolação linear, resultando em 0,8732. Já os valores de correção relativos à classe da edificação (b) e ao efeito meteorológico (p) serão extraídos da figura 14. Dessa forma, o fator S_2 fornecerá o resultado apresentado a seguir (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988):

$$S_2 = 0,94 \times 0,8732 \times \left(\frac{350}{10}\right)^{0,105}$$

$$S_2 = 1,1922$$

Figura 14. Fator S_2

Tabela 2 - Fator S_2

z (m)	Categoria														
	I			II			III			IV			V		
	Classe			Classe			Classe			Classe			Classe		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,10	1,09	1,06	1,00	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,80	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,90	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,80	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,10	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,10	1,08	1,06	1,01	1,00	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,20	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,20	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,10	1,09	1,07
160	1,30	1,30	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,20	1,18	1,16	1,12	1,11	1,10
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,20	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,20	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,30	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,20	1,20	1,18
300	-	-	-	1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,33	1,32	1,30	1,29	1,26	1,26	1,26
400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,35	1,35	1,33	1,30	1,30	1,30
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,32	1,32	1,32
500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,34	1,34	1,34

Fonte: ABNT/NBR 6123

3.2.2.6 Determinação do fator estatístico S_3

Segundo a NBR 6123, o fator S_3 baseia-se em conceitos estatísticos, considerando o grau de segurança exigido e a vida útil da edificação. Esse fator é dividido em cinco grupos, conforme apresentado a seguir. Para o projeto do reservatório, adotou-se o Grupo 3, correspondente a $S_3 = 0,95$. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988).

1. Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.);

2. Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação;
3. Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.);
4. Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.);
5. Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.

3.2.2.7 Resultados da carga do vento

Conforme as Equações 04 e 05, a velocidade característica do vento e a respectiva carga de vento são apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned}
 V_k &= V_0 \times S_1 \times S_2 \times S_3 \text{ (m/s)} \\
 V_k &= 35 \times 1 \times 1,1922 \times 0,95 \text{ (m/s)} \\
 V_k &= 39,64 \text{ (m/s)} \\
 q_{vento} &= 0,613 \times V_k^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \\
 q_{vento} &= 0,613 \times 39,64^2 \text{ (N/m}^2\text{)} \\
 q_{vento} &= 963,22 \text{ (N/m}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

3.2.2.8 Carga de vento no costado

De acordo com Carvalho (2012), na análise estrutural do costado sob a ação de vento, devem ser considerados dois esforços, conforme descrito a seguir (Antônio Carvalho Filho, 2012):

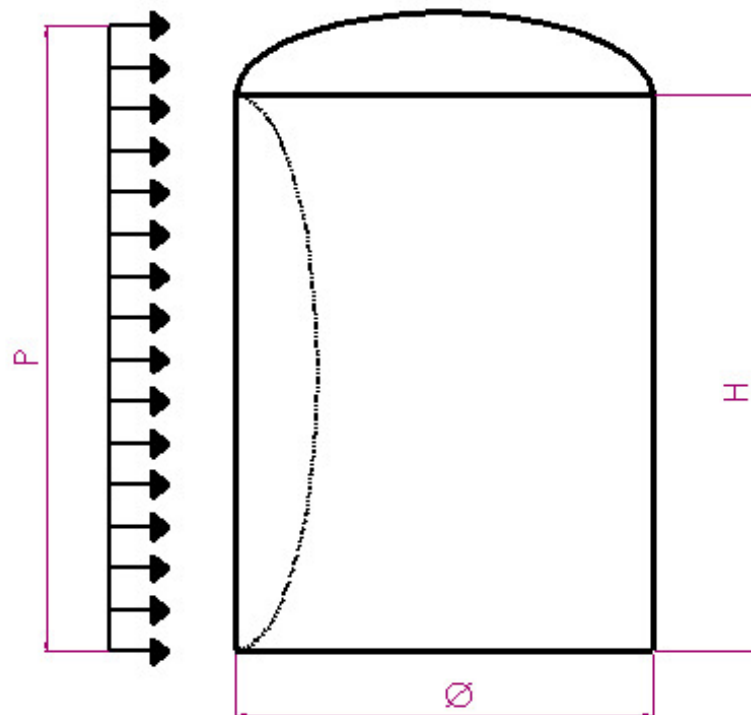
- a. Pressão radial exercida pelo vento;
- b. Tensão de compressão axial.

Para Carvalho (2012), estes esforços são de pequena relevância, e não causam ruptura por falta de resistência do laminado. Neste caso as falhas, são decorrentes pela instabilidade gerada pelas tensões de compressão (Antônio Carvalho Filho, 2012).

3.2.2.9 Pressão radial exercida pelo vento

Conforme Carvalho (2012), no cálculo da pressão radial do vento, considera-se uma carga uniformemente distribuída ao redor do cilindro. Essa distribuição pode causar uma instabilidade circunferencial, na face de incidência do vento. A situação torna-se mais crítica quando o reservatório está vazio, ou seja, sem fluido em seu interior, conforme ilustrado na Figura 16. Nessa condição, a pressão exercida pelo vento deve ser comparada à pressão circunferencial crítica, a fim de verificar a estabilidade estrutural do costado (Antônio Carvalho Filho, 2012).

Figura 15. Pressão radial



Fonte: O autor

3.2.2.10 Determinação da pressão do vento no costado do reservatório

De acordo com Carvalho (2012), a carga exercida pelo vento em superfícies verticais cilíndricas é mensurada pela equação 07. No entanto pode ser considerada a equação 04, estabelecida pela ABNT NBR 6123, a qual define carga de vento. Nesta situação deve-se adotar a carga mais crítica para o dimensionamento do reservatório.

$$\begin{aligned}
 P &= 4,76 \times 10^{-7} \times V^2 \\
 P &= 4,76 \times 10^{-7} \times (142,70^2) \\
 P &= 0,0097 \text{ kg/cm}^2 \\
 P &= 951 \text{ N/m}^2
 \end{aligned}
 \tag{07}$$

Onde:

P : Pressão do vento, em (kg/cm^2) ;

V : Velocidade do vento, em (km/h) ;

3.2.2.11 Determinação da força resultante da ação do vento no costado do reservatório

De acordo com a ABNT/NBR 6123, a força resultante decorrente da ação do vento é obtida a partir da equação 08, a qual fornece uma estimativa afim de determinar força de arrasto do vento sobre o costado do reservatório (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988).

$$\begin{aligned}
 F &= 0,613 \times V_k^2 \times C_p \times A_{proj.}(N) \\
 F &= 0,613 \times 39,64^2 \times 1,0 \times (5,1 \times 2,5)(N) \\
 F &= 12,3(kN)
 \end{aligned}
 \tag{08}$$

Onde:

F : Força do vento (N) ;

V_k : Velocidade característica do vento (m/s) ;

