

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
HELIONE DE ASSIS PEREIRA

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV

Varginha

2022

HELIONE DE ASSIS PEREIRA

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV

Projeto de pesquisa apresentado ao curso de engenharia mecânica do centro universitário do sul de minas sob orientação do prof. Me. João Mário Mendes de Freitas.

Varginha

2022

HELIONE DE ASSIS PEREIRA

PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UM RESERVATÓRIO EM PRFV

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

Aprovado em: / /

Prof.

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pelas oportunidades que colocou em minha vida e também a equipe FIBRAV que me apoiou em todas essas jornadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai por me incentivar, apoiar e investir no meu conhecimento e aprimoramentos, aos meus professores que em toda essa jornada contribuíram para com o meu aprendizado e disciplina.

“Se o conhecimento pode criar problemas, não é através da ignorância que podemos solucioná-los.”

Isaac Asimov

RESUMO

Este estudo acompanha todo o desenvolvimento de um reservatório em PRFV (polímero reforçado com fibra de vidro) em uma empresa no ramo de equipamentos em fibra de vidro no sul de Minas Gerais. A indústria está localizada no Sul de Minas Gerais desde 1974. No desenvolvimento deste trabalho poderá ser acompanhado como é feito a estrutura do equipamento, desenho técnico, memória de cálculo e simulações de carga de vento em CFD de um reservatório fornecido para uma companhia de saneamento no Paraná.

O objetivo deste trabalho é identificar e aproveitar ferramentas do meio acadêmico para fabricar de acordo com normas e métodos que devem ser respeitados para o desenvolvimento do reservatório em PRFV. Na conclusão deste trabalho foi possível criar um procedimento que deve seguir e apresentar métodos alternativos para a confecção do equipamento.

Palavras-chave: PRFV. Polímero. Reservatório. CFD

ABSTRACT

This study follows the entire development of a FRP (glass fiber reinforced polymer) reservoir in a company in the field of fiberglass equipment in the south of Minas Gerais. A is located in the south of Minas Gerais since 1974. No development of this work can be followed as the structure of the equipment, technical design, calculation memory and CFD wind load simulations from a different industry to a non- Paraná.

The objective of this work is to identify the tools for the development of means and manufacturing methods that must be defined for the development of the PRF reservoir. The conclusion of this work was possible to create a procedure that must be followed and to present alternative methods for the manufacture of the equipment.

Keywords.: FRP. Polymer. Reservoir. CFD

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de fabricação Hand lay-Up.....	15
Figura 2 – Processo de fabricação Spray-up.....	16
Figura 3 – Processo de fabricação Filament Winding.....	17
Figura 4 – Tecido de fibra de vidro.....	18
Figura 5 – Durômetro Barcol.....	20
Figura 6 – Molde para aplicação em PRFV.....	20
Figura 7 – Simulação de carga de vento no corpo do reservatório.....	22
Figura 8 – Dimensional do equipamento.....	24
Figura 9 – Amostra de resina Isoftálica.....	25
Figura 10 – Pressão radial do vento no costado.....	30
Figura 11 – Instabilidade axial.....	30
Figura 12 – Ação da força do vento, vista isométrica.....	34
Figura 13 – Ação da força do vento, vista superior.....	35
Figura 14 – Forças de reação nos pontos fixo do chumbador.....	35
Figura 15 – Instalação do chumbador.....	37
Figura 16 – Folha 1 desenho técnico.....	38
Figura 17 – Folha 2 desenho técnico.....	38
Figura 18 – Direção preferencial da fibra.....	40
Figura 19 – Tampo laminado pelo método Spray-up.....	42
Figura 20 – Lâmina do costado.....	43
Figura 21 – Molde do costado.....	43
Figura 22 – Fundo plano laminado.....	44
Figura 23 – Corpo do reservatório montado recebendo estruturação.....	45
Figura 24 – Instalação de acessórios.....	45
Figura 25 – Medição com durômetro.....	47
Figura 26 – Equipamento finalizado.....	49

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Característica de operação do equipamento.....	24
Tabela 2 – Parâmetros encontrados na análise.....	26
Tabela 3 – Espessura do tampo superior em função do diâmetro.....	28
Tabela 4 – Característica da haste do fixador.....	36
Tabela 5 – Propriedade de tração da amostra.....	39
Tabela 6 – Propriedade de resistências de materiais.....	41
Tabela 7 – Propriedade da resistência da resina utilizada no tanque.....	41
Tabela 8 – Resultado da medição do durômetro.....	47
Tabela 9 – Resultado do teste hidrostático.....	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Fabricação de reservatório em PRFV.....	14
2.1.1 Processo de fabricação Hand Lay-up.....	14
2.1.2 Processo de fabricação Spray-up.....	15
2.1.3 Processo de fabricação Filamentwiding.....	16
2.2 Material compósito.....	17
2.2.1 Fios de fibra de vidro.....	17
2.2.2 Tecido de fibra de vidro.....	18
2.2.3 Resina poliéster.....	19
2.3 Teste de dureza barcol.....	19
2.4 Utilização de molde.....	20
2.5 Resistência à tração do material compósito de PRFV.....	21
2.6 Materiais isotrópico e anisotrópico.....	21
2.7 Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	21
2.8 Danos ao meio ambiente.....	22
2.9 EPI's necessários para manuseio da resina.....	23
3 METODOLOGIA	23
3.1 Laudo de potabilidade.....	25
3.2 Memorial de cálculo.....	27
3.2.1 TAMPO SUPERIOR.....	27
3.2.2.2 CASCO CILINDRICO.....	28
3.2.2.3 Fundo plano.....	33
3.2.2.4 Espessura da emenda.....	34
3.2.2.5 Largura da emenda.....	34
3.2.2.6 Dimensionamento dos chumbadores.....	34
3.3 Desenho técnico.....	37

3.4 Fabricação do equipamento.....	39
3.4.1 Fabricação do tampo.....	41
3.4.2 Fabricação do costado.....	42
3.4.3 Fabricação de fundo plano.....	43
3.4.4 Montagem.....	44
3.4.5 Instalação de acessórios e bocais.....	45
3.5 Inspeção e teste.....	46
3.5.1 Teste de Cinza.....	46
3.5.2 Teste de dureza barcol.....	46
3.5.3 Teste de estanqueidade.....	48
3.5.4 Inspeção visual.....	48
3.6 Pintura.....	49
4 Resultado e discussões.....	50
5 Considerações finais.....	50
6 Conclusão.....	51
REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

No cenário industrializado pede que as máquinas e equipamentos “façam mais com menos”, O engenheiro mecânico deve projetar um equipamento respaldado de normas técnicas regulamentadora e o com um bom funcionamento atrelado a qualidade e segurança.

Todos os novos empreendimentos, expansão e retrofits que necessitam de um sistema de armazenamento de algum produto novo ou de maior volume deve ser analisado a forma que deve ser armazenado e umas das opções é a escolha de um reservatório em PRFV, com esse estudo podemos decidir se o PRFV está dentro da sua utilização.

Este trabalho está relacionado ao acompanhamento e desenvolvimento de um reservatório em PRFV (polímero reforçado com fibra de vidro). O reservatório em questão é um equipamento cilíndrico com fundo plano apoiado 100% no chão, feito para armazenamento de 50 m³ de água potável com até 5 mg/l de cloro e pH entre 6,0 e 9,0, trabalhando em temperatura ambiente e pressão atmosférica que deve ser instalado na unidade de um companhia de saneamento no Paraná na cidade de São João do Triunfo - PR.

O estudo teve como objetivo geral analisar todos os processos e procedimentos necessários para a fabricação de um reservatório para armazenamento de água.

O objetivo específico foi verificar a qualidade que um equipamento em PRFV pode apresentar, bem como sua estruturação, resistência química e mecânica através de cálculos e simulação computacional.

O processo de fabricação e inspeção do reservatório foi desenvolvido e executado a partir de pesquisas bibliográficas e normas técnicas na empresa fabricante de equipamentos em PRFV localizada na cidade de Lambari no sul de Minas Gerais.

Onde foi fabricado um reservatório de 50 m³ para o armazenamento de água potável para a companhia de saneamento no Paraná, que atenda a sua necessidade e a norma NBR 13210.

O desenvolvimento do projeto estudou o tipo de resina para entrar em contato com a água em temperatura ambiente e pressão atmosférica, desenho técnico para a fabricação e implantação, memorial de cálculo para encontrar a espessura mínima da parede do equipamento e os tipos de inspeções e testes de qualidade.

As coletas de dados e acompanhamento de inspeção foram em campo junto à fabricação do reservatório da empresa no ramo de equipamentos em fibra de vidro, realizando os testes de qualidades e conferência de espessuras conforme calculados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fabricação de reservatório em PRFV

Para a fabricação de um reservatório em PRFV (plástico reforçado com fibra de vidro) pode se utilizar várias formas de se laminar a resina com a fibra de vidro, as escolhas vão depender da dimensão, quantidade e esforços que irá sofrer durante sua vida útil (CAUHOIS, 2012).

As mais utilizadas são as *Hand Lay-up* (manual) que pode ser utiliza as mantas, tecido e véu de fibra de vidro o *Spray up* (mecanizada) que utiliza o *rouving* e *Filament Winding*. (semiautomática) que por sua vez também utiliza o *rouving* (CAUHOIS, 2012).

2.1.1 Processo de fabricação *Hand Lay-up*

A laminação manual é a maneira mais antiga e fácil de obter produtos moldados em plástico reforçado em fibra de vidro. O processo não requer investimento em equipamentos, podendo ser aplicado por rolos ou pincel (CAUHOIS, 2012).

