



**Guilherme Ribas
Leandro Rodrigues**

**DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTUFA PARA SECAGEM
DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**

Horizontina

2013

**Guilherme Ribas
Leandro Rodrigues**

**DIMENSIONAMENTO DE UMA ESTUFA PARA SECAGEM DE
COMPÓSITOS DE FIBRA DE CARBONO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Ademar Michels, Dr.

Horizontina

2013

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“Dimensionamento de uma estufa para secagem de compósitos de fibra de carbono”

**Elaborada por:
Guilherme Ribas
Leandro Rodrigues**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 04/12/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Ademar Michels
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Prof. Eng. Vilmar Bueno
FAHOR – Faculdade Horizontalina**

**Horizontalina
2013**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou quando eu mais precisei e sempre me incentivou a seguir em frente.

AGRADECIMENTO.

Agradeço aos meus pais pelo apoio e afeto demonstrados, porque sem eles eu não teria chegado tão longe.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram ao longo do caminho.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação
determina o que você conquista.”

Aldo Novak

RESUMO

Este trabalho apresenta o dimensionamento de um sistema de secagem a vácuo, a ser empregado pela equipe Águia FAHOR de *aero design* na confecção de componentes que utilizem compósitos, com a finalidade de participar em competições nacionais de engenharia envolvendo aeromodelos. O que motivou a escolha deste tema foi o fato da equipe Águia FAHOR não contar com um meio adequado para a produção de componentes, sendo a cura destes componentes feita à temperatura ambiente e não permitindo a obtenção de peças com a qualidade ideal. Para que a cura dos materiais compósitos garanta a qualidade estrutural, o compósito deve ser submetido a um aquecimento em um ambiente onde a pressão seja inferior à atmosférica, por isso o uso de uma estufa faz-se necessário para obter materiais com qualidade superior. Para dimensionar a estufa foram usadas simulações feitas usando software de desenho do tipo CAD, principalmente o software *FlowSimulation*, além de consulta a bibliografia disponível referente ao assunto. Também foi realizada uma pesquisa referente à cura dos materiais compósitos, para a obtenção de dados que possibilitassem a elaboração de uma estufa que atendesse as necessidades da equipe Águia FAHOR. Em seguida passou-se a realização dos cálculos e simulações usando o software *FlowSimulation* para obter os dados referentes ao funcionamento da estufa a vácuo, e necessários para o seu dimensionamento. Com o dimensionamento da estufa e o resultado das simulações foi possível perceber que o uso de vácuo na secagem de compósitos, é de grande ajuda para o processo de cura, pois permite uma secagem mais uniforme devido a melhor transmissão do calor dentro da estufa. Ressalta-se que o uso do vácuo na secagem de compósitos permite uma secagem mais uniforme, além de permitir um controle maior sobre a qualidade do material usado.

Palavras-chave:

Dimensionamento. Estufa a vácuo. Secagem de compósitos

ABSTRACT

The objective of this work is to dimension a vacuum drying system for composites, for the use of the Águia FAHOR aero design team in the production of components made of composites, with the intention of participate in national engineering competitions involving model aircrafts. What motivated the choice of this subject was the fact that the Águia FAHOR aero design team, don't possess adequate equipment for the production of components that have composites in its composition, usually curing these components at the environmental temperature which don't allow the attainment of components with the desired quality during the process. To guarantee the attainment of components with the recommended structural quality, the composite must pass through a curing process where it'll be heated in the presence of a vacuum, for this reason a stove is necessary to obtain components with better structural quality. In order to dimension the stove, simulations were made using CAD drawing software, specifically the FlowSimulation, in addition a bibliographic research was conducted in order to gather material concerning the subject. A research involving composites curing was also conducted, in order to gather information that allowed the construction of a stove, capable of meet the needs of the Águia FAHOR team. After that the calculations were made as well as simulations using the software FlowSimulation, to gather enough data concerning the vacuum stove's operation. With the dimensioning of the vacuum stove and the results of the simulations, the advantage of using vacuum in the process of composites curing is clear, because allow a better drying of the composites thanks the increased heat transmission inside the stove. Also should be noted that the use of vacuum in composites curing allows a more even drying, ensuring a better quality control of the used material.

Keywords:

Dimensioning. Vacuum stove. Composites drying

LISTA DE FIGURAS

Figura 01- Classificação dos secadores baseado no método de operação.....	15
Figura 02- Classificação dos Compósitos.	17
Figura 03- Região de trabalho de diversas bobas de vácuo.....	24
Figura 04- Fluxo da radiação com pressão atmosférica.....	32
Figura 05- Fluxo de radiação no vácuo.....	33
Figura 06- Variação da temperatura ocorrida pela radiação à pressão atmosférica.....	34
Figura 07- Variação da temperatura ocorrida pela radiação no vácuo.....	34
Figura 08: Fluxo da convecção no vácuo.....	35
Figura 09- Vista explodida da estufa.....	36
Figura 10- Desenho da estufa montada.....	37
Figura 11- Vista interna da estufa.....	37
Figura 12- Vista externa da estufa.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 SECAGEM INDUSTRIAL.....	14
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	16
2.2.1 FIBRA DE CARBONO.....	18
2.2.2 Resinas epóxi	20
2.3 VÁCUO	21
2.4 BOMBAS DE VÁCUO	23
3 METODOLOGIA.....	25
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	25
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	26
4.1 ROTEIRO DE CÁLCULO PARA UMA ESTUFA DE BAIXA PRESSÃO	26
4.1.1 DIMENSIONAMENTO DA ESPESSURA DO ISOLANTE TÉRMICO	28
4.1.2 Dimensionamento da potência necessária para a estufa	28
4.1.3 DIMENSIONAMENTO DA RESISTÊNCIA ELETRICA.....	30
4.2 SIMULAÇÕES DO FLUXO DE RADIAÇÃO	32
4.2.1 SIMULAÇÕES DO FLUXO DE CONVECÇÃO.....	35
4.3 DESENHOS DA ESTUFA	36
5 CONCLUSÕES	39
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
ANEXO 01- CATÁLOGO DA BOMBA ESCOLHIDA	43
ANEXO 02- VALORES DO COEFICIENTE DE CONVECÇÃO “H” PARA SITUAÇÕES DE CONVECÇÃO NATURAL	44
ANEXO 03 – CLASSIFICAÇÃO DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE MANTA MI.	44
ANEXO 04 – CARGA ESPECÍFICA SUPERFICIAL	45
ANEXO 05 – PROPRIEDADES DE ALGUNS MATERIAIS UTILIZADOS COMO RESISTÊNCIA.....	45
ANEXO 06 – CARACTERÍSTICAS DAS LIGAS CROMEL E COPEL.....	46

1 INTRODUÇÃO

O trabalho foi feito do dimensionamento e do projeto de uma estufa de secagem a vácuo, capaz de realizar a cura de materiais compósitos de maneira a permitir que as peças produzidas tenham a qualidade mais próxima da ideal. Devido a importância da resistência estrutural dos compósitos, quanto mais perto do valor recomendado melhor, porque as propriedades dos compósitos dependem da organização da estrutura, por isso a cura desses materiais é muito importante, pois se não for realizada da maneira correta resultará em um compósito com uma estrutura inadequada e conseqüentemente inutilizando o material.

A secagem é a operação, pela qual é retirada a umidade contida nos diversos materiais de acordo com COSTA (2007). Por possuir várias aplicações diferentes, a secagem é um dos processos mais comuns em uma linha de produção, não importa de qual tipo de empresa. A secagem ainda conforme (o autor) COSTA (2007) pode ser usada para dar um acabamento final ou equilibrar a umidade de um material processado ao ar ambiente, para conservar e para alterar as características do material através da modificação da sua estrutura. No caso deste trabalho, o objetivo é projetar uma estufa de secagem a vácuo para providenciar um melhor acabamento aos compósitos usados pela equipe Águia FAHOR de Aero design.

A principal razão para a realização do presente trabalho é a de que a equipe Águia FAHOR usa frequentemente na construção de suas aeronaves materiais compósitos. Sendo que o processo de cura desses materiais é feito a temperatura ambiente e exposto à umidade do ar, o que resulta na produção de materiais de qualidade inferior. Considerando o elevado preço dos compósitos, um material que não é devidamente curado representa um desperdício tanto de dinheiro quanto de recursos.

Portanto partindo do pressuposto de que materiais compósitos que passam por um processo de cura adequado, com temperatura constante e umidade controlada, apresentam uma qualidade superior a aqueles expostos ao ambiente, espera-se que ao fornecer a equipe os meios adequados para a fabricação de compósitos, a equipe possa além de produzir componentes de melhor qualidade possa também aproveitar melhor o material disponível, evitando desperdícios e gastos com compra de matéria-prima adicional.