C_a : Coeficiente de arrasto;

$A_{proj.}$: Área da projeção plana do cilindro (m^2) ;

3.2.2.12 Tensão de compressão axial

Carvalho (2012) indica, que a instabilidade axial, ocorre no lado oposto a direção do vento, conforme a equação 09. Nesta condição, a tensão de compressão axial é comparada à tensão axial crítica. As cargas de compressão atuam predominantemente no costado do reservatório, conforme imagem 16 (Antônio Carvalho Filho, 2012).

$$\sigma_x = \frac{P \times H^2}{\pi \times R \times t} (kg/cm^2) \quad (09)$$

$$\sigma_x = \frac{0,000749 \times 510^2}{\pi \times 125 \times 0,494} (kg/cm^2)$$

$$\sigma_x = 13(kg/cm^2)$$

Onde:

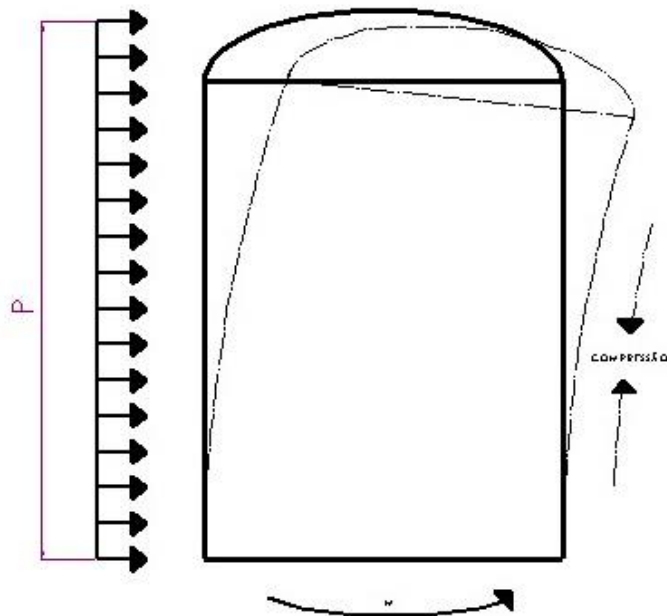
P : Pressão do vento (kg/cm^2)

H : Altura do cilindro (cm)

R : Raio do cilindro (cm)

t : Espessura do cilindro (cm)

Figura 16. Pressão axial



Fonte: O autor

3.2.2.13 Comprimento crítico

Segundo Carvalho (2012), o comprimento crítico aplica-se a reservatórios cilíndricos verticais de parede fina, estando relacionado à estabilidade estrutural sob a ação de pressões externas ou de pressão interna negativa, conforme apresentado na Equação 10 (Antônio Carvalho Filho, 2012).

$$L_{cri} = 3,1 \times 10^{-3} \times R_1 \times \sqrt{\frac{R}{t}} \times \left(\frac{E_x}{E_y}\right)^{0,25} (m) \quad (10)$$

$$L_{cri} = 3,1 \times 1,25 \times \sqrt{\frac{1250}{4,94}} \times \left(\frac{126500}{176000}\right)^{0,25} (m)$$

$$L_{cri} = 56,75(m)$$

Onde:

E_x : Módulo de elasticidade do laminado no eixo X (kg/cm^2)

E_y : Módulo de elasticidade do laminado no eixo Y (kg/cm^2)

R_1 : Raio do cilindro (m)

R : Raio do cilindro (mm)

t : Espessura do cilindro (mm)

3.2.2.14 Pressão lateral crítica

Segundo Carvalho (2012), a pressão lateral crítica é um conceito de estabilidade estrutural que indica o limite máximo de pressão lateral (interna ou externa) que o reservatório pode suportar antes que a estrutura sofra instabilidade, conforme apresentado na Equação 11 (Antônio Carvalho Filho, 2012).

$$P_{cri} = 0,82 \times E_y \times \left(\frac{E_x}{E_y}\right)^{1/4} \times \left(\frac{R}{L}\right) \times \left(\frac{t}{R}\right)^{5/2} (kg/cm^2) \quad (11)$$

$$P_{cri} = 0,82 \times 176000 \times \left(\frac{126500}{176000}\right)^{1/4} \times \left(\frac{1250}{5100}\right) \times \left(\frac{4,94}{1250}\right)^{5/2} (kg/cm^2)$$

$$P_{cri} = 0,032(kg/cm^2)$$

Onde:

E_x : Módulo de elasticidade do laminado no eixo X (kg/cm^2)

E_y : Módulo de elasticidade do laminado no eixo Y (kg/cm^2)

R : Raio do cilindro (mm)

t : Espessura do cilindro (mm)

L : Comprimento do cilindro (mm)

3.2.2.15 Tensão compressão axial crítica

De acordo com Carvalho (2012), a tensão de compressão axial crítica é a tensão máxima axial que um reservatório pode suportar antes de ocorrer instabilidade ou flambagem, conforme indicada na Equação 12 (Antônio Carvalho Filho, 2012).

$$\sigma_{cri} = 0,60 \times \left[0,1 + 0,9 \exp \left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \right] \times \sqrt{E_x \times E_y} \times \frac{t}{R} (kg/cm^2) \quad (12)$$

$$\sigma_{cri} = 0,60 \times \left[0,1 + 0,9 \exp \left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{1250}{4,94}} \right) \right] \times \sqrt{126,5 \times 10^3 \times 176 \times 10^3} \times \frac{4,94}{1250}$$

$$\sigma_{cri} = 153(kg/cm^2)$$

Onde:

E_x : Módulo de elasticidade do laminado no eixo X (kg/cm^2)

E_y : Módulo de elasticidade do laminado no eixo Y (kg/cm^2)

R : Raio do cilindro (mm)

t : Espessura do cilindro (mm)

L : Comprimento do cilindro (mm)

3.2.2.16 Flambagem por compressão axial

Conforme a ASTM D3299, o coeficiente de segurança contra a flambagem por compressão lateral é definido como a razão entre a tensão de compressão crítica e a tensão de compressão axial, devendo ser maior ou igual a 5, conforme apresentado na Equação 13 (ASTM D3299, 2018).

$$CS = \frac{\sigma_{cri}}{\sigma_x} \quad (13)$$

$$CS = \frac{153}{13}$$

$$CS = 11,77$$

3.2.2.17 Instabilidade circunferencial

Conforme Carvalho (2012), o coeficiente de segurança contra a instabilidade circunferencial é definido como a razão entre a pressão lateral do vento e a pressão lateral crítica, devendo ser maior ou igual a 2, conforme apresentado na Equação 14 (Antônio Carvalho Filho, 2012).

$$CS = \frac{P}{P_{cri}} \quad (14)$$

$$CS = \frac{0,0097}{0,032}$$

$$CS = 0,303$$

3.2.3 Cálculo do tampo superior

Conforme a norma ASTM D4097, a espessura do tampo superior, possuirá espessura de 6.0mm. E a carga considerada será de 110kg/cm², não apresentando a deformação do diâmetro do reservatório (ASTM D4097, 2018).