De acordo com Al-Qureshi (2010), o primeiro processo desse método de laminação é a limpeza do molde utilizando um solvente ou detergente para aplicação de um desmoldante como, por exemplo, álcool poli vinílico, então como representado na figura 1 pode se iniciar a primeira camada usando *rovings*, tecidos ou mantas, aplicando-as manualmente sobre a superfície do molde. A resina é então aplicada com um pincel e depois um rolo para remover as bolhas de ar da camada de reforço e garantir a permeabilidade e a umidade da fibra. Deve-se repetir o processo até conseguir a espessura desejada.

O processo de fabricação manual é amplamente utilizado na produção de protótipos, dispositivos de controle e moldes. Também é amplamente utilizado em revestimentos e reparos de equipamentos em campo. As peças obtidas apresentam superfície lisa e excelente acabamento superficial, geralmente com polimento em gel ou pintura posterior. A parte oposta ao molde tem um acabamento rugoso, embora haja variações de processo, após a junção de duas peças sobrepõe-se o acabamento dos dois lados (CAUHOIS, 2012).

A maior vantagem da laminação *Hand lay-up* sobre outros processos de laminação é o baixo investimento inicial. Uma desvantagem em relação a outros processos mais complexos, como a laminação por filamento contínuo, é a menor relação reforço/matriz e, então necessita

de mais camada para ter um bom reforço. A figura 1 apresenta a aplicação da resina na manta de fibra de vidro por um pincel (CAUHOIS, 2012).

Figura 1 – Processo de fabricação *Hand lay-Up*



Fonte: O autor

2.1.2 Processo de fabricação *Spray-up*

Este método de laminação é uma otimização mecanizada do processo de laminação manual, pois injeta simultaneamente a resina, o catalisador e a fibra de vidro na superfície do molde conforme demonstrado na figura 2, a fibra que vem da bobina é picotada na saída do revólver por um triturador pneumático. (CAUHOIS, 2012). O revólver é uma combinação de um cortador e uma pistola de pintura.

Após a aplicação simultânea dos itens citados anteriormente com o revólver, um rolo é passado manualmente sobre a laminação para remover bolhas de ar, além de abaixar a fibra e tornar o sistema mais denso e garantir o contato com a superfície do molde. Assim como na laminação manual, a cura pode ocorrer à temperatura ambiente se a peça for muito grande, mas a cura pode ser acelerada com um soprador de ar quente em peças menores.

De acordo com Cauhois (2009) algumas das vantagens do processo de laminação spray-up sobre o processamento manual *hand lay-up* são a boa produtividade e velocidade de aplicação no molde. Algumas limitações do processo de spray-up são a incapacidade de obter um acabamento liso em ambos os lados do laminado, a limitação do conteúdo volumétrico do

reforço de fibra tornando o inadequado para peças com alto estresse estrutural e depende da habilidade do laminador.

Figura 2 – Processo de fabricação Spray-up



Fonte: O autor

2.1.3 Processo de fabricação *Filament Winding*

De acordo com Pierin (2005) pelo o fato que corpo de um reservatório ser cilíndrico pode se usar o processo de enrolamento de fios de fibra de vidro contínuos em uma máquina semiautomática envolve o enrolamento de fios em estruturas um molde cilíndrico conforme apresentado na figura 3.

Segundo Pierin (2005), a peculiaridade de permitir a colocação contínua de reforços em um padrão predeterminado em altas velocidades torna uma técnica muito atraente para a fabricação de peças com alta resistência e baixo peso. Isso é possível graças ao uso de fios contínuos ou fios de alta resistência à tração, cobertos por uma matriz de resina.

Com a fabricação de FW a proporção de fibra e resina é em média de 70% e 30% e isso impactará diretamente em seu peso final. Pois essas propriedades do material compósito irão alterar sua densidade comparado com outro processo (PIERIN, 2005).

Figura 3 – Processo de fabricação *Filament Winding*



Fonte: O autor

2.2 Material compósito

Quando um material não possui uma propriedade satisfatória pode-se fazer sua combinação com um ou mais materiais distintos para que suas propriedades diferentes atendam a necessidade e transformando os materiais utilizados em apenas denominado material compósito (AL-QURESHI, 2010).

De acordo com Al-qureshi (2010) às características de cada material complementa o outro, abrindo um leque de possibilidade o PRFV é um material composto de baixa densidade que é altamente resistente à corrosão, oxidação e ataque químico em temperatura ambiente e enquanto a fibra de vidro fica banhada pela resina aumentando sua resistência mecânica.

Essa junção tornam os materiais com um melhor desempenho quando comparado com aplicações onde utiliza apenas um dos dois materiais citados. (AL-QURESHI, 2010).

2.2.1 Fios de fibra de vidro

As fibras são definidas, segundo Kaw (1997), a bitola da fibra deve ser de pelo menos dez vezes menor do que seu comprimento. As fibras com o diâmetro do filamento menor, melhor será sua aderência entre a fibra e a matriz e, conseqüentemente, maior a resistência do material. Por causa do pequeno diâmetro da seção transversal da fibra, elas são envoltas numa

matriz que, segundo Jones (1975), possui a função de suportar e proteger as fibras, além de transmitir de forma distribuída os esforços solicitados entre os reforços constituintes. Esta última função é de extrema importância, principalmente quando ocorre a quebra de algum reforço.

2.2.2 Tecido de fibra de vidro

A utilização do tecido de fibra de vidro mostrado na figura 4 deve ser feita em conjunto com algum tipo de ligante, Segundo Norris (1994) formando uma mistura que consiste na combinação de dois materiais para produzir um produto que supere as propriedades individuais de cada um. Em particular, o polímero reforçado com fibra (PRFV) é formado pela combinação de fibras com uma matriz. As fibras são responsáveis pela resistência do compósito, e a matriz é o produto que as une, responsável pela transmissão de força.

Figura 4 – Tecido de fibra de vidro



Fonte: O autor

2.2.3 Resina poliéster

As fibras possuem alta resistência e rigidez, mas não são capazes de transferir força entre elas, por isso são embutidas em uma matriz. Além de ser responsável por proteger a fibra de ataques químicos e raios ultravioleta a mesma aumenta suas propriedades mecânicas e físicas do composto, como o módulo de Young e resistência transversal, propriedades de cisalhamento e compressão (Agarwal e Broutman, 1990).

As propriedades físicas e químicas do substrato, como temperaturas de aquecimento e fusão, viscosidade e reatividade com as fibras, a forma da fibra de vidro impactará diretamente na escolha do processo de laminação para a fabricação dos equipamentos (Agarwal e Broutman, 1990).

A matriz mais utilizada na fabricação de equipamentos em PRFV são as poliméricas, que são conhecidas como plastificantes. O nome plástico é dado a uma molécula sintética chamada polímero (da palavra grega para muitas partes e simples). Polímeros são grandes moléculas formadas pela associação de moléculas de baixo peso molecular, chamadas monômeros, por meio de reações químicas (Agarwal e Broutman, 1990).

2.3 Teste de dureza barcol

Para uma inspeção de qualidade deve ser averiguado o índice de cura da resina poliéster, para essa monitoração uma das maneiras é utilizado o medidor durômetro barcol apresentado na figura 5 que por sua vez faz sua medição através de uma agulha que contabiliza a resistência a penetração que varia de 0 a 100, as resinas em geral tendem a ficar por volta de 40 barcol, porém deve se olhar o boletim técnico do fabricante para sua conferência da cura de 100% do polímero (KUNRATH, 2013).

Figura 5 – Durômetro Barcol



Fonte: O autor

2.4 Utilização de molde

A laminação de PRFV necessita de um molde ou forma para que seja feita a aplicação do PRFV existem moldes fechado e aberto, para a laminação utilizando o molde fechado obtém-se uma boa qualidade de superfície lisa e sem rugosidade em ambos os lados. E com a laminação utilizando o molde aberto, apenas um lado da peça fica em contato com o molde, dando ao outro um aspecto rústico. Costuma-se utilizar molde aberto por ter um menor investimento de produção e fácil correção de erros. Por outro lado, emite uma quantidade maior de estireno e produz uma quantidade maior de resíduo do que o tratamento com molde fechado (OLIVEIRA, 2017).

Figura 6 – Molde para aplicação em PRFV



Fonte: O autor

O molde demonstrado na figura 6 é do tipo aberto para a fabricação de um tampo de um reservatório.

2.5 Resistência à tração do material compósito de PRFV

A carga máxima aplicado nos compósitos reforçados com fibra de vidro depende de vários fatores, uma delas é que possui uma característica de material anisotrópico onde sua resistência a propriedade física depende da direção em que for submetida a esforços diferente do aço carbono que é um material isotrópico onde sua resistência a tração sempre será a mesma independente da direção, o costado de um reservatório em PRFV possui uma maior resistência a tração no sentido circunferencial do que no axial, isso se dá pelo motivo que as fibras contínuas são enroladas de forma circunferencial ao costado do equipamento então o tornando essa orientação preferencial da fibra, a tensão circunferência é submetida a carga hidrostática do fluido do equipamento e quanto a axial sofre a pressão do vento (BROUTMAN, 1980).

2.6 Materiais isotrópico e anisotrópico

O material que possui o fenômeno de anisotropia é no qual as propriedades dos materiais mudam dependendo da direção em que são medidos. Essa orientação não pode ser aplicada a propriedades volumétricas como densidade e calor específico, mas todas as outras formas e comportamentos. No caso dos metais, os aspectos importantes da anisotropia estão relacionados às propriedades mecânicas e às propriedades magnéticas (BROUTMAN, 1980).