O grupo planeja dimensionar e projetar uma estufa de secagem a vácuo a fim de providenciar a fabricação de compósitos de qualidade superior por parte da equipe Águia FAHOR. Espera-se que o presente trabalho possa ser de utilidade para a equipe e que permita um melhor controle sobre os materiais compósitos produzidos e utilizados na confecção de suas aeronaves futuras. Espera-se também confirmar a hipótese de que a secagem a vácuo é melhor que a temperatura ambiente na cura de compósitos.

O principal objetivo do presente trabalho é dimensionar um sistema de secagem a vácuo para materiais compósitos como a fibra de carbono, visando proporcionar uma cura mais homogênea, melhorando a resistividade dos mesmos, através da elaboração de um conceito de um sistema de secagem a vácuo, definindo os requisitos de dimensionamento necessários para o sistema de secagem e realizando simulações no software CAD e realizar o projeto no mesmo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O primeiro sistema de secagem existente no mundo foi o de secagem na própria natureza, com a utilização do sol e ar seco para a secagem dos produtos, sendo eles em sua maioria grãos colhidos nas lavouras, porém a qualidade desses produtos ficava comprometida devido a não homogeneização da secagem, variando de acordo com o clima em que o produto ficou exposto. Diante desse fato surgiu a necessidade da construção de secadores especiais.

A secagem é uma das intervenções industriais mais usadas na prática, tanto para o acabamento final ou balanceamento da umidade própria dos diversos materiais processados com o ar ambiente, como é o caso das madeiras e de seus derivados, das borrachas, dos couros, dos plásticos, da celulose, como para a sua melhor conservação, como é o caso dos cereais, dos alimentos e dos materiais perecíveis de uma maneira geral (COSTA, 2007).

Para Mano (1991, p.4), “plásticos de engenharia são polímeros que podem ser usados para aplicações de engenharia, como engrenagens e peças estruturais, permitindo seu uso em substituição a materiais clássicos, particularmente metais”. Ainda conforme o autor também é incluído entre os plásticos de engenharia as resinas epoxídicas, fenólicas, ureicas e melamínicas, que são termorrígidas’.

2.1 SECAGEM INDUSTRIAL

Para Queiroz (2013), a secagem é um processo de transferência simultânea de calor e massa. É a energia térmica necessária para evaporar a água que flui da face do produto para o meio externo de secagem que na maioria das vezes é o ar.

A secagem é o tratamento de remoção da água ‘livre’ de uma substância, que está contida dentro de um material sem ser parte de sua composição original. Conforme Heck (2009) “A secagem é utilizada para facilitar o manuseio de substâncias pulverulentas; para baixar o custo de transporte de matérias-primas; para aumentar o valor de uma commodity ou para cumprir especificações a respeito da matéria prima ou de um produto”.

Conforme Weber (2005) os secadores podem ser classificados como:

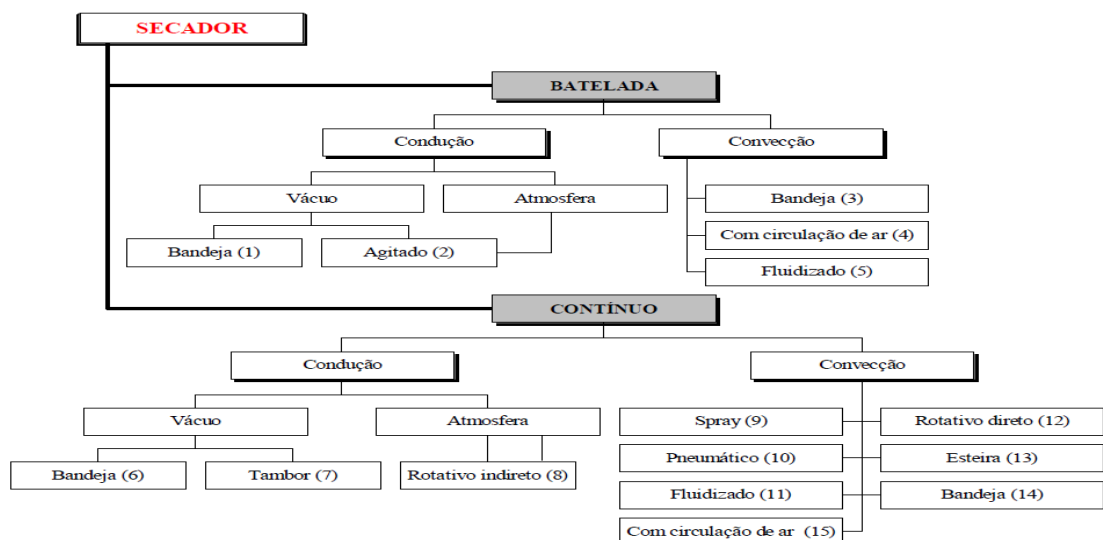
- Secador estático ou dinâmico: No secador estático o produto a ser secado permanece o tempo todo parado no interior do secador, já em

um secador de secagem dinâmica, o produto fica em constante movimento.

- Secadores fixos: Permanecem instalados fixos em uma unidade de recebimento e secagem.
- Secadores móveis: São secadores de pequeno porte, que são montados em cima de uma estrutura móvel.
- Secadores contínuos e intermitentes: É um sistema de secagem no qual os grãos passam mais de uma vez pela torre do secador e os secadores contínuos podem trabalhar tanto como o intermitente ou não, pois possuem duas câmaras de secagem.
- Secadores de fluxo de ar: Os produtos, durante o processo de secagem, seguirão sempre um único fluxo que é vertical, enquanto o ar de secagem poderá ser cruzado, concorrente, contracorrente ou misto.
- Secadores insuflação ou aspiração: O secador por insuflação trabalha com o fluxo de ar da fornalha para o ventilador e depois para o secador, já o secador por aspiração o ventilador se localiza depois do secador.

Para Park et al (2007), podemos classificar os secadores segundo o método de operação conforme a (figura 1):

Figura 1- Classificação dos secadores baseada no método de operação.



Fonte: Park et al, 2007.

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Materiais compósitos são materiais oriundos da mistura de dois ou mais materiais diferentes que acabam resultando em um novo material com características especiais, que pode ser usado em aplicações específicas. Martinez (2011) afirma que “a vantagem advém da definição dos materiais compósitos, na possibilidade de se misturar dois ou mais materiais diferentes obtendo um terceiro material com características compostas dos materiais utilizados”.

Os materiais utilizados para análise nesse estudo são de engenharia avançada, possuem mais de um componente em sua estrutura, sendo esses chamados de compósitos. Para Carneiro (2009) compósitos são materiais que possuem uma estrutura constituída por uma combinação de dois ou mais produtos não solúveis entre si, sendo que um dos seus produtos é chamado de reforço e outro de matriz. Concreto, madeira e osso humano são alguns tipos de compósitos.

Independentemente de que tipo for o material, seja ele o reforço ou a matriz, deve ter características próprias a sua função, no caso do material usado do reforço ele deve principalmente ser resistente, para criar a rigidez estrutural necessária no compósito. Mano (1991) apresenta a seguinte definição sobre materiais de reforço.

Os materiais de reforço devem ter resistência, rigidez e maleabilidade, que geralmente se encontram nas fibras. O seu papel é suportar as cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis. Quando associados a componentes resinosos, resultam em materiais que apresentam resistência mecânica muito elevada.

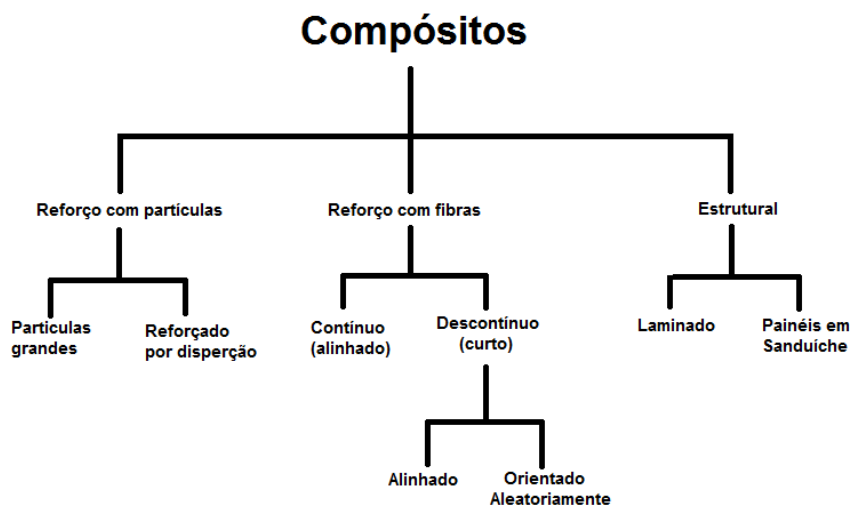
Enquanto o material de reforço fornece a resistência ao compósito, o material matricial organiza a estrutura interna do mesmo. Segundo Mano (1991, p.128) “o componente matricial é quase sempre um polímero orgânico, termoplástico ou termorrígido. O papel da matriz é manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras e proteger a fibra de danos superficiais”.