3.2.4 Espessura da emenda entre tampo e costado

Segundo a norma ASTM D4097, a espessura de emenda entre o tampo inferior e o corpo cilíndrico tem que possuir, no mínimo, a somatória das espessuras do fundo com o costado, conforme a equação 15 (ASTM D4097, 2018).

$$t_k = t_f + t_{total}(mm) \quad (15)$$

$$t_k = 6,4 + 4,94(mm)$$

$$t_k = 11,34(mm)$$

Onde:

t_k : Espessura da emenda entre tampo e costado (mm)

t_f : Espessura do tampo (mm)

t_{total} : Espessura total do costado (mm)

3.2.5 Largura da emenda entre tampo e costado

Segundo a norma ASTM D4097, a espessura de emenda entre o tampo inferior e o corpo cilíndrico tem que cobrir uma distância mínima de 12pol (304MM), para reservatórios com diâmetro superior a 1220mm (ASTM D4097, 2018).

3.2.6 Carregamento do tanque na base

Para a determinação dos chumbadores, é necessário determinar o carregamento transmitido pelo tanque à base e apresentar esses valores à empresa contratante, conforme a tabela 1. Essa empresa será responsável pelo projeto e construção do radier para a acomodação do reservatório.

Tabela 1. Carregamentos atuantes na base

Carregamentos	Valores
Peso do reservatório vazio	800kgf
Força de arraste do vento	12300N
Momento fletor	31365N
Carga vertical do reservatório cheio	25800N
Carga vertical do reservatório no teste hidrostático	25800kN
Carga vertical do tanque vazio	7848N
Sobre carga do equipamento	0

Fonte: O autor

3.2.6.1 Carregamento do tanque na base

De acordo com ASME RTP-1, o dimensionamento dos chumbadores será definido pela força de cisalhamento no chumbador, conforme a equação 16 (ASME RTP-1, 2017).

$$FC_{ch} = \frac{F_x}{N_{cha}} (kN) \quad (16)$$

$$FC_{ch} = \frac{12,3}{4} (kN)$$

$$FC_{ch} = 3,075(kN)$$

Onde:

FC_{ch} : Força de cisalhamento do chumbador (kN);

F_x : Força de arraste do vento (kN);

N_{cha} : Número de chumbadores.

Figura 17. Especificações dos chumbadores

Diâmetro		Furo (mm)		Distância mínima recomendada ⁴ (mm)		Chave (pol.)	Torque ⁵ (kgf.m)	Fixações por cartucho ⁶	Cargas últimas ² (kgf)		Carga característica ³ de acordo com certificação ETA TR029 (kgf)	
(pol.)	(mm)	Diâmetro	Profundidade ¹	Fixador fixador	Fixador borda				Tração	Corte	Tração	Corte
5/16"	8	10	64	128	64	1/2"	1,5	113	3.025	1.887	2.003	1.560
			96	192	96			75	3.122		3.005	
3/8"	10	12	80	160	80	9/16"	2	65	4.451	2.768	3.158	2.287
			120	240	120			43	4.990		4.736	
1/2"	12	14	96	192	96	3/4"	4,1	55	7.668	4.924	4.547	4.069
			144	288	144			37	8.137		6.821	
5/8"	16	18	128	256	128	15/16"	8,2	25	12.200	8.017	8.083	6.625
			192	384	192			16	13.259		12.124	
3/4"	20	22	160	320	160	1 1/8"	15,3	13	18.916	11.818	10.838	9.766
			240	480	240			8	19.528		18.945	
7/8"	22	25	176	352	176	1 5/16"	18,4	10	21.720	16.272	14.332	13.447
			264	528	264			6	26.911		21.498	
1"	24	28	192	384	192	1 1/2"	22,4	8	28.797	21.304	14.248	17.605
			288	576	288			5	31.397		25.331	
1 1/4"	32	35	256	512	256	1 7/8"	30,6	4	53.494	35.047	24.372	28.962
			384	768	384			2	56.099		36.558	

Fonte: Ancora

Conforme padrão adotado pela empresa em estudo, foi utilizado barras rosçadas Ø7/8" e comprimento de 250mm. Com base nos resultados obtidos, e de acordo com a equação 17, o chumbador resiste aproximadamente 13 vezes a carga solicitada, conforme especificações descritas pela empresa Ancora, ilustradas na figura 17.

$$CS = \frac{159,4}{12,3} (kN) \quad (17)$$

$$CS = \frac{\sigma_{cri}}{\sigma_{max}} (kN)$$

$$CS = 12,95$$

Onde:

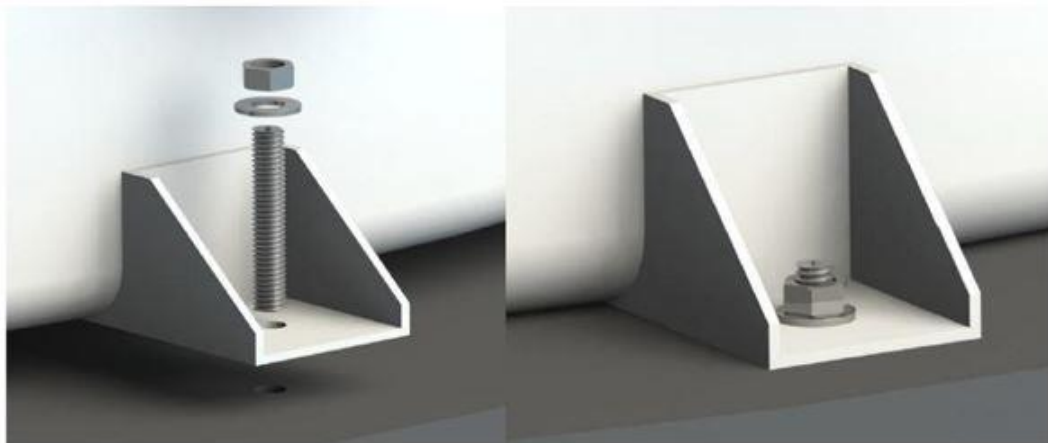
σ_{cri} : Carga característica do chumbador;

σ_{max} : Carga máxima de tração.

3.2.6.2 Instalação do reservatório na base

O reservatório deverá ser posicionado sobre a base (radier), onde serão executadas as perfurações nos pontos de fixação correspondentes às sapatas, conforme ilustrado na Figura 18. Em seguida, deve-se realizar a limpeza dos furos, a fim de remover as impurezas resultantes do processo de perfuração. Posteriormente, procede-se à aplicação do chumbador químico, juntamente com a barra roscada, conforme especificado no memorial de cálculo.

