



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

DESENVOLVIMENTO DE UM AUTOCLAVE PARA CURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Autor: Raimundo Otávio Nogueira Dias
Orientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

Brasília, DF
2017



Raimundo Otávio Nogueira Dias

DESENVOLVIMENTO DE UM AUTOCLAVE PARA CURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Trabalho de conclusão de curso referente à graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior

Brasília, DF
2017

Raimundo Otávio Nogueira Dias

DESENVOLVIMENTO DE UM AUTOCLAVE PARA CURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Trabalho de conclusão de curso referente à graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado, DF, Brasília,

Prof. Dr. Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior
Orientador

Prof. Dr. Fábio Alfaia da Cunha
Convidado 1

Prof. Dr. Cristian Vendittozzi
Convidado 2

Brasília, DF
2017

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein)

Agradecimentos

Na conclusão desse trabalho e dessa etapa eu gostaria de agradecer em especial aos meus pais, Eduardo Dias e Cleide Maria que sempre lutaram como uma equipe para que tudo corresse bem e os meus objetivos fossem cumpridos. Queria agradecer aos meus irmãos Cleidson, Eduardo Junior e suas respectivas famílias pelo carinho familiar em momentos de stress.

Queria deixar aqui também meus sinceros agradecimentos pelos meus amigos que me ajudaram na correria do dia a dia, em especial Carols Ian, Thales Queiroz, Cloves de Barros, Gabriela Volpato, Yuri Amorin e Yago Benázio, João Yamada e também meus amigos que me ajudaram diretamente na realização do trabalho Mateus Sant'Ana, Renato de Brito e Marcelo Lucas.

Para este trabalho e para minha vida profissional quero deixar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Manuel Barcelos, que me orientou nas horas de duvidas assim como ensinou o caminho das pedras a trilhar em rumo a ciência e ao profissionalismo.

Por fim, agradeço a todos os professores, servidores e colegas que cruzaram meu caminho, durante toda a minha jornada, e me ensinaram lições que eu levarei para à vida.

Resumo

A utilização de materiais compósitos como alternativa a materiais convencionais tem levado a grandes avanços tecnológicos na engenharia. Os compósitos constituídos por matriz e fibra podem resultar em materiais com propriedades avançadas combinando o melhor de cada elemento. Para que os ganhos com esses materiais sejam percebidos nas diversas indústrias são necessários um aprimoramento das técnicas de cura dos compósitos para a obtenção do produto mais próximo possível do desejado. Para realização de cura de materiais compósitos tem-se no mercado diversos equipamentos disponíveis, sendo o principal deles o autoclave. Os autoclaves são grandes vasos de pressão capazes de fornecer o controle da temperatura e da pressão necessária para um processo de cura. Porém, para uso universitário, o desenvolvimento de um autoclave de menor escala a nível educacional torna-se necessário. Com base nisso, este trabalho propõe uma concepção e desenvolvimento de um autoclave para estudo da cura de materiais compósitos por alunos e professores da Universidade. Na revisão bibliográfica são apresentados os processos de cura e os tipos de materiais compósitos, assim como características dos vasos de pressão. A partir da base teórica são desenvolvidos o dimensionamento dos componentes do autoclave, o desenho do sistema, simulação estrutural, os detalhes de construção de um modelo adaptado aos recursos da universidade, operação e manutenção do equipamento, assim como os resultados de um teste prático de funcionamento do equipamento na cura real de um material compósito.

Palavras-chave: Autoclave, Cura, Compósitos

Abstract

The use of composite materials as an alternative to conventional materials has led to major technological advances in engineering. Composites composed of matrix and fiber can result in materials with advanced properties combining the best of each element. For the gains with these materials to be perceived in the different industries, an improvement of the curing techniques of the composites is necessary to obtain the product as close as possible to the desired one. For the curing of composite materials, there are several available equipment on the market, the main one being the autoclave. Autoclaves are large pressure vessels capable of providing the temperature and pressure control necessary for the curing process. However, for university use, the development of a smaller-scale autoclave at the educational level becomes necessary. Based on this, this work proposes a conception and development of an autoclave for the study of curing of composite materials by students and professors of the University. In the bibliographic review are presented the curing processes and the types of composite materials, as well as characteristics of the pressure vessels. From the theoretical base are developed the design of the autoclave components, the sketch of the system, structural simulation, and the details of construction of a model adapted to the university resources, operation and maintenance of the equipment, as well as the results of a practical test of functioning of the equipment in actual curing of a composite material.

Keywords: Autoclave, Cure, Composites

Lista de Ilustrações

Figura 1: Comparação de propriedades mecânicas entre compósitos, aço e alumínio.....	6
Figura 2: Uso de materiais compósitos na estrutura de um Boeing 787.	8
Figura 3: Grumman X-29	11
Figura 4: Folha de Prepreg em fita unidirecional UD e em tecido.....	12
Figura 5: Disposição de tridimensional de fibras em camadas do tipo NCF e NC2	12
Figura 6: Gráfico dos efeitos da temperatura e tempo de exposição na capacidade de materiais de manterem suas propriedades	14
Figura 7: Esquema representativo de um autoclave industrial.	17
Figura 8: Tipos de vaso de pressão.....	20
Figura 9: Ciclo de cura de uma resina epóxi	25
Figura 10: Croqui para chapas circulares aparafusadas em casco, flange ou chapas laterais com juntas que abrangem toda a face de contato	34
Figura 11: Seção transversal com esquema de transferência de calor para o casco cilíndrico com manta isolante.....	37
Figura 12: Autoclave montado e explodido	42
Figura 13: simulação da deformação do autoclave no Ansys (deformação na escala 91:1)	43
Figura 14: Simulação de stress mecânico do autoclave no Ansys	43
Figura 15: Componentes do sistema de pressurização	44
Figura 16: Componentes do sistema de aquecimento	45
Figura 17: Componentes do sistema de segurança e vedação.	46
Figura 18: Painel de pressão industrial a ser adaptada	47
Figura 19: Perfil do tampo toriesférico 6%D	50
Figura 20: Resistência elétrica na base da panela.....	51
Figura 21: Simulação da deformação no Ansys (deformação na escala 28:1).....	55
Figura 22: Simulação de stress mecânico no Ansys.....	55
Figura 23: (a) Sistema on/off do termostato, (b) abertura e fechamento de contato de acordo com a temperatura.....	57
Figura 24: Estrutura de aquecimento com resistência fixada a panela pelas alças e termopar para medição e controle da temperatura.....	57

Figura 25: Sistema de pressurização contendo compressor, mangueira e regulador de pressão ligados a tampa da panela com destaque em vermelho para as válvulas de segurança de 10 psi (azul) e 15 psi (amarelo) e destaque em verde para a entrada de fluxo vinda do compressor.....	58
Figura 26: (a) Corte da camada de fibra de vidro, (b) início da fixação das camadas com uso de silver tape no molde do casco da panela, (c) isolamento móvel	59
Figura 27: (a) Base de apoio e termostato, (b) suporte interno	60
Figura 28: Sistema completo do Autoclave.....	61
Figura 29: Isolamento móvel na fase de pré-aquecimento com termostato medindo a temperatura interna.....	63
Figura 30: Rampa de temperatura no autoclave	63
Figura 31: (a) Massa da fibra, (b) massa do Epoxi e (c) massa do Epoxi + endurecedor	66
Figura 32: Aplicação da resina na fibra.....	66
Figura 33: Posicionamento do compósito a ser curado no autoclave.....	67
Figura 34: (a) Compósito curado no autoclave (b) compósito curado a temperatura ambiente (c) comparação lado a lado dos compósitos (verso)	68
Figura 35: representação do corpo de prova com destaque para sua profundidade (e) e amplitude de suporte (L).....	69
Figura 36: Confecção dos corpos de prova a partir das peças curadas. Em cima - corpo de prova curado a temperatura ambiente. Em baixo – corpode prova curado na panela	70
Figura 37: (a) autoclave pré-aquecido e molde de compósito (b) final do processo de pós cura do molde	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Número mínimo de fios de rosca que devem ser utilizados para fixação de conexões tubulares roscadas	35
Tabela 2 - valores do coeficiente de convecção h para situações de convecção natural em edifícios	38
Tabela 3 - Valores da tensão de ruptura obtidos pelo teste de flexão	71
Tabela 4 - Valores da extensão de ruptura obtidos pelo teste de flexão.....	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

CRFC	Carbono Reforçado com Fibra de Carbono	
PET	Politereftalato de etileno	
PVC	Policloreto de vinila	
NCF	Non-Crimp Fabric	
NC2®	Non-Crimp 2nd generation	
BMI	BisMaleimida	
DCPD	DiCicloPentaDieno	
TP	Termofixos de Poliéster	
CAD	Computer Aided Design	
FEA	OpenType Feature Data	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ASME	American Society of Mechanical Engineers	
t	Espessura requerida mínima de resistência de pressão	[mm]
es	Espessura requerida mínima de resistência estrutural	[mm]
Di	Diâmetro interno do casco cilíndrico	[mm]
CET	Comprimento entre tangentes	[mm]
P	Pressão	[Pa]
T	Temperatura	[°C]
S	Tensão admissível do material	[Pa]
C	Sobre espessura de corrosão	[mm]
E	Coefficiente de eficiência de solda	
d	Vão menor	[mm]
Npc	Número de porcas	
Nf	Número de fios de rosca	
Ff	Força suportada por fio de rosca	[N]
T∞1	Temperatura no centro do autoclave	[°C]
T1	Temperatura na superfície interna do autoclave	[°C]
T2	Temperatura na superfície externa do autoclave	[°C]
T3	Temperatura externa da manta de lã	[°C]
r1	Distância na superfície interna do autoclave	[m]
r2	Distância na superfície externa do autoclave	[m]
r3	Distância externa da manta de lã	[m]
L	Comprimento	[m]
T∞2	Temperatura ambiente	[°C]
K	Condutividade térmica	[W/m.K]

h	Coeficiente de transferência de calor	$ \text{W}/\text{m}^2.\text{K} $
Q	Fluxo de calor	$ \text{W} $
ds	Densidade	$ \text{g}/\text{cm}^3 $
c	Calor específico	$ \text{J}/\text{kg}.\text{K} $
ΔT	Varição de temperatura	$ \text{°C} $
m	Massa	$ \text{Kg} $
Pot	Potência do sistema	$ \text{W} $
η	Rendimento	$ \% $
I	Corrente	$ \text{A} $
V	Tensão	$ \text{V} $
Df	Diâmetro do fio	$ \text{mm} $
ρ	Resistividade do material do resistor	$ \Omega.\text{mm}^2/\text{m} $
Pe	Carga específica superficial	$ \text{W}/\text{cm}^2 $
pff	Potência do forno por fase	$ \text{W} $
Np	Número de circuitos resistores em paralelo	
R	Resistência	$ \Omega $
r	Resistência por unidade do fio resistor	$ \Omega/\text{m} $
Lf	Comprimento do fio	$ \text{m} $

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2.	MOTIVAÇÃO.....	2
1.3.	JUSTIFICATIVA	2
1.4.	OBJETIVO.....	2
1.4.1.	<i>Objetivo principal</i>	3
1.4.2.	<i>Objetivos secundários</i>	3
1.5.	METODOLOGIA	3
1.6.	CHAMADA.....	4
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1.	ASPECTOS GERAIS DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	5
2.2.	HISTÓRIA DOS COMPÓSITOS	7
2.2.1.	<i>Evolução histórica</i>	7
2.2.2.	<i>Perspectivas futuras</i>	9
2.3.	PROPRIEDADES DOS REFORÇOS	9
2.3.1.	<i>Utilização das Fibras</i>	10
2.3.2.	<i>Tipos de Fibras</i>	11
2.4	PROPRIEDADES DA MATRIZ.....	13
2.4.1	<i>Resinas poliméricas</i>	13
2.4.2.	<i>Tipos de resinas</i>	13
2.5	MÉTODOS DE CURA E MOLDAGEM DE COMPÓSITOS	14
2.6	EQUIPAMENTOS PARA CURA DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.6.1.	<i>Autoclave</i>	16
2.6.2.	<i>Cura sem autoclave</i>	17
2.7.	TIPOS DE AUTOCLAVE	18
2.8.	NORMA PARA CONSTRUÇÃO DO VASO DE PRESSÃO	19
2.8.1.	<i>História da normatização de vasos de pressão</i>	19
2.8.2	<i>Características de um vaso de pressão</i>	20
2.8.3	<i>Norma brasileira para fabricação de vaso de pressão</i>	22
2.9.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	23
2.10.	PROCESSO DE CURA DA RESINA EPÓXI	24
2.11.	INTERESSE EDUCACIONAL	25
3.	METODOLOGIA.....	27
3.1.	ESCOPO DO PROJETO	28
3.2.	REQUISITOS DO PROJETO	29
3.3.	PESQUISA DE MERCADO	30
3.4.	PROJETO CONCEITUAL.....	30

3.5.	PROJETO PRELIMINAR.....	31
3.5.1.	<i>Escolha do material</i>	31
3.5.2.	<i>Espessura de parede</i>	32
3.5.3.	<i>Isolamento do autoclave</i>	36
3.5.4.	<i>Dimensionamento do sistema de aquecimento</i>	39
3.5.5.	<i>Desenho Preliminar do Sistema</i>	42
3.5.6.	<i>Simulação com análise estrutural no Ansys</i>	42
3.6.	PROJETO DETALHADO	43
3.6.1.	<i>Dimensionamento do sistema de pressurização</i>	44
3.6.2.	<i>Dimensionamento do sistema elétrico de aquecimento</i>	44
3.6.3.	<i>Segurança e Vedação</i>	45
3.7.	AJUSTES NO PROJETO	46
3.7.1.	<i>Análise estrutural da panela</i>	48
3.7.2.	<i>Sistema de aquecimento do autoclave</i>	51
3.7.3.	<i>Sistema de isolamento do autoclave</i>	53
3.7.4.	<i>Ajustes no projeto detalhado</i>	54
3.7.5.	<i>Análise estrutural no Ansys</i>	54
3.8.	CONSTRUÇÃO DO AUTOCLAVE	56
3.8.1.	<i>Sistema de aquecimento</i>	56
3.8.2.	<i>Sistema de pressurização</i>	57
3.8.3.	<i>Sistema de isolamento</i>	58
3.8.4.	<i>Base para suporte</i>	59
3.9.	MANUAL DE UTILIZAÇÃO	61
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1.	TESTE DE VERIFICAÇÃO.....	65
4.2.	RESULTADOS QUALITATIVOS	67
4.3.	RESULTADOS QUANTITATIVOS	69
4.4.	UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO EM CAMPO	72
5.	CONCLUSÃO.....	73
6.	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A – TABELAS DE PROPRIEDADES.....	77
	APÊNDICE B – TABELAS INFORMATIVAS	82
	APÊNDICE C – PESQUISA DE MERCADO.....	88
	APÊNDICE D – RESULTADOS ENSAIO DE FLEXÃO	89

1 INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Os materiais compósitos são materiais compostos por mais de um componente em fases separadas. Muitas vezes os conceitos de materiais compósitos e materiais compostos são idênticos e podem ser usados para se referir ao mesmo material. Eles são utilizados no lugar de materiais convencionais, como madeira, concreto, aço e metal, para alcançar necessidades sofisticadas como redução de peso, resistência a intempéries, alta durabilidade, baixo custo de manutenção e outras vantagens no desempenho [STRONG, 2008].

As vantagens mecânicas dos materiais compósitos advêm da possibilidade de se misturar dois ou mais materiais diferentes formando um terceiro material com características combinadas dos materiais em sua composição. Em contrapartida esses materiais devido as suas características não convencionais contêm diversos desafios à sua utilização. Entre elas sua natureza anisotrópica (propriedade física varia com a direção) e a precisão necessária dos processos de fabricação para garantia das propriedades desejadas [MARTINEZ, 2007].

Os materiais compósitos são formados principalmente de dois componentes que interagem entre si. Um dos materiais é definido como a matriz, o qual funciona como a estrutura do composto, e mantém todos os componentes agrupados, a matriz é constituída por polímeros de várias classes, sendo eles termorrígidos ou termoplásticos [STRONG, 2008].

Para unir a fibra a matriz é utilizado o processo de ‘cura’ que se caracteriza pelo aquecimento de uma resina termoendurecível até à temperatura de cura e partir daí a sua manutenção durante intervalos de tempo específicos que vão desde alguns segundos a várias horas ou mesmo dias. Em todos os sistemas termoendurecíveis, o processo de cura é exotérmico e o calor envolvido leva ao aumento da temperatura do material [STRONG, 2008].

O processo de cura é feito principalmente em equipamentos chamados de “autoclave” e devido à importância dos materiais compósitos para a engenharia e vista a dificuldade em controlar os parâmetros termodinâmicos de forma a garantir um processo de cura de qualidade, observa-se a necessidade de desenvolver e construir um autoclave protótipo com dados técnicos-científicos que garantem um união da matriz com o reforço de forma a satisfazer o padrão de qualidade exigido nos projetos de engenharia atuais.

1.2. Motivação

As motivações técnico-científicas desse Trabalho de Conclusão de Curso são descritas a seguir:

- Importância do processo de cura de materiais compósitos para fins de pesquisa e desenvolvimento de componentes dentro do ambiente universitário
- Possibilidade de novos trabalhos e pesquisas na área de materiais utilizando processos que exigem manutenção de temperatura e pressão
- Melhoria da infraestrutura universitária quanto aos equipamentos e máquinas com tecnologia para auxiliar projetos de engenharia

1.3. Justificativa

Este trabalho integra-se num projeto do setor de engenharia de energia/aeroespacial da Universidade de Brasília campus Gama com a finalidade de desenvolvimento de um autoclave para utilização na Universidade como equipamento de laboratório para corpos de prova e para uso das equipes de competição para confecção de peças com propriedades específicas que necessitam de um tratamento de cura a pressão e temperatura controladas.

Na indústria o equipamento principal utilizado para realizar o processo de cura é o autoclave. O autoclave é um vaso de pressão capaz de ser internamente aquecido e pressurizado de forma independente. A pressão e o calor presentes no interior da máquina oferecem as condições necessárias para reações de curas completas e assim, para a fabricação de camadas de materiais compósitos [CAMPBELL, 2004].

Este método é frequentemente utilizado principalmente na indústria aeronáutica para a cura de componentes com formas complexas, produzindo materiais laminados com elevado controle de suas propriedades físicas [DAVIES et. al., 2007].

1.4. Objetivo

1.4.1. Objetivo principal

Dimensionar, desenhar e construir um protótipo de autoclave para a cura de materiais compósitos demandados pela Universidade de Brasília;

1.4.2. Objetivos secundários

- Estudar a tecnologia dos materiais compósitos e seus processos de cura;
- Simular a uniformidade da transferência de calor em diferentes ambientes de pressão dentro do autoclave.
- Demonstrar o funcionamento do autoclave desenvolvido por meio de testes de cura de materiais compósitos;
- Estudar a influência da pressão e temperatura na cura de materiais compósitos
- Verificar a estabilidade do forno em manter temperatura e pressão constantes durante longos períodos de tempo
- Estudo do vaso de pressão

1.5. Metodologia

O trabalho foi desenvolvido seguindo algumas etapas de projeto.

Primeiramente, na fase inicial desse trabalho é feito uma **pesquisa de mercado** para averiguar quais autoclaves estão sendo utilizados no mercado e sua tecnologia atual.

No **projeto conceitual** é apresentada a metodologia de projeto, o escopo, levantamento de requisitos, escolha dos materiais e testes e a idealização da forma do autoclave que será desenvolvido para atender as necessidades encontradas na Universidade de Brasília campus Gama no Distrito Federal.

Em seguida é feito um **projeto preliminar** onde foi identificado o escopo inicial do projeto do autoclave e definido globalmente alguns detalhes técnicos e econômicos que atendem aos requisitos demandados. São definidas nesse projeto também características dimensionais do autoclave de acordo com as demandas técnicas do projeto como temperatura na parede externa, suporte a pressão de trabalho, etc.

A partir do projeto preliminar, o **projeto detalhado** é feito identificando detalhes dos materiais a serem utilizados e suas características.

A partir do projeto detalhado são feitos os **ajustes no projeto** para a construção do equipamento de acordo com a disponibilidade de recursos e o cumprimento dos objetivos do trabalho

Por fim na fase **construção do autoclave**, são explanados as etapas da construção para que sejam realizados experimentos no equipamento para validar seu uso operacional com a finalidade em que foi projetado.

1.6. Chamada

Este trabalho é dividido em 5 partes principais: Introdução, Marco teórico, Materiais e métodos, Resultados e discussão e Conclusão.

A primeira parte apresentada é a **introdução**, que aborda os aspectos introdutórios do texto, onde são descritos dados gerais, objetivos, a contextualização e a justificativa da realização desse trabalho.

A segunda parte é a **revisão bibliográfica**, onde se encontra os fundamentos teóricos necessários para entendimento do projeto, com tópicos que, individualmente, expõem temas essenciais da pesquisa, como as características de cada componente do material compósito, o processo de cura utilizado pela indústria para tratar o material composto, e os requisitos dos vasos de pressão que são utilizados nesse tipo de processo.

A terceira parte apresenta os **metodologia**. Nessa fase são descritos os projetos conceitual, preliminar e detalhado da construção do autoclave enfatizando os métodos necessários para satisfazer os requisitos do projeto, os materiais escolhidos para atender essa demanda, assim como os ajustes para a construção do projeto e o seu manual de utilização.

A quarta parte apresenta os **resultados e discussão**, contendo o teste de verificação de funcionamento do equipamento e os resultados obtidos durante no processo de cura do material.

Por fim, a quinta parte apresenta a **conclusão**, onde são apresentadas as considerações finais acerca do projeto, uma análise dos resultados obtidos com os objetivos do projeto, as dificuldades do projeto e as propostas para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos gerais dos materiais compósitos

Alguns autores sugerem uma definição alternativa e mais completa de compósitos: misturas de dois ou mais materiais sólidos que são mecanicamente separáveis, pelo menos em teoria e possuindo propriedades complementares. Os termos "compósitos" ou "materiais compósitos" são geralmente utilizados, se referindo a materiais sólidos compostos por uma pasta ou matriz que envolve os materiais responsáveis pelos reforços. As matrizes de maior importância no mercado são as poliméricas, metálicas e cerâmicas. Geralmente, para todos esses materiais de matriz, os reforços considerados são fibras. As fibras de maior importância no mercado são as fibras de carbono, fibras de grafite e fibras de vidro[STEPANSKI, SIGWALT, 2008].

As propriedades dos compósitos variam de acordo com os materiais que a compõe, mas em relação a outros materiais tem características únicas para diferentes aplicações. A comparação de algumas propriedades de materiais compósitos em relação ao alumínio e ao aço é apresentada na figura 1. Esses gráficos podem não ter grande precisão, porque agrupam todos os compósitos em um grupo, e todos os tipos de aço e alumínio em outros dois, mas os dados refletem corretamente as tendências gerais.

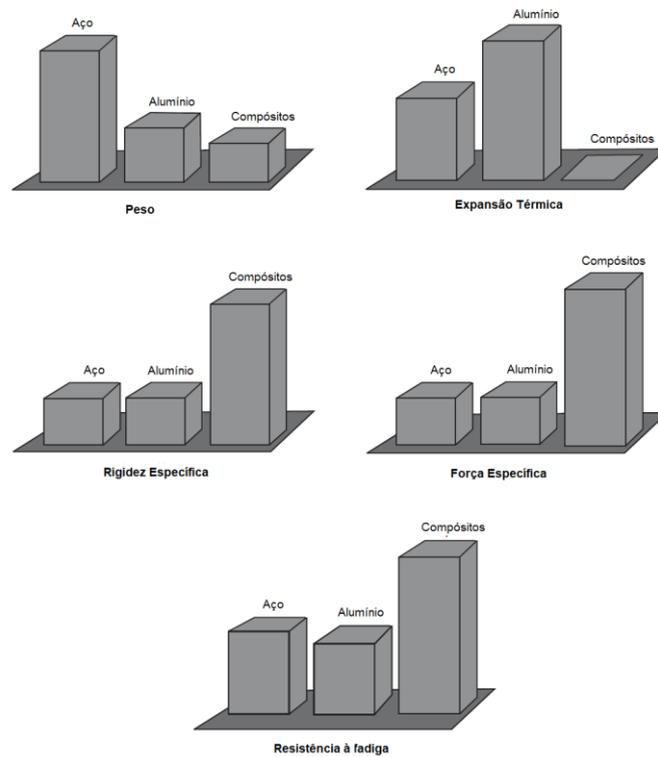


Figura 1: Comparação de propriedades mecânicas entre compósitos, aço e alumínio.

Fonte: Adaptado de A.B. Strong (2008)

Fica evidente na figura o baixo peso, baixa expansão térmica, alta rigidez, alta força específica e alta resistência à fadiga dos compósitos versus aço e alumínio. As características separadas da matriz e dos reforços contribuem de forma sinérgica para as propriedades globais do compósito. Além disso, porque podem ser escolhidos tantos materiais de matriz e reforço diferentes, é possível uma ampla gama de propriedades, tornando este um material de grande valor para a engenharia. Dentro de uma escolha particular de matriz e reforço, podemos obter ainda, uma variedade adicional de propriedades do composto através das: orientações dos reforços, método de fabricação, condições de processamento e combinações feitas com outros materiais. [STRONG, 2008].