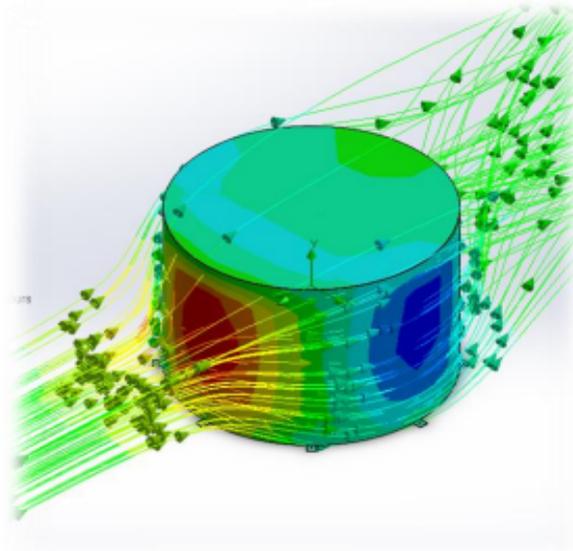
O oposto de anisotropia é o material isotrópico, onde o material exibe as mesmas propriedades em todas as direções da medida. Este é um comportamento típico de materiais amorfos, onde os átomos ou a molécula não está regularmente arranjada no período regular, que é naturalmente isotrópico fios (BROUTMAN, 1980).

2.7 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Segundo Lobosco, (2010), A dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é o campo do conhecimento que se ocupa da simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como

reação química, queima, evaporação, pressão do vento etc. O CFD nasceu da combinação de duas disciplinas: mecânica dos fluidos e computação numérica. As equações que governam o fluxo de fluidos derivam da mecânica dos fluidos e podem ser resolvidas usando vários métodos numéricos. Para os reservatórios pode ser usada para simular tanto o fluido que o equipamento armazenará quanto a pressão que o vento causará no reservatório.

Figura 7 – Simulação de carga de vento no corpo do reservatório



Fonte: O autor

A figura 7 é uma simulação das tensões que a carga de vento causa no corpo do equipamento.

2.8 Danos ao meio ambiente

Pela sua resistência química e densidade baixa, os compósitos à base de polímeros são competitivos no mercado, substituindo materiais convencionais como madeira e metal. (PINTO, 2002).

Por substituir uma gama de matéria prima sua utilização é bastante alta no mercado por exemplo na localidade da serra gaúcha, vem se entulhando cerca de 80 toneladas de resíduos por mês e por se tratar de um material que possui uma alta resistência a degradação o mesmo se torna um enorme transtorno ambiental para a região. (FONTAN, 2009).

De acordo com Theodorakopoulos (1995) na fabricação de materiais compósitos de resina poliéster com a fibra de vidro ocorre muito material de refugo principalmente pelo

método de laminação *spray up*, então por sua vez gera muito resíduo de matéria prima no meio ambiente e uma das formas de reciclar e triturar resíduos e adicioná-los à construção civil, é incrementado na argamassa e concreto para ter um melhor rendimento.

2.9 EPI's necessários para manuseio da resina

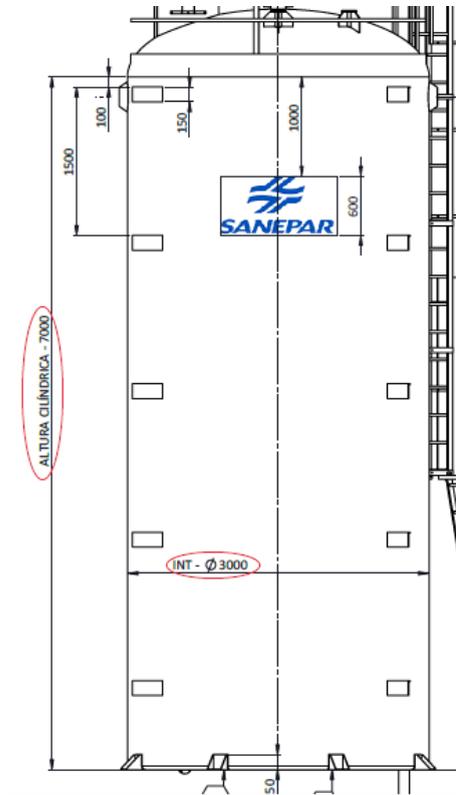
Conforme mencionado por Geron (2022) na fabricação de reservatórios em PRFV é indispensável a utilização de equipamentos individuais de proteção isso se dá pelo motivo em que a resina poliéster libera vapores tóxicos para o organismo dos trabalhadores, De acordo com a FISPQ da resina poliéster, para o seu manuseio deve-se utilizar máscara com filtro de vapores orgânicos e gases ácidos, Óculos de proteção contra os respingos e luva, avental, mangote, calçados de segurança para evitar o contato com a pele.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho teve seu direcionamento focado em projetar o equipamento de acordo com as normas regulamentadoras que regem o desenvolvimento de reservatório em PRFV.

O equipamento fornecido à companhia foi um reservatório de Ø3000 mm de diâmetro interno e altura cilíndrica de 7000 mm com capacidade para 50m³ de água com o fundo plano e tampo elíptico. Conforme figura 8.

Figura 8 – Dimensional do equipamento.



Fonte: O autor

O equipamento operará sob as características da tabela 1.

Tabela 1: Característica de operação do equipamento.

Temperatura de projeto	Ambiente
Temperatura de operação	Ambiente
Pressão de projeto	Atmosférica
Pressão de operação	Atmosférica
Fluido armazenado	Água Potável
Peso específico do fluido armazenado	1,0 g/cm ³
Alongamento máximo admissível	0,2%
Velocidade do vento (Costado)	162 km/h (45 m/s)
Velocidade do vento (Ancoramento)	162 km/h (45 m/s)

Fonte: O autor

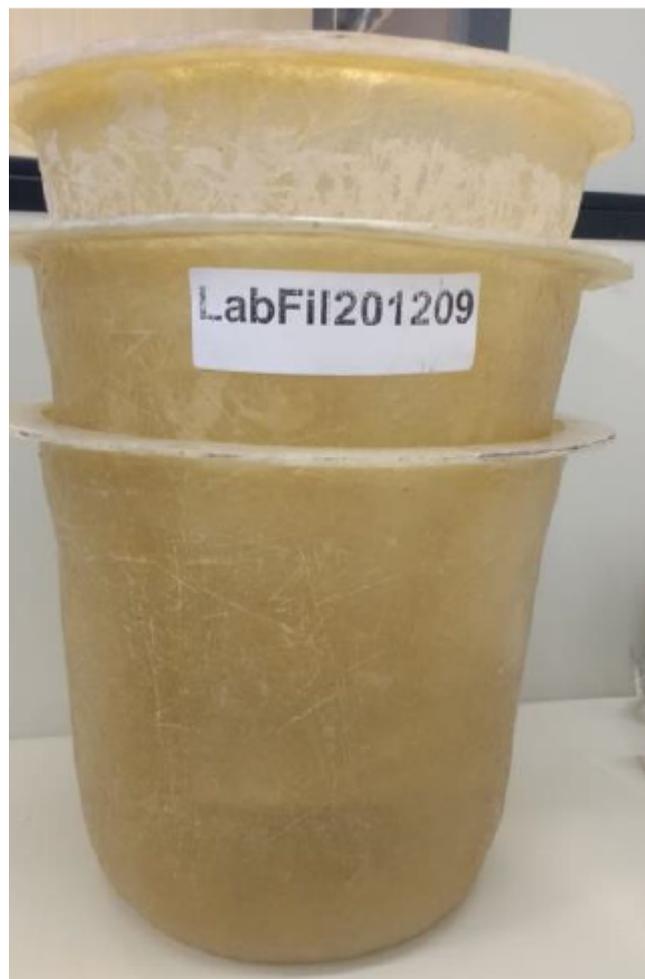
Durante a metodologia foi escolhida com o laudo de potabilidade da resina utilizada para entrar em contato com a água potável para não o contamina-la, será demonstrado os cálculos de acordo com a norma ASTM D3299 e ASTM D4097 em seguida será simulado utilizando a ferramenta de CFD a reação dos chumbadores de acordo com a carga do vento.

3.1 Laudo de potabilidade

De acordo com a NBR 16098 deve-se realizar ensaios específicos cabíveis em aparelhos que se propõem a melhoria da qualidade da água para consumo humano.

Foi enviada ao laboratório de ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISSO/IEC 17025 sob o número CRL 0135 três amostras feita de resina isostática conforme figura 9 para análise de contaminação.

Figura 9 – Amostra de resina Isofáltica.



Fonte: O autor

Para realização do ensaio foram coletados 4 litros de água para que fosse realizada a prova em branco.

Os três recipientes permaneceram cheios de água durante 24 horas. Após esse período foi coletado um volume de 4 litros de água para análise e obtiveram os seguintes parâmetros conforme tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros encontrados na análise.