Figura 18. Detalhe da sapata de fixação do reservatório



Fonte: O autor

3.3 Fabricação do equipamento

Após a aprovação do projeto pela empresa contratante, a matéria-prima é adquirida para a confecção do equipamento. Para a fabricação do reservatório e seus acessórios, utiliza-se o

compósito de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), cuja principal característica é a anisotropia, ou seja, a capacidade do material de reagir aos esforços de acordo com a direção.

Para garantir a confiabilidade da resistência mecânica, o material foi submetido ao ensaio de tração conforme a norma ASTM D638, em máquina universal de ensaios modelo 5969R da Instron, equipada com célula de carga de 50.000 N, em laboratório localizado na cidade de São Carlos – SP, na data 20/03/2024.

Figura 19. Propriedade de tração da amostra

Tabela 2 – Propriedades de tração da amostra LCP240178, ensaiada com velocidade de 2 mm/min e na temperatura de 23°C .

Amostra	C.P	Largura (mm)	Espessura (mm)	Módulo (MPa)	Tensão na ruptura (MPa)	Deformação na ruptura (%)
LCP240178	1	15,130	2,688	50260,53	488,38	2,38
	2	15,110	2,692	42740,79	494,93	3,24
	3	15,039	2,750	39169,19	531,01	3,16
	4	15,185	2,494	43745,05	410,13	1,07
	5	15,059	2,807	38269,11	388,66	1,03
	6	15,142	2,690	43135,07	576,21	2,19
	7	15,124	2,686	43073,66	469,13	1,62
Média		---	---	42913,34	479,78	2,10
Desv. Padrão		---	---	3880,83	65,19	0,91

Fonte: CCDM

Na figura 21 são apresentados os resultados do ensaio realizado pela CCDM. As propriedades das amostras foram analisadas no sentido longitudinal, correspondente à orientação preferencial das fibras.

Figura 20. Direção preferencial dos em fibra de vidro



Fonte: O autor

Após a análise dos resultados do ensaio de tração, é possível comparar o polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) com o aço ASTM A-36, conforme indicado na imagem 21 do livro *Hibbeler – Resistência dos Materiais 7ª edição*. Conclui-se que o PRFV apresenta aproximadamente metade da resistência à tração do aço estrutural.

Figura 21. Propriedades mecânicas do aço ASTM A-36

Propriedades mecânicas médias de materiais típicos de engenharia^a
(Unidades SI)

Materiais	Peso específico ρ (Densidade) (Mg/m ³)	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Módulo de elasticidade transversal (módulo de rigidez) G (GPa)	Tensão de escoamento (MPa) σ_c			Limite de resistência (MPa) σ_T			% de alongamento em corpo de prova de 50 mm	Coeficiente de Poisson ν	Coeficiente de dilatação térmica α (10 ⁻⁶)/°C
				Tração	Compr. ^b	Cisalh.	Tração	Compr. ^b	Cisalh.			
Metálicos												
Ligas de alumínio forjadas	2014-T6	2,79	73,1	27	414	414	172	469	469	290	0,35	23
	6061-T6	2,71	68,9	26	255	255	131	290	290	186	0,35	24
Ligas de ferro fundido	Cinza ASTM 2	7,19	67,0	27	—	—	—	179	669	—	0,6	12
	Maleável ASTM A-197	7,28	172	68	—	—	—	276	572	—	5	0,28
Ligas de cobre	Latão vermelho C83400	8,74	101	37	70,0	70,0	—	241	241	—	35	0,35
	Bronze C86100	8,83	103	38	345	345	—	655	655	—	20	0,34
Liga de magnésio	[Am 1004-T61]	1,83	44,7	18	152	152	—	276	276	—	1	0,30
Ligas de aço	Estrutural A36	7,85	200	75	250	250	—	400	400	—	30	0,32
	Inoxidável 304	7,86	193	75	207	207	—	517	517	—	40	0,27
	Ferramenta L2	8,16	200	75	703	703	—	800	800	—	22	0,32
Liga de titânio	[Ti-6Al-4V]	4,43	120	44	924	924	—	1.000	1.000	—	16	0,36
Não metálicos												
Concreto	Baixa resistência	2,38	22,1	—	—	—	12	—	—	—	0,15	11
	Alta resistência	2,38	29,0	—	—	—	38	—	—	—	0,15	11
Plástico reforçado	Kevlar 49	1,45	131	—	—	—	—	717	483	20,3	0,34	—
	Vidro 30%	1,45	72,4	—	—	—	—	90	131	—	0,34	—
Madeira selecionada de grau estrutural	Abeto Douglas	0,47	13,1	—	—	—	—	2,1 ^d	26 ^d	6,2 ^d	—	0,29 ^e
	Espruce branco	3,60	9,65	—	—	—	—	2,5 ^e	36 ^d	6,7 ^d	—	0,31 ^e

^aValores específicos podem variar para um determinado material devido a composição da liga ou composição mineral, processamento mecânico do corpo de prova ou tratamento térmico. Para obter valores mais exatos, consulte livros de referência para o material.

^bA tensão de escoamento e o limite de resistência para materiais dúteis podem ser considerados iguais para tração e compressão.

^cMedida perpendicularmente ao grão.

^dMedida paralelamente ao grão.

^eDeformação medida perpendicularmente ao grão, quando a carga é aplicada ao longo do grão.

Fonte: *Hibbeler* 2010

3.3.1 Propriedades físicas e mecânicas da resina

Conforme o boletim técnico da resina, estão apresentadas todas as especificações necessárias da resina isoftálica para a confecção do equipamento. A resina isoftálica, conforme a ABNT/NBR 16098, possui laudo de potabilidade, sendo adequada para o armazenamento de água potável. Por outro lado, embora a resina ortoftálica apresente boas características de compatibilidade química com o material a ser armazenado, não possui laudo de potabilidade, conforme exigido pela norma, tornando-a inadequada para esse fim.

Figura 22. Propriedades físicas e mecânicas da resina

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS – VALORES TÍPICOS ⁽¹⁾	PROPRIEDADES NA RESINA PURA, SEM REFORÇO ⁽³⁾	VALOR	UNIDADE	MÉTODO
	Resistencia a Tração	46	MPa	ASTM D-638
	Módulo na Tração	3200	MPa	ASTM D-638
	Alongamento	1,6	%	ASTM D-638
	Resistencia a Flexão	120	MPa	ASTM D-790
	Módulo na Flexão	3700	MPa	ASTM D-790
	Temperatura de Distorção Térmica	90	°C	ASTM D-648
	Dureza Barcol, após 2 horas	35	-	ASTM D-2583

⁽³⁾ 100 g de resina catalisada com 1,0 g de MEKP na temperatura ambiente por 24 horas e pós curada por 3 horas à 80°C.