Os materiais convencionais devem sempre ser comparados aos materiais compósitos em relação as demandas econômicas, estruturais e físicas do projeto. Para essa análise de acordo com Strong (2008) algumas das principais vantagens dos materiais compósitos são:

- Leveza;

- Alta rigidez e força específicas;
- Facilmente moldável a formas complexas (líquidas);
- Boa resistência à fadiga;
- Bom amortecimento;
- Baixa expansão térmica;
- Propriedades personalizadas (anisotrópicas);
- Baixa condutividade elétrica.

No entanto não existem só vantagens ao se utilizar materiais compósitos. Algumas das desvantagens desses componentes de acordo com Strong (2008) são:

- Falta de regras de design consolidadas;
- Os projetos para uso de metal e compósitos raramente são equivalentes;
- Dificuldades de fabricação por ser manual, lento, problemática para o meio ambiente, pobre em confiabilidade;
- Baixa ductilidade, que pode levar o material a articulações ineficientes e aumento de estresse mais crítico que nos metais;
- Custo dos materiais componentes do compósito, em especial as fibras que tornam o material mais caro.

Como as características dos compósitos diferem bastante dos materiais estruturais convencionais, precisamos analisar em quais áreas os materiais compósitos são atrativos em nossa sociedade para compreender sua importância.

2.2. História dos compósitos

2.2.1. Evolução histórica

Os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos de maneira definitiva a partir da década de 60 na indústria aeroespacial. Na época muitos engenheiros propuseram desenhos de aeronaves que não podiam construir. Por isso para atender as necessidades de desempenho de voo, era necessário flexibilizar os projetos estruturais [ZANATTA, 2000].

A velocidade de adoção dos materiais compósitos na indústria foi muito mais rápida do que se estimava nos anos 70. Seu uso evoluiu principalmente nos campos de aviação militar e experimental devido principalmente a duas propriedades muito importantes pro setor aeronáutico: alta resistência mecânica e baixo peso [ZANATTA, 2000].

Com o passar do tempo, o uso de compósitos se estendeu a vários componentes de uma aeronave tanto experimentais quanto comerciais. Hoje em dia as indústrias aeronáutica e aeroespacial já fazem uso de compósitos na fabricação de componentes sem exigência estrutural primária como observado na figura 2 [REZENDE, BOTELHO, 2000].

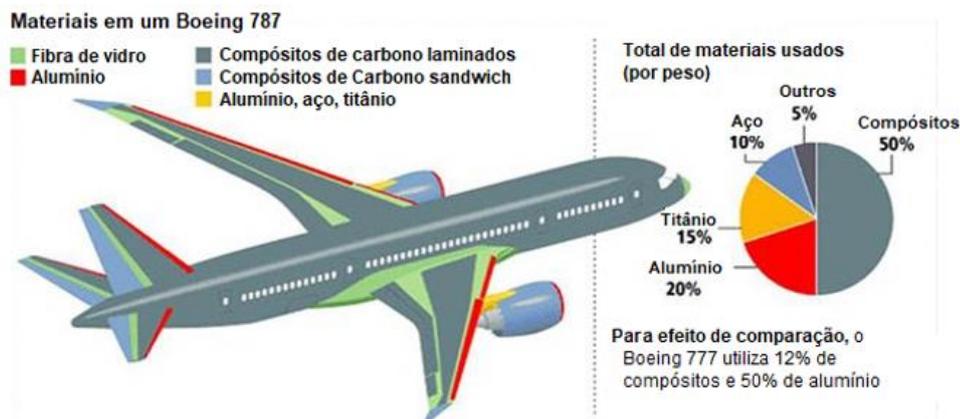


Figura 2: Uso de materiais compósitos na estrutura de um Boeing 787.

Fonte: Hangar33 (2015)

Na Indústria de energia os compósitos são utilizados em aplicações em células a combustível como eletrodos e componentes estruturais. Suas propriedades mais interessantes são a resistência a corrosão, baixa expansão térmica e suas boas propriedades elétricas [REZENDE, BOTELHO, 2000];

Outra grande aplicação no cenário energético é a utilização do material composto nas pás eólicas, que já foram fabricadas de madeira, aço e alumínio, mas atualmente os materiais mais comuns para o rotor eólico são fibras de vidro e carbono com matrizes poliméricas, como poliéster, epóxi e éster-vinílica. Esses materiais permitiram a fabricação de rotores que atendessem a exigências de projeto complexas como: baixa densidade do material, elevado

módulo de elasticidade, bom isolamento elétrico, resistência a fadiga e a corrosão [DUTRA, 2001].

Dos outros setores em que os materiais compósitos estão sendo utilizados temos:

- Indústria automotiva com discos de freio em carros de Fórmula 1 e trens de alta velocidade;
- Construção civil com componentes com exigências estruturais em hastes, estacas e tubos de menor peso, boa resistência a corrosão, boa resistência e rigidez mecânicas e a preços competitivos;
- Na área médica como próteses ortopédicas internas e externas;
- Em sistemas de antenas devido suas propriedades de reflexão de radiofrequências;
- Na fabricação de artigos esportivos como tacos de baseball, hóquei, varas de pescar, estruturas de bicicletas, etc.
- Utilizado como reforço filamental em tubos de pressão devido aos esforços de tração no sentido circunferencial [MARTINEZ, 2011].

2.2.2. Perspectivas futuras

Em todas as áreas observamos crescimento do uso de compósitos e redução cada vez maior de custos, assim como o desenvolvimento contínuo de materiais com melhores desempenhos. O desafio de fabricação de componentes com funções múltiplas leva a uma evolução na pesquisa em materiais compósitos. Esses materiais contribuem de forma fundamental aos avanços tecnológicos na área de engenharia.

Na esfera social há um desenvolvimento progressivo na formação de recursos humanos cada vez mais capacitados devido à complexidade de trabalho exigida na área de materiais compostos. Este desenvolvimento tende a se consolidar cada vez mais com o aumento na escala produtiva de materiais compostos e seu uso nas diversas áreas de engenharia, ciência e lazer.

2.3. Propriedades dos reforços

2.3.1. Utilização das Fibras

Os reforços em materiais compósitos são quase sempre compostos por fibras de diferentes materiais. Sendo assim no contexto de compósitos podemos nos referir a reforços e fibras com significados semelhantes.

As fibras agregam diversas propriedades mecânicas ao compósito de acordo com o projeto, sendo elas, força, rigidez, apoio as cargas aplicadas, entre outras. As suas propriedades mecânicas no caso dos compósitos são muitas vezes anisotrópicas, ou seja, variam suas propriedades de acordo com a direção e disposição geométrica das fibras, sendo em geral, as maiores propriedades mecânicas adquiridas ao longo das direções em que as fibras estão dispostas. Se for necessário um suporte de cargas em mais de uma direção, o projetista pode especificar um direcionamento múltiplo de fibras em várias camadas para se adequar as condições de carga do projeto. No caso dos metais por exemplo em sua maioria são isotrópicos (mesmas propriedades mecânicas em todos as direções) [STRONG, 2008].

Essa característica da disposição de fibras levou ao desenvolvimento de vários métodos específicos de fabricação e utilização de materiais compósitos na Engenharia, assim como a adaptação de métodos tradicionais de fabricação para o uso de compósitos. Como exemplo do uso específico de materiais compósitos devido ao seu direcionamento de carga a Aeronave experimental Grumman X-29 contém asas com enflexamento negativo, onde em materiais convencionais o esforço da asa tende a dobrar da ponta até a raiz. Nessa asa as fibras são direcionadas para suportar esse esforço da ponta à raiz permitindo uma geometria única da asa do avião (STEPANSKI, SIGWALT, 2008).

As fibras, como estrutura de materiais compostos, podem ser feitas de vários materiais diferentes dependendo do objetivo que se quer alcançar com o material. As fibras mais utilizadas na indústria de compósitos de alta performance, assim como suas características, são descritas na tabela B.5 no apêndice B:



Figura 3: Grumman X-29

Fonte: (STEPANSKI, SIGWALT, 2008)

2.3.2. Tipos de Fibras

As formas mais simples de disposição de fibras são em pacotes de filamentos, que podem ser chamados de cordões, reboques ou corda simples dependendo do tipo de fibra ou se é torcido ou não. As fibras também podem ser tecidas em pano e suas propriedades variam de acordo com o entrelaçamento usado para fazer o pano. Em alguns casos os padrões são escolhidos de acordo com a propriedades mecânicas desejáveis do material, em outros casos o foco é a forma, ou seja, a conformidade entre a forma do tecido de reforço e a forma da peça [STRONG, 2008].

Para suprir demandas ainda mais complexas de materiais são feitas malhas e tranças de fibras para atender a múltiplos esforços. A forma mais comum de fabricação de compósitos avançados é o método de combinação das propriedades da resina com as propriedades do reforço chamado Prepreg [STEPANSKI, SIGWALT, 2008].

Prepreg é a abreviação de “pré-impregnated fibers” e é um processo onde o tecido de fibras em forma de folha, unidirecional ou multidirecional, é impregnado ou “molhado” com a resina. O fabricante posiciona as folhas pré-impregnadas no molde, as comprime para remover o ar e por último aquece o material prepreg para moldagem e cura [STEPANSKI, SIGWALT, 2008]. Uma ilustração do método prepreg unidirecional e multidirecional pode ser visto na figura 4 abaixo.

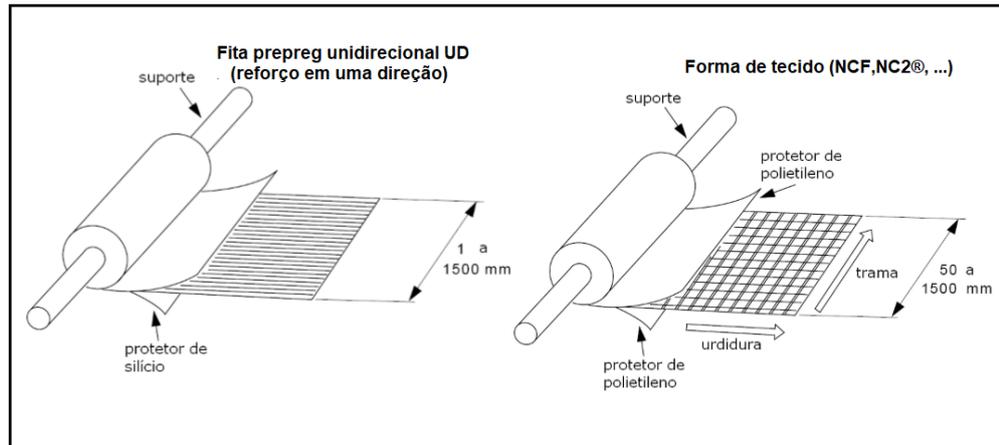


Figura 4: Folha de Prepreg em fita unidirecional UD e em tecido

Fonte: Manual Prepreg Technology, 2008

As peças de compósitos reais são tridimensionais, onde essencialmente várias camadas laminadas bidimensionais de fibras são dispostas uma em cima da outra. Essas camadas de laminados podem ser feitas a partir de matrizes em cada camada ou de laminados unidirecionais como mostrado na figura 5.

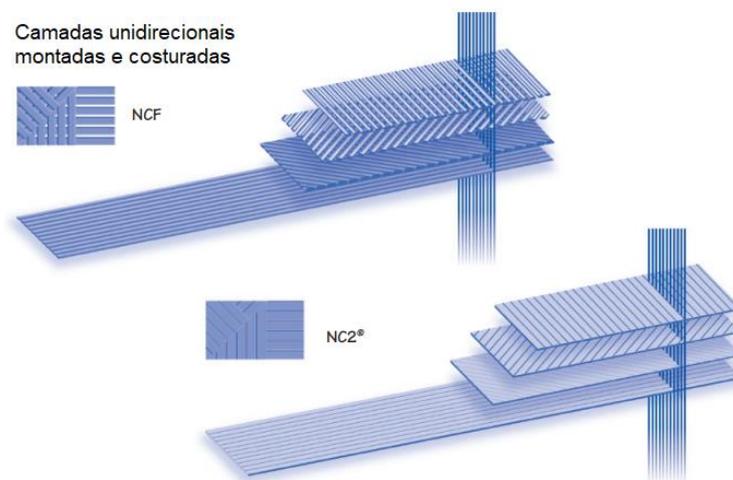


Figura 5: Disposição de tridimensional de fibras em camadas do tipo NCF e NC2

Fonte: Manual Prepreg Technology, 2013

Os reforços atualmente tanto bidimensionais quanto tridimensionais estão sendo moldados para se adequarem à forma final da peça, onde numa etapa posterior é adicionada a resina já no formato final. A diferença nas propriedades das disposições das fibras pode ser vista na tabela B.1 do apêndice B:

2.4 Propriedades da matriz

2.4.1 Resinas poliméricas

A matriz pode ser chamada de resina e é parte moldável do compósito. Sua característica principal é dá forma a estrutura envolvendo as fibras em sua fase contínua e apoiando todas camadas do material na sua forma projetada. A resina pode ser facilmente moldável e após o processo de cura, mantém sua forma. Os materiais mais comuns com essa característica são os polímeros, por isso, mais de 90% dos compósitos utilizam materiais poliméricos em sua matriz [STRONG, 2008].

A matriz é a parte do composto exposta ao ambiente externo, logo, uma de suas funções é a proteção do material de reforço estrutural às intempéries do ambiente a que o material está inserido. Como exemplo temos altas temperaturas, corrosão, campo elétrico, entre outros. Ela também é a primeira a entrar em contato com esforços independente de aonde eles estejam aplicados. Mas como suas propriedades mecânicas não são preparadas para resistir a esses esforços, é papel da matriz redistribuir as cargas para as fibras que reforçam a estrutura onde estas têm propriedades estruturais bem mais pronunciadas.

As resinas mais utilizadas em compósitos são as termofixas, que são líquidas ou sólidas facilmente fundidas à temperatura ambiente. Essas resinas são moldadas à temperatura ambiente e em seguida são solidificadas por um processo diferente do congelamento, onde na verdade ocorre o aquecimento ou cura do polímero no qual são formados vínculos entre as moléculas. Esses vínculos, também chamados de ligações cruzadas, mudam as propriedades naturais do material onde este não é mais líquido com a temperatura ambiente e não é derretido com o reaquecimento do material tornando-se fixos com a transferência de calor. Em temperaturas muito altas, porém, a resina pode degradar. Alguns termofixos comuns incluem: poliéster insaturado, éster vinílico, epoxi, bismaleimida, fenólico e cianoacrilato. Sendo alguns destes muito importantes em compósitos [STRONG, 2008].

2.4.2. Tipos de resinas

O mercado de compósitos é dominado por poliésteres insaturados e epóxis, mas várias usinas especiais são utilizadas para suprir necessidades críticas onde, propriedades únicas de cada compósito são utilizadas. As resinas especiais representam cerca de 20% do mercado total de compósitos, para compósitos de alta performance as resinas mais utilizadas são os epóxis, as fenólicas e as poliimidadas [STEPANSKI, SIGWALT, 2008]. Existem várias resinas utilizadas em materiais compósitos. As características das principais delas e suas vantagens são expostas na tabelas B.2 e B.3 em anexo.

O gráfico da figura 6 sintetiza as temperaturas de operação para os principais tipos de matrizes e compara também metais de alta performance. Podemos analisar que o epóxi apesar de boas propriedades mecânicas não é utilizado para operações em altas temperaturas. Para exposições mais longas ao calor se utiliza poliamidas como o BMI e a resina de carbono, onde esta chega a temperaturas de operação ainda mais extremas.

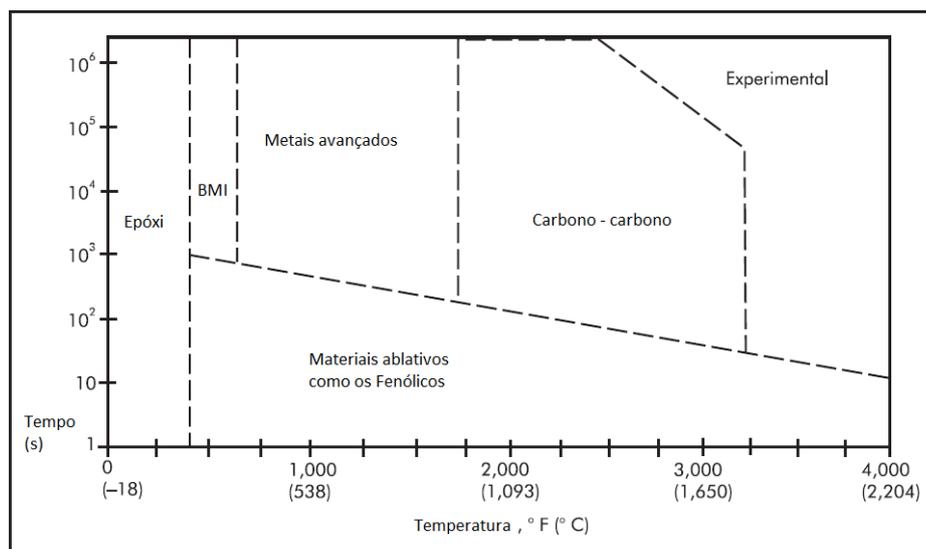


Figura 6: Gráfico dos efeitos da temperatura e tempo de exposição na capacidade de materiais de manterem suas propriedades

Fonte: adaptado de STRONG, 2008

2.5 Métodos de cura e moldagem de compósitos

Existem diversas técnicas para cura e moldagem de compósitos desde algumas mais simples até outras mais complexas e mais precisas. A primeira e mais simples técnica para moldagem de compósitos é a moldagem aberta a partir da colocação de fibras e em seguida da resina em um molde aberto, a resina deve molhar completamente as fibras e em seguida o material é curado. Esse processo onde as fibras e as resinas são colocadas praticamente ao mesmo tempo no molde é chamado de “molhado”. Existem duas formas comuns de colocação de fibras no molde. O método Lay-up com colocação das fibras no molde e o método spray-up com o corte e pulverização de fibras no molde.

Embora os métodos mais simples possam ser utilizados em materiais avançados, normalmente são utilizados outros processos visando superar alguns possíveis problemas para a indústria de compósitos avançados. Os principais problemas dos métodos de spray-up e lay-up são:

- dificuldade em alinhar as fibras exatamente nas direções desejadas;
- dificuldade em otimizar a quantidade de fibras para alcançar as propriedades mais altas possíveis;
- dificuldade em controlar a relação fibra / resina;
- dificuldade em reduzir o conteúdo vazio;

Os materiais mais utilizados para a indústria de materiais compósitos avançados de molde aberto são os pré-impregnados ou “prepreg”. A utilização dessa técnica resolve boa parte dos problemas dos métodos mais artesanais, isso se deve a algumas características que aumentam a precisão na obtenção de características importantes do material prepreg como:

- As fibras são cuidadosamente orientadas para que tenham a direção correta de resistência a esforços demandados pelo projeto da peça;
- As camadas de prepreg são colocadas muitas vezes em várias direções até atingirem a espessura desejada;
- A cura é geralmente feita sob condições de vácuo e/ou alta pressão reduzindo assim os vazios e permitindo uma maximização do conteúdo da fibra.

Na maioria dos casos a cura acontece em um autoclave. Os objetivos principais desse sistema de moldagem aberta para compósitos avançados são:

- Controle a orientação e localização da fibra;

- Controle a espessura da camada;
- Controle a relação fibra-resina;
- Minimizar o conteúdo vazio;
- Reduzir os estresses internos.

2.6 Equipamentos para cura de materiais compósitos

2.6.1. Autoclave

O autoclave é uma máquina de pressão que permite a imposição simultânea de pressão (a vácuo ou positiva) e calor. O maior desafio no uso do autoclave é o seu custo, que é alto devido aos regulamentos de código de pressão rigorosos que um vaso de pressão deve seguir por lei. A norma brasileira que regulamenta os requisitos mínimos para construção de caldeira e vaso de pressão é a NBR 16035. No entanto, como muitas peças podem ser curadas no autoclave, o custo de mão-de-obra por peça pode ser bastante reduzido.

Na maioria dos autoclaves existe um sistema de controle de temperatura e pressão que permite o ciclo programado de aquecimento e pressurização em função do tempo. Geralmente diferentes tipos de resina em variadas aplicações exigem ciclos de cura diferentes para a obtenção das suas melhores propriedades.

No processo de cura a partir de um vácuo e um autoclave, depois que as camadas de prepreg são colocadas no molde é aplicado um vácuo para que todas as bolhas de ar entre as camadas e quaisquer voláteis presentes sejam removidos. Após desinchar a peça é colocada no autoclave para ser curada com aplicação de pressão e temperatura para que as camadas sejam embaladas ainda mais apertadas, reduzindo assim ainda mais o conteúdo vazio e permitindo que a resina escorra entre as camadas do laminado, melhorando a consolidação da peça. Após a cura a pressão é removida e a peça finalizada [STRONG, 2008].

Os autoclaves são muitas vezes preenchidos com gás inerte em seu interior a fim de evitar qualquer tipo de oxidação que possa ocorrer na peça ou no molde durante o ciclo de cura. Um gás muito utilizado devido a seu custo e suas propriedades inertes é o nitrogênio. Em alguns

casos um ventilador é utilizado para espalhar o gás na câmara interna do autoclave como no esquema representativo de um autoclave industrial na figura 7 abaixo [STRONG, 2008].

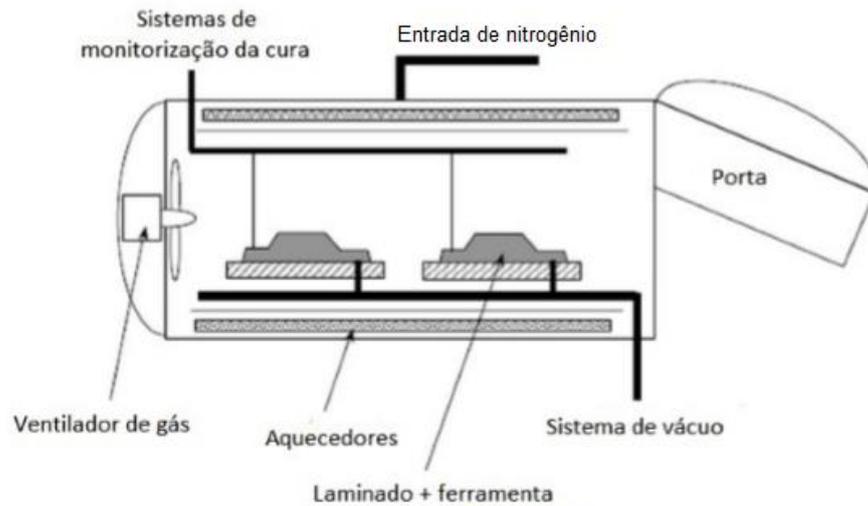


Figura 7: Esquema representativo de um autoclave industrial.

Fonte: Adaptado de PLÁCIDO A.C., 2014

Além do processo de cura, o autoclave pode servir também para ajudar na ligação de peças num processo chamado de co-cura, onde a pressão além de auxiliar a cura também garante que as peças mantenham contato íntimo para que a ligação seja feita corretamente.

2.6.2. Cura sem autoclave

O processo de cura pode ser feito sem um autoclave. Alguns meios de pressurizar o prepreg incluem o uso de bolsas internas a vácuo ou materiais que se expandem dentro de um molde fechado para comprimir a peça. Outro método muito utilizado na fabricação de peças tubulares, principalmente em artigos esportivos é o Enrolamento de Tubo onde a compactação é feita envolvendo o compósito em um mandril em que é aplicada uma fita retrátil para pressionar o prepreg enquanto este é enrolado.

2.7. Tipos de autoclave

Autoclave é um vaso de pressão que permite a aplicação de calor, pressão e vácuo em um volume útil dentro do equipamento. Sua utilização abrange as mais diversas áreas, pois qualquer aplicação de temperatura e pressão pode ser feita utilizando um autoclave. Neste tópico detalharemos apenas alguns dos usos mais comuns do equipamento.

O autoclave para esterilização utiliza calor úmido (com presença de vapor d'água) e pressão para esterilização de peças e têm sua utilização nas mais diversas áreas como: laboratórios químicos, laboratórios farmacêuticos, laboratórios médicos, hospitais e demais ambientes de saúde. Para a esterilização material sujo ou contaminado, primeiramente o material é colocado dentro do autoclave. Em seguida, a resistência ou chama aquece a água até a sua evaporação. A pressão dentro do autoclave é controlada e os microrganismos em contato com o vapor de água, e alta temperatura são exterminados do material.

O autoclave para tratamento de madeira é usado para prevenir a deterioração da madeira e ampliar sua vida útil, o tratamento químico comumente aplicado é o de fixação de elementos preservativos na madeira, tornando-a mais resistente à ação de intempéries, principalmente de organismos vivos como fungos e insetos. A impregnação de inseticidas e fungicidas na madeira só é possível a partir do processo de autoclavagem que consiste na impregnação da solução num vaso de pressão que aplica vácuo e pressão positiva seguida da secagem para retirada da humidade.

Outra aplicação importante do autoclave é para vulcanização da borracha, que quando submetidas a altas temperaturas e em presença de ativadores sofrem mudanças físicas e químicas devido a ligações cruzados que ocorrem em seus polímeros. O ativador mais comum no processo de vulcanização é o enxofre, e esse processo é feito em um autoclave por diversas formas, desde contato direto com o vapor de água em altas temperaturas, vulcanização através de contato indireto com o vapor quente, ou até mesmo autoclave aquecido por resistências elétrica com ar ou gás nitrogênio para evitar oxidação.