Tanto o material de reforço quanto o matricial são importantes para a criação de um material compósito de qualidade, porque as características do compósito formado dependem diretamente da simbiose entre os seus materiais componentes, quanto maior ela for melhor. Ainda segundo Mano (1991), em relação às características dos compósitos formados a seguinte opinião é apresentada.

Para as propriedades mecânicas dos compósitos contribuem as duas fases: a fase estrutural, geralmente com módulo alto e elevada resistência mecânica, representada por material fibroso, e a fase matricial, com módulo baixo e grande alongamento, tipicamente constituída de um material plástico, não quebradiço. A combinação de excelentes propriedades mecânicas e leveza estrutural tornam os compósitos interessantes materiais de aplicação em engenharia. MANO (1991, p.128)

Callister (1999) destaca que os materiais compósitos podem ser considerados materiais multifásicos, que exibem uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades, podendo ser classificado em três divisões principais, que são os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais.

Figura 2: Classificação dos Compósitos.



Fonte: Callister, 1999.

Ainda nessa linha de considerações, Chiaverini (1986) destaca que os materiais compósitos são constituídos por uma mistura de fases macro componentes compostas de materiais que estão num estado dividido e que, geralmente, são diferentes sob os pontos de vista de composição química e forma, sendo os principais macro componentes as fibras, partículas, lâminas, escamas e substâncias de enchimento.

Tabela 1: Valores da condutividade térmica à temperatura Ambiente para Vários Materiais Utilizados em Engenharia

Material	Condutividade Térmica		Material	Condutividade Térmica	
	W/m.K	Btu/pé.h.°F		W/m.K	Btu/pé.h.°F
Metals e ligas metálicas			Ligas de Alumínio		
Aços comuns ao Carbono e Aços de baixa liga					
Liga de aço A36	51,9	30	Liga 1100	222	128
Liga de aço 1020	51,9	30	Liga 2024	190	110
Liga de aço 1040	51,9	30	Liga 6061	180	104
Aços Inoxidáveis			Liga 7075-T6	130	75
Liga inoxidável 304	16,2	9,4	Liga 356.0-T6	131	87
Liga inoxidável 316	16,2	9,4	Ligas de Cobre		
Liga inoxidável 405	27	15,6	C11000	388	224
Liga inoxidável 440A	24,2	14	C17200	105-130	60-75
Liga inoxidável 17-7PH	16,4	9,5	C2600	120	70
Ferro Fundido			C3600	115	67
Ferros cinzentos					
Classe G1800	46	26,6			
Classe G3000	46	26,6			
Classe G4000	46	26,6			
Ferros nodulares					
Classe 60-40-18	36	20,8			
Classe 80-55-06	36	20,8			
Classe 120-90-02	36	20,8			

Fonte: Callister, 1999.

2.2.1 Fibra de carbono

Segundo Callister (1999), o carbono é um material de fibra de alto desempenho e o reforço mais comumente utilizado em compósitos avançado com matriz que não contém fibra de vidro. As razões para tal são as seguintes:

- 1- As fibras de carbono possuem os maiores módulos específicos dentre todos os materiais fibrosos de reforço.
- 2- Elas retêm seus elevados módulos de tração e suas grandes resistências mesmo a temperaturas elevadas; a oxidação a temperatura elevadas, no entanto, pode ser um problema.
- 3- À temperatura ambiente, as fibras de carbono não são afetadas pela umidade ou por ampla variedade de solventes, ácidos e bases.
- 4- Essas fibras exibem múltiplas características físicas e mecânicas, permitindo que os compósitos que incorporam essas fibras possuam propriedades especificamente criadas.

5- Fora desenvolvidos processos de fabricação para as fibras e os compósitos que são relativamente baratos e de boa relação custo-benefício.

As fibras de carbono possuem um coeficiente de dilatação muito baixo, permitindo a elas uma grande estabilidade dimensional das estruturas e uma condutividade térmica elevada. Essas fibras apresentam também propriedades de anisotropia, com a sua resistência e módulo de elasticidade dependente da orientação dos planos que compõem as fibras. As principais desvantagens da utilização da fibra de carbono se devem a baixa resistência ao choque e ainda uma grande diferença de potencial em relação aos metais favorecendo uma possível corrosão (FELIPE, 2008).

Os materiais de fibra de carbono vêm a cada dia mais sendo utilizados de forma comercial, pois esse material possui um elevada resistência mecânica e uma baixa densidade conforme tabela 2.

Tabela 2: Valores da densidade à temperatura ambiente para materiais compósitos.

Material	Densidade	
	g/cm ³	lb/pol ³
Materiais Compósitos		
Fibras aramida-matriz epóxi	1,4	0,05
Fibras de carbono de módulo alto-matriz epóxi	1,7	0,061
Fibra de vidro E-matriz epóxi	2,1	0,075
Madeira		
Carvalho vermelho	0,61-0,67	0,022-0,024
Pinheiro de Douglas	0,46-0,50	0,017-0,018

Fonte: Adaptada de Callister, 1999.

As fibras utilizadas nos compósitos são denominadas reforços, sendo que possuem elevada razão entre o comprimento e as dimensões laterais, sendo composto principalmente de macromoléculas lineares orientadas longitudinalmente. Diversos materiais podem ser utilizados como reforços nos compósitos poliméricos. Ente eles estão incluídas as fibras de vidro, carbono e aramida, como também as fibras naturais. As fibras de vidro são os principais reforços utilizado em compósitos

poliméricos, pois oferecem uma boa combinação de resistência, rigidez e preço (LEITÃO, 2007)

Quadro 1 – Fibras e suas respectivas aplicações.

Componente		Aplicações Típicas
Estrutura (fibra)	Matricial (resina)	
Vidro	Poliéster insaturado	Telhas corrugadas, carcaças de carro, cascos de barco, piscinas, tanques, silos, reatores de pressão
Vidro	Resina epoxida	Circuitos impressos, componentes para a indústria eletrônica
Celulose	Resina fenólica	Laminados para revestimento de móveis e divisórias, engrenagens, circuitos impressos
Celulose	Resina ureica	Placas de madeira compensada
Carbono	Poli-imida	Peças para indústria aeronáutica e aeroespacial, resistentes ao calor
Carbono	Resina epoxida	Material esportivo, aerofólios de carros de corrida, reatores industriais
Poliamida Aromática	Resina epoxida	Tubulações resistentes ao calor
Poliamida Aromática	Poli-imida	Peças resistentes ao calor para as indústrias aeronáutica e aeroespacial
Poliéster Saturado	Poli (cloreto de vinila)	Lonas para cobertura da carga de caminhões

Fonte: Mano, 1991.

2.2.2 Resinas epóxi

De acordo com Carneiro (2008), as resinas têm como principal função a união e o envolvimento das fibras, com o objetivo de alterar a sua estrutura, deixando-a com melhores propriedades mecânicas e de resistência à umidade. Mano (1991) destaca a importância das aplicações das resinas epoxídicas.

Resinas epoxídicas são compatíveis com todas as fibras e são mais comumente empregadas em compósitos dos quais é exigido alto

desempenho. Os compósitos são principalmente usados nas seguintes indústrias: mecânica de precisão, automobilística, aeronáutica, aeroespacial, ótica, médica e de material esportivo.

As resinas epóxi podem ser classificadas como uma classe de resinas termorrígidas de alto desempenho, que possuem uma vasta variedade de aplicações, podendo ser utilizada como resinas de laminação, adesivos, selantes, tintas, vernizes, entre outras aplicações. Elas podem ser definidas como todas aquelas em que as ligações químicas ocorrem através de grupos de radicais epóxi, que são o centro da reação (CAPELLA, et al, 2012).

Segundo Souza D. (2009) “O processo de polimerização é chamado de ‘cura’, e pode ser controlado através da temperatura e da escolha dos compostos de resina e endurecedor, o processo pode demorar alguns minutos a horas.” O autor ainda destaca a importância das resinas epoxídicas e de seu processo de cura.