Fonte: Alta Compósitos 2025

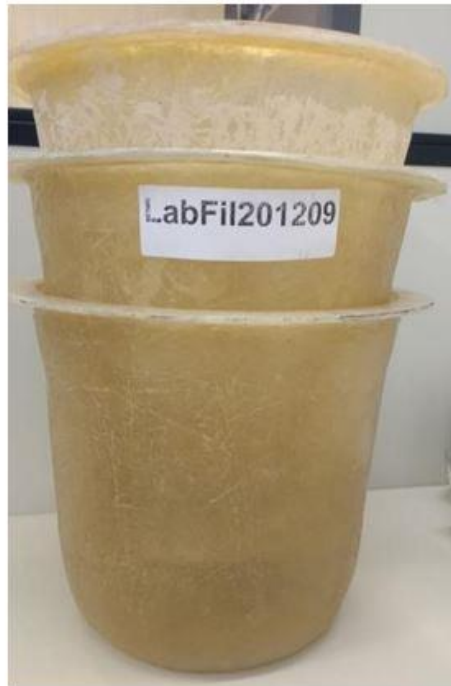
3.3.2 Laudo de potabilidade

Conforme a ABNT NBR 16098, são estabelecidos os requisitos e os métodos de ensaio aplicáveis a aparelhos destinados à melhoria da qualidade da água potável destinada ao consumo humano.

De acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, são definidos os requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. A Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE), órgão vinculado ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), é responsável por conceder a acreditação formal a organismos de avaliação da conformidade, como laboratórios e empresas de certificação.

Foram encaminhadas a um laboratório de ensaio acreditado pela CGCRE três amostras confeccionadas em resina isoftálica, conforme apresentado na Figura 23. O ensaio foi conduzido mediante a coleta de 4 litros de água para a realização da prova em branco. As amostras permaneceram em contato com a água por um período de 24 horas. Em seguida, foi coletado um volume total de 4 litros das amostras para análise.

Figura 23. Peça em PRFV para teste



Fonte: A empresa 2025

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 24. Após a verificação dos parâmetros analisados, o laboratório emitiu um certificado de conformidade das amostras, em atendimento às exigências da ABNT NBR 16098 e da Portaria nº 394. Com a emissão deste documento, a utilização da resina isoftálica na fabricação do equipamento foi devidamente autorizada.

Figura 24. Laudo de conformidade

Ferro	mg/L	0,3	0,008	<LQ
Fluoreto	mg/L	1,5	0,010	0,035
Glifosato + AMPA 1	µg/L	500	10	<LQ
Mancozebe 1	µg/L	180	50	<LQ
Manganês	mg/L	0,1	0,011	<LQ
Mercurio Total	mg/L	0,001	0,00000194	<LQ
Metamidofós	µg/L	12	1	<LQ
Microcistinas	µg/L	1	0,30	<LQ
Níquel	mg/L	0,07	0,008	<LQ
Nitrato-N	mg/L	10	0,010	0,190
Nitrito-N	mg/L	1	0,010	<LQ
Profenofós	µg/L	60	1	<LQ
Sódio	mg/L	200	0,093	0,394
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000	3,2	16,8
Sulfato	mg/L	250	0,010	0,050
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,1	0,001	<LQ
Tebuconazol	µg/L	180	1,00	<LQ
Terbufós	µg/L	1,2	1,00	<LQ
Turbidez	NTU ^b	5	0,09	0,28
Zinco	mg/L	5	0,039	0,069
Prata	mg/L	sem limite	0,005	<LQ
Surfactantes Aniônicos	mg/L	0,5	0,05	<LQ
Di(2-Etilhexil)ftalato (DEHP)	µg/L	0,8	0,001	<LQ
Xilenos	µg/L	0,003	0,001	<LQ
Tolueno	mg/L	0,017	0,001	<LQ
Clorobenzeno (monoclorobenzeno)	mg/L	0,012	0,001	<LQ
Etilbenzeno	mg/L	0,002	0,001	<LQ
Metil Paration	µg/L	9,0	0,001	<LQ
Lindano (gama-BHC-HCH)	µg/L	92	0,001	<LQ
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,002	0,001	<LQ
Cloro Residual Livre	mg/L	5	0,05	0,84
Saxitoxinas	µg/L	3,0	0,002	<LQ
Cloraminas	mg/L	4	0,06	<LQ
Gosto	Intensidade	6	1	1
Odor	Intensidade	6	1	<1

Fonte: A empresa 2025

3.3.3 Fabricação do tampo plano inferior

O tampo inferior não requer elevada espessura, uma vez que permanecerá totalmente apoiado sobre a base. Conforme apresentado na figura 26, o molde recebeu a aplicação de desmoldante, e a laminação foi executada por meio do processo mecanizado de *spray-up*.

Figura 25. Fabricação do tampo inferior pelo método *Spray-up*



Fonte: O autor

3.3.4 Fabricação do casco (costado)

O *liner* e a barreira química, camadas mais internas do tanque, foram confeccionados pelo processo mecanizado de *spray-up*. Conforme apresentado na imagem 27, foi aplicada uma camada de desmoldante na superfície interna do cilindro e, em seguida, o laminado foi depositado de forma mecanizada.

Figura 26. Fabricação do costado pelo método *Spray-up*



Fonte: O autor

3.3.5 Fabricação do tampo elíptico superior

Conforme apresentado na imagem 27, o processo de fabricação do tampo elíptico segue os mesmos procedimentos utilizados na produção do fundo plano, sendo a única diferença o formato do molde.

Figura 27. Fabricação do tampo superior *Spray-up*



Fonte: O autor

3.3.6 Montagem e estruturação

Após a fabricação dos tampos e do laminado do costado, estes serão encaixados e emendados em conformidade com a norma ASTM D4097, conforme ilustrado na figura 29.

Figura 28. Montagem dos tampos com o costado



Fonte: O autor

Em seguida, a peça será encaminhada para a máquina de *filament winding*, onde a camada estrutural do reservatório será confeccionada de acordo com o memorial de cálculo e em conformidade com a ASTM D3299, conforme ilustrado na figura 30.

Figura 29. Estruturação do reservatório



Fonte: O autor

3.3.7 Instalação dos flanges e acessórios

Após a conclusão da estruturação do reservatório, a etapa subsequente consiste na montagem das conexões e dos acessórios, conforme o projeto aprovado pela empresa contratante. A fabricação dos flanges e dos demais componentes em PRFV deverá ser realizada com a mesma resina utilizada na confecção do corpo do equipamento, a fim de garantir a compatibilidade química e a uniformidade estrutural do conjunto.

Figura 30. Montagem dos acessórios e conexões



Fonte: O autor

3.4 Inspeção e teste

Conforme a ASTM D2584, e com o objetivo de garantir a qualidade e a segurança equipamento, o reservatório será submetido a inspeções e ensaios específicos (ASTM D2584, 2018).