O autoclave para cura de materiais compósitos é o foco do trabalho, onde o autoclave nada mais é que um vaso de pressão onde o material compósito pode ser curado a partir do controle de vácuo, temperatura e pressão. Mais detalhes de como o processo de cura do autoclave é descrito no tópico 2.6.1.

Existem muitas outras aplicações do autoclave como autoclavagem de vidros, cocção de alimentos, etc. Esse equipamento pode ser usado em escala laboratorial como os autoclaves para esterilização em laboratórios e hospitais ou em escala industrial, como os autoclaves para tratamento de madeira, vulcanização de borracha e cura de materiais compósitos.

2.8. Norma para construção do Vaso de Pressão

2.8.1. História da normatização de vasos de pressão

Nos primórdios do século XIX com a revolução industrial iniciou-se o uso intensivo de máquinas a vapor. A partir de então já surgiu a necessidade de regulamentar projetos de construção de vasos de pressão devido as frequentes explosões que aconteciam na época [MARCHORREDDO, 2008].

Em 1815 em Londres depois de uma explosão catastrófica, o parlamento britânico passou a exigir que todas as caldeiras fossem construídas a ferro forjado, com tampos hemisféricos e com duas válvulas de segurança que representaram na época um grande avanço tecnológico. Também na Filadélfia em 1817 começou a regulamentação de testes hidrostáticos e rotinas de inspeção sobre as caldeiras, mas o aspecto de normalização e padronização de vasos de pressão só foi ser consolidado em 1911 com o código ASME (American Society of Mechanical Engineers) feito a partir de uma comissão especial incumbida de redigir a primeira norma de vasos de pressão e caldeira após uma grande explosão em Brockton, Massachusetts que causou 58 mortos e 117 feridos [MARCHORREDDO, 2008].

O código ASME consolidou e unificou diversas normas já existentes nos Estados Unidos sendo o primeiro código utilizado em larga escala para padronizar vasos de pressão. A cada três anos é publicada uma nova edição do código que é atualmente o mais utilizado no mundo. Na Inglaterra em 1976 surgiu a norma BS 5500 publicada pela British Standards Institution e baseada em critérios da norma internacional ISO. Na Alemanha a norma legal obrigatória utilizada é a A.D. merckblatt publicada pelo grupo de trabalho para vasos de pressão Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter que especifica exigência de materiais, fabricação e inspeção de vasos de pressão [MARCHORREDDO, 2008].

2.8.2 Características de um vaso de pressão

O corpo do vaso de pressão é chamado de casco, e é ele que faz o papel de “parede” na estrutura, aguentando os esforços mecânicos e envolvendo o volume útil do vaso de pressão. A maior parte dos cascos de vasos de pressão são os cilíndricos, devido a sua facilidade de fabricação, de transporte, aproveitamento de chapas inteiras para fabricação do vaso e é adequado à maioria dos serviços. Outros formatos comuns, porém menos utilizados de casco são os cascos esféricos e cônicos, além de combinações de vários cascos cilindros e cônicos [MARCHORREDDO, 2008].

Os cascos podem ser verticais, horizontais ou inclinados. Essa disposição depende muito do fluido de trabalho e da função do vaso de pressão. Os vasos verticais são mais caros, porém ocupam menor área de terrenos sendo preferíveis quando espaço for uma prioridade no local em que ele é instalado. Os vasos horizontais são mais comuns e mais baratos, sendo os vasos inclinados os mais raros, sendo usados em condições específicas como escoamento de materiais com difícil escoamento [MARCHORREDDO, 2008]. Alguns tipos de cascos podem ser vistos abaixo:

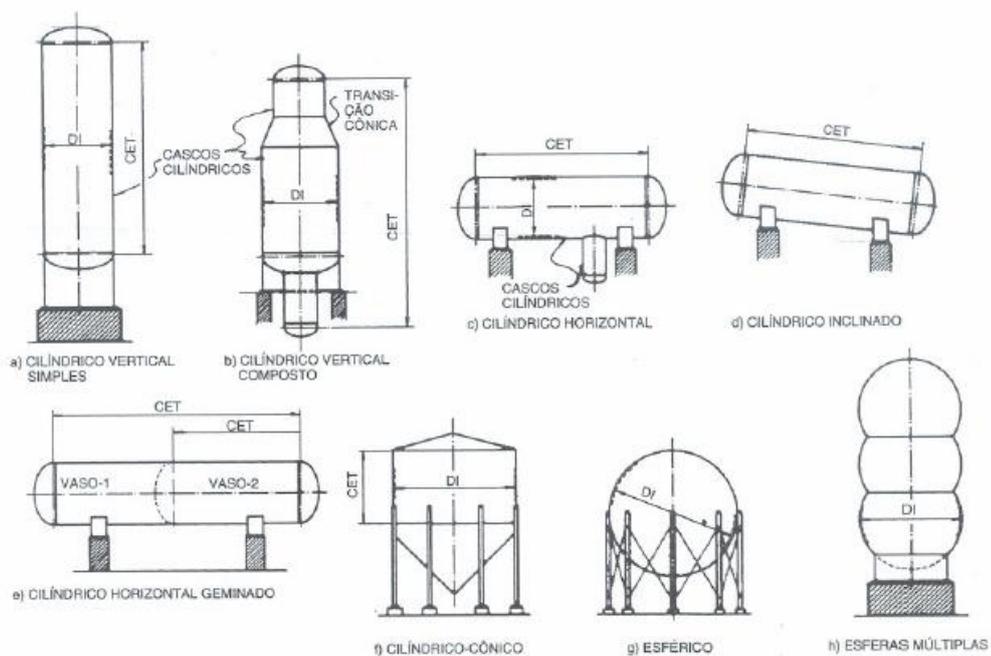


Figura 8: Tipos de vaso de pressão

Fonte: [MARCHORREDDO, 2008].

Os tampos dos vasos de pressão são as peças que abrem e fecham os cascos cilíndricos e fazem o papel da “porta” na estrutura. O seu dimensionamento é extremamente importante pois além dos esforços de pressão é necessário dimensionar a estrutura que abre e fecha o tampo de forma a vedar o fluido dentro do vaso de pressão impedindo vazamentos de pressão, temperatura e matéria do seu interior [MARCHORREDDO, 2008].

Os tipos mais comuns de tampo são os elípticos, toriesféricos, hemisféricos, cônicos e planos:

Os **tampos hemisféricos** são os mais resistentes podendo ser construídos com a metade da espessura do casco. Porém são os mais difíceis de construir e ocupam mais espaço devido a sua altura. São usados em vasos horizontais, verticais maiores que 10 metros e pequenos vasos a altas pressões.

Os **tampos elípticos** têm seções transversais como o de uma elipse, esse tampo geralmente tem a mesma espessura do casco cilíndrico, pois sua resistência é praticamente igual ao casco cilíndrico de mesmo diâmetro

Os tampos mais utilizados são os **tampos toriesféricos**, que consistem numa calota central esférica de raio R_c e uma seção toroidal de concordância de raio R_k . Os tampos toriesféricos são sempre menos resistentes que os elípticos, sendo assim, sua espessura será sempre maior que o do casco cilíndrico. Em compensação são bem mais fáceis de construir, ocupam pouco espaço, são de melhor construção e menor a resistência quanto menor for o R_k . Seu formato mais resistente é o de falsa elipse, pois quanto mais próximo da elipse, mais resistente o tampo fica.

Os **tampos cônicos** são os menos resistentes e menos usados devido a sua geometria, sendo utilizados principalmente no tampo inferior de vasos de pressão verticais que necessitam esvaziamento rápido e completo.

Os **tampos planos** são os tampos que possuem maior variedade de fabricação, podendo ser presos por solda, rosqueáveis, removíveis a partir de anéis rosqueados, removíveis a partir parafuso e porca, entre outros. Estes tampos geralmente possuem espessura bem maior que os cascos cilíndricos devido a sua baixa resistência.

2.8.3 Norma brasileira para fabricação de vaso de pressão

No Brasil a norma que especifica os requisitos mínimos que devem ser adotados para a construção de caldeiras ou vasos de pressão é a ABNT NBR 16035, que está em conformidade com a ABNT NBR ISO 16528. Esses requisitos são estabelecidos pela ABNT para garantir que os vasos de pressão construídos tenham maior nível de confiabilidade quanto a sua segurança e sejam os mais uniformes possíveis, independente do código de construção adotado.

A NBR 16035 cujo título é “Caldeiras e vasos de pressão – Requisitos mínimos para construção” conta atualmente com 5 partes:

- **ABNT NBR 16035-1: 2012 Ed 2:** Geral.

Esta parte da norma especifica os requisitos mínimos para construção de caldeiras e vasos de pressão, sendo os requisitos específicos abordados em outras partes da norma.

- **ABNT NBR 16035-2: 2012 Ed 2:** Conforme ASME Code Section I.

A segunda parte da norma utiliza como referência o padrão americano ASME para abordar requisitos específicos para a construção de caldeiras.

- **ABNT NBR 16035-3: 2012 Ed 2:** Conforme ASME Code Section VIII, Division 1.

A divisão 1 da seção VIII do código ASME é a norma de vasos de pressão mais difundida em grande parte do mundo e no Brasil sendo referenciada na terceira parte dessa NBR.

Nesta divisão estão incluídas no escopo todos os vasos de pressão, exceto:

- Vasos sujeitos a chama;
- Vasos para ocupação humana;
- Vasos com pressões de operação entre 0 a 1 kg/cm² ou acima de 200 kg/cm² ;
- Vasos para água pressurizada com pressão de operação até 20 kg/cm² e temperatura até 99 °C;

- Vasos para água quente com carga térmica até 200000 BTU, capacidade até 0,45 m³ e temperatura de operação até 93 °C;
- Vasos com diâmetro até 6’.

- **ABNT NBR 16035-4: 2013:** Conforme ASME Code Section VIII, Division 2 A divisão 2 da seção VIII do código ASME são as chamadas “regras alternativas de projeto” que contém uma tecnologia mais avançada de projeto. No escopo dessa norma abrangida pela quarta parte dessa NBR estão os todos os vasos de pressão sem limite de pressão máxima, incluindo os vasos instalados em embarcações e vasos sujeito a chama desde que não abrangidos nas seções I, III e IV do código ASME.

- **ABNT NBR 16035-5: 2013: vasos de pressão não sujeito a chama – Padrão Europeu.**
A última parte dessa NBR está de acordo com a norma europeia EN 13445, que é utilizado na União Européia desde 2002 e contém as normas para todos os tipos de vasos de pressão.

2.9. Simulação Numérica

Após os cálculos dos parâmetros do autoclave, uma forma complementar de validar os parâmetros é fazendo uma simulação numérica utilizando um software de simulação.

A tecnologia do uso de um software de simulação consiste no uso de métodos matemáticos e a ferramenta de cálculo computacional para simular uma situação física real. Esse método de teste computacional tem a vantagem que a interação de erros de projeto e adaptação é muito mais barata já que não envolve fabricação de protótipos e descarte de peças mal dimensionadas. A simulação computacional permite adequar o projeto ao máximo do problema demandado antes de iniciar sua construção e teste.

O ANSYS é um software de uso geral, usado para simulações com interações de várias disciplinas da física como: estruturas, vibração, dinâmica dos fluidos, transferência de calor e eletromagnetismo. O ANSYS permite simulações 3D em ambiente virtual para determinar e

melhorar pontos fracos, calcular o tempo de vida útil de uma peça, prever problemas prováveis entre outros.

O autoclave é um exemplo de produto desenvolvido que pode ser trabalhado na plataforma Workbench do Ansys. Uma simulação para transferência de calor pode ser feita para simular o sistema de aquecimento e uma simulação de estruturas pode ser realizada para simular os esforços devido à alta pressão interna no autoclave.

2.10. Processo de cura da resina Epóxi

A resina que será foco desse trabalho é a resina epóxi devido a sua extensa utilização em compósitos avançados, com ótimas propriedades mecânicas e custo moderado. O epóxi por ser um termofixo necessita da realização das ligações cruzadas no seu processo de cura.

A temperatura de cura do epóxi depende fortemente da natureza da resina e do endurecedor, sendo que algumas delas não reagem prontamente a temperatura ambiente, necessitando de temperaturas mais altas para um bom nível de cura. As elevadas temperaturas também ajudam no aumento de probabilidade de colisão entre resina e endurecedor resultando em mais reações de ligações cruzadas [STRONG, 2008].

O desempenho do polímero está relacionado a temperatura de cura. Onde como explicado na seção 2.4.1, a temperatura máxima de operação do polímero não deve ultrapassar a temperatura de transição vítrea do polímero. Sendo ela maior quanto mais ligações cruzadas a resina tiver e quanto maior for a temperatura de cura. Portanto, para resinas epóxi com elevada temperatura de operação, são necessárias elevadas temperaturas de cura. A temperatura de cura para usinas epóxis comuns está em torno de 80°C. Para desempenhos térmicos melhores ou para resinas mais difíceis de reticular (ligações cruzadas), a temperatura de cura utilizada pode chegar a 180°C [STRONG, 2008].

O ciclo de cura da resina Epóxi de alta resistência a temperatura pode ser vista no gráfico abaixo:

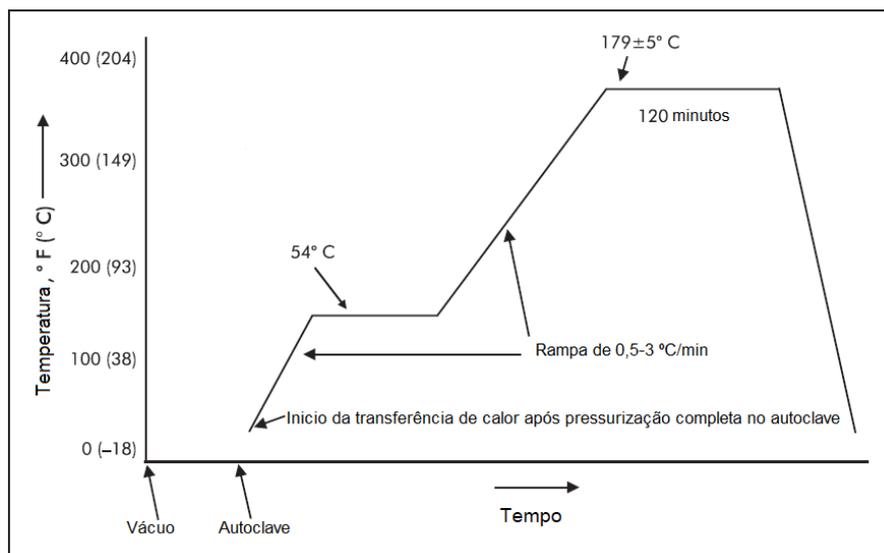


Figura 9: Ciclo de cura de uma resina epóxi

Fonte: adaptado de Strong, 2008

2.11. Interesse educacional

No ambiente universitário muitos estudos científicos são desenvolvidos. No Brasil a Universidade tem papel tão fundamental no desenvolvimento regional devido sua geração de conteúdo e conhecimento, que o Estado Brasileiro investe parte da verba pública para fomentar pesquisas e formas profissionais especializados nas mais diversas áreas do conhecimento.

Na UnB (Universidade de Brasília) existem vários cursos superiores na área científica e de engenharia, onde alunos de graduação, mestrado e doutorado estão sempre desenvolvendo pesquisas científicas para suas dissertações, para projetos científicos ou até mesmo equipes de competição.

O campus Gama da UnB, também conhecido como FGA (Faculdade Gama) tem uma demanda muito alta de equipamentos avançados para trabalhos em engenharia, pois contém em seu espaço variados cursos de graduação e mestrado em engenharia nas áreas de: aeroespacial, automotiva, energia, eletrônica e software.

Na FGA existem várias equipes de competição de aeromodelismo, baja, carros de competição, modelos de foguetes, entre outras que produzem máquinas para competições de nível nacional. Algumas dessas máquinas necessitam de peças de alto desempenho que podem

fazer uso de materiais compósitos como por exemplo na longarina da asa de um avião de aeromodelismo, a coifa e as aletas de um foguete.

Para uso em pesquisas científicas, trabalhos de conclusão de curso e equipes de competição existe uma demanda na FGA por um autoclave para cura de materiais compósitos. Os resultados do crescimento intelectual atingido com o uso desse equipamento na universidade são inestimáveis.

3. METODOLOGIA

O processo de desenvolvimento de um autoclave deve seguir as normas técnicas brasileiras devido à periculosidade de se trabalhar com vasos de pressão. A norma seguida no Brasil para vasos de pressão é a NBR 16035 partes 1 e 3, sendo a parte 1 as normais gerais para vasos de pressão e caldeiras e a parte 3 apresenta os requisitos específicos para construção de vaso de pressão de acordo com a norma ASME Seção VIII Divisão 1.

Para esse desenvolvimento é necessário determinar o escopo do projeto assim como seus requisitos, definir a escolha dos materiais e sua forma, calcular o seu volume, pressão de trabalho, a espessura de segurança do vaso assim como a espessura da sua tampa, dimensionamento da potência do autoclave, das resistências elétricas, desenhar e simular o comportamento termodinâmico do forno, dimensionar o sistema de controle de temperatura e pressão, construir e testar.

A metodologia será dividida em seis etapas com sequência ordenada e passos definidos visando um resultado palpável.

A primeira etapa é o escopo do projeto. Nessa etapa são definidos os limites do projeto, ou seja, até aonde ele pode ir.

A segunda etapa é o levantamento dos requisitos do projeto. Nessa etapa são definidas as limitações do projeto de acordo com a demanda da universidade e a disponibilidade financeira e tecnológica para a construção do autoclave.

A terceira etapa é a pesquisa de mercado. Nessa etapa é feita a pesquisa da tecnologia atual que é utilizada e quais delas são úteis para o projeto.

A quarta etapa é o projeto conceitual que busca levantar as soluções do autoclave para alcançar os objetivos propostos, dentro do escopo estabelecido e atendendo os requisitos do projeto.

A quinta etapa é o projeto preliminar aonde serão dimensionados todos os parâmetros do forno como espessura de parede, válvula de segurança, dimensionamento das resistências, sensores de temperatura e pressão, sistema de controle, e cálculo das tensões mecânicas do forno. Nessa etapa devemos obter uma visão inicial de como será o forno sempre de forma retroalimentada, voltando ao escopo e adaptando o projeto conceitual.

A sexta etapa é o projeto detalhado, que conta com os sistemas de pressurização, de aquecimento de resistências e método de leitura das informações dos sensores e o circuito elétrico. Nessa etapa já devemos ter todos os dados técnicos para o início da construção do autoclave.

3.1. Escopo do projeto

O autoclave a ser construído tem como sua finalidade o uso acadêmico na Universidade de Brasília em projetos de extensão, projetos de graduação, uso em equipes de competição, entre outros. O escopo define os limites do projeto e até onde ele vai podendo ser retroalimentado pelas fases futuras e sofrendo modificações para se adequar as condições impostas ao projeto.

Sua escala de tamanho, operação e precisão será pequena comparada aos autoclaves industriais disponíveis no mercado. Logo seu custo também deve ser reduzido pelo tamanho do projeto e pelos fins não lucrativos no uso do forno que deve estar à disposição dos alunos e professores da UnB.

Como exemplo de peças demandadas por equipes de competição e projetos dentro da universidade temos:

UNB Rocket Design Team: Equipe de competição para o desenvolvimento de foguetes nas categorias “high-power rocketry” e “model rocketry”. A equipe utiliza em seus modelos de foguete a coifa e as aletas fabricadas com material compósito.

Mamutes do Cerrado Aerodesign: Equipe de competição no desenvolvimento de projetos aeronáuticos em aeromodelos. A equipe tem um projeto de longarina de seu aeromodelo que é feita de material compósito. A longarina mede 1,80 m de largura e é dividida em 4 partes de aproximadamente 45 cm de largura cada.

Projeto científico: Caracterização de material compósito sanduiche com núcleo e/ou faces feito em impressora 3D.

O escopo do autoclave envolve os seguintes itens:

- Fabricação de peças de pequeno volume na ordem de $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$;
- Ter espaço para cura de peças longas em uma direção, como por exemplo a longarina de um aeromodelo;

- Possuir um sistema de pressurização positiva e a vácuo e um sistema de aquecimento elétrico através de resistências;
- Possuir medidores de temperatura e pressão e sistema de controle desses parâmetros;
- Atender as normas ABNT NBR 16035 para vasos de pressão;
- Garantir a segurança e a integridade física dos operadores do equipamento
- Baixo custo de projeto com priorização de compra de materiais baratos evitando importação;
- O vaso será utilizado no laboratório aeroespacial da FGA localizado no Gama-DF, onde o local contará com energia elétrica, água, tolerância a ruído, facilidade de montagem no local.

A norma ABNT.3 é baseada na norma ASME seção 8, divisão 1, que é uma norma feita para atender vasos de pressões industriais que operam dia e noite durante meses a fio sem parada para manutenção e inspeção. Essas condições severas exigem maior confiabilidade do equipamento, porém no escopo desse projeto o autoclave será utilizado de forma periódica pela universidade e em sua maior parte do tempo ficará fora de operação. Inspeção e manutenção poderão ser feitas a qualquer momento durante o tempo de vida útil do equipamento sempre que julgado necessário pelos responsáveis pelo autoclave.

3.2. Requisitos do projeto

Os requisitos do projeto são características requeridas pelo produto para atender as necessidades do projeto. Os requisitos devem ser coerentes e servirão de base para todo o dimensionamento que venha a ocorrer no projeto. Os requisitos do autoclave foram definidos a partir do escopo levando em consideração as condições de contorno do processo de cura da resina epóxi que é o material a ser testado. O autoclave desenvolvido deve:

- Alcançar temperaturas de até 180°C de forma estável (temperatura de cura da resina epóxi) em regime de operação e não deve ultrapassar o valor de 200°C de temperatura;
- Pressão de operação é 2 bars (dimensionamento do forno para suportar até 10 bar);
- Possuir um volume interno suficientemente grande para suportar as resistências e um espaço para o corpo de prova com profundidade de pelo menos 50 cm, altura e largura de no mínimo 30 cm;

- Admitir uma rampa de aquecimento de até 3 °C/min;
- Possuir sistema de controle e sistema de isolamento suficientes para manter a temperatura máxima de 180°C constante por duas horas;
- Possuir sensores de temperatura e pressão confiáveis e instalados sem causar vazamento de pressão;
- Fluido de trabalho do vaso pressão será o ar atmosférico de forma estática sem cargas localizadas e sem fluxo induzido.
- A temperatura de superfície externa do autoclave com isolante deve ser de no máximo 30°C.

3.3. Pesquisa de Mercado

Os autoclaves de pequena dimensão são muito utilizados para esterilização de materiais onde uma resistência aquece a água para geração de vapor quente pressurizado. O preço desse tipo de autoclave varia de acordo com seu tamanho:

- Autoclave pequeno (entre 5 e 7 litros) está na faixa de 1.000-2.000 reais.
- Autoclave médio (entre 12 e 41 litros) está na faixa de 2.500-6000 reais.
- Autoclave grande (42 litros ou acima) está a partir de 5.000 reais.

Os autoclaves para cura de materiais compósitos são encontrados em escala industrial de grande dimensão, com diâmetros de câmara maiores que 1 metro de comprimento e preços variando de 30.000-300.000 reais.

Devido aos requisitos operacionais e econômicos, está descartado a compra de um equipamento autoclave já existente no mercado.

3.4. Projeto Conceitual

Nessa etapa será definido a forma do vaso de pressão e o motivo das suas escolhas de acordo com os requisitos do projeto.

O autoclave será simples e de baixo custo devido ao escopo do projeto que atende demandas universitárias para fins de aprendizagem com peças em pequena escala. Neste sentido as características do equipamento serão:

- Casco cilíndrico horizontal simples;
- Dois tampos planos presos entre si por quatro tirantes rosqueados
- Pressão de projeto de 2 bar e temperatura de projeto de 180°C;
- Possuirá uma resistência rígida no seu interior alimentada por corrente elétrica para sistema de troca de calor;
- Possuirá um compressor e uma bomba de vácuo para o sistema de pressurização do forno;
- Possuirá um termopar, um manômetro manual e um termostato para o sensoriamento e sistema de controle de temperatura e pressão no vaso;
- Todos os instrumentos ligados ao vaso de pressão terão sistema de vedação assim como o encaixe entre o casco e a tampa.
- Revestimento externo com uma manta para isolamento térmico
- Material: aço carbono. O aço carbono é o material utilizado na grande maioria dos vasos de pressão chegando por exemplo a fazer parte de 95% do peso dos equipamentos de uma refinaria de petróleo [MARCHORREDDO, 2008]. O aço carbono é muito utilizado devido a suas propriedades como: conformabilidade, fácil obtenção em várias as formas, menor preço em relação a sua resistência mecânica.

3.5. Projeto Preliminar

3.5.1. Escolha do material

Para a escolha do material exato do cilindro e das flanges é necessário entender as propriedades dos aços-carbono. O aço-carbono é uma liga de ferro e 0,05 a 1,5% de carbono onde o aumento na quantidade de carbono no aço produz um aumento nos limites de resistência e de escoamento, na dureza e temperabilidade do aço. Porém o aumento no carbono dificulta a ductilidade e soldabilidade do aço [MARCHORREDDO, 2008]. Para a construção deste autoclave não haverá peças soldáveis o que retira limitações quanto ao teor de carbono.