Parâmetro	Unidade	Valor Máximo Permitido	Limite de Quantificação	Resultado
2,4 - D + 2,4,5 - T	µg/L	30	0,002	<LQ
Aldicarbe + sulfona + sulfóxido	µg/L	10	1	<LQ
Alumínio	mg/L	0,2	0,029	<LQ
Amônia	mg/L	1,5	0,05	<LQ
Antimônio	mg/L	0,005	0,004	<LQ
Arsênio	mg/L	0,01	0,008	<LQ
Bário	mg/L	0,7	0,008	0,057
Bromato	mg/L	0,01	0,010	<LQ
Cádmio	mg/L	0,005	0,001	<LQ
Carbendazim + Benomil	µg/L	120	1	<LQ
Carbofuran	µg/L	7	0,001	<LQ
Chumbo	mg/L	0,01	0,008	<LQ
Cianeto	mg/L	0,07	0,005	<LQ
Cloreto	mg/L	250	0,4	0,145
Clorito	mg/L	1	0,010	<LQ
Clorpirifos + oxon	µg/L	30	0,001	<LQ
Cobre	mg/L	2	0,018	<LQ
Condutividade Elétrica	µS/cm	sem limite	0,5	25,3
Cor Aparente	uH [°]	15	1,0	2,2
Cromo	mg/L	0,05	0,010	<LQ
Diuron	µg/L	90	1	<LQ
Dureza	mg/L	500	4	12
Ferro	mg/L	0,3	0,008	<LQ
Fluoreto	mg/L	1,5	0,010	0,035
Glifosato + AMPA	µg/L	500	10	<LQ
Mancozebe	µg/L	180	50	<LQ
Manganês	mg/L	0,1	0,011	<LQ
Mercurio	mg/L	0,001	0,0000134	<LQ
Metamidofos	µg/L	12	1	<LQ
Microcistina	µg/L	1	0,30	<LQ
Níquel	mg/L	0,07	0,008	<LQ
Nitrato	mg/L	10	0,010	0,060
Nitrito	mg/L	1	0,010	<LQ
Profenofos	µg/L	60	1	<LQ
Sódio	mg/L	200	0,093	0,227
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	1000	30	39,8
Sulfato	mg/L	250	0,010	0,060
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,1	0,001	<LQ

Fonte: O autor

Após análise dos parâmetros, o laboratório emitiu uma declaração da conformidade das amostras conforme a especificação exigida pela ABNT NBR 16098 e portaria de inmetro nº 394 sem agregação de incerteza de medição.

Com a declaração feita, está autorizada a utilizar a resina na fabricação do equipamento.

3.2 Memorial de cálculo

As normas técnicas e bibliografias específicas consideradas no dimensionamento e fabricação do tanque são a ASTM D3299, ASTM D4097 e COMPÓSITOS PARA USO INDUSTRIAL – ANTÔNIO CARVALHO FILHO.

Para a elaboração da memória deve-se levar em conta que o processo de fabricação utiliza diferentes tipos de laminação.

Esses processos são diferentes e variam de acordo com tipo de camada a ser fabricada e também com o formato da peça.

As camadas mais internas do tanque (Liner e Barreira Química), o Fundo, o Tampo, as soldas/uniões e os acoplamentos do tanque são fabricados pelos processos de laminação manual e spray-up.

A camada estrutural do corpo cilíndrico (costado) é fabricada pelo processo denominado de Filament Winding (Enrolamento Filamentar).

Esses processos, bem como suas principais características estão descritas abaixo:

a) Laminação manual hand lay-up: No processo de laminação manual, a resina, o véu, as mantas e os tecidos são aplicados manualmente. O laminador faz a compactação das lâminas e a remoção das bolhas;

b) Fibras Picotadas (Chopped Fiber): A máquina laminadora spray-up picota os fios de fibra de vidro e, sincronicamente, agrega a resina devidamente catalisada. A característica principal deste processo é que as fibras picotadas pulverizadas formam um laminado de resistência considerado isotrópico;

c) Filament Winding (Enrolamento Filamentar): Fios contínuos de fibra de vidro são enrolados no costado do tanque a um determinado ângulo, que pode variar de 50° a 90° dependendo das características do equipamento e do projeto em questão. Essa flexibilidade que permite a variação do ângulo de enrolamento, permite e assegura que o equipamento possua alta resistência mecânica circunferencial, axial e ao cisalhamento;

3.2.1 TAMPO SUPERIOR

De acordo com a Norma ASTM D4097 a espessura da calota para tanques com diâmetro de 3.000 mm deverá ser de 6.5 mm. A carga considerada foi de 110 Kg/cm² não apresentando deformação de 1/200 do diâmetro do reservatório. Os valores de espessura,

considerando as devidas especificações, estão contidos na Tabela 3 de acordo com o diâmetro do tanque.

Tabela 3: Espessura do tampo superior em função do diâmetro.

Diâmetro (cm)	Espessura da Calota (mm)
120	4.5
150	5.0
180	6.0
200	6.0
220	6.0
250	6.0
280	6.5
300	6.5
320	6.5
350	6.5
380	6.5
400	7.0
420	7.0
450	8.0

Fonte: O autor

3.2.2.2 CASCO CILINDRICO

De acordo com a norma ASTM D3299, a espessura do casco cilíndrico (costado) deverá ser no mínimo maior ou igual à 4,77 mm (0,1875 polegadas).

A espessura estrutural mínima exigida para suportar a pressão hidrostática no tanque é calculada pela equação 01 a seguir.

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

Onde:

H é a altura da seção analisada em metros,7,0m;

D é o diâmetro em milímetros,3000 mm;

γ é a densidade do fluido armazenado em g/cm³.....1,0 g/cm³;

$E\gamma$ é módulo de tração circunferencial em kg/cm²...298200 kg/cm²;

e ϵ_{adm} é o alongamento admissível.....0,001;

A espessura total mínima será calculada pela soma a seguir:

$$t_{total} = [t_{estrutural} + (t_{liner} + t_{barreira\ química} + t_{topcoat})].$$

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

Devido a variação da pressão hidrostática, a espessura estrutural do costado será dividida em 2 seções para efeitos de cálculo.

1º. Seção do fundo até 3,0 m de altura. Totalizando de 3,0 m de extensão;

2º. Seção de 3,0 m até 7,0 m de altura. Totalizando 4,0 m de extensão;

$$t_1 = \frac{(0,1 \times 7,0 \times 1,00) \times 3000}{2 \times 298200 \times 0,001} = t_1 = 3,52\text{ mm (estrutural)}$$

$$t_{total} = [t_{estrutural} + (t_{liner} + t_{barreira\ química} + t_{topcoat})] = 2,8 + 3,52 = 6,32\text{ mm}$$

$$t_2 = \frac{(0,1 \times 4,0 \times 1,00) \times 3000}{2 \times 298200 \times 0,001} = t_1 = 2,01\text{ mm (estrutural)}$$

$$t_{total} = [t_{estrutural} + (t_{liner} + t_{barreira\ química} + t_{topcoat})] = 2,8 + 2,01 = 4,81\text{ mm}$$

3.2.2.3 Carga do vento no costado

Existem dois esforços que devem ser considerados na análise estrutural do costado sob cargas de vento:

a) Pressão radial exercida pelo vento;

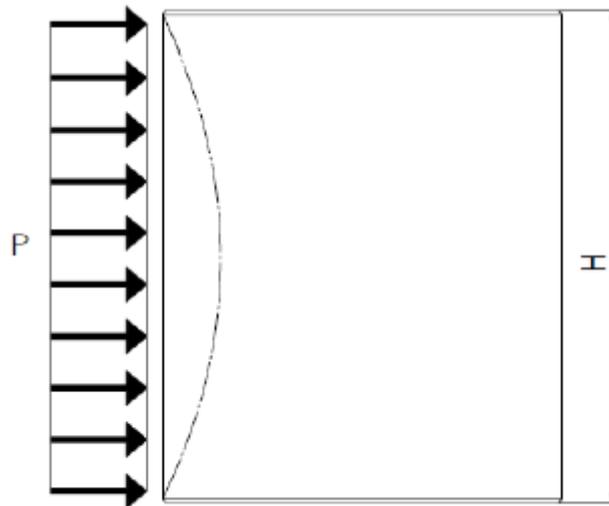
b) Tensão de compressão axial;

Esses esforços são de pequena magnitude e não causam ruptura por “falta de resistência do laminado”. As falhas, nesse caso, são causadas pela instabilidade resultante das tensões de compressão.

1º. CASO: Instabilidade Circunferencial

Para efeitos de cálculo, a pressão radial do vento é considerada uniformemente distribuída ao redor do cilindro e pode causar uma falha de instabilidade circunferencial. Essa instabilidade ocorre no lado em que o vento sopra, considerando o tanque vazio (pior condição), conforme ilustra a figura 10.

Figura 10 – Pressão radial do vento no costado.



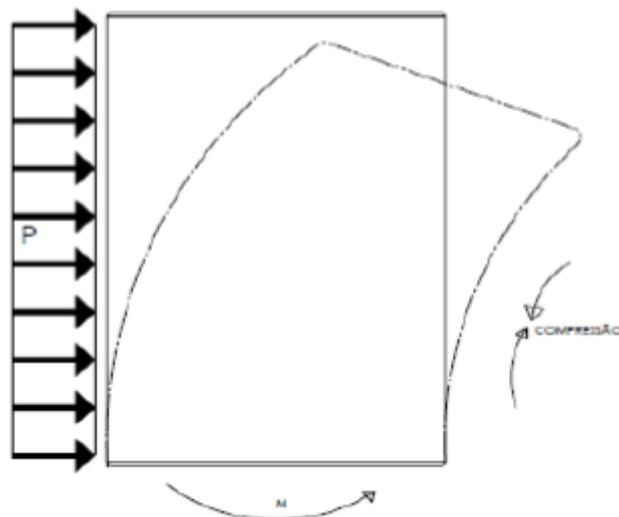
Fonte: O autor

Nesse primeiro caso a pressão do vento será comparada à pressão circunferencial crítica.

2°. CASO: Instabilidade Axial

A instabilidade axial ocorre no lado oposto ao que sopra o vento e é onde as tensões de compressão atuam na parede da estrutura, conforme exhibe a Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Instabilidade axial.



Fonte: O autor

Nesse segundo caso, a compressão axial será comparada à tensão axial crítica.

A pressão exercida pelo vento em superfícies verticais cilíndricas pode ser estimada pela equação 02.

$$P = 4,76 \times 10^{-7} \times V^2 = 4,76 \times 10^{-7} \times 162^2 \rightarrow P = 0,0125 \text{ kg/cm}^2 \quad (02)$$

Onde:

P é a pressão do vento, em kg/cm²

V é a velocidade do vento em km/h.