As resinas epoxídicas constituem uma família de materiais poliméricos termoendurecíveis, que não dão origem a produtos de reação durante a sua cura (formação de ligações cruzadas) e que, portanto, têm uma pequena retração durante a cura. Estas resinas têm também uma boa adesão a outros materiais, boa resistência química e ao meio ambiente, boas propriedades mecânicas e boas propriedades de isolamento elétrico. SOUZA D. (2009, p.7)

2.3 VÁCUO

De um modo muito geral, as bombas de vácuo podem ser classificadas em dois grupos: o primeiro é encarregado de bombas de transferência, que são bombas que conduzem o gás do recipiente para a atmosfera ou para recipientes ou outras bombas com pressões maiores que as de sua entrada e o segundo são as bombas de aprisionamento, que retiram as moléculas do recipiente prendendo-as em suas paredes por procedimentos físicos ou químicos (GAMA, 2002).

Para que a fibra de carbono e fibra de vidro possa ser utilizada de forma industrial é necessária à adição de resina epóxi para fazer a constituição do compósito, sendo que esse compósito necessita de um local em temperatura constante e pressão controlada [pressão menor que a atmosférica (vácuo)] para que a cura do mesmo seja homogênea. Vácuo é à região do espaço em que a pressão é menor que a pressão atmosférica, sendo uma das grandes aplicações de vácuo

corresponde à retirada de ar de uma câmara na qual se quer realizar um processo industrial ou científico. Isto é realizado acoplado-se a esta câmara uma ou mais bombas de vácuo, utilizando-se tubulações, válvulas e conexões (GAMA, 2002).

Tabela 3: Composição do ar.

<i>Componente</i>	<i>Volume (%)</i>	<i>Pressão Parcial (Torr)</i>
N ₂	78,08	$5,95 \cdot 10^2$
O ₂	20,95	$1,59 \cdot 10^2$
H ₂ O	1,57	$1,19 \cdot 10^1$
Ar	0,93	7,05
CO ₂	0,03	$2,5 \cdot 10^{-1}$
Ne	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
He	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Kr	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
CH ₄	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
H ₂	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
N ₂ O	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Xe	$8,7 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
O ₃	$7 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Gama, 2002.

Conforme Moutinho (1899), o vácuo pode ser classificado de três formas, sendo elas:

O vácuo primário ou pré-vácuo que é principalmente utilizado na desgaseificação de óleos, na filtragem em vácuo, na desidratação de alimentos, nas lâmpadas de luz elétrica, no transporte de líquidos ou em sistemas de secagem simples.

O alto vácuo é utilizado na indústria, no tratamento térmico de liga, na fusão de resinas sintéticas, na têmpera de aços, na impregnação de componentes eletrônicos e etc.

O ultra vácuo é usado em casos especiais de simulação de condições do espaço interplanetário, na fabricação de produtos de grande pureza ou em casos específicos extremos.

Tabela 4: Classificação e parâmetros físicos envolvidos na tecnologia do vácuo.

Pressão (mbar)	Zonas de Pressão	Livre percurso médio* (cm)	Nº de moléculas/área (moléculas cm ⁻²)
10 ³	Pressão atmosférica vácuo	7 10 ⁻⁶	2 10 ¹⁹
10 ²		7 10 ⁻³	2 10 ¹⁶
10 ⁻²	Vácuo primário	7	2 10 ¹³
10 ⁻⁵	Alto vácuo	7 10 ³	2 10 ¹⁰
10 ⁻⁸	Vácuo muito alto	7 10 ⁶	2 10 ⁰⁷
10 ⁻¹¹	Ultra-alto vácuo	7 10 ⁹	2 10 ⁰⁴

* distância que uma molécula percorre entre duas colisões sucessivas.

Fonte: Trivelin, 2006.

2.4 BOMBAS DE VÁCUO

Nas condições normais não há a presença de vácuo na natureza, apenas fora da atmosfera no espaço, apesar de a pressão variar conforme a altura seja ao ar livre ou embaixo d'água, não há condições para a criação de vácuo na natureza no nosso planeta por meios naturais, portanto para poder obter vácuo deve-se utilizar uma máquina que seja capaz de fazer isso, normalmente uma bomba. Mesmo em laboratórios há limites para os valores de vácuo que podem ser obtidos, porém no caso do presente trabalho o valor de vácuo será pequeno e em um ambiente interno.

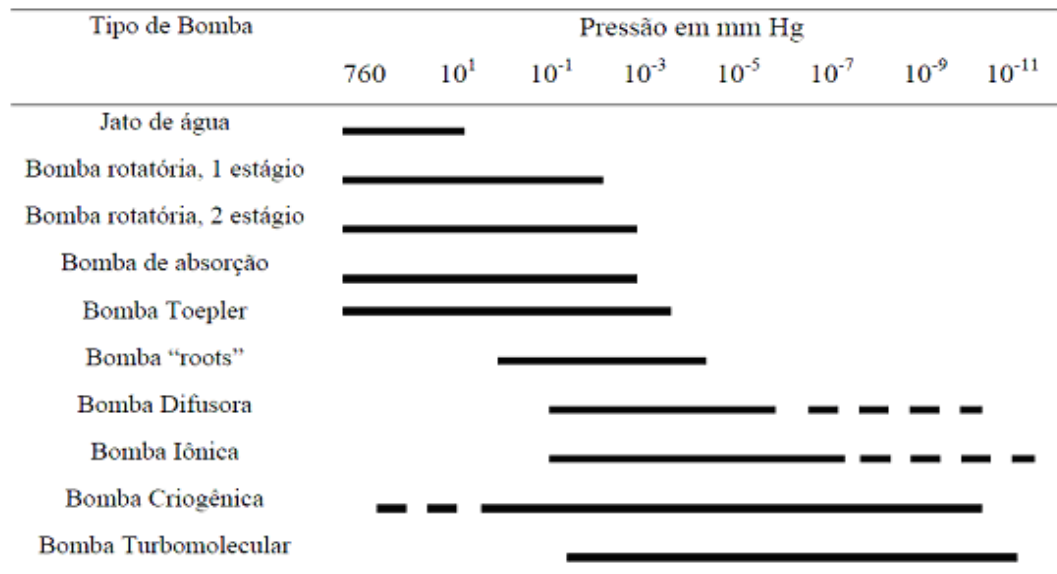
Para conseguir a redução da pressão interna da câmara de secagem será necessária a utilização de uma bomba de vácuo sendo que essa pode ser classificada em dois grupos: o primeiro é encarregado de bombas de transferência, que são bombas que conduzem o gás do recipiente para a atmosfera ou para recipientes ou outras bombas com pressões maiores que as de sua entrada e o segundo são as bombas de aprisionamento, que retiram as moléculas do recipiente prendendo-as em suas paredes por procedimentos físicos ou químicos (GAMA, 2002).

Conforme Trivelin (2006) as bombas de vácuo podem ser classificadas como:

- Bombas com deslocamento de gás - que retiram os gases do sistema expelindo-os para a atmosfera.
- Bombas que trabalham a partir da pressão atmosférica (bombas rotativas).

- Bombas que trabalham a pressões sub-atmosférica, requerem a ligação a uma bomba de vácuo primária para remover os gases para a atmosfera (bombas "roots" e bombas de vapor)
- Bombas de fixação - retêm os gases dentro da própria bomba.

Figura 3: Região de trabalho de diversas bombas de vácuo.



Fonte: Trivelin, 2006.

Tanto em bombas mecânicas como nas bombas de vapor a razão de compressão pode ser definida pelo quociente entre a pressão de saída da bomba e a pressão de entrada, já nas bombas de fixação o gás é retirado do volume que ele ocupa através da fixação em paredes que têm a propriedade de bombear, não ocorrendo a compressão do gás e este também não sendo expulso para a atmosfera (MOUTINHO, 1989).

3 METODOLOGIA

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

O presente trabalho por se tratar de um projeto de produto foi baseado em uma vasta bibliografia disponível sobre o assunto em questão, onde a pesquisa foi realizada após uma busca minuciosa no material disponível considerando todos os resultados possíveis para o projeto. O intuito do presente trabalho é verificar o desempenho da estufa de secagem a vácuo de compósitos projetada pelo grupo, será adequada a aplicação proposta.

A elaboração do conceito de um sistema de secagem a vácuo foi feita conforme o que consta na bibliografia analisada, observando as particularidades do projeto. Os requisitos necessários para o dimensionamento adequado da máquina, como as dimensões da estufa e potência necessária, foram levantados pelo grupo baseando-se no material consultado e nas necessidades específicas da equipe para garantir que a estufa atenda as especificações de projeto.