A temperaturas superiores a 400°C e inferiores a 0°C o aço-carbono perde resistência mecânica e fica suscetível a trincas frágeis devido a precipitação do carbono e devido ao aumento de oxidação superficial. De modo geral não se operam vasos de pressão com aço

carbono a temperaturas de operação de serviço acima de 450°C ou onde possam ocorrer temperaturas abaixo de -45°C [MARCHORREDDO, 2008]. No caso do autoclave em construção a faixa de temperatura é de 25°C a 200°C o que evita problemas de trincas e necessidade de revestimentos especiais.

Por fim o aço carbono não é muito resistente a corrosão, mesmo assim o aço-carbono pode ser usado na maioria dos processos industriais mantendo a vida útil aceitável. Uma margem de corrosão é comum em partes de aço carbono em contato com o fluido de trabalho ou atmosfera, exceto em casos que há um revestimento resistente a corrosão.

Outros tipos de aço são utilizados em casos especiais aonde o aço-carbono não supre os requisitos do projeto, estes são chamados de aços-liga e possuem composição que se distinguem dos aços-carbono. Um exemplo comum são os aços inoxidáveis que possuem em média 12% de cromo, o que lhes confere propriedade antioxidante mesmo com exposição prolongada ao fluido de trabalho. Os aços de baixa liga possuem até 5% de elementos de liga, os aços de média liga possuem entre 5% a 10% de elementos de liga e os aços de alta liga possuem mais de 10% de elementos de liga. A desvantagem principal dos aços-liga é o custo mais elevado que o material tem devido ao seu tratamento especial. Devido aos requisitos do projeto foi considerado que não é necessário o uso de aços-liga devido a simplicidade operacional do projeto e a preferência por materiais econômicos [MARCHORREDDO, 2008].

Pela norma ASME seção VIII na tabela UCS-23 podemos verificar as tensões máximas admissíveis de materiais aço-carbono e aços de baixa liga disponível no Apêndice A. Para o casco cilíndrico foi escolhido o tubo condutor de aço-carbono A-53-B. Para as flanges será utilizada a chapa A-285-C de aço carbono.

3.5.2. Espessura de parede

Definido o material é necessário calcular a espessura da parede do vaso de pressão. De acordo com a norma técnica NBR 16035 os requisitos técnicos para os cálculos do vaso com pressão interna devem seguir o parágrafo UG-27 “Cálculos de espessura de cascos sujeitos a pressão interna” da norma ASME seção VIII divisão 1.

A espessura da parede de pressão do casco cilíndrico deve ser o maior entre os dois valores de espessura t e e_s onde:

- t : espessura requerida mínima para suportar os esforços de pressão e carregamento atuantes no vaso.
- e_s : espessura mínima de resistência estrutural para garantir a estabilidade estrutural e evitar colapso por ação do peso ou forças externas.

Para atender os requisitos de espaço interno levando em consideração os elementos do autoclave e o material a ser curado além de suas condições de projeto será utilizado:

- D_i : Diâmetro interno do casco cilíndrico de 300 mm.
- CET : Comprimento entre tangentes, ou seja, o comprimento do casco cilíndrico, será de 50 cm.
- P : Pressão máxima de projeto de 10 bar ou 1 MPa.
- T : Temperatura máxima de projeto de 200°C.
- S : Tensão admissível do material adquirido pela tabela UCS-32 do código ASME é igual a 101 MPa
- C : Sobre espessura de corrosão considerada de 1,5mm como valor usual adotado para vasos de aço-carbono e baixa liga para meios não corrosivos [MARCHORREDDO, 2008]. O código ASME não estabelece valores ou critérios para essa variável a não ser que seja vaso de pressão destinado a água, vapor ou ar comprimido com espessura de parede inferior a 6mm, o que não é o caso.
- E : Coeficiente de eficiência de solda conforme parágrafo UW-12 do código ASME. Para cilindros sem costura seu valor é igual a 1. Esse coeficiente tem a função de compensar a resistência na região da solda, que é menor em comparação com a chapa inteira de mesma espessura.

De acordo com a UG-27 a espessura requerida (t) para o casco quando a espessura não exceder a metade do raio interno (R) ou a pressão (P) não exceder o valor de $0,385SE$ é, como no caso do projeto, calculada como:

- Para **tensão circunferencial**:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} + c \quad (1)$$

A espessura requerida t é de 2,99 mm.

- Para **tensão longitudinal**

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} + c \quad (2)$$

A espessura requerida t é de 2,37 mm.

De acordo com o código a espessura requerida deve ser o maior valor entre as duas equações que no caso é de $t = 2,99\text{mm}$.

A **espessura estrutural** pode prevalecer para vasos de pressões muito baixas ou diâmetros muito grandes. Ela é definida pelo maior valor entre a espessura mínima estrutural de 4mm e a fórmula abaixo:

$$e_s = 2,5 + \frac{Di}{1000} + c \quad (3)$$

A espessura mínima calculada pela fórmula é de $e_s = 4,30$ mm que também é o maior valor para espessura estrutural e_s e para espessura requerida t .

A espessura do casco cilíndrico considerando os valores nominais comerciais será então de 4,75mm que é a espessura comercial logo acima da espessura mínima calculada de 4,30mm.

O cálculo de tampos planos não estaiados é feito a partir da parte UG-34 da norma ASME seção VIII divisão 1. Como serão utilizadas flanges planas parafusadas por tirantes onde a junta abrange toda a face de contato com o casco cilíndrico, temos o caso de croqui (p) da figura UG-34 da norma como visto na figura 10 abaixo:

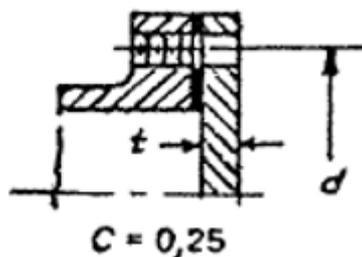


Figura 10: Croqui para chapas circulares aparafusadas em casco, flange ou chapas laterais com juntas que abrangem toda a face de contato

Fonte: adaptado de figura UG-34 do código ASME, 1983

Para cálculo da espessura do tampo utilizamos a equação:

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{SE}} + c \quad (4)$$

Onde:

d = vão menor medido conforme figura UG-34 da ASME

C = Fator adimensional que depende do método de fixação do tampo de 0,25

A flange terá dimensões de 400 mm x 400mm. Sendo assim, o vão d pode ser calculado como a medida do centro do eixo do tirante superior área o centro do eixo do tirante inferior, que será como no desenho esquemático representado em 3.5 de $d = 350$ mm.

$$t = 350 \sqrt{\frac{0,25P}{SE}} + c \quad (5)$$

Logo, espessura do tampo $t = 18,91$ mm. E o valor comercial nominal usado será 19,0mm.

Após o cálculo da espessura da flange que servirá de tampo, a parte UG-43 da norma exige que as roscas devem ser de formato cônico padronizado para tubos de condução. O diâmetro da bitola tubular de rosca será o mesmo diâmetro do tirante. Calculamos a partir da tabela UG-43 o número mínimo de fios de rosca que esta deve possuir.

Tabela 1 - Número mínimo de fios de rosca que devem ser utilizados para fixação de conexões tubulares roscadas

Bitola da conexão tubular NPS	1/2 e 3/4	1, 1 1/4 e 1 1/2	2	2 1/2 e 3	4-6	8	10	12
N.º de fios de rosca utilizados na fixação	6	7	8	8	10	12	13	14
Espessura mínima requerida da chapa, mm	11	16	18	25	32	38	41	45

Fonte: tabela UG-43 do código ASME, 1983

De acordo com a tabela 1 acima, considerando a espessura da chapa como 19 mm, utilizaremos uma bitola de seção tubular de 1 polegada, ou 1,27 cm de diâmetro. Deste modo pela tabela UG-43 serão utilizados 7 fios de rosca.

A tensão que a porca deve suportar é a força que o tampo recebe na pressão máxima admissível do projeto. A força máxima recebida no tampo pode ser calculada por:

$$F = P\pi R^2 \quad (6)$$

A força $F = 70,69$ kN será distribuída entre os quatro tirantes e suas quatro porcas (Npc). Para cada uma contendo sete fios de roscas (Nf) temos a força suportada por fio de rosca (Ff).

$$F_f = \frac{F}{(Npc Nf)} \quad (7)$$

A força suportada pelo fio é então $F_f = 2,52$ kN. Utilizando roscas unificadas de acordo com o número ANSI B1.1 na norma ASME e parafusos de acordo com o número ANSI B18.2.3.1M a rosca será a 8 UNC 1''

3.5.3. Isolamento do autoclave

Um autoclave é um equipamento que trabalha a temperaturas elevadas acima da temperatura ambiente. Mais especificamente o autoclave do projeto trabalha à temperatura de cura da resina epóxi que pode chegar a 180°C com temperatura máxima de trabalho de 200°C.

Ao trabalhar com essa temperatura devemos considerar a dissipação de calor para o meio externo, a segurança de trabalho do operador do equipamento e os requisitos de isolamento do projeto a fim de se obter um controle preciso de temperatura.

Para isolar a temperatura interna do equipamento será utilizado uma manta de lã de vidro, devido a suas propriedades como: baixo custo, alta resistividade térmica e fácil obtenção.

É necessário dimensionar a manta para atender ao requisito de segurança de temperatura de superfície externa igual a 30°C. A manta cobrirá o calor apenas na direção radial, visto que os tampos apresentarão equipamentos que tornarão a instalação da manta inviável. Um desenho esquemático do casco cilíndrico isolado é representado abaixo:

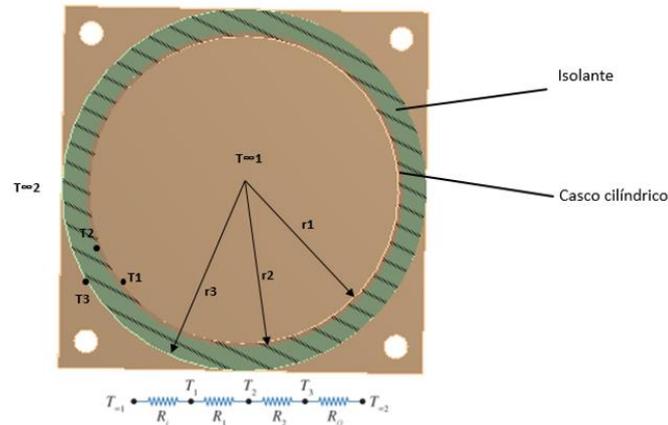


Figura 11: Seção transversal com esquema de transferência de calor para o casco cilíndrico com manta isolante

Fonte: autoral

Na figura:

$T_{\infty 1}$ = Temperatura no centro do autoclave (200°C, Aproximadamente igual a T1);

T_1 e r_1 = Temperatura e distância na superfície interna do autoclave respectivamente (200°C e 0,15m);

T_2 e r_2 = Temperatura e distância na superfície externa do autoclave respectivamente (T_2 e 15,40mm ou $15,40 \cdot 10^{-3}$ m);

T_3 e r_3 = Temperatura e distância externa da manta de lã respectivamente (30°C e r_3);

L = Comprimento do tubo (0,50m);

$T_{\infty 2}$ = Temperatura ambiente (25°C);

K_l = Condutividade térmica do aço-carbono (60,50 W/m.K) [tabela A.2 do apêndice A];

K_2 = Condutividade térmica da manta de lã de vidro ($4,20 \cdot 10^{-3}$ W/m.K) [tabela A.5 do produto WALLFELT 4+ da Isover];

h_2 = coeficiente de transferência de calor por convecção externa (25 W/m².K)[estimado de acordo com a tabela 2];

De acordo com Neto (2010), a tabela 2 para convecção obtida de forma empírica nos permite estimar o valor do coeficiente h_2 . Consideramos o valor de h_2 igual a 25 W/m².K, como solução conservadora caso a parede do forno tenha condições similares a uma parede externa, se localizando em ambientes espaçosos.

Tabela 2 - valores do coeficiente de convecção h para situações de convecção natural em edifícios

SITUAÇÃO	h [W/m ² .K]
Paredes internas	8
Forros internos	6
Pisos internos	10,50
Paredes externas (sem vento)	25
Superfícies horizontais externas (sem vento)	29

Fonte: Neto, Carlos B., 2010

Para o cálculo da espessura da manta observamos que existe apenas um fluxo de calor constante no sistema Q , onde:

$$Q = \frac{T_{final} - T_{inicial}}{R} \quad (8)$$

A resistência R depende se ela for de condução, convecção ou radiação, sendo esses valores de:

$$R_{Cond} = \frac{L}{kA} \quad (9)$$

$$R_{Conv} = \frac{1}{hA_s} \quad (10)$$

$$R_{Rad} = \frac{1}{h_{Rad}A_S} \quad (11)$$

Desprezando a parcela da radiação por sua contribuição minoritária, podemos considerar que o Q entre T_1 e T_3 é igual ao Q entre T_3 e $T_{\infty 2}$. Obtemos então a equação:

$$\frac{T_3 - T_1}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2}} = \frac{T_{\infty 2} - T_3}{\frac{1}{h_2 2\pi L r_3}} \quad (12)$$

Utilizando o software Wolfram, foi possível encontrar $r_3 = 0,20\text{m}$. A espessura mínima da manta é $(r_3 - r_2)$ onde conhecido os valores dos raios foi definida como 46 mm. A espessura da manta será a espessura comercial mais próxima que corresponde a 50 mm.

3.5.4. Dimensionamento do sistema de aquecimento

Para dimensionar o sistema de aquecimento, precisamos calcular a potência do autoclave. O volume interno do autoclave pode ser definido para o cálculo da quantidade máxima de resina epóxi que pode ser curada. Consideramos que o volume máximo disponível para o corpo de prova seja um quarto do volume do casco cilíndrico, já que outros componentes também devem ocupar espaço no forno.

$$v = \frac{\pi R i^2 L}{2} \quad (13)$$

Sendo R_i o raio interno do casco esférico e L o seu comprimento encontramos o volume útil $v = 0,01767246 \text{ m}^3$ ou $17672,46 \text{ cm}^3$. A potência do equipamento depende da velocidade de aquecimento que se deseja obter do material e para isso é preciso identificar seu calor específico e densidade da resina Epóxi [Da Silva, W. M., 2009]. Esses dados foram obtidos a partir da tabela A.3 com características de diferentes resinas Epóxi disponível no apêndice A. Os valores conservadores considerados para as propriedades do Epóxi são:

d_s : densidade da resina epóxi ($1,40 \text{ g/cm}^3$)

c : calor específico da resina epóxi (800 J/kg.K)

Logo, encontramos a massa máxima a ser curada desconsiderando as fibras que já estão em estado seco e considerando uma resina epóxi com densidade e calor específico superdimensionados de acordo com a tabela A.3:

$$m = dsv \quad (14)$$

A massa máxima a ser curada no autoclave é de $m = 24,74$ kg. Para curar toda essa massa precisamos calcular a energia necessária para esse processo que pode ser obtida pela equação:

$$Q = mc\Delta T \quad (15)$$

Onde ΔT é a variação de temperatura que o material deve chegar (entre 180°C em fase de cura e 25°C a temperatura ambiente). $\Delta T = 155$ °C. Logo a energia necessária é $Q = 3,07$ MJ

Por fim a potência necessária depende da rampa de aquecimento para chegada do ambiente interno da temperatura ambiente à temperatura de cura que é de 3°C/min. O tempo necessário no caso de uma rampa única para chegada temperatura de cura é de 51,67 minutos ou $t = 3100$ segundos. A potência considerando um rendimento de 80% pode ser calculada pela equação:

$$Pot = \frac{Q}{t\eta} \quad (16)$$

A potência do autoclave é de $Pot = 1,24$ kW. Podemos agora dimensionar as grandezas elétricas do circuito de aquecimento. O forno é monofásico e funcionará em tomadas comum que suportam correntes de até 10 A. A tensão de uso doméstico padrão em Brasília é de $V = 220$ V. Podemos assim calcular a corrente do circuito:

$$I = \frac{Pot}{V} \quad (17)$$

A corrente I é de 5,63 A. A resistência é calculada em seguida pela lei de Ohm.

$$R = \frac{V}{I} \quad (18)$$

A resistência que o fio deve ter é de $R = 39,12 \, \Omega$. Para atender essa resistência foi escolhido o fio de níquel-cromo (80%Ni-20%Cr) devido ao seu baixo custo, fácil acesso, a capacidade de manter suas propriedades mecânicas e elétricas a elevadas temperaturas e principalmente, devido a sua boa resistividade, que exige menos material para alcançar a resistência desejada. Podemos observar algumas propriedades do aço inoxidável de níquel-cromo na tabela A.4 disponível no apêndice A. O diâmetro do fio pode ser calculado de acordo com Cestile pela equação:

$$Df = 34,4\sqrt{\left(\frac{\rho}{Pe Np v}\right)} \quad (19)$$

Onde:

Df = Diâmetro do fio (mm);

ρ = Resistividade do material do resistor ($1,0806 \, \Omega\text{mm}^2/\text{m}$);

Pe = Carga específica superficial ($5 \, \text{W}/\text{cm}^2$);

p_{ff} = Potência do forno por fase ($1,24\text{W}$);

Np = Número de circuitos resistores em paralelo (1);

V = Tensão (220V).

O diâmetro do fio é de $Df = 1,20 \, \text{mm}$. O comprimento da resistência é calculado pela equação [Cestile, 2012]:

$$Lf = \frac{R}{r} \quad (20)$$

Onde:

R = resistência do fio ($39,12 \, \Omega$)

r = resistência por unidade do fio resistor ($1,12 \, \Omega/\text{m}$)

O comprimento do fio de resistência Lf será de $34,92 \, \text{m}$.

3.5.5. Desenho Preliminar do Sistema

Para ilustrar como ficará a parte estrutural de autoclave foi desenhado o modelo do vaso de pressão montado e explodido, como visto nas figura 12 abaixo:

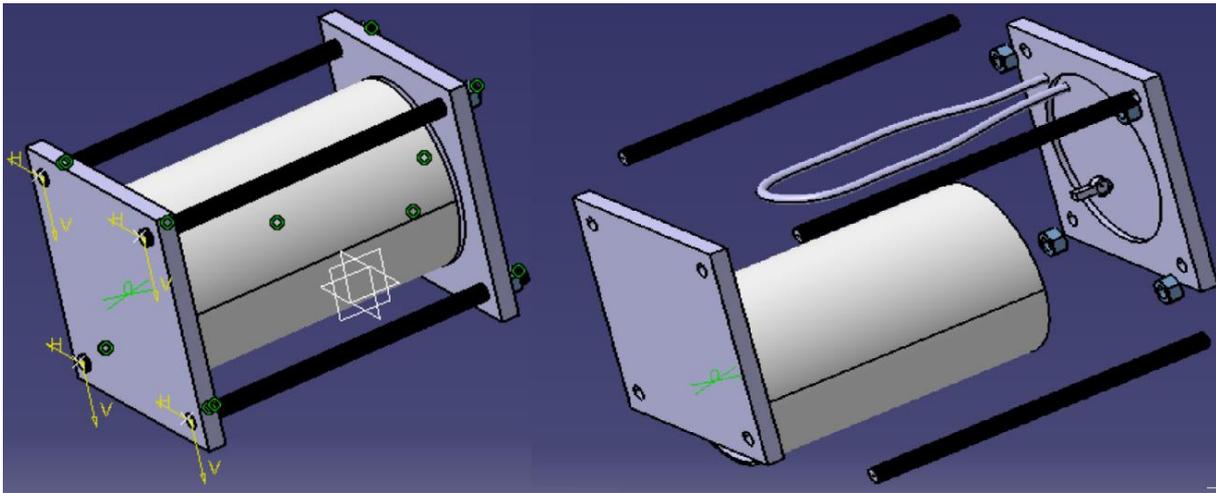


Figura 12: Autoclave montado e explodido

Fonte: autoral

3.5.6. Simulação com análise estrutural no Ansys

Para incrementar os resultados dos cálculos do vaso de pressão foi feita uma simulação dessa geometria no software Ansys. A simulação foi feita a partir da malha da geometria simplificada da estrutura principal do autoclave com material de aço estrutural e simulando a pressão interna de trabalho de 2 Mpa. O suporte fixo da geometria foi configurado para a base do tampo e para a superfície dos furos dos tirantes. A partir daí foi feita a simulação de pressão nas paredes internas do autoclave.

O resultado da análise de stress e deformação da pressão interna como podem ser vistos nas figuras 19 e 20 abaixo, demonstram que a maior deformação se encontra no centro do tampo

plano, porém a deformação total não supera a marca de 0,5mm e o stress não supera o stress de escoamento do aço carbono A-285-C de 207 Mpa [tabela UCS-23 ASME].

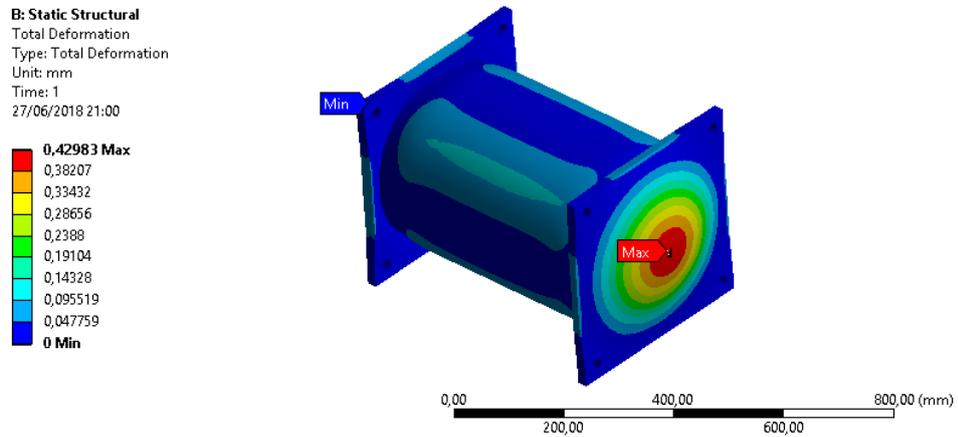


Figura 13: simulação da deformação do autoclave no Ansys (deformação na escala 91:1)

Fonte: autoral

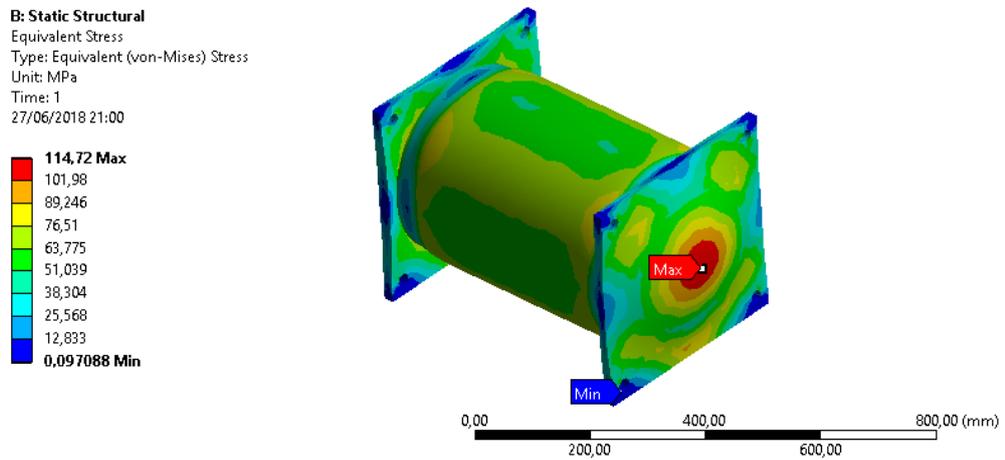


Figura 14: Simulação de stress mecânico do autoclave no Ansys

Fonte: autoral

3.6. Projeto Detalhado

3.6.1. Dimensionamento do sistema de pressurização

O sistema de pressurização será feito por um compressor que deverá ser capaz de operar com o volume útil do forno de 17,70 litros, e alcançar pressões de 2 bar. O compressor escolhido é o Compressor Ar Direto 1/3 Hp Bivolt G2815br Gamma que possui baixa potência, mas consegue atingir pressões de até 3,50 Bar, tem baixo custo e é leve pesando em torno de 9 kg.

Além do compressor será necessário também um regulador de pressão com manômetro capaz de trabalhar com aproximadamente 10 Bar que é a pressão máxima suportada pelo autoclave. O regulador de pressão escolhido foi o Regulador Válvula Pressão para Pistola De Pintura ARC-WF-06A Arcom com pressão de trabalho de até 9,6 bar, válvula abre e fecha e manômetro.



Figura 15: Componentes do sistema de pressurização

3.6.2. Dimensionamento do sistema elétrico de aquecimento

Para controlar a temperatura e fornecer calor precisamos de um resistor de aproximadamente 40 ohms, formato adequado para o vaso cilíndrico com 30cm de diâmetro e 50 cm de profundidade. Para essas especificações um resistor de aço inoxidável níquel-cromo com boas propriedades térmicas e formato em “U”. Foi escolhido o resistor esterelizador

marmiteiro Buffet 1000w de aço inox Ni-Cr, tensão 220V, potência de 1Kw e dimensões de 220mm de comprimento e 40 mm de abertura

Para controle da temperatura precisamos de um sensor de temperatura e um regulador de temperatura com boa precisão e que suporte medições de até 200°C. Para esse sistema foi escolhido o Termostato Tic-17rgti Full Gauge 90~240 Vca Digital utilizando um cabo sensor de silicone (SB59), que possui precisão de 0,10°C entre -10 a 100°C e de 1°C no restante da faixa, opera até 200°C.