De modo análogo ao item anterior, a força resultante da ação do vento pode ser estimada, conservadoramente, pela equação 03.

$$F = 12 \rho C_a V^2 A_{proj} = 12 (1,22) (1,0) (45)^2 (7,0 \times 3,0) \rightarrow F = 25,940 \text{ kN} \quad (03)$$

Onde:

F é a força do vento em N;

ρ peso específico do ar em kg/m³;

C_a o coeficiente de arrasto;

V a velocidade do vento em m/s

A_{proj} a área da projeção plana do cilindro;

A tensão de compressão axial na parede oposta à ação do vento é dada pela equação 04.

$$\begin{aligned} \sigma_x &= M \times R I \text{ with : } M = P \times R \times H^2 \text{ and } I = \pi \times R^3 \times t & (04) \\ \sigma_x &= P \times H^2 \pi \times R \times t = (0,0122) \times 700^2 \pi \times 150 \times 0,632 \rightarrow \\ & \sigma_x = 20,55 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

Onde:

σ_x é a tensão de compressão axial, em kg/cm²;

M é o momento fletor em kg.cm;

R é o raio do cilindro em cm;

I é o momento de inércia da seção cilíndrica, em **cm⁴**;

H é a altura do costado em cm e t é a espessura do costado em cm;

Para verificar a instabilidade circunferencial e a flambagem por compressão axial, são calculados a seguir os valores críticos correspondentes.

a) comprimento crítico

$$L_{crit} = 3,1 \times R \times \sqrt{\frac{R}{T}} \times \frac{E_x^{0,25}}{E_y^{0,25}} \quad (05)$$

$$L_{crit} = 3,1 \times 150 \times \sqrt{\frac{150}{0,632}} \times \frac{92800^{0,25}}{298200^{0,25}}$$

$$L_{crit} = 53,50 \text{ m}$$

b) Pressão crítica

$$P_{crit} = 0,82 \times 298200 \times \frac{E_x^{\frac{1}{4}}}{E_y} \times \frac{R}{L} \times \frac{t^{\frac{5}{2}}}{R} = \quad (06)$$

Onde:

K = 0,82 para laminados combinados;

L = Altura do cilindro ou a distância entre nervuras circunferenciais;

$$P_{crit} = 0,82 \times 298200 \times \frac{92800^{\frac{1}{4}}}{298200} \times \frac{1500}{7000} \times \frac{6,32^{\frac{5}{2}}}{1500} = \quad (07)$$

$$P_{crit} = 0,0326 \text{ kg/cm}^2$$

c) Tensão de compressão axial crítica.

$$\sigma_{crit} = 0,60 \times \left[0,1 + 0,9 \exp \exp \left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \right] \times \left(\sqrt{E_x \times E_y} \right) \times \frac{t}{R} \quad (08)$$

$$\sigma_{crit} = 0,60 \times \left[0,1 + 0,9 \exp \exp \left(-\frac{1}{16} \times \sqrt{\frac{1500}{6,13}} \right) \right] \times \left(\sqrt{92800 \times 298200} \right) \times \frac{6,43}{1500}$$

$$\sigma_{crit} = 186,6 \text{ kg/cm}^2$$

d) Instabilidade circunferencial

A análise da estabilidade global do costado é feita pela equação 09 comparando a pressão exercida pelo vento equação 02 com a pressão radial crítica para cilindros equação 07. Esta comparação é feita conforme a norma e exige que o coeficiente de segurança seja igual ou maior a 2.

$$CS = \frac{P}{P_{crit}} = \frac{0,0125}{0,0326} = 2,61 - OK! \quad (09)$$

e) Flambagem por compressão axial

O coeficiente de segurança contra flambagem é calculado pela equação 10 por compressão axial que é obtido comparando a pressão axial crítica encontrada na equação 08 com aquela que de fato atua no cilindro que é obtida na equação 04. Esta comparação é feita conforme a norma e exige que o coeficiente de segurança seja igual ou maior a 5.

$$CS = \frac{\sigma_{crit}}{\sigma_x} = \frac{186,6}{20,55} \quad CS = 9,08 - OK! \quad (10)$$

Concluimos que a estrutura cilíndrica analisada resiste satisfatoriamente às cargas de vento de até 162 km/h. Evidenciada pelos coeficientes de segurança calculados anteriormente.

3.2.2.3 Fundo plano

O fundo plano dos tanques é integralmente apoiado e por isso não precisa ser calculado, porque o peso do fluido é transmitido diretamente à base. A norma ASTM D4097-18, recomenda que diâmetros de 3000 mm devem ter $T_f = 6,5$ mm de espessura mínima total de fundo.

3.2.2.4 Espessura da emenda

De acordo com a norma ASTM D4097, a espessura da emenda do fundo com cilindro deve ser, no mínimo, a somatória das espessuras do fundo com a do costado. Ou seja,

$$T_k (\text{mínimo}) = (t_f + t_l \text{ total}) \text{ mm} = (6,5 + 6,32) \text{ mm} \rightarrow t_k (\text{mínimo}) = 12,82 \text{ mm}$$

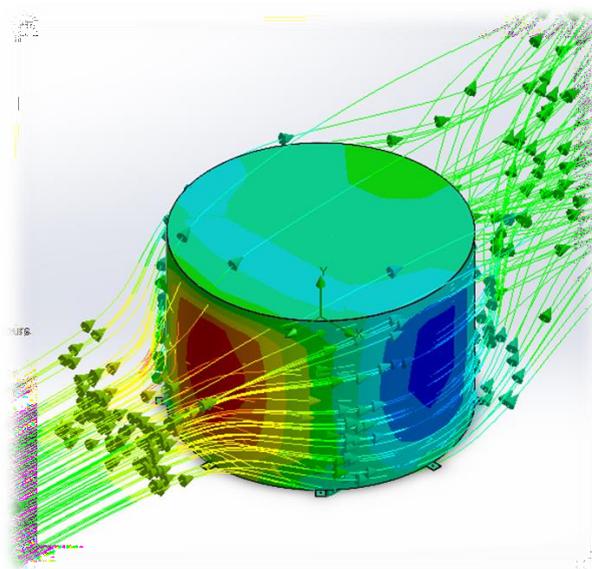
3.2.2.5 Largura da emenda

De acordo com a norma ASTM D4097, a emenda deve estender sobre o costado do tanque cobrindo uma distância de 12pol (304mm) para tanques com diâmetro acima de 1,22m.

3.2.2.6 Dimensionamento dos chumbadores.

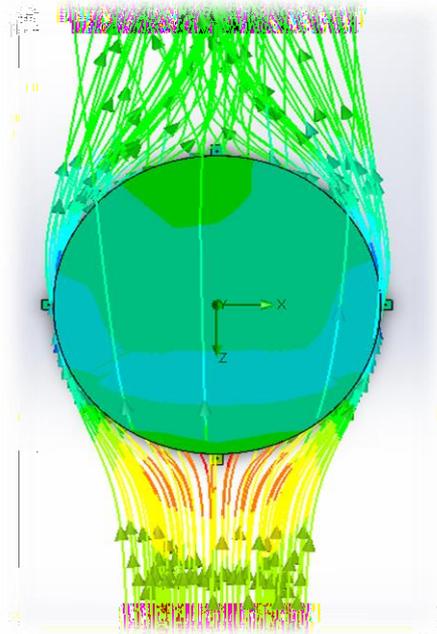
Como método para validação do dimensionamento dos chumbadores dos quais serão necessários para o ancoramento do equipamento na base civil, foram utilizadas ferramentas computacionais de fluidodinâmica (CFD) em conjunto com a análise estrutural por elementos finitos. Veja as figuras 12 e 13 abaixo.

Figura 12 – Ação da força do vento, vista isométrica.



Fonte: O autor

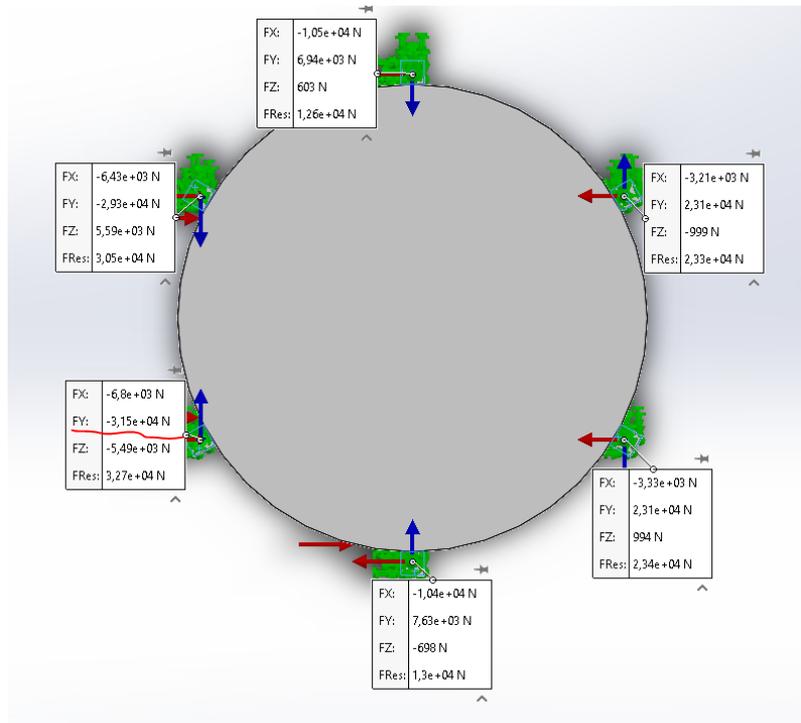
Figura 13 – Ação da força do vento, vista superior.