3.4.1 Teste de sensibilidade a acetona

Segundo a ASME RTP-1 (2017), o ensaio de sensibilidade a acetona, é utilizado para verificar a cura da resina em superfícies externas, superfícies expostas ao ar ou cura em superfícies não moldadas (ASME RTP-1, 2017).

Para a realização do teste, gotas de acetona pura é aplicada em uma pequena área do equipamento com o auxílio do algodão, que absorva a acetona. Após a secagem de 60 segundos, será necessário verificar se existe aderência na superfície (ASME RTP-1, 2017)..

O teste será considerado aprovado quando a superfície não apresentar aspecto pegajoso ao contato com a acetona. Se o laminado apresentar aspecto grudento, isso indica que a cura da resina está incompleta. Nesse caso, o teste de dureza Barcol deverá ser realizado para verificar o grau de cura. Para este reservatório, o teste foi aprovado, pois não apresentou aspecto pegajoso (ASME RTP-1, 2017).

3.4.2 Teste de cinzas

De acordo com a ASTM D2584, o ensaio de cinzas consiste na determinação da perda por ignição de resinas reforçadas curadas. Quando apenas fibras ou filamentos de vidro são utilizados como reforço de uma resina orgânica, esta é completamente decomposta em materiais voláteis nas condições do teste. A pequena quantidade de voláteis presentes (como água ou solvente residual) é desprezada, de modo que a perda por ignição pode ser considerada equivalente à quantidade de resina presente na amostra (ASTM D2584, 2018).

O teste de cinzas é realizado retirando-se a amostra do laminado do costado, separando-se o *liner* e a barreira química da camada estrutural. A amostra é então recortada em um pequeno corpo de prova compatível com o cadinho e pesada. Em seguida, o cadinho contendo o corpo de prova, inicialmente à temperatura ambiente, é aquecido em forno a 565 °C por 60 minutos, de modo que todo o material volátil seja removido e o resíduo carbonoso seja convertido em cinzas. Após o aquecimento, a amostra é resfriada em um dessecador por 40 minutos e

novamente pesada, permitindo determinar a perda por ignição da resina. O ensaio é realizado em triplicata (ASTM D2584, 2018).

O teste será considerado aprovado se o percentual de resina estiver entre 50% e 80%, quando a amostra for confeccionada pelo processo de *spray-up*. No caso do processo de *filament winding*, este percentual deverá variar entre 30% e 50%. Os resultados do teste são apresentados na imagem 31 (ASTM D2584, 2018).

Figura 31. Resultado do teste de cinzas

3.6 <u>RESULTADO</u>			
TAG FIBRAV:	FBV-0023-025	DATA DO TESTE	05/08/2025
HORA DO INÍCIO:	12:00	HORA DO TÉRMINO:	15:40
TAG CLIENTE:	-		
Dados das Amostras			
LINER			
Massa Inicial (Cadinho + Corpo)	Massa Final – Pós-queima (Cadinho + Corpo)		Massa do Cadinho (sem corpo)
36,4121 g	34,6701 g		34,0875 g
ESTRUTURA			
Massa Inicial (Cadinho + Corpo)	Massa Final – Pós-queima (Cadinho + Corpo)		Massa do Cadinho (sem corpo)
58,0532 g	54,8459 g		48,0452 g
Temp. Atingida:	565°C	Tempo Resfriamento:	40'
Dados Obtidos			
	% Resina	% Fibras de Vidro	Processo de Fabricação
LINER	74,94%	25,06%	SPRAY-UP
ESTRUTURA	32,05%	67,95%	FILAMENTO CONTÍNUO

Fonte: A empresa 2025

3.4.3 Teste de dureza Barcol

Conforme a norma ASTM D2583, o teste de dureza Barcol abrange a determinação da dureza de indentação de plásticos rígidos, reforçados ou não, utilizando um medidor Barcol. No procedimento, a amostra é posicionada sob o penetrador do medidor Barcol, e uma pressão uniforme é aplicada sobre seu corpo até que a indicação atinja o valor máximo. A profundidade

da penetração é então convertida em números absolutos Barcol. Este procedimento será repetido dez vezes para cada amostra (ASTM D2583).

O teste será considerado aprovado se a média aritmética simples dos valores obtidos for igual ou superior ao indicado pelo boletim técnico da resina. Conforme apresentado na imagem 33, serão exibidos os resultados do teste juntamente com o boletim técnico da resina (ASTM D2583).

Figura 32. Resultado do teste de dureza Barcol

RESULTADOS DO TESTE DE DUREZA BARCOL											
TAG FIBRAV:				FBV-0023-025				TAG CLIENTE:		-	
MODELO DO DURÔMETRO:				DUROMETER MEDTEC – GYZJ-934-1 N° 162171							
DATA DO TESTE:				05/08/2025				TEMPERATURA:		16°C	
VALORES ENCONTRADOS – LINER											
RESINA DO LINER:				ARAZYM 31700				DUREZA BARCOL DO FABRICANTE:		35	
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média Encontrada
Valores	40	38	39	38	36	37	35	40	40	36	37,9
VALORES ENCONTRADOS – ESTRUTURA											
RESINA DA ESTRUTURA:				AROPOL 50500				DUREZA BARCOL DO FABRICANTE:		35	
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média Encontrada
Valores:	35	37	38	39	35	40	40	35	36	38	37,3

Fonte: O autor

3.4.4 Teste de estanqueidade

De acordo com a norma ASME RTP-1, todo reservatório deve ser submetido a um teste hidrostático, realizado na empresa fabricante ou no local de instalação após a sua fabricação. O ensaio deve ser conduzido com água limpa e ter duração mínima de duas horas, mantendo-se todas as conexões devidamente vedadas durante o teste. Caso sejam identificados vazamentos ou defeitos, estes devem ser reparados pelo fabricante, e um novo teste deverá ser realizado. O reservatório foi aprovado conforme apresentado na imagem 33 (ASME RTP-1, 2017).

Figura 33. Resultado do teste de estanqueidade

RESULTADOS DO TESTE DE ESTANQUEIDADE			
TAG FIBRAV	FBV-0023-025	TAG CLIENTE:	-
VOLUME PROJETADO:	25000 L	VOLUME TESTADO:	25000 L
PRESSÃO DE PROJETO:	1 ATM	PRESSÃO DE TESTE:	1 ATM
DATA INÍCIO DO TESTE:	11/08/2025	DATA TÉRMINO DO TESTE:	11/08/2025
HORA DE INÍCIO:	08:30	HORA DE TÉRMINO:	13:00

Fonte: O autor

3.4.5 Inspeção visual

Segundo a ASTM D2562, a classificação de defeitos visuais em peças moldadas a partir de plásticos termofixos reforçados abrange critérios de aceitação para peças e equipamentos feitos com laminados plásticos reforçados com fibra de vidro. Os critérios de aceitação das amostras e os defeitos permitidos podem ser previamente acordados entre comprador e vendedor. Neste estudo, foi adotado o nível II como procedimento. Cada parte ou peça do equipamento foi verificada visualmente, sem necessidade de ampliação, e o reservatório apresentou resultado satisfatório (ASTM D2562, 2018).