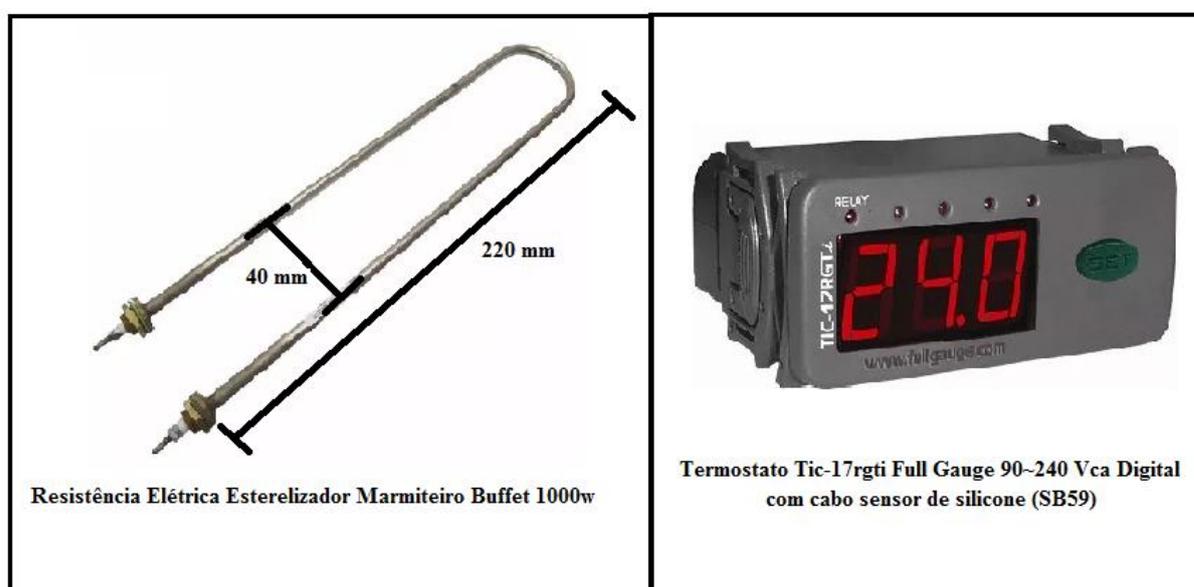


Figura 16: Componentes do sistema de aquecimento

3.6.3. Segurança e Vedação

A vedação de cada componente instalado no autoclave será feita com resina epóxi para alta temperatura, devido a suas boas propriedades mecânicas e térmicas, além da sua capacidade de formar uma massa sólida e resistente quando misturada com um endurecedor, se tornando um ótimo componente para vedação. A resina utilizada será a resina epoxi Ampreg 26 - High TG, para garantir boa atuação nas condições do autoclave.

A manutenção será feita a partir da abertura dos tampos e operação nos componentes. A seção vedada com epóxi no tampo será fixa e os componentes poderão ser trocados desde que a vedação não seja corrompida.

Para garantir a segurança de pressão para que não atinja os 10 bar em que o autoclave foi projetado, utilizaremos uma Válvula De Alívio de Segurança Para Compressor 1/4 para 8 Bar. A válvula de alívio garantirá que a pressão não chegue a níveis extremos.



Figura 17: Componentes do sistema de segurança e vedação.

A lista de peças a serem compradas para a construção do autoclave está apresentada na tabela C-1 no apêndice C

3.7. Ajustes no Projeto

Na fase de aquisição de materiais para o prosseguimento da montagem do autoclave foi verificado as primeiras dificuldades de construção do projeto. Os materiais em aço carbono tanto as chapas quanto o tubo estavam fora do orçamento disponível para o projeto.

Para prosseguimento das atividades foram feitas mudanças no escopo do autoclave de acordo com o orçamento disponível. Para isso foi feita uma análise de adaptação do projeto a uma panela de pressão industrial com as seguintes propriedades:

- **Volume útil:** 35 litros
- **Diâmetro interno do casco:** 340mm
- **Comprimento entre os Tampos:** 400 mm
- **Material:** Alumínio 99,30%, liga 3003 na tampa e liga 1050-1235
- **Espessuras:** Casco = 4,50mm. Tampo = 5,50mm
- **Pressões (manométricas):**
 - **Trabalho:** 5 psi ou 34 kPa
 - **Abertura de válvula de alívio:** 10 psi ou 70 kPa
 - **Abertura de válvula de segurança:** 15 psi ou 102 kPa
 - **Pressão máxima suportada:** 25 psi ou 172 kPa



Figura 18: Panela de pressão industrial a ser adaptada

As pressões características da panela de pressão são medidas em relação da pressão atmosférica, o que significa que a diferença de pressão entre o interior e o exterior da panela chega a 173 kPa (25 psi) antes de atingir seu ponto de falha permanente do equipamento.

A panela vai ser analisada para validar sua adaptação a utilização como autoclave. Suas dimensões são próximas ao escopo do projeto, mas é preciso estudar sua capacidade estrutural como vaso de pressão para utilização com segurança no laboratório. A panela de pressão

também não será danificada em sua estrutura e será aproveitado todos os seus sistemas pré-fabricados sem causar danos ao casco e à tampa mantendo sua estrutura como a fabricação.

O sistema de vedação da panela é feito por uma borracha de vedação e uma estrutura de alumínio rosqueável como visto na figura 18, que pressiona uma barra de alumínio na tampa contra um suporte no casco. Essa estrutura mecânica impede que altas pressões dentro da panela venham a danificar a estrutura entre o tampo e o casco.

3.7.1. Análise estrutural da panela

Para realizar a adaptação devemos calcular sua resistência a pressão a partir da espessura de parede e pressão de trabalho do projeto de acordo com a UG-27. Atualizando os dados para alumínio e para as novas dimensões calculamos:

- Espessura para tensão circunferencial a partir da equação 1:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P} + c$$

Onde:

P: Pressão máxima de projeto de 25 psi ou 0,17 MPa.

R: Raio interno do casco cilíndrico de 170 mm.

S: Tensão admissível da liga de alumínio 1060 a 125°C adquirido pela tabela UNF-23.1 do código ASME é igual a 10 MPa

C: Sobre espessura de corrosão considerada de 0,5 mm devido a resistência do alumínio a corrosão

E: Coeficiente de eficiência de solda igual a 1.

A espessura requerida *t* é de 3,41 mm.

- Espessura para tensão longitudinal a partir da equação 2:

$$t = \frac{PR}{2SE + 0,4P} + c$$

A espessura requerida t é de 1,99 mm.

De acordo com o código a espessura requerida deve ser o maior valor entre as duas equações que no caso é de $t = 3,41$ mm.

- Espessura estrutural a partir da equação 3

$$e_s = 2,5 + \frac{Di}{1000} + c$$

A espessura mínima calculada pela fórmula é de $e_s = 3,34$ mm, porém essa espessura deve ter um valor mínimo de 4 mm. Logo $e_s = 4$ mm que também é o maior valor para espessura estrutural e_s e para espessura requerida t .

A espessura da panela de 4,50mm de parede corresponde a espessura estrutural mínima e também é superior a espessura requerida devido as tensões do projeto.

Consideramos o tampo toriesférico com $r= 6\%D$ e $L=D$ que é a configuração mais comum de tampos não elípticos para os cálculos como na figura 19 abaixo:

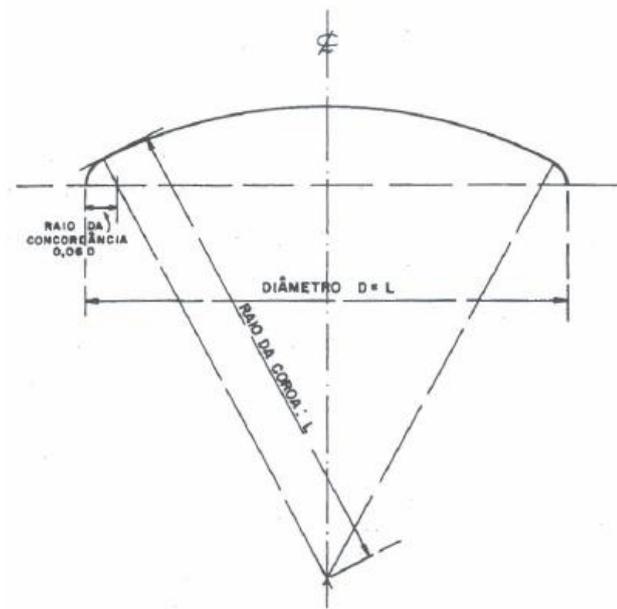


Figura 19: Perfil do tampo toriesférico 6%D

Fonte: código ASME, 1983

No caso da panela de pressão temos um tampo toriesférico que pode ser calculado pelo parágrafo UG-32, temos a seguinte fórmula para cálculo de espessura:

$$e = \frac{0,885 PL}{SE - 0,10P} + c \quad (21)$$

Utilizando $L=D$ e tensão admissível da liga de alumínio 3003 a 125°C adquirido pela tabela UNF-23.1 do código ASME igual a 20 Mpa calculamos a espessura do tampo onde $e = 3,06\text{mm}$.

A panela de pressão possui espessura de tampo de 5,5 mm. Essa espessura resulta numa margem de segurança da panela em relação à falha do vaso de pressão aos esforços de tensão. Ao conversar com o fabricante foi informado que o teste destrutivo chegou a 25 psi para falha da panela. Provavelmente a causa da falha está no sistema de vedação entre o tampo e o casco, no projeto o autoclave operará na pressão de 10 psi que é quando é acionada a válvula de alívio e a janela de segurança.

3.7.2. Sistema de aquecimento do autoclave

Para o nosso autoclave adaptado da panela de pressão o sistema de aquecimento ocorrerá de forma diferente em relação ao projetado anteriormente. No projeto inicial do autoclave a resistência elétrica ficava no ambiente interno do autoclave sendo alimentado por fios elétricos a partir de um furo com vedação na parede do tampo.

No projeto atual devido ao escopo de não danificar a parede do casco ou do tampo foi feito a escolha de uma resistência no ambiente externo da panela. A resistência ficará em contato com a base no lado oposto ao tampo e através principalmente da condução todo o equipamento será aquecido. A resistência foi fabricada sob medida no tamanho da base da panela e pode ser vista na figura 20:



Figura 20: Resistência elétrica na base da panela

Fonte: autoral

Para cálculo da potência da resistência consideraremos o caso mais extremo, que é a massa máxima a ser curada. Devido a posição da grade de apoio entre outras perdas no volume consideramos o volume útil de massa a ser curada como a metade do volume interno do autoclave e calculamos o volume a partir da equação 13:

$$v = \frac{\pi R i^2 L}{2}$$

Sendo R_i o raio interno do casco esférico de 170mm e L o seu comprimento de 400mm encontramos o volume útil $v = 18.158,41 \text{ cm}^3$. A partir daí calculamos a partir da equação 14 a massa a ser curada de resina considerando sua densidade de $1,4 \text{ g/cm}^3$.

$$m = ds v$$

A massa máxima a ser curada no autoclave é de $m = 25,42 \text{ kg}$. O fluxo de calor necessário é então calculado pela equação 15:

$$Q = mc\Delta T$$

Onde c é o calor específico de 800 J/kg.K e ΔT é a variação de temperatura que o material deve chegar que será no projeto de 25°C a 120°C sendo $\Delta T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Logo a energia necessária é $Q = 1,93 \text{ MJ}$

Por fim a potência necessária depende da rampa de aquecimento que será de até 3°C/min . O tempo necessário no caso de uma rampa única para chegada temperatura de cura é de $t = 3100$ segundos. Como a resistência será externa ao forno consideraremos uma baixa eficiência de aproximadamente 45% e calculamos a potência pela equação 16:

$$Pot = \frac{Q}{t\eta}$$

A potência do autoclave é de $Pot = 2,26 \text{ kW}$. A resistência fabricada para o projeto tem $2,50 \text{ KW}$ de potência.

Para a utilização prática do autoclave no laboratório de acordo com o escopo do projeto essa quantidade de potência deve ser avaliada de acordo com as perdas no sistema. O caso para cura de massa máxima do compósito calculada acima ($25,42 \text{ kg}$) é para um sistema sem perdas. A real massa máxima a ser curada será proporcional a parcela de potência que realmente irá para o material e não será perdida para o meio considerando que resistência será posicionada do lado externo do autoclave.

3.7.3. Sistema de isolamento do autoclave

No caso do isolamento o cálculo nessa nova configuração será diferente do dimensionamento prévio. Com a resistência externa à panela aquecendo principalmente sua estrutura a fonte de calor estará principalmente na parede da panela. Nesse caso observando a figura 11, temos agora o valor de T_2 como temperatura da parede externa do forno. Pelo escopo do projeto, T_2 é igual a 120°C e ele enfrenta apenas duas resistências até a temperatura ambiente de 25°C , a de condução da manta isolante e a de convecção para o ar. As novas medidas para o projeto adaptado são:

$T_{\infty 1}$ = Temperatura no centro do autoclave;

T_1 e r_1 = Temperatura e distância na superfície interna do autoclave respectivamente (Aproximadamente igual a T_2 e 170 mm);

T_2 e r_2 = Temperatura e distância na superfície externa do autoclave respectivamente (120°C e 174,5 mm);

T_3 e r_3 = Temperatura e distância externa da manta de lã respectivamente (30°C e r_3);

L = Comprimento do tubo (400 mm);

$T_{\infty 2}$ = Temperatura ambiente (25°C);

K_1 = Condutividade térmica do alumínio (237 W/m.K) [tabela A.2 do apêndice A];

K_2 = Condutividade térmica da manta de lã de rocha ($4,70 \cdot 10^{-3} \text{ W/m.K}$);

h_2 = coeficiente de transferência de calor por convecção externa ($25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) [estimado de acordo com a tabela 2].

Para calcular a distância r_3 utilizamos a equação 23 onde o Q entre T_2 e T_3 é igual ao Q entre T_3 e $T_{\infty 2}$. Assim calculamos r_3 pela fórmula:

$$\frac{T_3 - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2}} = \frac{T_{\infty 2} - T_3}{\frac{1}{h_2 2\pi L r_3}} \quad (22)$$

Utilizando o software Wolfram, foi possível encontrar $r_3 = 0,20\text{m}$. A espessura mínima da manta é $(r_3 - r_2)$ onde conhecido os valores dos raios foi definida como 26 mm. A espessura da manta será a espessura comercial mais próxima que corresponde a 50 mm. Haverá também uma proteção térmica na tampa do autoclave fornecendo assim maior isolamento ao sistema.

3.7.4. Ajustes no projeto detalhado

Com a mudança de escopo, os materiais necessários para a compra do autoclave foram modificados. Em princípio, o compressor continuou como previamente dimensionado. Porém o termostato agora pôde ser um mais simples, a resistência elétrica mudou seu formato agora considerando o contato com a base da panela e não mais seu comprimento. A resina de vedação e a válvula de segurança não foram mais necessárias pois não haverá desgaste na estrutura da panela e a mesma já vem com suas válvulas de segurança.

Como o uso da panela como solução adaptada teremos algumas limitações quanto ao projeto anterior. O volume será parecido com o cilindro interno com diâmetro 40 milímetros maior e comprimento 100 milímetros menor que o projeto original. A pressão de trabalho em relação a atmosfera será de 173 kPa 0,68 kPa ao invés de 2 Mpa. A temperatura máxima de projeto será de 120° C que é a quantidade máxima medida pelo termostato e a temperatura de trabalho reduzirá para 80°C por ser a temperatura máxima que as resinas comerciais suportam sem perder propriedade.

3.7.5. Análise estrutural no Ansys

Para incrementar os resultados dos cálculos do vaso de pressão foi feita uma simulação dessa geometria no software Ansys. A simulação foi feita a partir do desenho da superfície interna do autoclave adicionando a sua espessura de 4,5 mm utilizando como material o alumínio. A partir daí foi feita a malha e a simulação de pressão nas paredes internas do autoclave. A pressão utilizada foi a pressão de operação em 68 kPa (10 psi).

O resultado da análise de stress e deformação da pressão interna como podem ser vistos nas figuras 21 e 22 abaixo, demonstram que como o autoclave tem dois tampos sendo um a

tampa da panela em forma elíptica e a outra é a base da panela em sua forma plana assim sendo menos resistente a pressão, a pressão interna se concentra toda na base da panela com uma deformação de aproximadamente 1,22 mm no ponto central e stress de 52,25 Mpa num ponto periférico da base. A deformação do material é mínima e o maior nível de stress se encontra em uma geometria que não deforma. De acordo com a tabela ASME UNF 23-1 o limite de escoamento do alumínio da classe 1100 é de 76 Mpa mostrando assim um comportamento seguro do autoclave

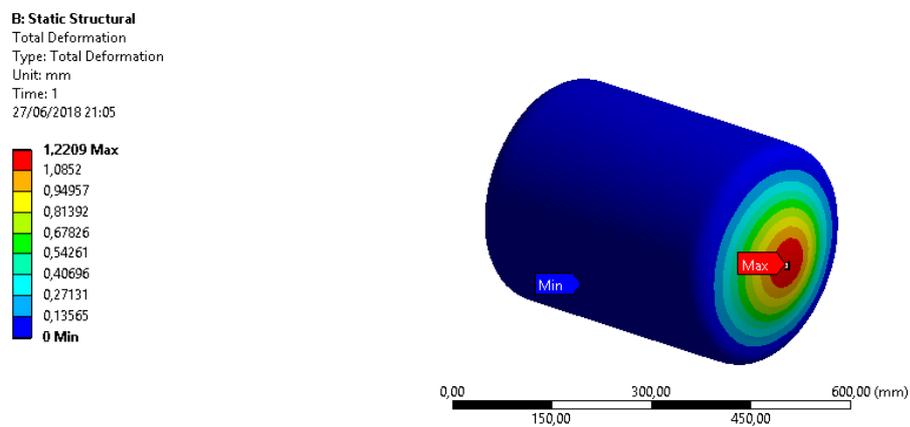


Figura 21: Simulação da deformação no Ansys (deformação na escala 28:1)

Fonte: autoral

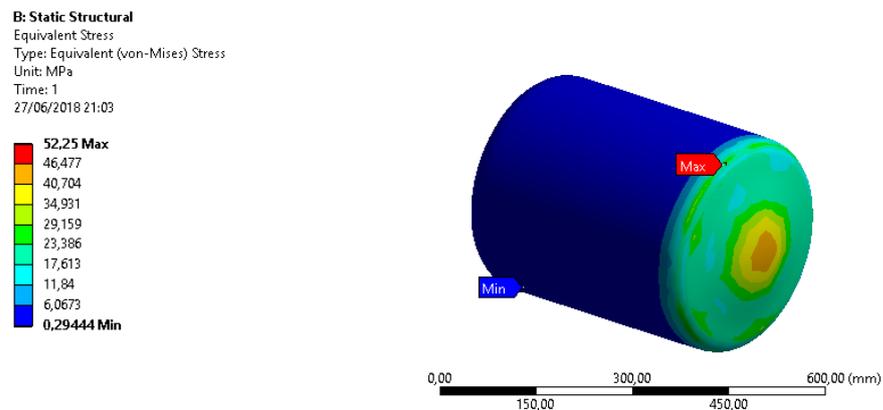


Figura 22: Simulação de stress mecânico no Ansys

Fonte: autoral

3.8. Construção do Autoclave

A montagem do autoclave partiu da estrutura da panela industrial Fugor Express 35 litros. A panela já fornece a estrutura de parede e de tampos, assim como também o sistema de vedação para altas pressões e as válvulas de segurança instaladas com redundância de 3 válvulas de segurança com abertura para 10 psi (69 kPa), 10 psi (69 kPa) e 15 psi (103 kPa) e uma válvula reguladora de pressão de trabalho de até 5 psi (34 kPa).

3.8.1. Sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento foi feito a partir da fabricação da resistência sob medida no tamanho da base da panela. A resistência de potência de 2,50 kW de formato circular foi instalada utilizando aço galvanizado fixados nas duas alças da panela e na resistência que possui um suporte com porcas que pressionam e fixam a sua estrutura em contato direto com a base da panela. A resistência aquece o sistema principalmente por condução.

Para controle da temperatura foi usado o kit termostato Droyd com variância de medição de -20°C a 120°C. Seu controle é feito a partir do sistema de on/off com um relé elétrico que fecha e abre o circuito a partir da temperatura medida no termopar e a temperatura de operação. Quando o termostato mede uma temperatura acima da de operação ele abre o contato do circuito impedindo a passagem de corrente na resistência. Quando a temperatura reduzir para abaixo da temperatura de operação o termostato religa o contato para que a corrente volte a fluir na resistência. A figura 23 abaixo ilustra o circuito simplificado do sistema de aquecimento e seu controle on/off. O sistema de aquecimento montado se encontra na figura 24.

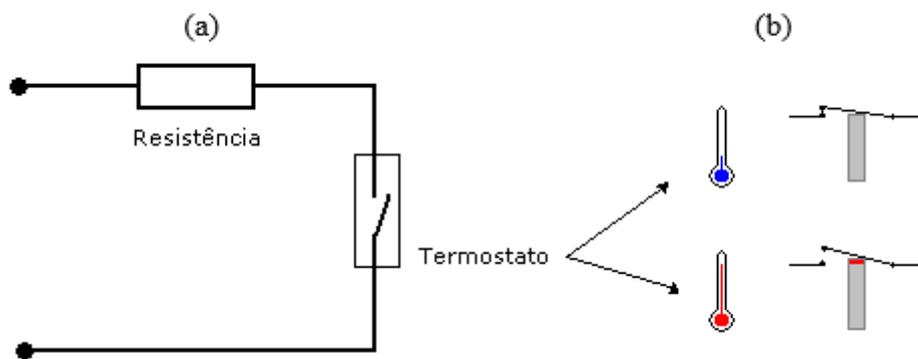


Figura 23: (a) Sistema on/off do termostato, (b) abertura e fechamento de contato de acordo com a temperatura

Fonte: autoral



Figura 24: Estrutura de aquecimento com resistência fixada a panela pelas alças e termopar para medição e controle da temperatura

Fonte: autoral

3.8.2. Sistema de pressurização

O sistema de pressurização do autoclave foi desenvolvido adaptando-se a panela a partir de sua válvula reguladora de pressão e suas válvulas de segurança. Para gerar a pressão dentro da panela foi usado um compressor Motomil com capacidade de pressão de até 8,30 bar. O compressor foi conectado por uma mangueira em um filtro de ar regulador de pressão da marca

Worker que tem o objetivo de regular com precisão a quantidade de pressão que é aplicada ao sistema. A pressão chega à panela através da retirada do pino da sua válvula reguladora de pressão de trabalho e conectando a esta entrada a mangueira que sai do compressor.

Nesse sistema como a válvula reguladora de pressão da panela foi retirada, a nova pressão de trabalho será de 10 psi (69 kPa) quando acionado a válvula e a janela de segurança da panela. A panela ainda conta com mais uma válvula de segurança de 15 psi (103 kPa), caso haja aumento indesejado da pressão no autoclave. O sistema de pressurização é representado como na figura 25 abaixo:



Figura 25: Sistema de pressurização contendo compressor, mangueira e regulador de pressão ligados a tampa da panela com destaque em vermelho para as válvulas de segurança de 10 psi (azul) e 15 psi (amarelo) e destaque em verde para a entrada de fluxo vinda do compressor

Fonte: autoral

3.8.3. Sistema de isolamento

Para manter a alta temperatura de cura dentro do autoclave é necessário que haja um sistema de isolamento robusto e que não comprometa a utilização do autoclave. Para isso, como calculado no projeto preliminar, foi montado uma camada de isolamento de lã de rocha de 50 milímetros de espessura.

A camada de isolamento fixa se encontra na parte externa ao casco da panela, e foi construída a partir de uma estrutura com três camadas sendo estas duas de fibra de vidro e um núcleo de lã de rocha. A fixação foi feita a partir do uso da fita adesiva de alta performance Silver Tape. A estrutura de isolamento foi projetada de acordo com o formato do casco panela considerando o espaço para as alças de suporte.

A camada de isolamento móvel possui a mesma estrutura de núcleo de lã de rocha da estrutura fixa e seu formato adaptado foi dimensionado de acordo com a tampa da panela e pode ser posicionada na sua parte interna. O uso da camada móvel visa facilitar o manuseio do autoclave evitando que sejam feitas muitas operações de abertura e fechamento da tampa várias vezes durante o processo de cura e sua função é ajudar a isolar a temperatura no interior da panela enquanto esta se encontra aberta. A imagem das duas camadas de isolamento pode ser vista na figura 26 abaixo:

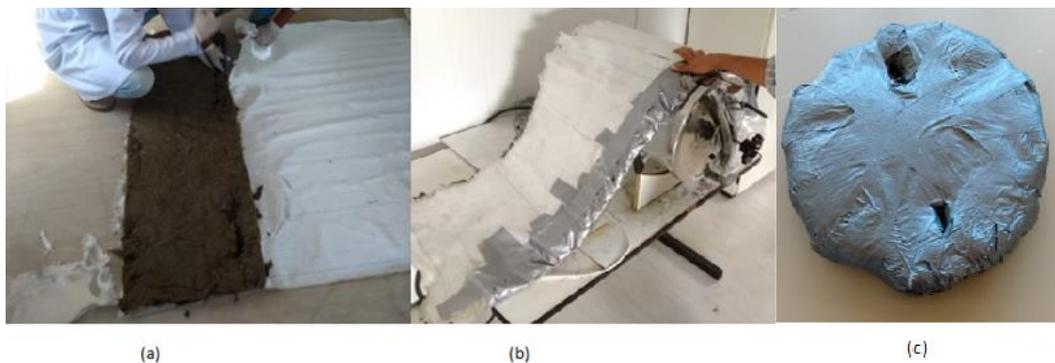


Figura 26: (a) Corte da camada de fibra de vidro, (b) início da fixação das camadas com uso de silver tape no molde do casco da panela, (c) isolamento móvel

Fonte: autoral

3.8.4. Base para suporte

Como o autoclave será utilizado com seu eixo principal na horizontal é necessário uma estrutura de base que permita o fácil manuseio do equipamento e a segurança do operador. Para isso foi construído uma base com estrutura de dois suportes que sustentam o autoclave na horizontal tornando o acesso à tampa e ao interior possível e operacionalmente cômodo. Além da função operacional a base também possui função de segurança, a estrutura vertical da base evita que haja contato com a parte térmica e elétrica da resistência situadas na base da panela.