Fonte: O autor

A figura 14 abaixo demonstra a força de reação dos chumbadores perante a carga do vento.

Figura 14 –Forças de reação nos pontos fixo do chumbador..



Fonte: O autor

A partir do conhecimento das forças de reação das quais os fixadores serão solicitados, é possível dimensionar as configurações das hastes de fundação informado na tabela 4.

Tabela 4: –Característica da haste do fixador.

Diâmetro da rosca	Comp. da haste	Aço ABNT 1010/20		Aço ABNT 1010/20			AÇO ASTM A193 B7			Aço Inoxidável ABNT 304		
		PRQ	PRI	Resistências últimas (kgf)			Resistências últimas (kgf)			Resistências últimas (kgf)		
		Com chanfro	Sem chanfro	Escoamento	Tração	Corte	Escoamento	Tração	Corte	Escoamento	Tração	Corte
1/4"	65		•	729	1.104	707	-			530	1.292	773
	90		•									
	75		•									
5/16"	100		•	1.198	1.815	1.162	2.613	3.122	1.887	871	2.123	1.270
	110	•										
	200	•										
3/8"	80		•	1.757	2.662	1.703	3.833	4.578	2.768	1.278	3.114	1.863
	110		•									
	130	•										
1/2" *	220	•		3.125	4.735	3.030	6.818	8.143	4.924	2.273	5.539	3.314
	95		•									
	135		•									
5/8"	160	•		5.088	7.709	4.933	11.100	13.259	8.017	3.700	9.019	5.396
	250	•										
	115		•									
3/4"	165		•	7.500	11.363	7.273	16.363	19.545	11.818	5.454	13.295	7.954
	190	•										
	260	•										
7/8"	250	•	•	10.326	15.646	10.013	22.530	26.911	16.272	7.510	18.305	10.952
	175		•									
1"	250		•	13.520	20.484	13.110	29.497	35.233	21.304	9.832	23.967	14.339
	300	•	•									
1.1/4"	380	•	•	21.511	32.593	20.859	48.527	57.962	35.047	15.644	38.133	22.815

*Rosca 1/2 - 13 UNC.

Fonte: (ANCORA, 2022)

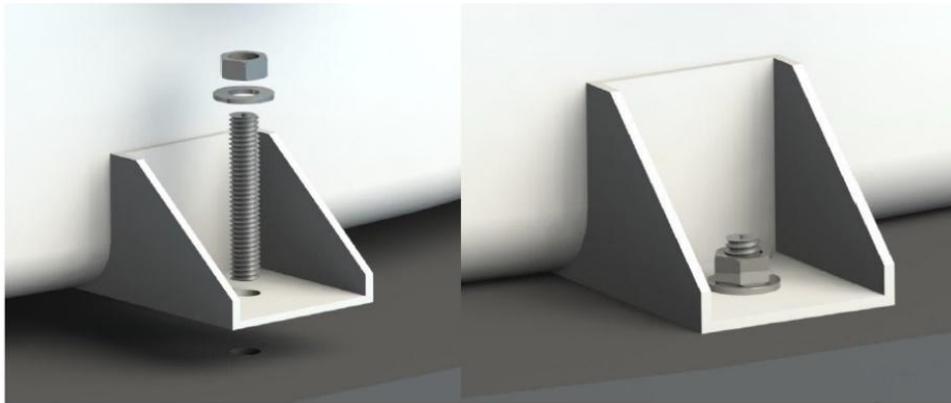
Checando o nível de segurança do chumbador pela equação 11 com os dados obtidos na tabela fornecida pela ANCORA, conforme imagem 7 abaixo:

$$CS = \frac{\sigma_{crit}}{\sigma_{max}} \quad (11)$$

$$CS = \frac{18305}{3211} = 5,7 \rightarrow \text{OK!}$$

A figura 15 abaixo demonstra como é feita a instalação do chumbador.

Figura 15 - Instalação do chumbador.



Fonte: O autor

Para a instalação do chumbador é recomendado que é feita após o posicionamento do equipamento na base,

Primeiramente deve fazer os furos nos pontos de fixação e logo após realizar uma limpeza para tirar as impurezas causadas durante a furação, então finalmente é aplicado o chumbador químico com a barra roscada indicada na memória de cálculo.

3.3 Desenho técnico

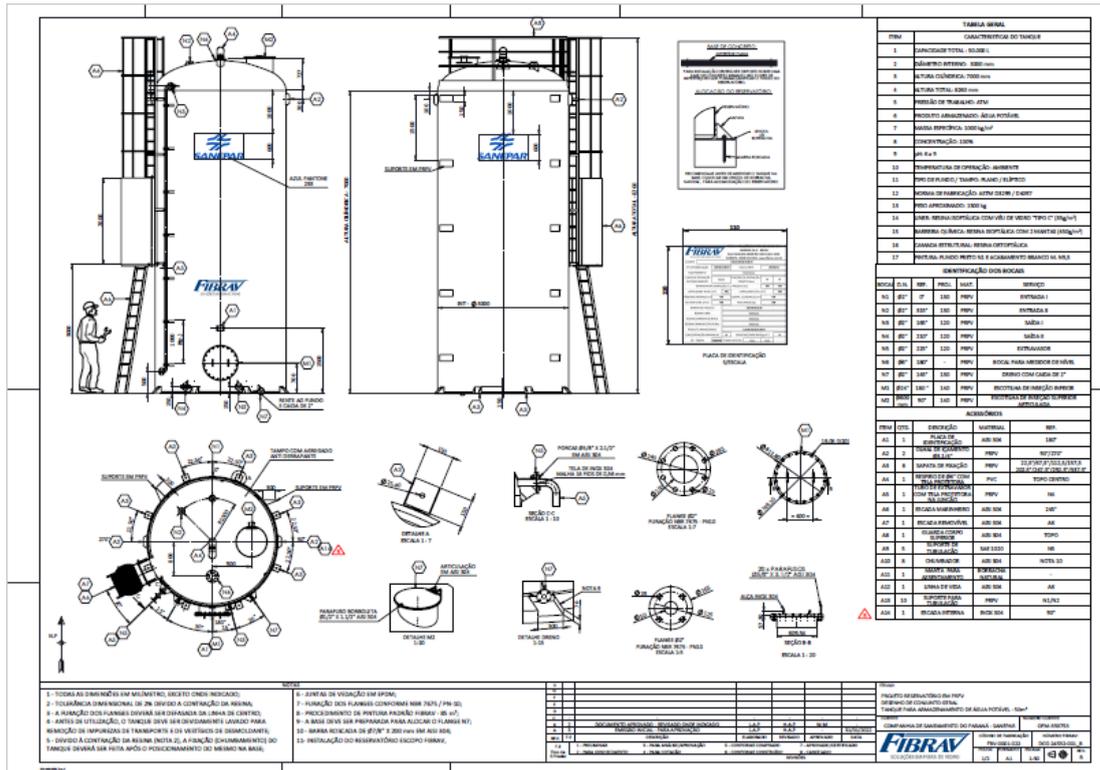
O desenho seguiu a norma ABNT/NBR 10647 para o detalhamento e nomenclaturas.

Este consta todas as dimensões e layout do tanque. Importante informar que esta é criada pela equipe de projetos, porém aprovada e liberada pelo contratante.

O desenho possui duas folhas A1, sendo a primeira o detalhamento geral dos bocais e acessórios e a segunda folha a lista de material e detalhes de escadas e guarda corpo.

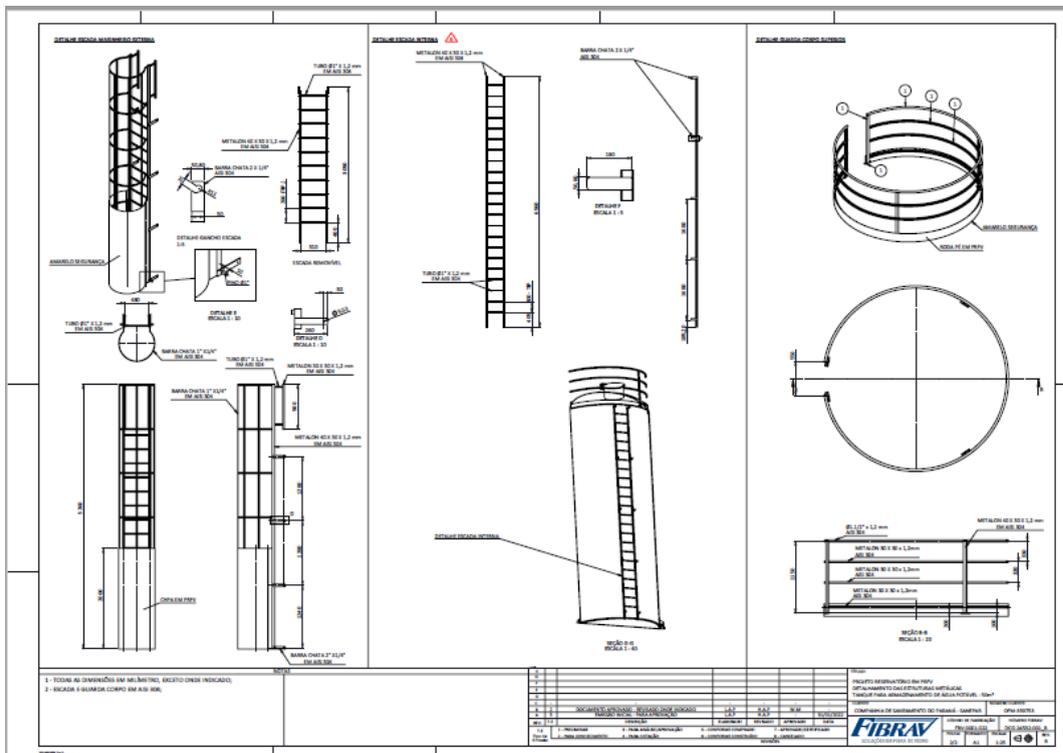
A partir do desenho técnico é realizada a lista de materiais para a compra e todas as informações para a confecção do equipamento.