3.5 Acabamento externo

Após a aprovação do reservatório em todos os testes normativos, o tanque irá receber a pintura conforme modelo aprovado pela empresa contratante, seguindo sua identidade visual com área de pintura de 60m². Será aplicado duas camadas de tinta sendo a primeira para evitar a proliferação de algas interior do equipamento na cor preto Munsell N6 e o acabamento externo na cor branco sanitário N9,5.

Figura 34. Equipamento concluído



Fonte: O autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo teve como metodologia principal acompanhar o processo de fabricação de um reservatório de 25m³ em polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), desde o projeto até seu acabamento final.

Após este monitoramento, o reservatório em PRFV possui a mesma segurança que os reservatórios em aço carbono. Por ser um material compósito, a estrutura possui baixa densidade em torno de 1600kg/m³ o que acarreta em um baixo peso, e apresenta resistência mecânica próxima ao aço, com durabilidade próxima.

Segundo o boletim técnico de resistência da resina, o tanque em PRFV atende temperatura de até 90°C, para temperaturas acima o reservatório deverá ser confeccionado com outro tipo de resina mais nobre.

Em comparação aos reservatórios de aço carbono o reservatório possui resistência a oxidação, intempéries químicas agressivas (chuva ácida), a resina por ser epóxi não será necessário acabamento interno, devido ao formato do molde não possuirá pontos de incrustação que pode gerar contaminação.

O reservatório por ser confeccionado em polímero possui uma baixa condutividade elétrica, não sendo necessário a instalação do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) dessa for reduzindo seu custo.

Por meio do estudo, foi possível absorver conhecimento sobre o armazenamento de água, elaboração de desenho técnico e desenvolvimento de memorial de cálculo conforme as normas ASME RTP-1, ASTM D3299, ASTM D4097 e ABNT/NBR 6123.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu demonstrar a relevância do PRFV na fabricação de reservatórios, destacando não apenas suas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e elevada durabilidade, mas também o seu custo significativamente inferior que pode ser de até 70% mais econômico quando comparado a materiais convencionais, como o aço carbono. O fator econômico, aliado ao baixo custo de manutenção e à longa vida útil, torna-o uma alternativa altamente vantajosa para aplicações industriais e de abastecimento.

Este trabalho também representa uma oportunidade para que outros profissionais e estudantes compreendam um dos métodos de fabricação de equipamentos em PRFV, ainda pouco difundido no mercado nacional.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização de uma análise comparativa entre reservatórios em PRFV e em aço carbono, abordando as propriedades químicas e mecânicas de ambos os materiais, bem como sua aplicação e desempenho em diferentes condições de operação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS COMPÓSITOS. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. São Paulo, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123:1988** – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10647:2014** – Desenho técnico – Regras gerais de representação. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16098:2012** – Aparelhos para melhoria da qualidade da água para consumo humano. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025:2017** – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

AL-QURESHI, H. A. **Processing of polymer composites**. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

ANTEQUERA, M. C.; OLIVEIRA, E. P.; CAMPOS, J. A. **Introdução aos Materiais Compósitos**. UFRGS, 1991.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASME. **RTP-1:2017** – Reinforced Thermoset Plastic Corrosion-Resistant Equipment. American Society of Mechanical Engineers, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2471-18** – Standard test method for gel time and peak exothermic temperature of reacting thermosetting resins. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2562-18** – Standard classification for defects in reinforced thermosetting resin equipment. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2583-18** – Standard test method for indentation hardness of rigid plastics by means of a Barcol impresser. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2584-18** – Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3299-18** – Standard specification for filament-wound glass-fiber-reinforced thermoset resin corrosion-resistant tanks. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3878-18** – Standard terminology for composite materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D4097-18** – Standard specification for contact-molded glass-fiber-reinforced thermoset resin chemical-resistant tanks. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

BRUTMAN, L. J. **Modern composite materials**. New York: Addison-Wesley, 1980.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CAMPOS, A. M. **Vasos de pressão: projeto e fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

CARVALHO FILHO, A. **Compósitos para uso industrial**. São Paulo: Érica, 2012.

CAUHOIS, A. **Manual de processos de laminação em PRFV**. São Paulo: Alta Compósitos, 2012.

CHATTOPADHYAY, S. **Pressure vessels: design and practice**. Boca Raton: CRC Press, 2005.

CHIAVERINI, V. **Materiais metálicos**. São Paulo: ABM, 1986.

DIAS, M. **Resinas éster-vinílicas e epóxi: características e aplicações**. Rio de Janeiro: CETEM, 2009.

GARAY, A. C. et al. **Estudo das características térmicas da resina éster-vinílica**. Porto Alegre: UFRGS; Rio Grande: FURG, [s.d.].

GERON, D. **FISPQ** – Resina poliéster isoftálica. Alta Compósitos, 2022.

HAGE, E. **Materiais compósitos estruturais**. São Carlos: UFSCar, 1989.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2010.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. New York: McGraw-Hill, 1975.

KAR, K. K. **Composite materials: processing, applications, and properties**. Boca Raton: CRC Press, 2017.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 1997.

KUNRATH, F. **Análise da cura de resinas poliéster pelo ensaio Barcol**. Porto Alegre: UFRGS, 2013.

LEVY, N.; PARDINI, L. **Compósitos estruturais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2012.

LIAO, K. et al. Fiber reinforced plastics: mechanical properties and applications. **Composite Structures**, v. 42, n. 4, p. 217–225, 1998.

MAZUMDAR, S. K. **Composites manufacturing**: materials, product, and process engineering. Boca Raton: CRC Press, 2002.

OLIVEIRA, A. J. **Laminação de materiais compósitos em moldes abertos e fechados**. São Paulo: IPT, 2017. 60

OSAMU HARA, K. **Epoxy resins**: chemistry and technology. Tokyo: Nikkan Kogyo, 1990.

PIERIN, I. **Processos de fabricação de compósitos estruturais**. São Paulo: IPT, 2005.

SHAHBAZ, A. **Epoxy resin technology and applications**. Berlin: Springer, 2016.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007.

VASCONCELOS, E. **Materiais compósitos avançados**. Belo Horizonte: UFMG, 2018.