Alguns dados foram definidos pelos autores, com base nas necessidades do projeto, como as dimensões da estufa, enquanto outros foram obtidos através de cálculos ou por consulta em tabelas. O processo de cálculo seguiu um processo conciso, através da obtenção de valores referentes ao funcionamento tanto interno quanto externo da estufa, como pressão interna, potência necessária para o funcionamento e resistência do aquecedor.

O grupo projetou a máquina proposta usando os conceitos e cálculos aprendidos no decorrer do curso e de fórmulas retiradas de livros consultados, além do uso de softwares de desenho 3D do tipo CAD tanto para a parte de projeto quanto a de análise. Foi levado em conta duas situações, para as simulações usando o software *FlowSimulation*, funcionamento da estufa e propagação do calor a temperatura ambiente e na presença de vácuo.

A construção de um modelo da estufa foi realizada usando o software de CAD *SolidWorks*, para apresentar uma noção de como será a estufa pronta. A elaboração deste modelo se trata de uma análise essencialmente teórica, visto que como já foi ressaltado anteriormente, a estufa não será construída devido ao seu custo.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ROTEIRO DE CÁLCULO PARA UMA ESTUFA DE BAIXA PRESSÃO

Para começar o dimensionamento da estufa, foi necessário estipular alguns valores para que seja possível dar início ao projeto. As dimensões da estufa foram definidas com base nos diversos usos possíveis, tentando estipular valores que permitam versatilidade a estufa. Após conversar bastante sobre o assunto, chegou-se a conclusão de que uma estufa com as dimensões de 50cm x 50cm x 100cm seria a mais adequada ao projeto. A fórmula do volume pode ser definida como:

$$\begin{aligned} V &= l * c * a \\ V &= 0,5 * 1 * 0,5 \\ V &= 0,25m^3 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde:

$V = Volume (m^3)$

$l = Largura (m)$

$c = Comprimento (m)$

$a = Altura (m)$

Porém estipular as dimensões da estufa é apenas o início, é necessário calcular e dimensionar o resto dos componentes da estufa. Além das dimensões da estufa, será necessário dimensionar o sistema de aquecimento, o isolamento térmico e outros cálculos referentes ao funcionamento da estufa.

Outro grande desafio do projeto foi encontrar na bibliografia disponível, valores confiáveis para o vácuo dentro da estufa, já que ele é um fator essencial no processo de secagem de compósitos. Após pesquisa rigorosa foi encontrada uma tabela com as faixas de pressão e os valores recomendados, permitindo que o valor da pressão interna da estufa (vácuo interno) fosse selecionado, no presente caso esse valor é de 100mbar, e se encontra presente na tabela 2.

Após a seleção do valor da pressão interna da estufa, foi necessário encontrar informações referentes à temperatura de secagem dos compósitos, em especial sobre as resinas que são efetivamente o único componente que será afetado pela secagem. Existem vários tipos de resinas usadas na criação de compósitos, por isso optou-se pelo uso da resina epóxi no projeto pelo fato dela ser a mais usada no mercado e ter as melhores propriedades mecânicas. Conforme (TEIXEIRA E CARNEIRO) “quando ultrapassada a temperatura de transição vítrea,

na faixa de 60°C a 82°C, o valor do seu módulo de elasticidade pode sofrer significativa redução devido a alterações na sua estrutura interna”.

Com esses dados em mãos pode-se calcular a pressão dentro da estufa nessas condições. Para isso usa-se a equação dos gases perfeitos, cuja fórmula se encontra logo abaixo.

$$P * V = n * R * T \quad (2)$$

Onde:

$P =$ Pressão (kPa)

$V =$ Volume (L)

$n =$ número de mols (mols)

$R =$ Constante universal dos gases perfeitos

$T =$ Temperatura (K)

Como existem duas temperaturas diferentes, deve-se resolver a equação para descobrir o valor da pressão no segundo caso ($T=82^\circ\text{C}$) já que no primeiro caso a pressão já é conhecida (100mbar). Só que para isso primeiro é necessário encontrar o valor do número de mols, que pode ser obtido através da equação 2, o resto dos valores já foram estipulados ou são tabelados.

$$10 * 250 = n * 8,314472 * 333$$

$$n = \frac{(10 * 250)}{(8,314472 * 333)}$$

$$n = 0,9 \text{ mols}$$

Onde:

$P =$ Pressão (kPa)

$V =$ Volume (L)

$R =$ Constante universal dos gases perfeitos [(L x kPa)/(mol x K)]

$T =$ Temperatura (K)

Com o numero de mols encontrado é possível calcular a pressão no segundo caso, usando a equação 2 novamente.

$$P * 250 = 0,9 * 8,314472 * 355$$

$$P * 250 = \frac{0,9 * 8,324472 * 355}{250}$$

$$P = 10,63 \text{ kPa}$$

Onde:

$V =$ Volume (L)

$n =$ Número de mols (mols)

$R =$ Constante universal dos gases perfeitos [(L x kPa)/(mol x K)]

$T =$ Temperatura (K)

Com os valores da pressão obtidos para os dois casos, foram analisadas tabelas para a seleção da bomba, como a figura 3. Baseando-se nessa faixa de pressão, foi encontrada uma bomba capaz de atender as necessidades do projeto com bastante segurança. A bomba modelo NOF-650 da fabricante New Pump, que

possui uma vazão de até 58 litros por minuto e vácuo máximo de 85,5kPa, mais informações sobre a bomba podem ser vista no apêndice 1.

4.1.1 Dimensionamento da espessura do isolante térmico:

Esse trabalho por se tratar de uma estufa que possui aquecimento interno, teve que ter sido levado em consideração a dissipação de calor para o meio externo, pois essa dissipação pode colocar em risco a integridade física dos usuarios, para que essa dissipação não ocorresse tivemos que dimensionar a espessura do isolante térmico utilizado, sendo que nesse caso foi utilizado manta de lã de vidro, devido a sua alta resistividade a temperaturas elevadas e também de facil plicação.

Para o dimensionamento do isolamento térmico adequado, levamos e consideração que a temperatura das faces externas da estufa deveria permanecer a uma temperatura de 20°C, para garantir a segurança dos usuários da estufa. Para tanto foi analisado o material mais adequado para a aplicação em questão.

$$\frac{\frac{T_s - T_i}{\frac{L_i}{K_i * A} + \frac{L_{is}}{K_{is} * A}}}{\frac{1}{h_e * A}} = \frac{T_{ar} - T_s}{\frac{1}{h_e * A}} \quad (3)$$

$$\frac{20 - 80}{\frac{0,012}{13,93 * 0,5} + \frac{L_{is}}{0,033 * 0,5}} = \frac{25 - 20}{\frac{1}{8 * 0,5}}$$

$$L_{iso} = 0,049m \approx 49 mm$$

Onde:

K do aço inoxidável (tabela 5) = 16,2 W/m².K = 13,93Kcal/m.h°C

K da manta MI - CT (isolante térmico) (tabela isover) = 0,033 Kcal/m.h°C

Temperatura interna da estufa = 80°C

T_{ar} = Temperatura do ar = 25°C

T_s = Temperatura da superfície externa da estufa = 20°C

A = Área de uma lateral = 0,5m²

L_i = Espessura da chapa interna da estufa (chapa de inox) = 1,2mm

Coefficiente de película (tabela 3 Neto 2010) = 8 Kcal/m.h°C

4.1.2 Dimensionamento da Potência necessaria para a estufa

Para calcular a potência necessaria para a estufa é necessario antes calcular a massa maxima a ser curada e também a quantidade de energia necessaria para aquecer e curar o componentes de compósito.