A base foi feita a partir de madeira compensada e além do espaço para suporte da panela possui também espaço para o manuseio de equipamentos como o termostato tornando-se assim uma área de trabalho para a operação de cura. A estrutura possui uma área semi fechada para isolar a área de maior perigo do equipamento, toda a estrutura foi fixada com pregos.

Além da estrutura de madeira da base, alguns componentes como a grade interna e a cerâmica, que fazem suporte do material a ser curado, completam a construção do autoclave. A base de suporte do equipamento é ilustrado na figura 27 abaixo:

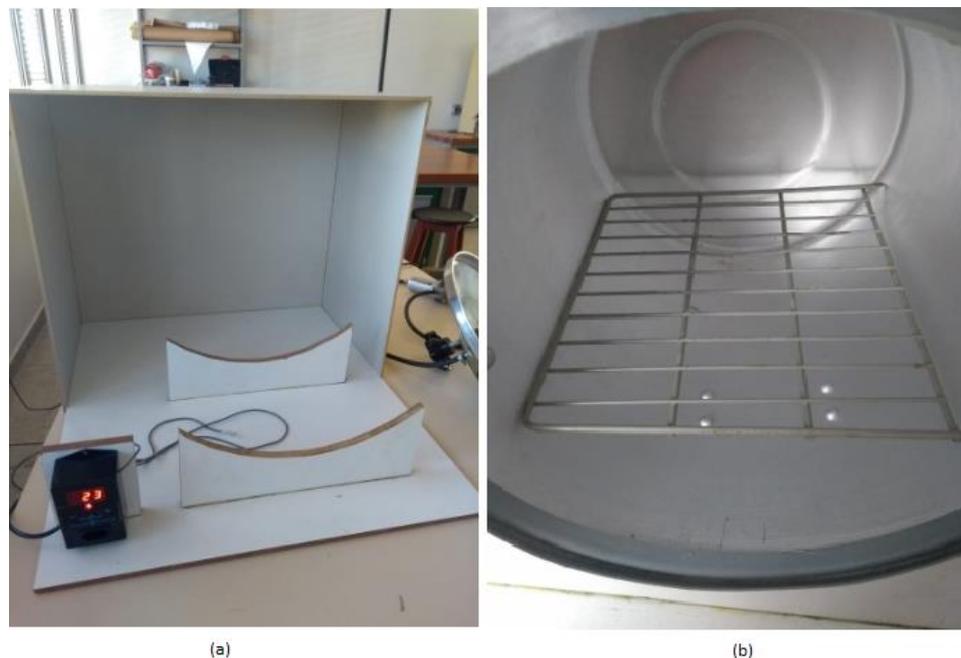


Figura 27: (a) Base de apoio e termostato, (b) suporte interno

Fonte: autoral

Após realizados todos os procedimentos necessários para unir os subsistemas de aquecimento, pressurização, isolamento, estrutural que compõe o equipamento, obteve-se o autoclave para cura de materiais compósitos. Este aparelho é apresentado na figura 28 a seguir.



Figura 28: Sistema completo do Autoclave

Fonte: autoral

3.9. Manual de Utilização

Antes de utilizar o equipamento para cura ou pós cura o operador deve fazer todos os procedimentos de aplicação da resina na fibra previamente preparando a peça para receber a cura. O processo de preparação do material compósito varia de acordo com o tipo de resina, o molde e complexidade do material.

Para realização da cura de compósitos utilizando o autoclave primeiramente monte a bancada para a pratica térmica. Para isso você deve:

- Verificar se o ambiente encontra-se limpo e que apenas o material necessário para a cura está em cima da bancada;
- Observar se há algum risco de contato entre a resistência e qualquer objeto que não faça parte do autoclave durante todo o processo;
- Posicionar o autoclave no suporte da base de forma a manter o acesso fácil à tampa;
- Preparar o sistema de pressurização conectando a mangueira do compressor com regulador de pressão à tampa;
- Preparar o sistema de aquecimento ligando o termostato e configurando sua temperatura de operação e seu decaimento. Para configurar a temperatura do termostato basta apertar e segurar um de seus botões para que ele mostre a temperatura configurada, ajuste essa temperatura de acordo com o processo de cura da resina. Para ajustar o decaimento de temperatura ao qual o termostato voltará a fechar o contato da resistência aperte e segure os dois botões do termostato para ir ao menu, aperte o botão até chegar na opção TAP, e configure para 1°C. Assim o termostato voltará a acionar a resistência quando esta cair para 1 °C abaixo de sua temperatura configurada.

Após a preparação da bancada, o autoclave poderá ser fechado ou pela tampa ou como mais recomendável pela peça de isolamento móvel para o início da sua fase de pré-aquecimento. Caso seja utilizado o isolamento móvel meça a temperatura no da parte interna do equipamento posicionando o termopar na parte interior pela abertura do isolamento como visto na figura 29.



Figura 29: Isolamento móvel na fase de pré-aquecimento com termostato medindo a temperatura interna

Fonte: autoral

O sistema de aquecimento pode ser ligado plugando a resistência no termostato, neste momento a resistência passará a receber energia e a aquecer até atingir a temperatura configurada. A temperatura de pré-aquecimento depende da temperatura que o compósito deve alcançar após a primeira rampa de aquecimento e de sua temperatura inicial, seu objetivo é tornar a distribuição de temperatura mais uniforme na parede do autoclave. A rampa de aquecimento do equipamento depende da posição do termopar e do método de isolamento. Na figura 30 podemos ver a rampa de aquecimento na situação da figura 29 com termopar medindo a temperatura interna do equipamento e isolamento feito com a camada móvel.

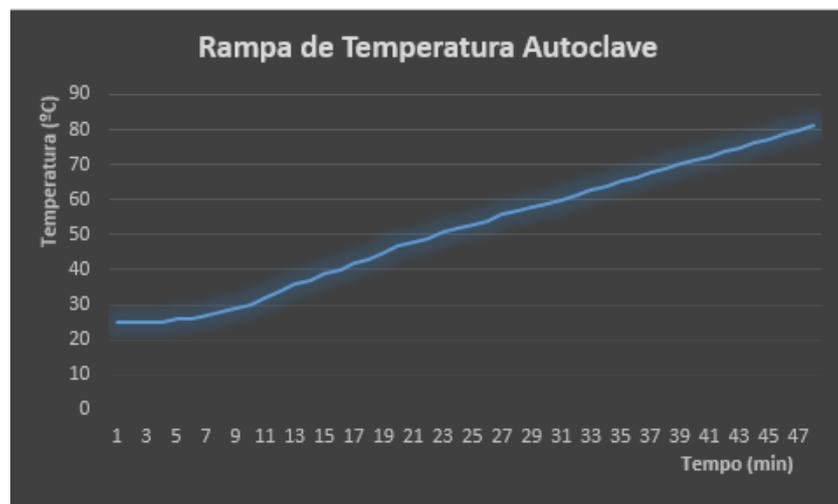


Figura 30: Rampa de temperatura no autoclave

Fonte: autoral

Podemos observar que a rampa de temperatura nesse caso é de em média $1,17\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, que é superior ao mínimo necessário de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para curas de materiais epóxis complexos e peças sofisticadas, assim, para a maioria dos materiais e resinas comuns no mercado a rampa é suficiente para realização da cura.

Após o pré-aquecimento caso seja necessário reconfigure a temperatura do termostato e utilizando luvas de proteção térmica abra a tampa (ou isolamento móvel) e leve o compósito até a base cerâmica dentro da panela. Reposicione o termostato para a parede externa da panela, feche a tampa com cuidado verificando a posição da borracha de vedação, apoie o suporte da tampa no suporte do casco e gire o regulador da estrutura da tampa no sentido horário para que ele fique bem fixado ao casco.

No momento de fechamento da tampa e verificação da sua boa fixação, ligue o compressor se verifique o regulador de pressão está permitindo que a pressão correta de ar esteja passando pela mangueira. O regulador de pressão é configurado puxando para baixo sua peça girante para o seu destravamento, após destravado gire o regulador observando no manômetro a pressão que está sendo transferida, lembre-se de ajustar também a pressão na saída do compressor para aumentar a pressão que chega no regulador. Caso todo o sistema esteja funcionando corretamente, trave o regulador apertando sua peça girante e prossiga com a cura anotando resultados relevantes até o tempo de retirada do material curado.

Com o fim do processo desligue o compressor, desconecte a mangueira de encaixe rápido pressionando a ponta do engate, afrouxe cuidadosamente a fixação da tampa e do casco, e com a própria haste do sistema de fixação da panela abra a tampa e com luva térmica retire a cerâmica sob o qual o compósito foi curado. Por fim desligue o termostato e desplugue a resistência ligada nele e limpe a bancada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Teste de Verificação

Para a verificação do autoclave foi feito um teste qualitativo onde foram realizadas duas curas de materiais compósitos de mesma massa, uma utilizando o forno e a outra não. O teste foi feito no dia 23/06/2018 no Laboratório de Sistemas Aeroespaciais na FGA Faculdade Gama. A resina utilizada foi o Epóxi 2001-BB mais endurecedor epóxi 3154, ambos da marca Redelease. De acordo com a fabricante a resina para pós cura do compósito deve ficar meia hora a temperatura ambiente e depois ser levada ao forno na temperatura máxima que ela suporta sem perder propriedades que é a 80 °C. A aplicação do Epóxi deve ser realizada junto com o seu endurecedor com proporção 2:1 entre epóxi e endurecedor com a mesma massa das fibras.

O teste teve início na fase de aplicação da resina. Dois pedaços retangulares de fibras foram pesados na balança, uma para a cura com autoclave e a outra para cura a temperatura ambiente. Da massa de fibra a ser curada foram cortadas em dois pedaços e a cura ocorreria com a resina aplicada a duas camadas de compósitos. Para a aplicação da resina precisamos calcular a estequiometria exata de epóxi e endurecedor a partir da massa de fibra no esqueleto do material. A partir da pesagem das fibras igual a 54g e usando a balança fazemos a mistura de Epóxi com endurecedor sendo 36g de Epóxi e 18g de endurecedor. A pesagem ocorre pesando-se primeiro a massa de Epóxi no recipiente tarado na balança e a seguir é adicionado o endurecedor até chegar a massa final da mistura. O processo pode ser visto nas figuras 31 e 32:

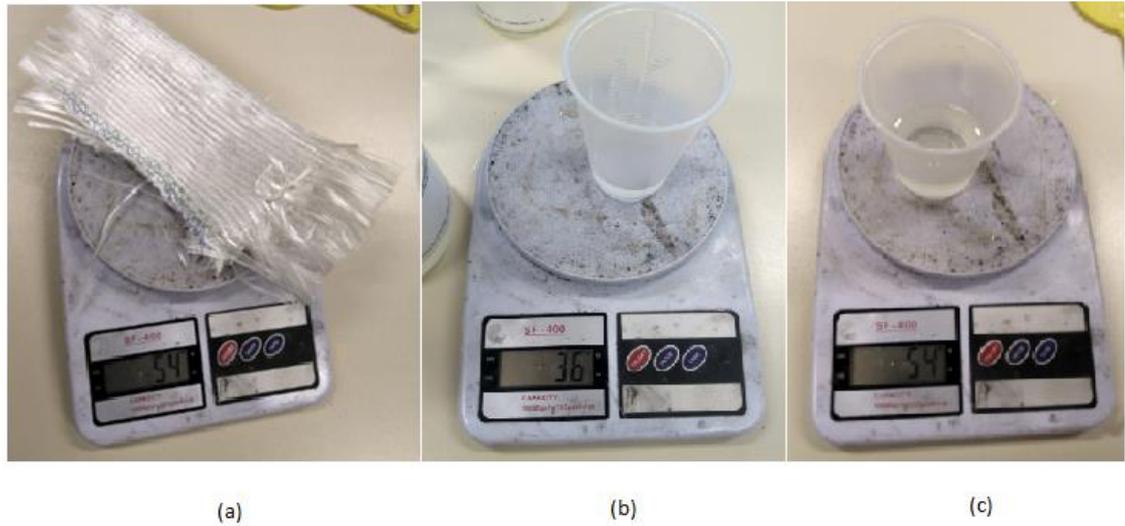


Figura 31: (a) Massa da fibra, (b) massa do Epoxi e (c) massa do Epoxi + endurecedor

Fonte: autoral



Figura 32: Aplicação da resina na fibra

Fonte: autoral

Após a mistura do epóxi com endurecedor até formar um líquido esbranquiçado foi feita a aplicação dessa resina nas fibras de vidro. A aplicação foi feita de forma cuidadosa com espátula e em cima do plástico para que impedir contato da resina com a mesa. O epóxi foi

aplicado as 17:55h e foi colocado com segurança no autoclave pré-aquecido a 80°C como na figura 33 às 18:25h enquanto a outra amostra ficou do lado de fora do forno. Durante o processo de cura o termostato, que estava configurado com temperatura de trabalho de 80 °C, manteve a faixa de variação de temperatura entre 76°C a 83° C na parede do autoclave. Às 20:10 o compósito foi retirado do forno para comparação com a amostra que ficou do lado de fora.

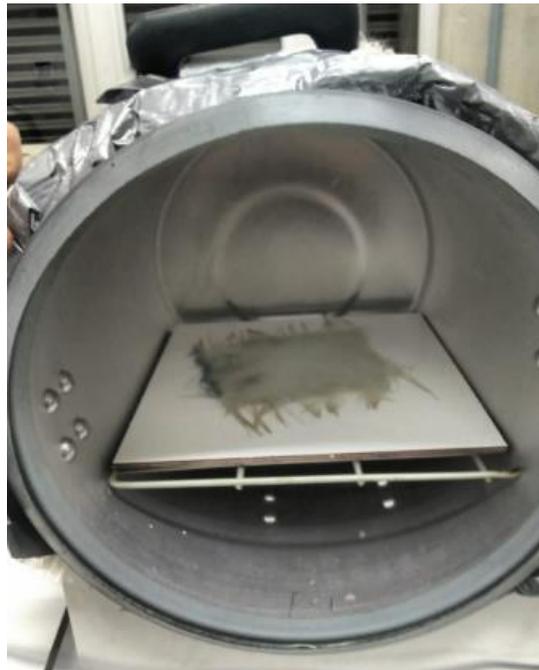


Figura 33: Posicionamento do compósito a ser curado no autoclave

Fonte: autoral

4.2. Resultados Qualitativos

O compósito curado no autoclave após mais de duas horas após aplicado a resina já obteve sua forma endurecida e homogeneia. O compósito curado a temperatura ambiente após esse período ainda apresentava resina pouco endurecida e foi necessário deixar o material mais um dia no laboratório para que endurecesse. A comparação dos dois compósitos pode ser vista na figura 34.



Figura 34: (a) Compósito curado no autoclave (b) compósito curado a temperatura ambiente (c) comparação lado a lado dos compósitos (verso)

Fonte: autoral

Após o resultado foi observado maior uniformidade na superfície resinada de fibras curadas no equipamento, uma maior compactação do material e principalmente a redução significativa no tempo de cura comparado com o material curado a temperatura ambiente.

O objetivo principal da construção do autoclave foi seu uso como ferramenta para a universidade dentro dos projetos científicos e fabricação de peças com material compósito de maneira mais rápida e eficiente que o método simples a temperatura ambiente.

4.3. Resultados Quantitativos

Para análise dos resultados quantitativos foi necessário submeter o material curado a testes mecânicos padronizados a fim de obter conclusões com validação científica. A observação da homogeneidade e compactação do material curado no autoclave como resultado qualitativo sugere que a peça também obterá melhor desempenho mecânico. Contudo, para verificar essa tendência o desempenho mecânico das peças deve ser analisado a partir de um teste de flexão seguindo a norma para ensaios de flexão ASTM D790.

O ensaio de flexão foi escolhido por ser um esforço com boa medição das propriedades de um compósito, pois as suas fibras aliadas a resina dão propriedade de leveza e resistência a flexão para o material. Para a realização do teste foi consultado na norma ASTM D790 as dimensões do corpo de prova necessárias para realização do teste. De acordo com a seção 7.4 da norma para materiais de modelagem (termosets e termoplásticos) as dimensões do corpo de prova devem ser de 127 mm de comprimento, 12,7mm de largura e 3,2mm de espessura resultando em uma relação de amplitude / profundidade de suporte de $16:1 \pm 1$ como visto na figura 35.

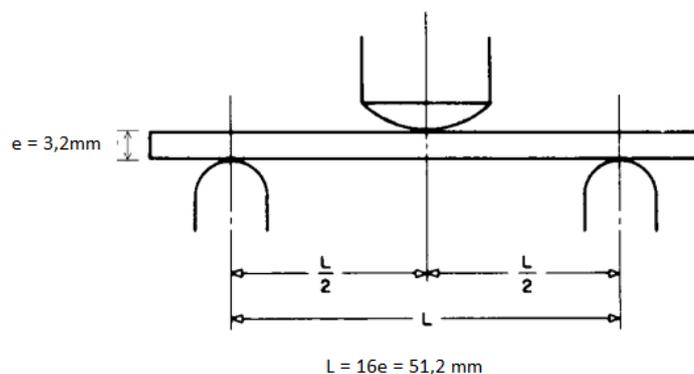


Figura 35: representação do corpo de prova com destaque para sua profundidade (e) e amplitude de suporte (L)

Fonte: Adaptado de ASTM D790

De acordo com a norma ASTM D790 seção 8.1 são necessários pelo menos cinco espécimes se cada amostra no ensaio de flexão. Os corpos de prova possuem formatos retangulares simples, logo foram utilizadas as peças curadas para modelar os corpos de prova. A espessura das peças curadas variam em torno de $3,3 \pm 1 \text{ mm}$ de acordo com as medições

feitas no paquímetro. Os moldes foram recortados utilizando a Dremel como visto na figura 36 abaixo:

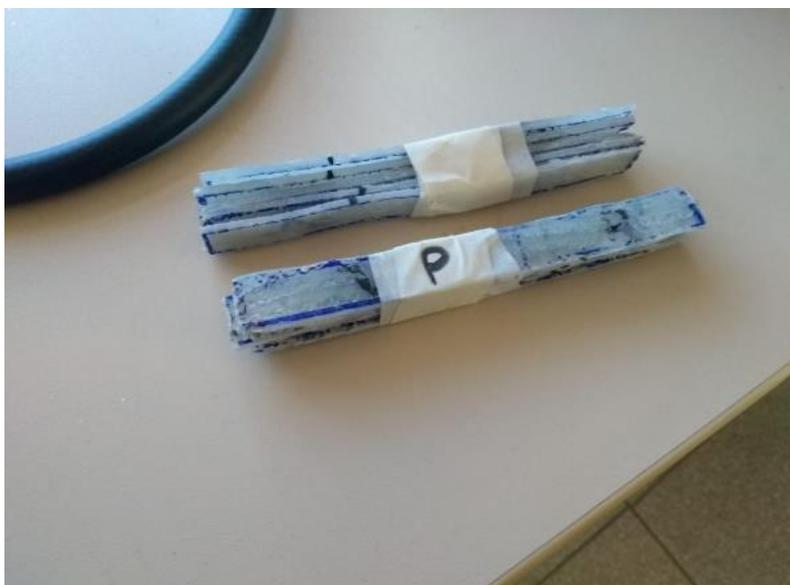


Figura 36: Confeção dos corpos de prova a partir das peças curadas. Em cima - corpo de prova curado a temperatura ambiente. Em baixo – corpode prova curado na panela

Fonte: autoral

Os materiais a serem testados são compósitos contendo duas camadas de fibras de vidro com mesma direção e sentido independentemente do seu processo de cura. Com cinco corpos de prova do material curado a temperatura ambiente e cinco do material curado no autoclave com dimensões variando de 127 ± 3 mm de comprimento e $12,7 \pm 1$ mm de largura foi realizado o ensaio de flexão na máquina de Laboratório de Materiais na Universidade de Brasília.

O corpo foi ajustado entre os pontos de apoio com a distância L entre eles calculada em 48 mm a partir da espessura média de 3 mm dos corpos de prova. A máquina impôs uma rampa de deslocamento do corpo de até este atingir a ruptura no momento em que a carga resistida pelo equipamento sofra redução repentina.

Foi gerado pelo equipamento gráficos da carga compressiva x extensão compressiva de cada uma das peças assim como dados importantes como tensão de ruptura e extensão de ruptura. Os dados foram armazenados as principais informações podem ser vistos no apêndice D.

Para o tratamento dos dados obtidos pelo teste foi calculado a tensão de ruptura média e o desvio padrão de cada amostra e a expansão média e o desvio padrão como vistos nas tabelas 3 e 4 abaixo:

Tabela 3 - Valores da tensão de ruptura obtidos pelo teste de flexão

Tensão Ruptura	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Média	Desvio padrão
Cura autoclave	390,21	324,15	404,31	317,06	305,71	348,29	45,46
Cura ambiente	308,72	405,78	347,37	321,36	261,43	328,93	53,08

Fonte: autoral

Tabela 4 - Valores da extensão de ruptura obtidos pelo teste de flexão

Extensão Ruptura	Peça 1	Peça 2	Peça 3	Peça 4	Peça 5	Média	Desvio padrão
Cura autoclave	6,65	5,52	6,1	5,52	4,98	5,75	0,64
Cura ambiente	5,19	7,65	6,79	5,6	5,18	6,08	1,10

Fonte: autoral

Os resultados do teste apontam uma melhora na resistência a flexão do material de aproximadamente 6%, assim como também demonstram uma menor flecha de ruptura de aproximadamente 4%. Porém o desvio padrão com cinco peças por amostra é relativamente alto, o que torna necessário um estudo mais aprofundado para obtenção de resultados mais confiáveis. Um futuro estudo para melhor verificação dos efeitos da pós-cura no autoclave pode ser feito com mais espécimes por amostra, corpo de prova feito com corte a água para melhor precisão das dimensões e chapa de compósito feita dentro de um molde para maior uniformidade da espessura.

4.4. Utilização do Equipamento em campo

Com o autoclave construído e validado foi possível concluir o projeto com seu uso pelos estudantes da Universidade de Brasília. O primeiro procedimento prático ao qual o autoclave foi necessário foi em um processo de pós cura de um modelo em miniatura de um kart feito com compósito pela empresa júnior Engrena. O kart será utilizado para exposição em feiras de tecnologia como a Campus Party e no ambiente universitário a fim de expor as novas tendências do uso de materiais compósitos no setor de engenharia automotiva.

Para agregar valor ao material do modelo do kart foi solicitado o procedimento de pós-cura da peça no autoclave. Realizando todos os procedimentos descritos no manual de utilização do equipamento foi feita uma pós cura com pré-aquecimento de 70°C e tempo de pós-cura de 1:30h a pressão de 10 psi. O procedimento pode ser visto na figura 37 abaixo:

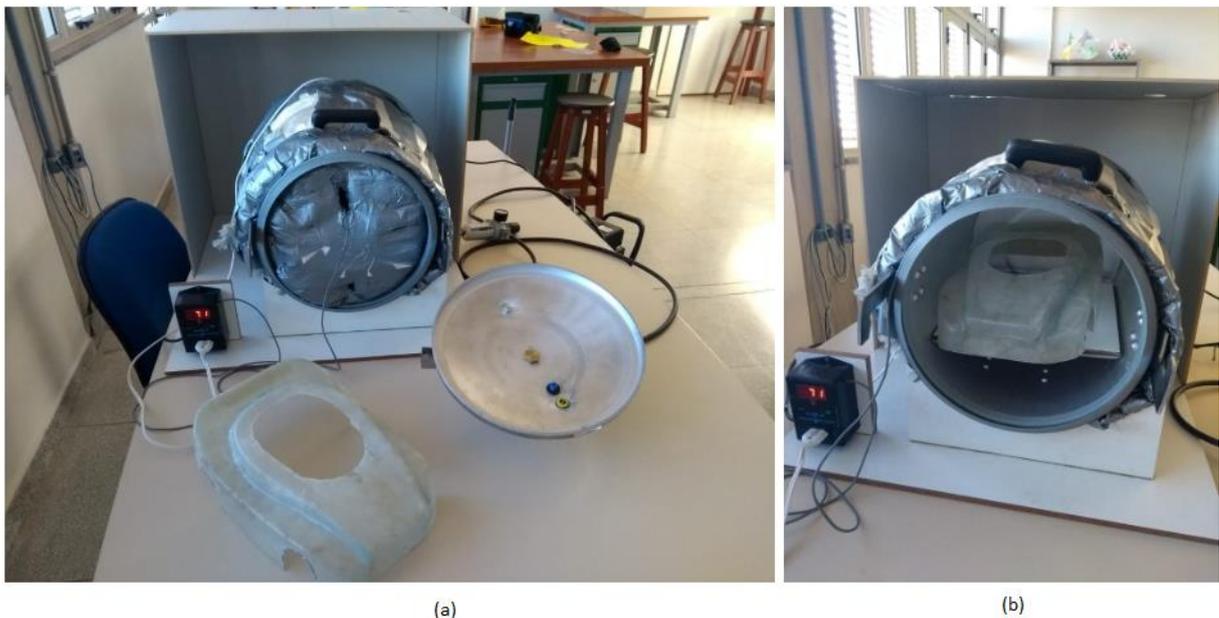


Figura 37: (a) autoclave pré-aquecido e molde de compósito (b) final do processo de pós cura do molde

Fonte: autoral

5. CONCLUSÃO

A partir do objetivo de atender as necessidades previstas pela Universidade de Brasília quanto a instrumentação de laboratório para cura de materiais compósitos, foi feita uma vasta pesquisa sobre o assunto para entender o processo que deve ser solucionado justificando assim a escolha da construção de um autoclave.