Figura 16 – Folha 1 desenho técnico.



Fonte: O autor

Figura 17 – Folha 2 desenho técnico.



Fonte: O autor

3.4 Fabricação do equipamento

Após o desenho aprovado é adquirido a matéria prima para a confecção do equipamento.

Na fabricação do equipamento e acessórios é utilizado material composto de polímero com fibra de vidro que possui em sua característica a anisotropia que sua reação aos esforços varia de acordo com direção , para um melhor aproveitamento e confiança da resistência mecânica foram feitos ensaios no laboratório em São Carlos - SP na data de 09/03/20.

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D638 em máquina universal de ensaios modelo 5969R da Instron com célula de carga de 50000 N.

Na tabela 5 obtido pelos ensaios feito pela CCDM apresenta as propriedades à tração das amostras no sentido longitudinal a orientação preferencial das fibras conforme demonstrado na figura 17

Tabela 5: – Propriedade de tração da amostra.

Amostra	C.P	Módulo Elástico (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Tensão na Ruptura (MPa)	Alongamento na Ruptura (%)
LCP200237 Longitudinal	1	16091,38	276,12	267,12	3,61
	2	16289,96	242,28	241,78	3,15
	3	13914,15	264,62	264,11	3,30
	4	16540,95	270,31	269,88	3,10
	5	16217,47	260,77	260,66	3,21
Média		15810,78	262,82	260,71	3,27
Desv. Padrão		1072,86	12,87	11,13	0,20

Fonte: (CCDM, 2020)

Figura 18– Direção preferencial da fibra.



Fonte: O autor

Observando o resultado da resistência dos materiais encontrados no livro BEER, RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS-2012. na tabela 6 podemos concluir que é um pouco mais da metade de resistência à tração que aço estrutural A36 conforme informado na tabela 6.

Tabela 6: – Propriedade de resistências de materiais.

Materiais	Peso específico ρ (Densidade) (Mg/m ³)	Módulo de Elasticidade E (módulo de rigidez) G (GPa)	Tensão de escoamento (MPa) σ_e			Limite de resistência (MPa) σ_l			% 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	2,79	73,1	27	414	414	172	469	469	290	0,35	23
2014-T6	2,71	68,9	26	235	235	131	290	290	186	0,35	24
Ligas de ferro fundido	7,19	67,0	27	-	-	-	179	669	-	0,6	12
Cinzeiro ASTM 2	7,28	172	68	-	-	-	276	572	-	5	0,28
Maleável ASTM A-197											
Ligas de latão	8,74	101	37	70,0	70,0	-	241	241	-	35	0,35
vermelho C83400	8,83	103	38	345	345	-	635	635	-	20	0,34
Bronze C86100											
Liga de magnésio	1,83	44,7	18	152	152	-	276	276	-	1	0,30
[Am 1004-T61]											
Ligas de aço	7,85	200	75	250	250	-	400	400	-	30	0,32
Estrutural A36	7,86	193	75	207	207	-	517	517	-	40	0,27
Inoxidável 304	8,16	200	75	703	703	-	800	800	-	22	0,32
Ferramenta L2											
Liga de titânio	4,43	120	44	924	924	-	1.000	1.000	-	16	0,36
[Ti-6Al-4V]											9,4
Não metálicos											
Concreto	2,38	22,1	-	-	-	12	-	-	-	-	0,15
Baixa resistência	2,38	29,0	-	-	-	38	-	-	-	-	0,15
Alta resistência											
Plástico reforçado	1,45	131	-	-	-	-	717	483	20,3	2,8	0,34
Kevlar 49	1,45	72,4	-	-	-	-	90	131	-		0,34
Vidro 30%											
Madeira selecionada de grau estrutural	0,47	13,1	-	-	-	-	2,1 ^c	26 ^d	6,2 ^d	-	0,29 ^e
Abeto Douglas	3,60	9,65	-	-	-	-	2,5 ^c	36 ^d	6,7 ^d	-	0,31 ^e
Espruce branco											

*Valores 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 dúcteis podem ser considerados iguais para tração e compressão.

^cMedida perpendicularmente ao grão.

^dMedida paralelamente ao grão.

Fonte: (BEER, RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS-2012).

Conforme tabela 7 informado no certificado da resina a resina oferece uma resistência a temperatura de até 90°C.

Tabela 7: – Propriedade da resistência da resina utilizada no tanque..

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS - VALORES TÍPICOS ⁽¹⁾	PROPRIEDADES NA RESINA PURA, SEM REFORÇO ⁽³⁾	VALOR	UNIDADE	MÉTODO
Resistência a Tração		46	MPa	ASTM D-638
Módulo na Tração		3200	MPa	ASTM D-638
Alongamento		1,6	%	ASTM D-638
Resistência 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: (INEOS, 2020).

3.4.1 Fabricação do tampo

Assim que a matéria prima é recepcionada na fábrica e o molde preparado com o desmoldante conforme representados na figura 6, inicia-se a laminação do tampo utilizando o método de laminação spray-up que é a injeção simultaneamente da resina, o catalisador e a fibra de vidro na superfície do molde conforme demonstrado na figura 2, a fibra que vem da bobina é picotada na saída do revólver por um triturador pneumático. (CAUHOIS, 2012). O revólver é uma combinação de um cortador e uma pistola de pintura.

Depois de laminado com PRFV seguindo as espessuras calculadas na memória o tampo ficará conforme a figura 19.

Figura 19- Tampo laminado pelo método Spray-up



Fonte: O autor

Em paralelo a fabricação do tampo pode ser realizada a confecção do fundo plano e o costado cilíndrico para que posteriormente seja realizada a montagem das 3 peças.

3.4.2 Fabricação do costado

A primeira camada da lâmina do costado é denominada de liner que é a camada que irá entrar em contato com a água, o mesmo possui uma maior porcentagem de resina, que é para criar uma barreira contra a penetração do produto na estrutura do corpo. A figura 20 demonstra a lâmina do costado após laminação, a lâmina possui os mesmos procedimentos de fabricação do tampo porém o molde é cilindro conforme figura 21.

Figura 20- Lâmina do costado.



Fonte: O autor

Figura 21- Molde do costado.



Fonte: O autor

3.4.3 Fabricação de fundo plano

O fundo do equipamento não exige uma alta espessura pelo fato que será apoiado ao chão e o método de fabricação e laminação é basicamente o mesmo do tampo, será necessário a preparação do molde como demonstrado na figura 22 com desmoldante e a laminação do tipo *spray-up*.

Figura 22- Fundo plano laminado.



Fonte: O autor

3.4.4 Montagem

Assim que fabricado as três peças, deve-se realizar a montagem do fundo com lâmina do costado e o tampo superior conforme apresentado na figura 23 para que possa ir para a máquina de *Filament Winding* que irá proporcionar uma camada de estrutura conforme calculado no memorial pelo método de laminação de filamento contínuo.

Figura 23- Corpo do reservatório montado recebendo estruturação.



Fonte: O autor

3.4.5 Instalação de acessórios e bocais

Após o equipamento receber sua estruturação a próxima tarefa será a de instalação de acessórios conforme aprovado no desenho técnico. A fabricação dos bocais e acessórios também devem seguir a mesma resina utilizada para o corpo do equipamento.

Figura 24- Instalação de acessórios.



Fonte: O autor

3.5 Inspeção e teste

Para garantir a qualidade e segurança o equipamento é submetido a inspeções visuais e teste conforme a norma ASTM D2584.

3.5.1 Teste de Cinza

Este método de ensaio abrange a determinação da perda de ignição de resinas reforçadas e curadas. Esta perda de ignição pode ser considerada como sendo a resina contida dentro das limitações de 4.2¹ (ASTM D2584).

Se apenas tecido de vidro ou filamento é usado como reforço de uma resina orgânica que é completamente decomposto a materiais voláteis nas condições deste teste e a pequena quantidade de voláteis (água, solvente residual) que pode estar presente é ignorada, a perda de ignição pode ser considerado o conteúdo de resina da amostra.

Um cadinho contendo o corpo de prova é aquecido e queimado até que somente cinzas e carbono permaneçam. O resíduo carbonoso é reduzido a cinzas por aquecimento em mufla a 565° C (1050° F), resfriada em um dessecador, e pesado.

3.5.2 Teste de dureza barcol

Enfim instalado as conexões e aguardado o tempo de cura estabelecido pelo boletim técnico da resina isoftálica, deverá ser feito o teste de dureza barcol com equipamento apresentado na figura 5 para verificar se a cura foi concluída.

Este teste tem como finalidade determinar a dureza de superfícies em equipamentos de plástico rígido reforçados e não reforçados usando um medidor Barcol

Os valores determinados de acordo com o Sistema Internacional devem ser considerados como unidades padrão. Os valores indicados entre parênteses são apenas para informação complementar.

A amostra é posicionada sob o penetrador de dureza Barcol e uma pressão uniforme é aplicada ao seu corpo até que a indicação atinja um valor máximo. A profundidade da penetração é convertida em números absolutos Barcol. Este procedimento deve ser repetido 10 vezes.

Figura 25- Medição com durômetro.



Fonte: O autor

Tabela 8: – Resultado da medição do durômetro.