Para cálculo da massa máxima foi considerado apenas a densidade da resina epóxi, pois a fibra de carbono já se encontra em um estado físico seco.

$$d = \frac{m}{v} \quad (4)$$

$$1140 = \frac{m}{0,0015}$$

$$m = 1,71 \text{ kg}$$

$$m = 0,00171 \text{ ton}$$

Onde:

$d = \text{densidade da resina epóxi (1140 kg/cm}^3\text{)}$

$v = \text{volume (cm}^3\text{)}$

Após cálculo da massa máxima é necessário então calcular a energia necessária para curar esse material compósito, sendo que no cálculo realizado levou em consideração a energia necessária para curar uma tonelada de material comósito.

$$Q = m * c * \Delta T \quad (5)$$

$$Q = 1000 * 1800 * 100$$

$$Q = 50 \text{ kWh/ton}$$

Onde:

$Q = \text{Calor Sensível}$

$m = \text{Massa do corpo (g)}$

$c = \text{Calor específico da resina epóxi (J / kg * K)}$

$\Delta T = \text{Variação de temperatura (K)}$

Com os valores de massa máxima e a energia necessária para curar os compósitos é possível realizar o cálculo da potência necessária para a estufa através da equação 6, onde a partir desse valor podemos nos basear para o dimensionamento de alguns outros componentes.

$$Pf = \frac{E * Pm}{n * T} \quad (6)$$

$$Pf = \frac{50 * 0,00171}{0,6 * 0,0833}$$

$$Pf = 1,7 \text{ kW}$$

Onde:

$E = \text{kWh/Ton}$

$Pm = \text{Peso (Ton)}$

$n = \text{rendimento}$

$T = \text{Tempo (h)}$

4.1.3 Dimensionamento da Resistência elétrica

O dimensionamento da resistência elétrica pode ser iniciado pelo cálculo do diâmetro do fio da resistência, considerando que o material da resistência que foi escolhido pelo grupo foi de níquel-cromo, devido a sua alta resistência a temperaturas elevadas e também devido a sua fácil comerciabilidade.

$$Df = 34,4 * \sqrt{\frac{\rho}{Pe} * \frac{pff}{Np*v}} \quad (7)$$

$$Df = 34,4 * \sqrt{\frac{1,0806}{5} * \frac{2,85}{1 * 220}}$$

$$Df = 1,82mm$$

Onde:

Df = Diâmetro do fio (mm)

ρ = Resistividade do material resistor ($\Omega mm^2/m$)

Pe = Carga específica superficial

Pff = Potência do forno por fase (kW)

Np = Número de circuitos resistores em paralelo

v = Voltagem (V)

Para realização do cálculo do comprimento necessário de resistência elétrica é necessário antes encontrar a intensidade da corrente da resistência e a resistividade total da mesma.

$$P = I * v \quad (8)$$

$$1700 = I * 220$$

$$I = 7,72 A$$

Onde:

P = Potência (W)

I = Intensidade da corrente (A)

v = Voltagem (V)

Através da resistividade encontrada na equação 9, podemos calcular o comprimento da resistência a ser utilizada no projeto.

$$R = \frac{v}{I} \quad (9)$$

$$R = \frac{220}{7,72}$$

$$R = 28,49\Omega$$

Onde:

R = Resistência (Ω)

v = Voltagem (V)

$I = \text{Intensidade da corrente (A)}$

Comprimento da Resistência:

$$Lf = \frac{R}{r} \quad (10)$$
$$Lf = \frac{28,49}{0,32515}$$
$$Lf = 87,62$$

Onde:

$Lf = \text{Comprimento (m)}$

$R = \text{Resistência } (\Omega)$

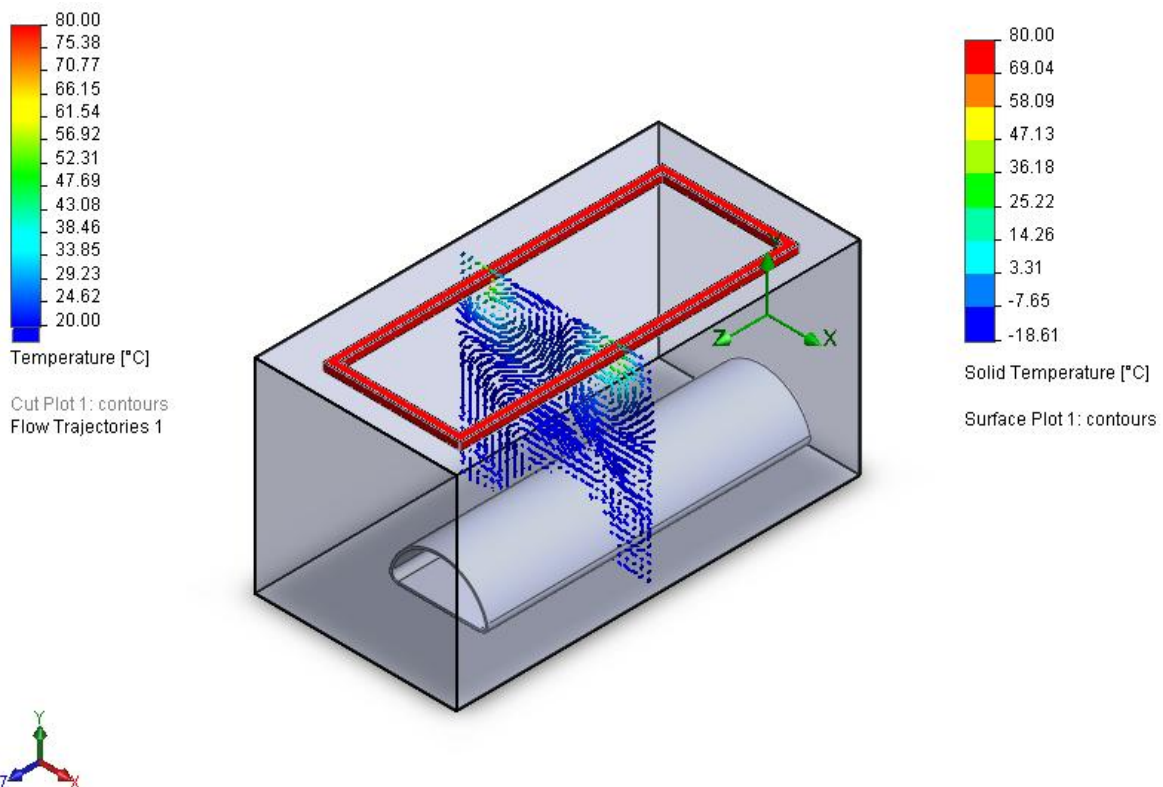
$r = 0,32515\Omega/m$

4.2 SIMULAÇÕES DO FLUXO DE RADIAÇÃO

Com o uso do software de CAD *SolidWorks FlowSimulations*, foram realizadas várias simulações referentes ao comportamento da radiação no ambiente interno da estufa, considerando duas situações, a pressão atmosférica e na presença de vácuo.

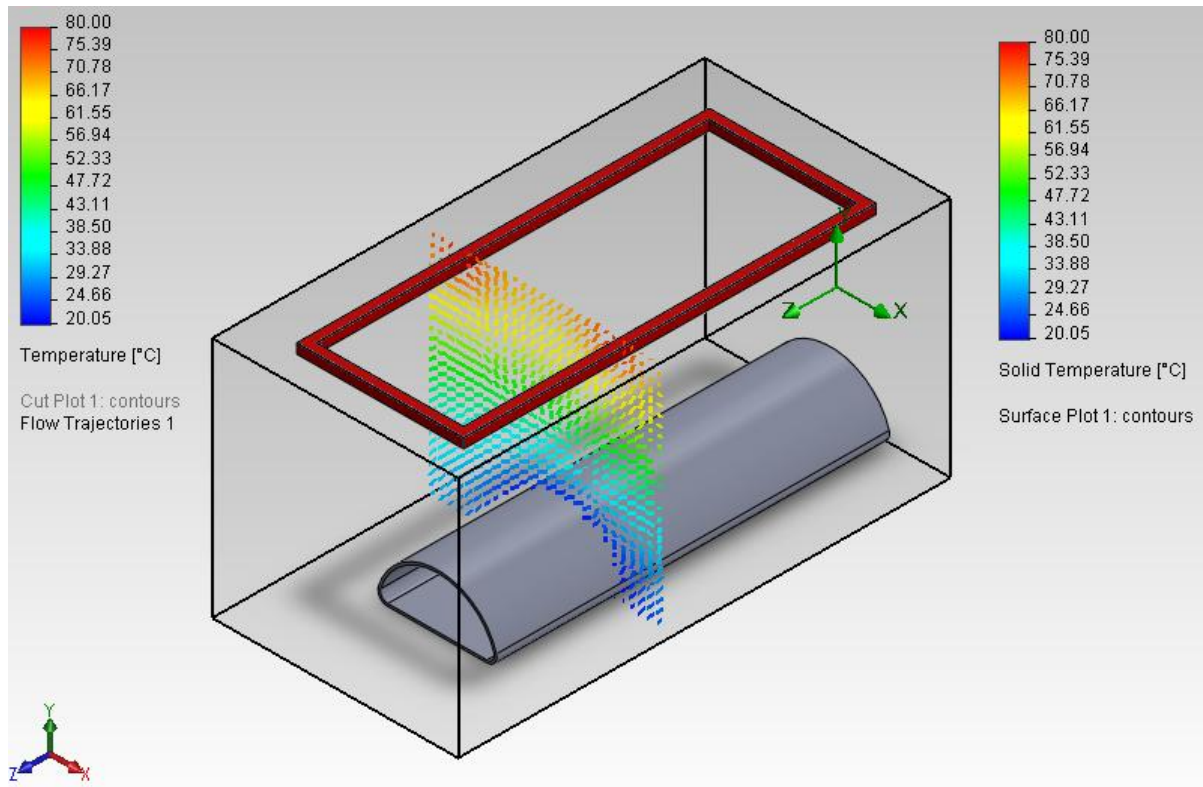
Como se pode perceber na figura 4, o fluxo de radiação a pressão atmosférica é bem menor do que na presença de vácuo, figura 5, o que confirma o fato de que a presença de vácuo auxilia no processo de cura, pois permite a melhor distribuição do calor radiado no interior da estufa.