WIEBECK, H.; HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

ANEXO A

TABELA GERAL

CARACTERÍSTICAS DO TANQUE

ITEM	DESCRIÇÃO
1	CAPACIDADE NOMINAL: 25m³
2	DIÂMETRO INTERNO: 2500mm
3	ALTURA CILÍNDRICA: 5100mm
4	ALTURA TOTAL: 6032 mm
5	PRESSÃO DE OPERAÇÃO: ATMOSFÉRICA
6	PRESSÃO DE PROJETO: ATMOSFÉRICA
7	TEMPERATURA DE OPERAÇÃO: AMBIENTE
8	TEMPERATURA DE PROJETO: 40°C
9	PRODUTO ARMazenado: ÁGUA POTÁVEL
10	DENSIDADE: 1000 Kg/m³
11	CONCENTRAÇÃO: 100%
12	pH: 6-11
13	MÓDULO DE TANQUE: VERTICAL C/ FUNDO PLANO E TAMPO LÚPTICO
14	PESO APROXIMADO: 800kg
15	LINER: RESINA ISOTÉRMICA C/ DUPLA REJ
16	BARREIRA QUÍMICA: RESINA ISOTÉRMICA
17	CAMADA ESTRUTURAL: RESINA ORTOFÁLICA
18	CAMADA EXTERNA: RESINA ORTOFÁLICA
19	SISTEMA DE PROJETO: ASME VIII DIV 1 / ASTM D3299 / ASTM D4097
20	CATÁLISE: MCKEPP + COBALT
21	PINTURA: EXTERNA NA COR BRANCO Nº 5 COM PROTEÇÃO ULV E FUNDO NA COR PRETA Nº 1

IDENTIFICAÇÃO DOS BOCALIS

BOCAL	D.N.	REF.	PROJ.	MAT.	NORMA	RELEVÂNCIA	SERVIÇO
N1	2"	1207	120	PREV	ANSI B16.5	90	DRENO
N2	2"	2457	120	PREV	ANSI B16.5	100	SADA I
N3	2"	2457	120	PREV	ANSI B16.5	4995	ENTRADA
M1	2"	5387	120	PREV	ANSI B16.5	100	SADA II
M2	24"	07	170	PREV	-	700	FUNDO (LUA DE INSPEÇÃO INFERIOR)
M2	600	1807	170	PREV	-	-	ESCOTILHA DE INSPEÇÃO SUPERIOR

ACESSÓRIOS

ITEM	QTD.	DESCRIÇÃO	MATERIAL	REF.
A1	1	PLACA DE IDENTIFICAÇÃO	ASII 304	0"
A2	2	OLHAL DE CIMENTO Ø3,114"	PREV	907 / 2707
A3	4	SARAFAL DE FRAÇÃO	PREV	457 / 1357 / 2257 / 1315
A4	1	FRANJAS	NOTA 9	A3
A5	1	RESPIRO 86" C/ TELA PROTETORA	PVC	TOPO
A6	1	LUGARONIA	TINTA	0"

DETALHE A
ESCALA 1:10

DETALHE B
ESCALA 1:10

DETALHE C
ESCALA 1:10

DETALHE D
ESCALA 1:10

DETALHE E
ESCALA 1:10

DETALHE F
ESCALA 1:10

DETALHE G
ESCALA 1:10

DETALHE H
ESCALA 1:10

DETALHE I
ESCALA 1:10

DETALHE J
ESCALA 1:10

DETALHE K
ESCALA 1:10

DETALHE L
ESCALA 1:10

DETALHE M
ESCALA 1:10

DETALHE N
ESCALA 1:10

DETALHE O
ESCALA 1:10

DETALHE P
ESCALA 1:10

DETALHE Q
ESCALA 1:10

DETALHE R
ESCALA 1:10

DETALHE S
ESCALA 1:10

DETALHE T
ESCALA 1:10

DETALHE U
ESCALA 1:10

DETALHE V
ESCALA 1:10

DETALHE W
ESCALA 1:10

DETALHE X
ESCALA 1:10

DETALHE Y
ESCALA 1:10

DETALHE Z
ESCALA 1:10

DETALHE AA
ESCALA 1:10

DETALHE AB
ESCALA 1:10

DETALHE AC
ESCALA 1:10

DETALHE AD
ESCALA 1:10

DETALHE AE
ESCALA 1:10

DETALHE AF
ESCALA 1:10

DETALHE AG
ESCALA 1:10

DETALHE AH
ESCALA 1:10

DETALHE AI
ESCALA 1:10

DETALHE AJ
ESCALA 1:10

DETALHE AK
ESCALA 1:10

DETALHE AL
ESCALA 1:10

DETALHE AM
ESCALA 1:10

DETALHE AN
ESCALA 1:10

DETALHE AO
ESCALA 1:10

DETALHE AP
ESCALA 1:10

DETALHE AQ
ESCALA 1:10

DETALHE AR
ESCALA 1:10

DETALHE AS
ESCALA 1:10

DETALHE AT
ESCALA 1:10

DETALHE AU
ESCALA 1:10

DETALHE AV
ESCALA 1:10

DETALHE AW
ESCALA 1:10

DETALHE AX
ESCALA 1:10

DETALHE AY
ESCALA 1:10

DETALHE AZ
ESCALA 1:10

DETALHE BA
ESCALA 1:10

DETALHE BB
ESCALA 1:10

DETALHE BC
ESCALA 1:10

DETALHE BD
ESCALA 1:10

DETALHE BE
ESCALA 1:10

DETALHE BF
ESCALA 1:10

DETALHE BG
ESCALA 1:10

DETALHE BH
ESCALA 1:10

DETALHE BI
ESCALA 1:10

DETALHE BJ
ESCALA 1:10

DETALHE BK
ESCALA 1:10

DETALHE BL
ESCALA 1:10

DETALHE BM
ESCALA 1:10

DETALHE BN
ESCALA 1:10

DETALHE BO
ESCALA 1:10

DETALHE BP
ESCALA 1:10

DETALHE BQ
ESCALA 1:10

DETALHE BR
ESCALA 1:10

DETALHE BS
ESCALA 1:10

DETALHE BT
ESCALA 1:10

DETALHE BU
ESCALA 1:10

DETALHE BV
ESCALA 1:10

DETALHE BW
ESCALA 1:10

DETALHE BX
ESCALA 1:10

DETALHE BY
ESCALA 1:10

DETALHE BZ
ESCALA 1:10

DETALHE CA
ESCALA 1:10

DETALHE CB
ESCALA 1:10

DETALHE CC
ESCALA 1:10

DETALHE CD
ESCALA 1:10

DETALHE CE
ESCALA 1:10

DETALHE CF
ESCALA 1:10

DETALHE CG
ESCALA 1:10

DETALHE CH
ESCALA 1:10

DETALHE CI
ESCALA 1:10

DETALHE CJ
ESCALA 1:10

DETALHE CK
ESCALA 1:10

DETALHE CL