O autoclave dimensionado está de acordo com a demanda, segue normas e redundâncias de segurança, possui custo inicial de projeto baixo, boa possibilidade de fabricação, simplicidade de estrutura evitando possíveis imprevistos. Devido a verba disponível para o projeto foi feita uma solução alternativa adaptando-se uma panela para uso como autoclave e o mesmo dimensionamento foi feito para validar sua utilização.

O sistema alternativo adaptado possui limitações quanto ao projeto original, principalmente quanto a sua pressão de projeto que foi reduzida de 2 Mpa para 69 kPa (10 psi), a temperatura máxima de cura foi reduzida à capacidade do termostato de 200°C para 120°C, mas como vantagens o equipamento manteve o seu volume interno em torno de 35 litros e o isolamento alcançou com êxito o objetivo de manter a parede externa segura a temperatura de até 30°C. As limitações, porém, não impedem que a construção do autoclave atinja seu objetivo, pois a maioria das resinas comerciais são curadas até 80°C para não perderem suas propriedades, sua capacidade interna continuou semelhante ao projeto original e a pressão de trabalho na panela já viabiliza curas mais precisas da resina para as demandas da universidade.

A fabricação do autoclave no sistema alternativo permitiu o aprendizado do trabalho prático, a construção de um equipamento dimensionado previamente na teoria, assim como a análise de obstáculos que aparecem na prática e a tomada de decisão para ultrapassá-los dentro dos recursos disponíveis. O autoclave e o trabalho redigido servem como exemplo para um passo maior na construção futura de um equipamento mais robusto de acordo com a demanda e disponibilidade de recursos da universidade.

O objetivo principal do projeto de dimensionar, desenhar e construir um protótipo de autoclave para a cura de materiais compósitos foi concluído com sucesso. Assim como o objetivo principal com exceção das simulações de transferência de calor os principais estudos dos objetivos secundários foram concluídos assim como a demonstração do funcionamento do autoclave.

Por fim, vale destacar que para a continuidade do projeto por meio de trabalhos futuros, os alunos podem realizar os trabalhos não concluídos de simulação para análise dos fenômenos de transferência de calor dentro do equipamento, o sistema de isolamento poderia ser substituído por uma solução que evite o uso de fitas adesivas ao mesmo tempo que mantenha a eficiência de isolamento alcançado no projeto, além disso é fundamental otimizar o equipamento para aprimorar o seu funcionamento tanto em pressão positiva quanto trabalhando em ambiente de vácuo melhorando se possível a rampa de aquecimento , maiores testes quantitativos com corpos de prova em ensaios mecânicos devem ser feitos para ajudar a comprovar os efeitos do uso do equipamento além de gerar dados técnico-científicos a partir de diversos tipos diferentes de compósitos e diferentes métodos de cura.

6. REFERÊNCIAS

- CAMPBELL, F. C.; "**Prepreg Manufacturing**" in Manufacturing Processes for Advanced Composites, Elsevier", 2004, pp. 56-60.
- L. Davies, R. Day, D. Bond, A. Nesbit, J. Ellis e E. Gardon; **Effect of cure cycle heat transfer rates on the physical and mechanical properties of an epoxy matrix composite**, Composites Science and Technology, vol. 67, 2007., pp. 1892-1899
- MARTINEZ, C.B.; "**Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina**" – Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011, pp. 1, 5-7.
- STRONG, A. B.; **Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications**, Society of Manufacturing Engineers", 2008,
- PLACIDO A.C. V.; "**Optimização das condições de cura de compósitos para molde destinado à reparação de defeitos em radome de aeronave**", – Dissertação de mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2014. pp. 4, 5.
- REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C.; **O Uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial**, Matéria elaborada no Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol 10, nº 2, 2000
- ZANATTA, Rodrigo. **MATERIAIS COMPÓSITOS NA AVIAÇÃO - Os materiais que prometem reduzir o peso e o consumo das aeronaves modernas**, 2015, artigo disponível em <<http://www.aviacao.org/article/materiais-compositos/>>, acesso em 23/11/2017
- HANGAR33 (2015) < <http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves/>>, acessado em 06/10/2017
- DUTRA, R.M.; **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2000, pp. 309
- STEPANSKI, G. J.; SIGWALT, R.M.G.; **Materiais Compostos Na Indústria Aeroespacial**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tuiuti do Paraná, Curitiba, Brasil, 2008, pp. 12-17
- CAMPOS, M. O.; **ESTUDO COMPARATIVO DE PÁS PARA AEROGERADORES DE GRANDE PORTE FABRICADAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADAS COM FIBRA DE CARBONO OU FIBRA DE VIDRO.**; Dissertação M.Sc., Programa de

Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN/BSE-CCET, Natal, Brasil, 2013, pp. 54

Hexcel Registered Trade Mark; **HexPly Prepreg Technology**, 2013

MARCHORREDDO A., **Apostila de Dimensionamento de Equipamentos 1**; Fundação Técnica Educacional Souza Marques, 2008

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**, 4 edição. *Porto Alegre, RS: Editora McGrawHill*, 2012.

NETO, Carlos B., **Transferência de Calor**; Instituto Federal de Santa Catarina, campus São José, 2010

Da Silva, W.M., **Compósitos resina epóxi/nanotubos de carbono de paredes múltiplas: caracterização dos materiais de partida e avaliação das condutividades elétricas e térmicas**; Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear, 2009

GAIIEWSKI J. V. B.; KOZAKEVITCH K. A.; MENEZES M. A.C. **DESENVOLVIMENTO DE UM MICROFORNO ELÉTRICO UTILIZANDO CONTROLADOR PID**, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), Paraná, 2015

CESTILE, Marlon, **Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos, fornos elétricos**, 2012, volume 4, Unioeste, 2012.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME SeçãoVIII Divisão I: Código ASME para Caldeiras e Vasos de Pressão**. Tradução do Insituto brasileiro de Petróleo, 1º ed. Rio de Janeiro, IBP, 1986.

APÊNDICE A – Tabelas de Propriedades

Tabela A.1 - Tensões admissíveis das classes de materiais baseado no código ASME, seção VIII, Divisão I

Classe de Material	Forma de Apresentação	Especificação ASTM	Tensões admissíveis (kg/cm ²) @ temperatura (°C)																
			-30 a 93	150	205	260	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600
Aço-carbono	Chapas	A-285-C	1104	1104	1104	1104	1084	1064	1032	993	908	759	635	466					
	Tubos cond.	A-53-A	823	823	823	823	823	823	804	731	636	555	485	409					
	Tubos cond.	A-53-B	1027	1027	1027	1027	1027	1027	1005	913	775	647	541	395					
	Tubos t.c.	A-179	942	942	942	942	937	923	893	855	748	647	570	483					
	Forjados	A-181-60	942	942	942	942	937	923	893	855	748	647	570	483	345	224			
Aço-carbono Si para altas temperaturas	Chapas	A-515-60	1202	1202	1202	1202	1167	1139	1102	1053	908	759	635	466	329	224			
	Chapas	A-515-65	1308	1308	1308	1308	1273	1244	1206	1147	970	801	642	466	329	224			
	Chapas	A-515-70	1406	1406	1406	1406	1376	1350	1310	1240	1033	844	684	519	350	224			
	Tubos cond.	A-106-A	963	963	963	963	963	963	943	861	748	654	571	483	367	240			
	Tubos cond.	A-106-B	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	635	466	329	224			
	Tubos t.c.	A-210-A1	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	635	466	329	224			
	Forjados	A-105	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	684	519	350	224			
	Fundidos	A-216-WC1	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	684	519	350	224			
	Aço-carbono Si para baixas temperaturas	Chapas	A-516-60	1202	1202	1202	1202	1167	1139	1102	1053	908	759	612	466	329	224		
Chapas		A-516-65	1308	1308	1308	1308	1273	1244	1206	1147	970	801	612	466	329	224			
Chapas		A-516-70	1406	1406	1406	1406	1376	1350	1310	1240	1033	844	654	519	350	224			
Tubos cond.		A-333-6	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1177	1071	908	759	612	466	329	224			
Tubos t.c.		A-334-6	1202	1202	1202	1202	1202	1202											
Forjados		A-350-LF1	1202	1202	1202	1156	1095	1064	1032	993	908	759	612	466	329	224			
Fundidos		A-350-LF2	1406	1406	1406	1383	1317	1279	1241	1186	1033	844	654	471	350	224			
Aço-liga H Mo	Chapas	A-204-A	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1307	1294	1264	1040	716	447			
	Chapas	A-204-B	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1399	1363	1066	716	447			
	Tubos cond.	A-335-P1	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1101	1081	1048	1024	978	716	447		
	Tubos t.c.	A-209-T1	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1104	1101	1081	1048	1024	978	716	447		
	Forjados	A-182-F1	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1406	1399	1364	1066	716	447			
	Fundidos	A-217-WC1	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1308	1304	1289	1257	1223	1194	1022	716	447		

Fonte: MARCHORREDDO, 2008.

Tabela A.2 Propriedades térmicas dos materiais

Material / Composição	Propriedades a 300 K	
	ρ [kg/m ³]	k [W/m.K]
Alumínio		
Puro	2702	237
Duralumínio (96% Al, 4% Cu, Mg)	2787	164
Liga comercial 2024-T6	2770	177
Liga 195, fundida	2790	168
Chumbo	11340	35,3
Cobre, puro	8933	401
Bronze comercial (90% Cu, 10% Al)	8800	52
Latão 71 (70%Cu, 30% Zn)	8530	110
Cromo	7160	93,7
Estanho	7310	66,6
Ferro, puro	7870	80,2
Ferro Armco (99,75% puro)	7870	72,7
Aço carbono	7854	60,5
AISI 1010	7832	63,9
Aço de baixo cromo	7882	37,7

Fonte: NETO, CARLOS B. (2010)

Tabela A.3- Calor específico, difusividade e condutividade térmica com índice de confiança de 95% para a resina reticulada com Phr 10 e para os compósitos processados.

Amostra	% Em Massa MWNT	Massa Específica (ρ) kg.m ⁻³	Calor Específico J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Difusividade Térmica (α) m ² .s ⁻¹		Condutividade Térmica (k) W.m ⁻¹ .K ⁻¹	
				Valor	U _{95%}	Valor	U _{95%}
					(GUF)		(GUF)
Resina Pura	-	1182	606,2	0,17	0,01	0,12	0,01
	-	1182	606,2	0,18	0,01	0,13	0,01
Compósito (Acetona)	0,1	1150	536,4	0,11	0,01	0,07	0,01
	0,5	1130	538,0	0,12	0,01	0,07	0,01
	1,0	1140	540,0	0,13	0,01	0,08	0,01
Compósito (Sem Acetona)	0,1	1159	534,9	0,12	0,01	0,07	0,01
	0,1	1159	534,9	0,12	0,01	0,07	0,01
	0,5	1130	538,0	0,11	0,01	0,07	0,01
	0,5	1130	538,0	0,12	0,01	0,07	0,01
	1,0	1140	537,0	0,12	0,01	0,08	0,01
	1,0	1140	537,0	0,11	0,01	0,07	0,01
Compósito <i>Buckypaper</i>	2,0	1130	542,4	0,11	0,01	0,07	0,01
	4,0	1130	550,0	0,13	0,01	0,08	0,01
	4,0	1130	550,0	0,13	0,01	0,08	0,01

GUF – Guia para cálculo das incertezas de medições.

Fonte: Da Silva, W. M., 2009

Tabela A. 4 - Propriedades de resistências utilizadas em fornos

Material	Composição	Resistividade	Ponto de fusão (°C)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1,1221	1350
Nicromo V	Ni-Cr	1,0806	1400
Cromax	Fe-Ni-Cr	0,9975	1380
Nirex	Ni-Cr-Fe	0,9809	1395
Nilvar	Fe-Ni	0,8046	1425
Bronze comercial	Cu-Zn	0,0415	1040
Ni puro	Ni	0,0997	1450
Platina	Pt	0,1060	1773
Aço	Fe	0,0999	1535
Zinco	Zn	0,0592	419

Fonte: Cestile, 2012.

Tabela A.5. Performance térmica de lâs de vidro WALLFELT de acordo com a espessura

Performance Térmica

	Espessura / Coeficientes	Resistência Térmica (RT)	Condutividade Térmica
□	WALLFELT 4+ 50mm	1,19m ² °C/W	0,042 W/m °C
□	WALLFELT 4+ 70mm	1,78m ² °C/W	0,042 W/m °C
□	WALLFELT 4+ 100mm	2,38m ² °C/W	0,042 W/m °C

Fonte: (Isover Saint-Gobain, 2017)

Tabela A.6. Tabela de propriedades do alumínio com destaque no caso mais conservador adotado nos cálculos do vaso de pressão. no código ASME, seção VIII, Divisão I

Produtos de Alumínio e de Ligas de Alumínio						Tensão máxima admissível, MPa (Multiplicar por 10^6 para obter Psi), para temperatura de metal, °C, não superior a								
Espec. Nº	Designação da Liga	Tempera (Grau de endurecimento)	Biotolas ou Espessuras, mm	Resist. mínima à tração especif., MPa	Resist. mínima ao escoam. especif., MPa	P- Nº	Notas	Tensão máxima admissível, MPa						
								40	75	100	125	150	175	200
Chapas grossas e finas														
SB-209	1060	-O	1,3 - 76,0	55	17	21	.	12	12	11	10	9	8	6
		-H12	1,3 - 51,0	76	62	21	(1)	19	19	17	16	14	13	9
		-H14	1,3 - 25,0	83	69	21	(1)	21	21	21	21	18	13	9
		-H112	6,4 - 12,6	76	48	21	(1)	19	18	16	14	12	11	8
		-H112	12,7 - 25,0	69	34	21	(1)	17	16	15	13	12	10	7
			25,1 - 76,0	62	28	21	(1)	16	14	13	12	10	8	6
SB-209	1100	-O	0,2 - 76,0	76	24	21	.	16	16	16	16	12	10	7
		-H12	1,3 - 50,7	97	76	21	(1)	24	24	24	22	19	14	9
		-H14	0,2 - 25,3	110	97	21	(1)	28	28	27	25	19	14	9
		-H14	6,4 - 12,6	90	48	21	(1)	23	22	20	18	16	12	8
		-H112	12,7 - 51,0	83	34	21	(1)	21	20	19	17	15	12	8
			51,1 - 76,0	79	28	21	(1)	19	19	18	16	12	10	7

Fonte: ASME, seção VIII, Divisão I Tabela UNF-23.1

APÊNDICE B – Tabelas Informativas

Tabela B.1 – Vantagens e aplicações dos tipos de reforços

REFORÇO		VANTAGENS	APLICAÇÕES
Unidirecional	Fita Prepreg unidirecional UD	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistência e dureza em uma direção; - Fibras de baixo peso $\approx 100 \text{ g/m}^2$. - Fibras de alto peso $\approx 3000 \text{ g/m}^2$ para vidro e 800 g/m^2 para carbono 	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturas primárias de aeronaves • Produtos esportivos • Energia eólica • Estruturas de carga
	Corda simples	<ul style="list-style-type: none"> - Adequado para filamentos sinuosos; - Largura muito estreita para disposição precisa da fibra (1mm). 	<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes de pressão • Eixo acionador • Tubo
	Tira	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistência e dureza em uma direção; - Fibra de alto peso $\approx 500 - 1500 \text{ g/m}^2$; - Processamento econômico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturas primárias de aeronaves
	Tecido >80% Urdidura	<ul style="list-style-type: none"> - Para componentes que requerem predominante dureza e resistência em uma direção; - Boa manipulação; - Pesos de 160 a 1000 g/m². 	<ul style="list-style-type: none"> • Indústria aeroespacial • Esporte e Lazer
Tecido	Trançado equilibrado	<ul style="list-style-type: none"> - Dureza e resistência em duas direções; - Ótimas características de manipulação; - Seleção de estilo de tecidos; - Possibilidade de mesclar fibras; - Pesos de 20 a 1000 g/m². 	<ul style="list-style-type: none"> • Indústria aeroespacial • Esporte e Lazer • Energia eólica

Multiaxiais	NCF	<ul style="list-style-type: none"> - Economia de tempo, tecnologia de custo eficaz; = Menos resíduos para designs complexos - Dureza e resistência em múltiplas direções; - Habilidade para otimizar distribuição de peso na manta de “tecido”; - Sem ondulação; - Processo com custo reduzido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia eólica (pás)
	NC2®	<ul style="list-style-type: none"> - Igualmente ao NCF; - Filamentos de distribuição homogênea na produção da matriz; - Propriedades mecânicas melhoradas (compressão); - Efeito do fluxo da resina aumentado (capilaridade); 	<ul style="list-style-type: none"> • Industria automotiva

Fonte: Adaptado de Manual Prepreg Technology, 2013

Tabela B.2 – Tipos de Matrizes

Tipo	Características
Termofixos de poliéster	São as resinas mais comuns utilizadas em compósitos. A popularidade dessas resinas é causada pelo seu baixo custo, sua capacidade de fabricação de vários tipos de produto com diferentes propriedades e sua facilidade de moldagem.
Epóxi	Epoxies são a segunda família de resinas mais utilizadas em materiais compostos. Cerca de metade das resinas Epóxi são utilizadas para aplicações sem reforços. Suas boas propriedades com custo moderado levaram as resinas epóxis a serem as mais utilizadas em compósitos de alta performance (reforço com fibras de grafite ou carbono).
Éster de Vinil	Os ésteres de vinil são uma família de resinas termofixas onde suas propriedades se encaixam entre os poliésteres insaturados e epóxis. As resinas de vinil éster são ligeiramente mais caras do que os poliésteres

	insaturados, mas são mais baratas que os epóxis. São utilizados principalmente quando o custo do compósito é um fator importante, e as propriedades químicas e físicas dos poliésteres não são adequadas.
Fenólicos	A resina fenólica é o primeiro material termofixo sintetizado. Com custo atual 10-15% acima dos termofixos de poliéster. Eles ainda estão entre os termofixos mais importantes porque suas propriedades são únicas e valiosas.
Matriz de Carbono	A matriz de carbono apresenta característica singular em comparação com as outras matrizes. Ela é feita a partir de outra resina existe que após uma série de etapas se transforma em matriz de carbono. Dois exemplos de materiais comuns utilizados são as resinas fenólicas e o piche, produto deixado para trás após a remoção de componentes mais voláteis na destilação do petróleo. O compósito de carbono-carbono, fabricado com fibras de carbono e matriz de carbono é um compósito muito utilizado para demandas de alta performance, porém sua desvantagem é o custo muito elevado.
Bismaleimida (BMI) e outras Poliimidias	Os tempos de processamento e o custo extremamente elevados dos compostos de carbono-carbono levaram a esforços para desenvolver outros polímeros que tenham boas estabilidades térmicas a um custo menor. As poliamidas são polímeros compostos estruturais termicamente estáveis
Dicyclopentadieno (DCPD)	DCPD é uma nova resina no campo de compósitos devido a suas características distintas e vantajosas aos materiais utilizados, vantagens convincentes sobre os materiais atualmente sendo usado. Suas propriedades de dureza e resistência a corrosão são mais atrativas que os Ésteres de Vinil.

Fonte: adaptada de STRONG, 2008.

Tabela B.3 - Vantagens e utilizações de Matrizes

Tipo	Vantagens	Utilização
-------------	------------------	-------------------

Termofixos de poliéster(TP)	Baixo custo, variedade de fabricação, fácil moldagem, flexibilidade, desempenho em alta temperatura, retardador de chamas, boas propriedades de flexão, boas propriedades adesivas, boas propriedades mecânicas	Peças automobilísticas, casco e equipamentos diversos de barcos, roupas de arrasto, secadores, mercado de construção de casas, tanques, tubos para conter produtos químicos e encontra aplicação em quase todas as indústrias de manufatura existentes.
Epóxi	Baixa condutividade elétrica, baixa tendência a emitir gases, estabilidade térmica, boa adesão às fibras e outros materiais, força e rigidez, resistência a deformação, meios disponíveis de endurecer o epóxi sem sacrificar outras propriedades principais	<ul style="list-style-type: none"> • Sem reforços: revestimentos especialmente duráveis (tintas) e em adesivos • Com reforços: Placas de circuitos elétricos, compósitos de alta performance nos setores: aeroespacial, artigos esportivos, dispositivos médicos, transporte, etc
Éster de Vinil	Resistência máxima à corrosão (a solventes orgânicos e água), boas propriedades de adesão resina-reforço, resistência a chamas, excelentes características de processamento, boa resistência, custos razoáveis, menos emissões de estireno	Tubos e tanques para a indústria química, aplicações de controle de poluição do ar como torres de depuração, caixas de equipamentos (desempenho de impacto importante) e aplicações marinhas onde a resistência à corrosão é crítica.
Fenólicos	Excelente desempenho de inflamabilidade (baixa propagação de chama, baixa geração de fumaça e baixa toxicidade do fumo), baixa	Sem reforços: interruptores elétricos, caixas de junção, peças para o setor automotivo, peças para eletrodomésticos, alças para painéis

	transferência de calor, alta estabilidade térmica, resistência elétrica, Excelente resistência a solventes clorados, boa adesão	e frigideiras, adesivos para compensados , bolas de bilhar. Com reforços: paredes, tetos e pavimentos de interiores de aeronaves, interior de trens e outros meios de transporte, bocais de foguete
Matriz de carbono	Não ablativo (erosão do material ao regressar a terra), excelente estabilidade térmica,	Uso similar aos fenólicos com maiores temperaturas e alta performance: uso em bocais de saídas e em válvulas de foguetes, turbinas a gás, indústria automotiva de alta performance em pastilhas de freio e componentes internos.
Bismaleimida (BMI) e outras Poliamidas	Excelente estabilidade térmica, estabilidade oxidativa, dureza, processamento aceitável em especial o BMI (equivalente aos fenólicos) e boas propriedades mecânicas (equivalente aos melhores epóxis)	Uso em altas temperaturas de trabalho (288-316 °C): rolamentos e vedações em ambientes de alta temperatura, dutos em motores e lâminas do motor de avião, uso em radome de mísseis
Dicyclopentadieno (DCPD)	Dureza e resistência química aprimoradas em comparação aos poliésteres tradicionais.	Uso na cobertura de células de cloreto alcalino e em tubos resistentes a corrosão

Fonte: adaptado de STRONG, 2008

Tabela B.4 – Tipos de Fibras

Tipo	Características
Fibra de Carbono	A fibra de carbono possui uma combinação de propriedades mecânicas impossível de ser obtida com qualquer metal ou ligas metálicas, que são baixo peso, alta resistência e alto módulo de elasticidade

Fibra de Grafite	A fibra de grafite mantém as propriedades da fibra de carbono. A sua diferença com a fibra de carbono está no teor de carbono do material e a temperatura que ocorre o tratamento térmico
Fibra de Vidro	A fibra de vidro é uma nomenclatura utilizada tanto para descrever as fibras, quanto o material composto PRFV (Plástico Reforçado com Fibra de Vidro), que é um material composto por filamentos de fibra de vidro adicionados a qualquer tipo de resina
Fibra de Boro	A fibra de boro é produzida a partir de um processo de deposição de vapor químico sobre um fio de tungstênio ou grafite. Seu principal uso é em aplicações que exigem alta resistência
Fibra de Aramida	A fibra de aramida, mais conhecida com Kevlar, tem sua resistência ao calor como sua principal característica. Esse material chega a ser sete vezes mais resistente ao calor por unidade de peso que o aço

Fonte: adaptado de STRONG, 2008

APÊNDICE C – Pesquisa de Mercado

Tabela C.5 – Pesquisa de mercado para construção do autoclave

Peça	Preço médio
2 Chapas planas aço carbono 25mm	R\$ 1.082,00
1 tubo de aço carbono di=30cm esp=4,75mm	R\$ 781,00
4 tirantes rosqueados 1 polegada mais porcas	R\$ 50,00
Anel de vedação 1 m	R\$ 4,00
Tela de apoio	R\$ 36,00
Resistências para aquecimento	R\$ 30,00
Termostato	R\$ 31,00
Regulador válvula de pressão	R\$ 35,00
Resina Epóxi para vedação	R\$ 96,00
Manta de lã de vidro	R\$ 27,00
Compressor	R\$ 400,00
Válvula de pressão	R\$ 16,00
Total	R\$ 2.588,00