Figura 4: Fluxo da radiação com pressão atmosférica.



Fonte: Próprio, 2013.

Figura 5: Fluxo de radiação no vácuo

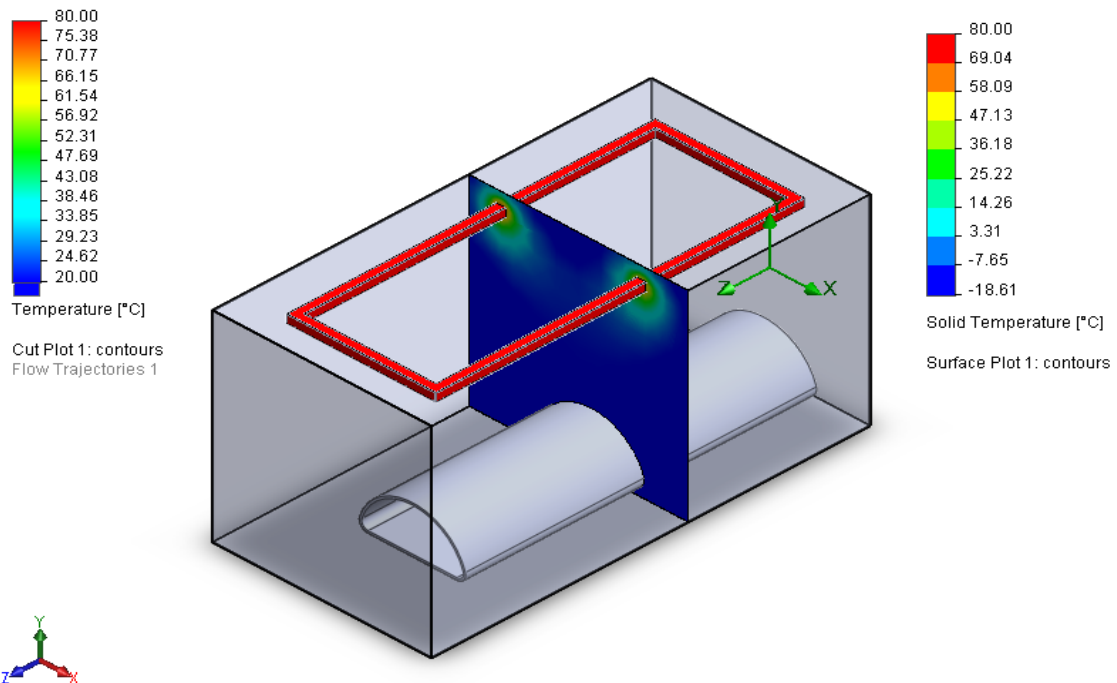


Fonte: Próprio, 2013.

Outro estudo realizado através do software foi a análise da variação de temperatura ocorrida no interior da estufa, onde foi analisado a diferença da variação de temperatura ocorrida em uma estufa com pressão atmosférica (figura 6), e em uma utilizando o vácuo (figura 7).

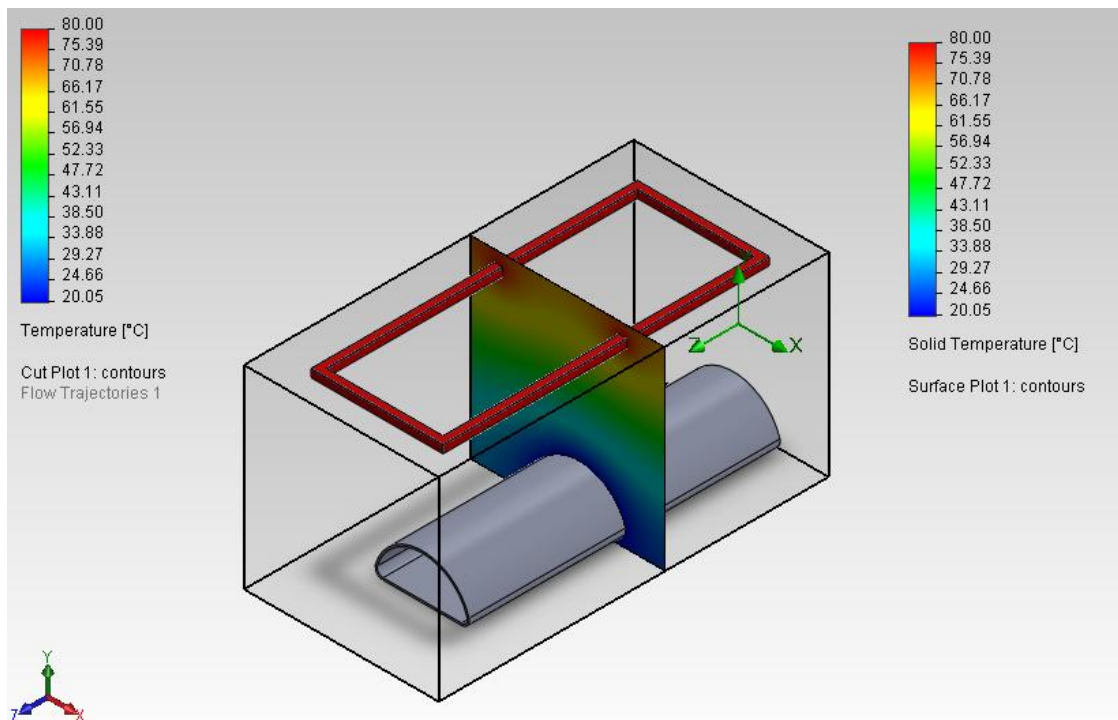
Através das imagens retiradas da simulação podemos verificar nitidamente a diferença entre os dois casos avaliados, sendo possível analisar que a propagação da temperatura ocorre bem mais rapidamente na estufa à vácuo do que a na estufa à pressão atmosférica e que essa dissipação do calor ocorre de forma bem homogênea.

Figura 6: Variação da temperatura ocorrida pela radiação à pressão atmosférica



Fonte: Próprio, 2013.