RESULTADOS DO TESTE DE DUREZA BARCOL											
N° SÉRIE DO EQUIPAMENTO:	FBV-0002-022		TAG CLIENTE:	-							
RESINA DO LINER:	ARAZYN 31700		DUREZA BARCOL:	35							
MODELO DO DURÔMETRO:	DUROMETER MEDTEC – GYZJ-934-1 N° 162171										
DATA DO TESTE:	14/04/2022		REALIZADO POR:	LUÍS PAIVA							
MEDIDAS											
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
Valores	45	39	42	41	39	45	48	39	36	44	41,8

Certifico de que o equipamento listado acima foi submetido ao Teste de Dureza Barcol, de acordo com a norma de referência ASTM D 2583, obtendo aprovação como resultado.

Resina: ARAZYN 31700

Dureza Barcol da Resina: 35

Média de Dureza Barcol: 41,8

Fonte: O autor

3.5.3 Teste de estanqueidade

Os tanques devem ser testados hidrosticamente com água limpa por no mínimo quatro horas para verificar se há vazamento, caso encontrado deve ser reparado e testado novamente.

Tabela 9:Resultado do teste hidrostático.

RESULTADOS DO TESTE DE ESTANQUEIDADE			
NÚMERO* SÉRIE:	FBV-0002-022	TAG CLIENTE:	-
VOLUME PROJETADO:	50.000 LITROS	VOLUME TESTADO:	50.000 LITROS
PRESSÃO DE PROJETO:	01 atm	PRESSÃO DE TESTE:	01 atm
DATA INÍCIO DO TESTE:	14/04/2022	DATA TÉRMINO DO TESTE:	14/04/2022
HORA DE INÍCIO:	07:45	HORA DE TÉRMINO:	09:00

Fonte: O autor

3.5.4 Inspeção visual

A inspeção visual abrange critérios de aceitação para peças e equipamentos feitos a partir de laminados plásticos reforçados com fibra de vidro.

Essa inspeção apresenta descrições textuais de possíveis defeitos que devem servir como guia para contratos, desenhos, especificações de produtos e inspeção final contidos nos documentos do projeto.

Os requerimentos de inspeção são categorizados por níveis de qualidade do produto.

O tamanho permitido e o número de defeitos aceitáveis dentro das categorias de nível durante a inspeção são genéricos e não são relacionados a nenhum serviço específico prestado pela fábrica. O comprador eo fornecedor devem estabelecer um acordo sobre como categorizar especificamente o Nível IV de defeitos admissíveis, que define o tamanho permitido, número de defeitos aceitáveis e procedimentos de reparação autorizados.

Os valores expressos de acordo com o Sistema Internacional deverão ser considerados como unidades padrão. Os valores indicados entre parênteses são apenas para informação complementar.

Esta norma não pretende abordar todos os procedimentos de segurança, se houver, relacionados à prática de inspeção. É de responsabilidade dos responsáveis

estabelecer procedimentos de segurança e de bem-estar adequados aos envolvidos e regulamentar as limitações da inspeção antes de dar início ao processo.

3.6 Pintura

Aprovado em todos os testes o equipamento será submetido a uma pintura externa que não pode permitir a incidência de luz no interior do equipamento para evitar a proliferação de algas. O revestimento externo do reservatório deve ser na cor branca (Munsell N 9,5) conforme identidade visual da SANEPAR.

Figura 26- Equipamento finalizado.



Fonte: O autor

4 Resultado e discussões

Esse trabalho teve como metodologia acompanhar toda área de projeto e de engenharia envolvida no processo de construção de um reservatório em PRFV para água potável.

Após esse acompanhamento pode-se identificar que o equipamento em PRFV possui uma grande importância no setor de abastecimento de água potável e na engenharia e garantido uma boa qualidade de equipamento no projeto apresentado.

Conforme analisado no boletim técnico de resistência química da resina, o reservatório fabricado em PRFV atende até uma temperatura de até 90° C, sendo assim temperaturas superiores o equipamento deve ser confeccionado com outro tipo de material para a confecção do equipamento.

Outro ponto que pode ser citado é a resistência à oxidação, intempéries e substâncias químicas agressivas, uma das vantagens é que não é necessário o revestimento como nos tanques de aço carbono.

Como o equipamento é feito de polímero que possui baixa condutividade elétrica, não é obrigatório a instalação do sistema SPDA (sistema de proteção de descarga atmosférica) assim reduzindo o seu custo.

O material PRFV possui uma densidade média de 1600 kg/m³ que está bem abaixo dos outros materiais genéricos da engenharia, fazendo com que seu peso final fique abaixo da média, fazendo com que seu transporte e manuseio fique de forma mais econômica. O equipamento finalizado ficou com o peso de 1473 kg vazio.

Durante o todo o processo foi possível aprender sobre armazenamento de água, elaboração de desenho técnico e simulação computacional CFD via software SOLIDWORKS, desenvolvimento de memória de cálculo para encontrar as espessuras mínimas exigidas pelas normas ASTM D3299 e ASTM D4097.

5 Considerações finais

Durante a participação do projeto e fabricação do equipamento, tive contato com grandes profissionais que poderiam me agregar conhecimentos e linhas de raciocínio lógicas.

Esse trabalho abriu oportunidade para outros engenheiros estudarem e entenderem um dos métodos de fabricação de um equipamento em PRFV que não é tão conhecido no mercado.

Foi o primeiro fornecimento para a companhia de saneamento do Paraná fico feliz em saber que graças a esse projeto que participei a empresa foi homologada e agora irá participar das principais licitações de obras.

6 Conclusão

Com esse trabalho pode-se concluir que o material composto de PRFV é uma boa opção para a fabricação de um reservatório.

Esse projeto foi essencial para todos os envolvidos na construção do equipamento e para a empresa, pois foi possível identificar e encontrar pontos de melhorias no processo de fabricação.

Depois de alguns meses a companhia de Campo Mourão adquiriu mais equipamentos para a estação de tratamento.

Este estudo foi recompensador pois tive muitos aprimoramentos na minha área de formação acadêmica e profissional e obtive a oportunidade de participar na área de projeto e fabricação.

REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3299: Standard specification for filament-wound glassfiber-reinforced thermoset resin corrosion-resistance tanks**. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3299: Standard Specification for Contact-Molded Glass-Fiber-Reinforced Thermoset Resin Corrosion-Resistant Tanks**. 2000.

AL-QURESHI, Hazim A. **Materiais compostos: análises e fabricação**. Apostila, Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2010.

BEER, RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS-Ferdinand P.; JOHNSTON JR, E. Russel; HIBBELER, **RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS-RC. RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS 2**. 2012.

BROUTMAN, Lawrence Jay; AGARWAL, B. D. **Analysis and performance of fiber composites**. New York: Wiley, 1980.

BARROS, Gustavo de Araújo. **Tubulações de PRFV com adição de areia quartzosa visando sua aplicação na indústria do petróleo**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAUHOIS, J. P. **Compósitos 1-Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências**. 2012.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. John Wiley & Sons, 2020.

CARVALHO, Laura H. de; CAVALCANTI, Wilma S. **Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro**. *Polímeros*, v. 16, n. 1, p. 33-37, 2006.

GERON, Mateus; GERON, Vera Lúcia Matias Gomes; DE JESUS, Jociel Honorato. **LEVANTAMENTO DE USO DE EPI PELOS TRABALHADORES DE FABRICAÇÃO DE PISCINAS DE POLIÉSTER REFORÇADA COM FIBRA DE VIDRO (PRFV)**. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 13, n. edespsimpae, 2022.

JUNIOR, Osni Fontan; SILVA, Denise Abatti Kasper; DE OLIVEIRA, Fernanda Scopel. 1. **Caracterização mecânica, térmica e perfil de absorção de água de compósitos híbridos de fibra**

de vidro/fibra de pupunheira em matriz poliéster insaturado. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 5, n. 1, 2010.

LOBOSCO, R. J.; SCHULZ, H. E. **Análise computacional do escoamento em estruturas de vertedouros em degraus**. *Mecânica Computacional*, v. 29, n. 35, p. 3593-3600, 2010.

KUNRATH, Kamila; KLEINSCHMIDT, Ana Cláudia; AMICO, Sandro Campos. **Estudo preliminar de nanocompósitos de matriz epoxídica reforçada com nanoplaquetas de grafeno**. In: Congresso Brasileiro de Polímeros (12.: 2013 set. 22-26: Florianópolis, SC).[Anais][recurso eletrônico]. Florianópolis, SC: Associação Brasileira de Polímeros, 2013. 2013

NORRIS, T.; SAADATMANESH, H. **Improving the serviceability of concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP)**. Sheets, FHA, Grant no. DDEGRF-93-P-05, 1994.

OLIVEIRA, Eric Manoel Nunes de et al. **Adaptação e avaliação de um processo de fabricação de componentes automotivos de poliuretano com fibra de vidro utilizando spray em molde aberto**. 2017.

ORTH, Cíntia Madureira; BALDIN, Nelma; ZANOTELLI, Cladir Teresinha. **A geração de resíduos sólidos em um processo produtivo de uma indústria automobilística: uma contribuição para a redução**. *Gestão & Produção*, v. 21, p. 447-460, 2014.

PINTO, N. C. K.; ROSSI, Jesualdo Luiz. **Reciclagem de resíduos de materiais compósitos de matriz polimérica: poliéster insaturado reforçado com fibras de vidro**. São Paulo–SP–Brasil: Universidade de São Paulo, 2002.

PIERIN, Igor et al. **Estudo de estabilidade de perfis pultrudados de materiais PRFV**. 2005.

THIESEN JUNIOR, Anselmo et al. **Estudo comparativo de laminados em plástico reforçado com fibra de vidro obtidos através dos processos spray-up e hand lay-up**. 2016.

KAW; A. A., **Mechanics of composite materials**, CRC Press LLC, USA, 1997.