Fonte: autoral

APÊNDICE D – Resultados ensaio de flexão

Cura a temperatura ambiente - Peça 1:

Carga de ruptura (N): 308,72226

Extensão de ruptura (mm): 5,19025

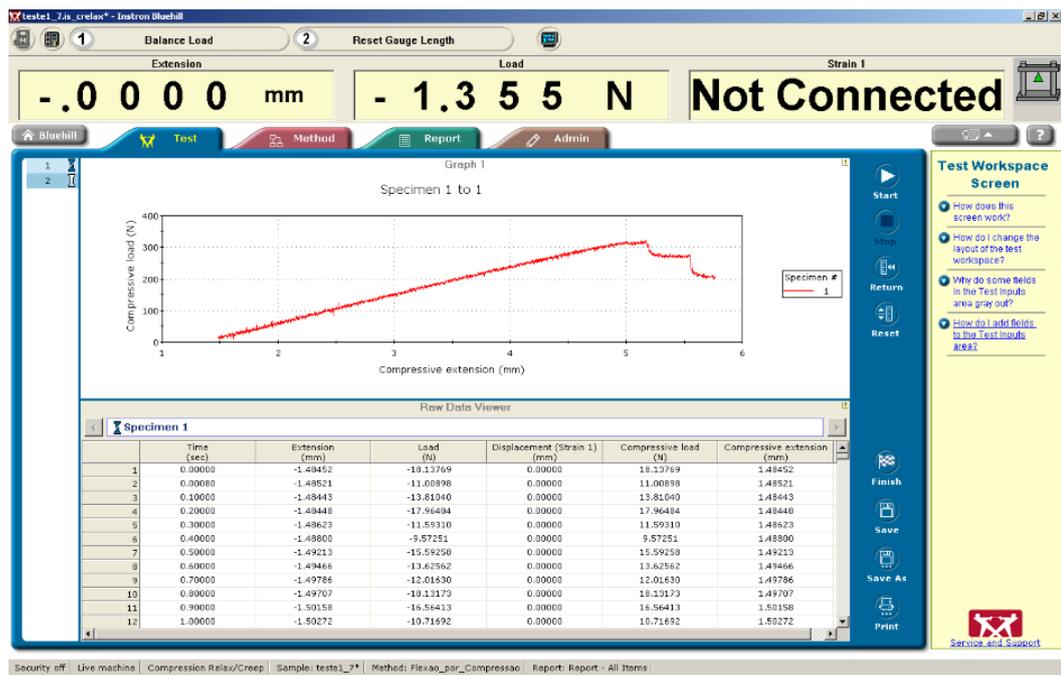


Figura D.1: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 1 curada a temperatura ambiente

Fonte: autoral

Cura a temperatura ambiente - Peça 2:

Carga de ruptura (N): 405,78247

Extensão de ruptura (mm): 7,64778

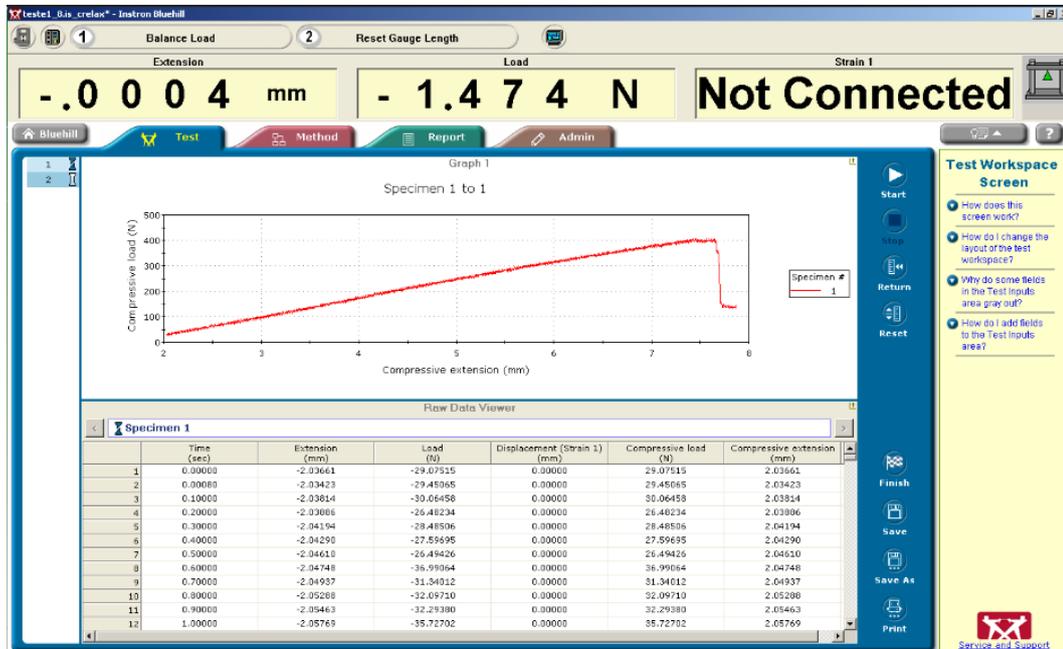


Figura D.2: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 2 curada a temperatura ambiente

Fonte: autoral

Cura a temperatura ambiente - Peça 3:

Carga de ruptura (N): 347,36990

Extensão de ruptura (mm): 6,78727

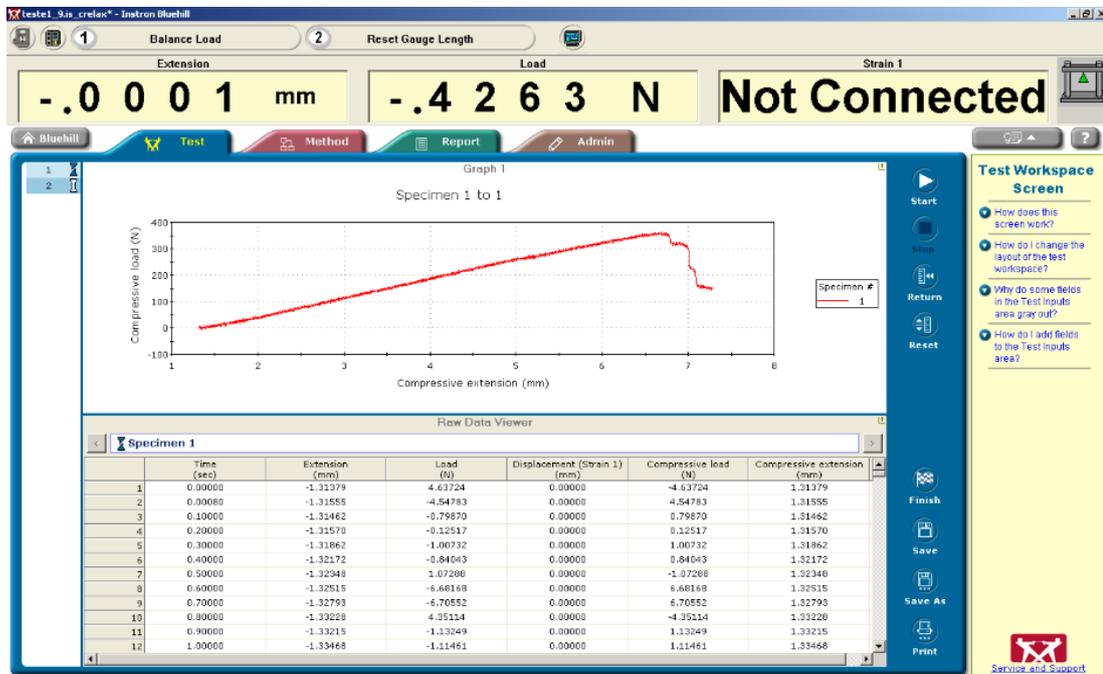


Figura D.3: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 3 curada a temperatura ambiente

Fonte: autoral

Cura a temperatura ambiente - Peça 4:

Carga de ruptura (N): 321,35843

Extensão de ruptura (mm): 5,65798

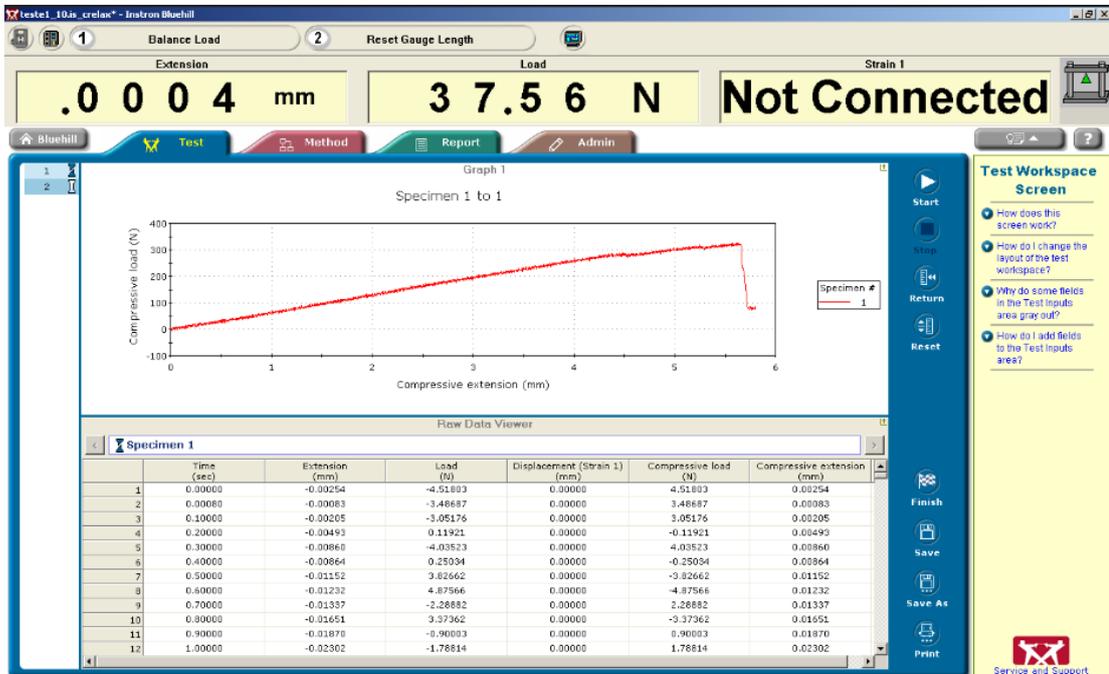


Figura D.4: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 4 curada a temperatura ambiente

Fonte: autoral

Cura a temperatura ambiente - Peça 5:

Carga de ruptura (N): 261,42596

Extensão de ruptura (mm): 5,17989

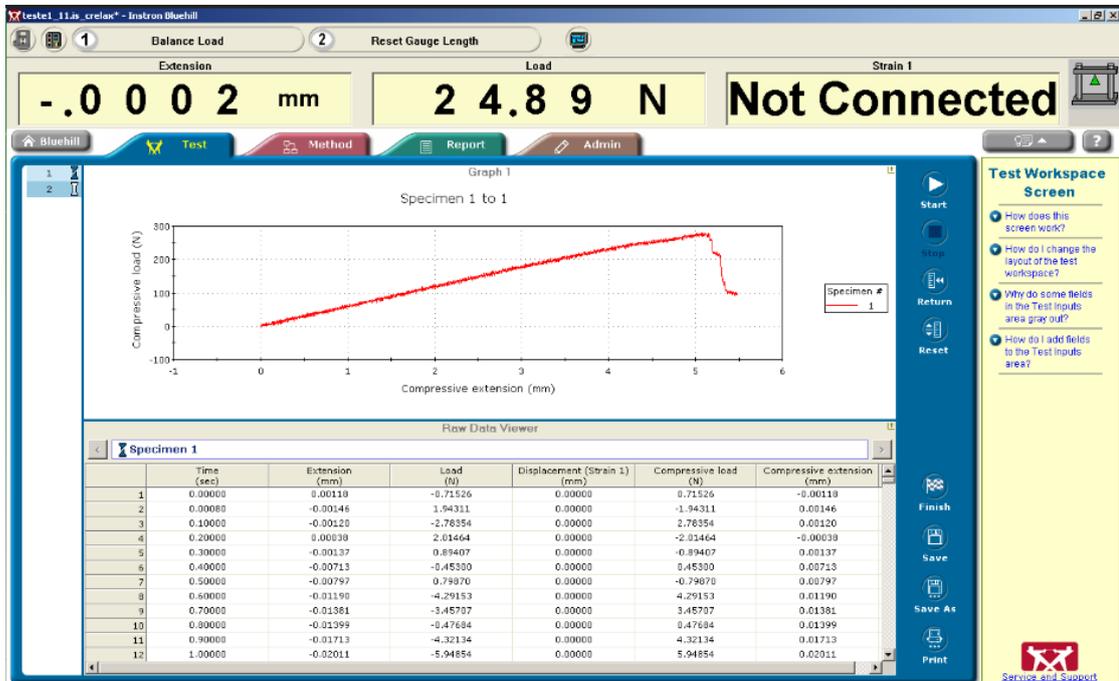


Figura D.5: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 5 curada a temperatura ambiente

Fonte: autoral

Cura no autoclave - Peça 1:

Carga de ruptura (N): 390,21371

Extensão de ruptura (mm): 6,65401

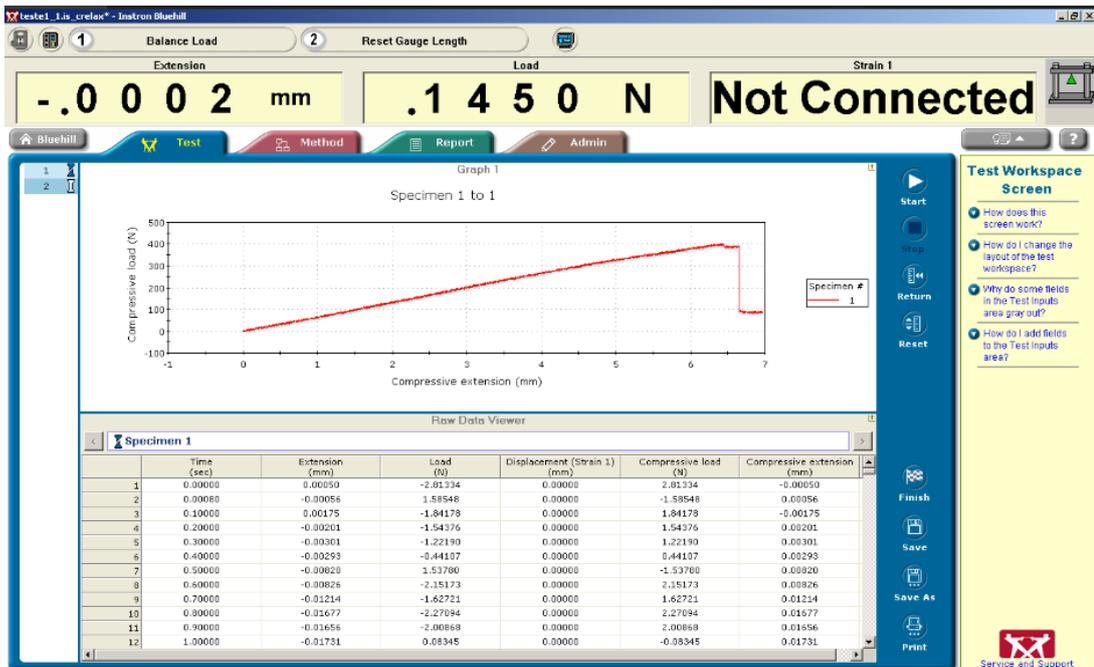


Figura D.6: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 1 curada no autoclave

Fonte: autoral

Cura no autoclave - Peça 2:

Carga de ruptura (N): 324,14795

Extensão de ruptura (mm): 5,52158

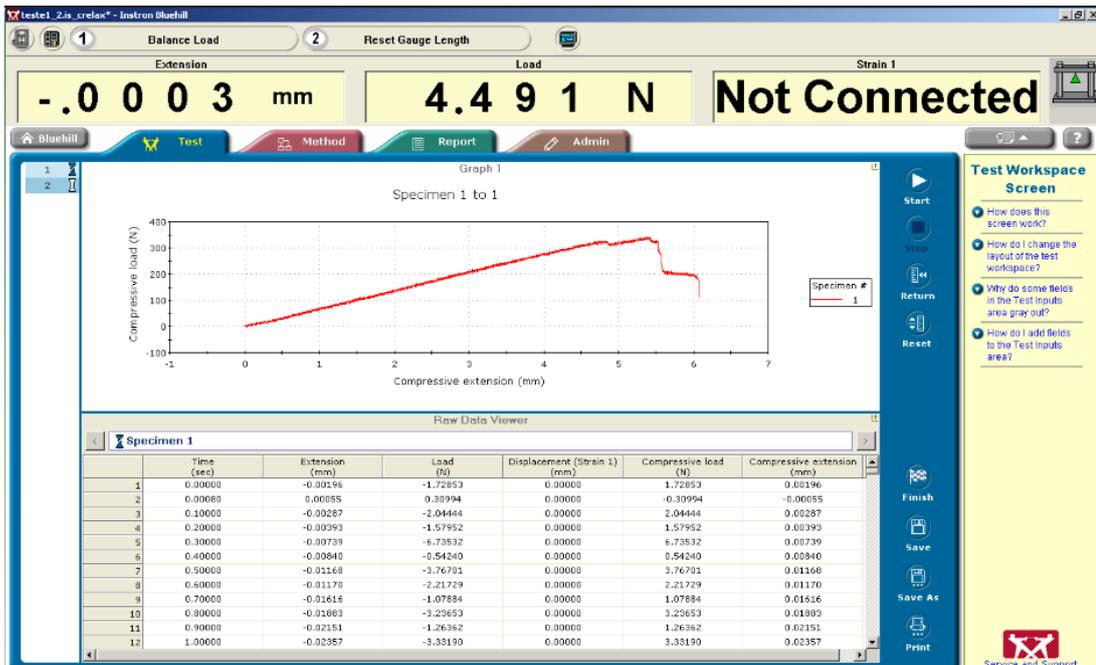


Figura D.7: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 2 curada no autoclave

Fonte: autoral

Cura no autoclave - Peça 3:

Carga de ruptura (N): 404,31024

Extensão de ruptura (mm): 6,10010

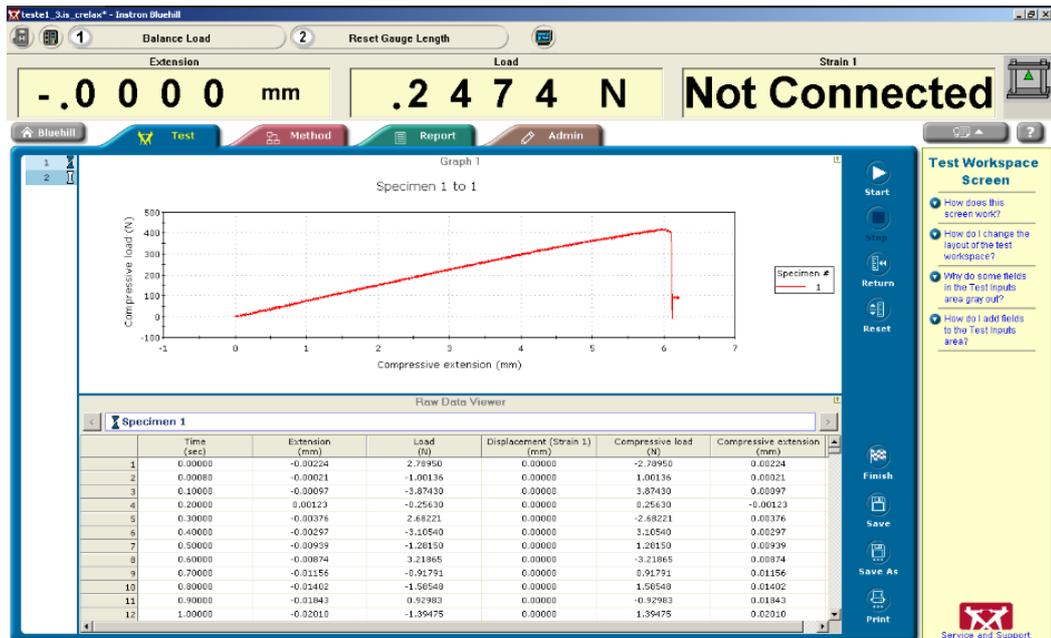


Figura D.8: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 3 curada no autoclave

Fonte: autoral

Cura no autoclave - Peça 4:

Carga de ruptura (N): 317,06094

Extensão de ruptura (mm): 5,52827

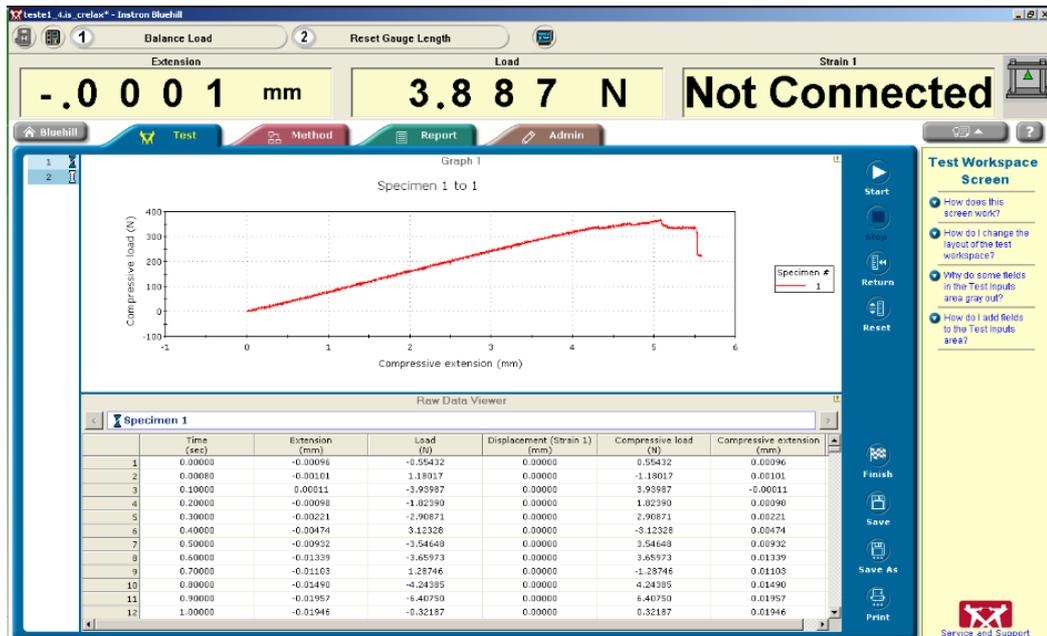


Figura D.9: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 4 curada no autoclave

Fonte: autoral

Cura no autoclave - Peça 5:

Carga de ruptura (N): 305,70627

Extensão de ruptura (mm): 4,98449

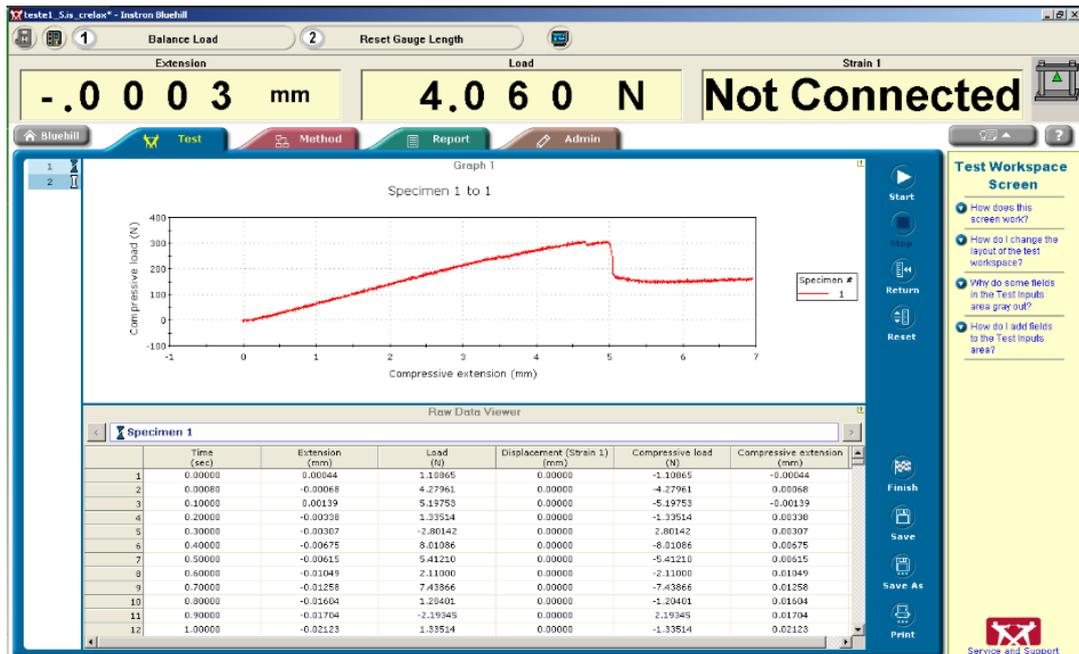


Figura D.10: Gráfico carga(N) x extensão(mm) e dados da peça 5 curada no autoclave

Fonte: autoral