Figura 7: Variação da temperatura ocorrida pela radiação no vácuo

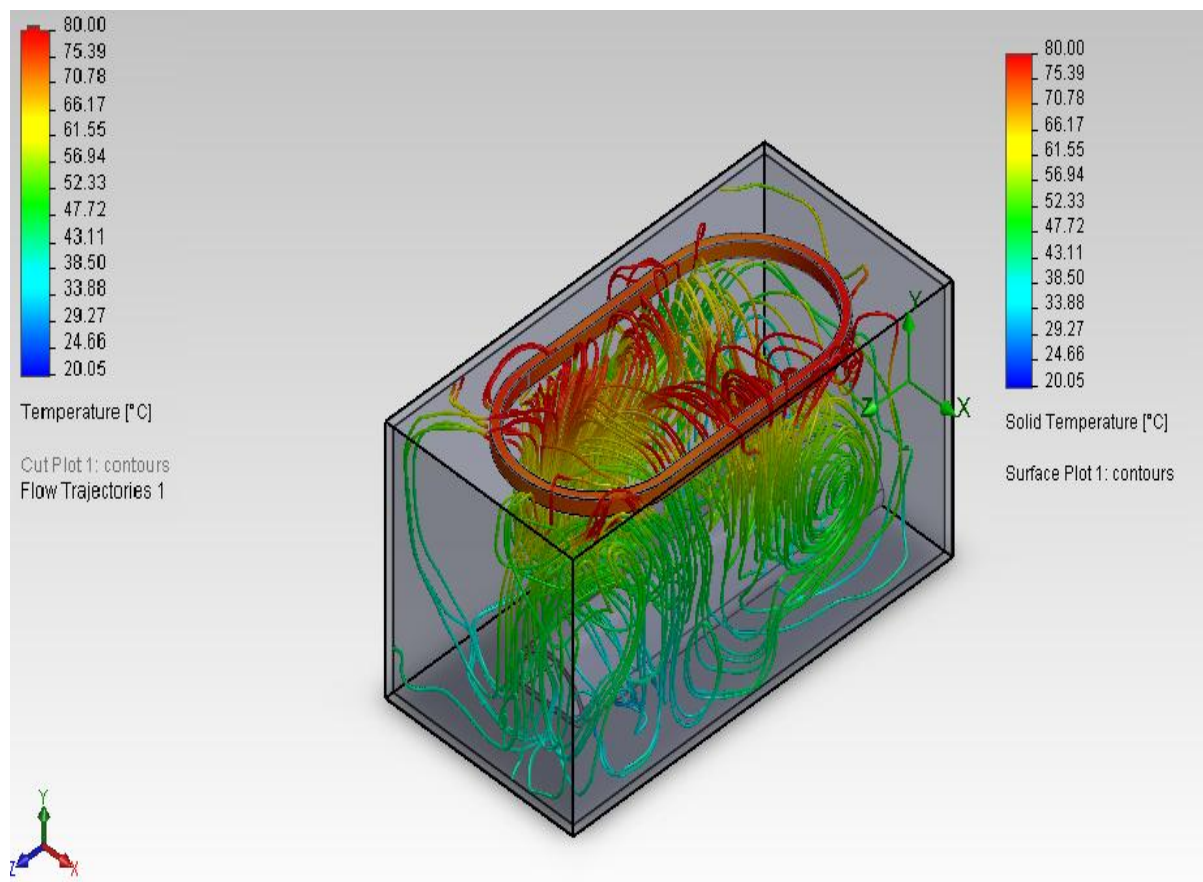


Fonte: Próprio, 2013.

4.2.1 SIMULAÇÕES DO FLUXO DA CONVECÇÃO

As trocas de calor ocorridas no interior da estufa projetada são principalmente a radiação e a convecção, sendo que o calor gerado pela resistência irradia para o ambiente interno e esse calor irradiado é transferido através do fluxo de convecção. Através do resultado da análise de convecção ocorrida no interior da estufa (figura 8), podemos visualizar o fluxo de calor ocorrido pela convecção.

Figura 8: Fluxo da convecção no vácuo

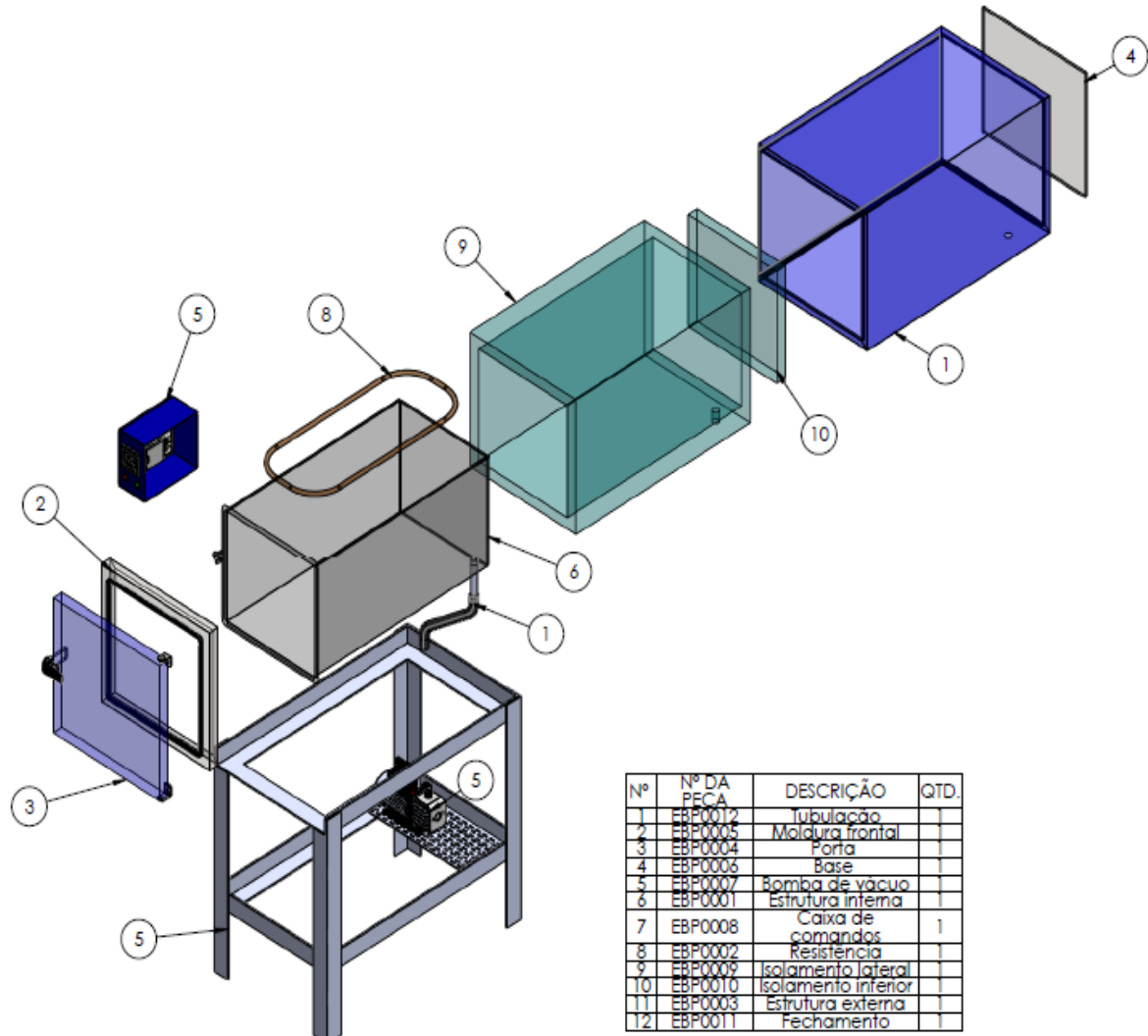


Fluid cells – 14483 solid cells - 670

Fonte: Próprio, 2013.

4.3 DESENHOS DA ESTUFA

Figura 9: Vista explodida da estufa



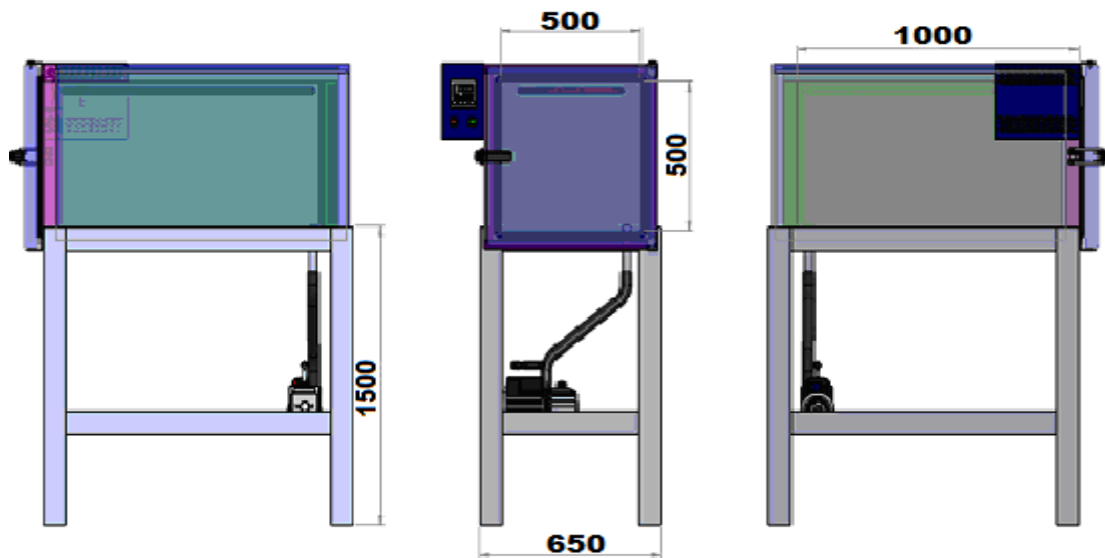
Fonte: Próprio, 2013.

Apartir da conclusão dos conceitos teóricos e os seus respectivos calculos, partiu-se para o projeto individual de cada componente da estufa, para serem montados todos os componentes no conjunto final, sendo que as principais partes da estufa são:

A estrutura da base, carcaça interna, carcaça externa, bomba de vácuo, resistência elétrica, caixa de comandos, isolamento térmico e porta.

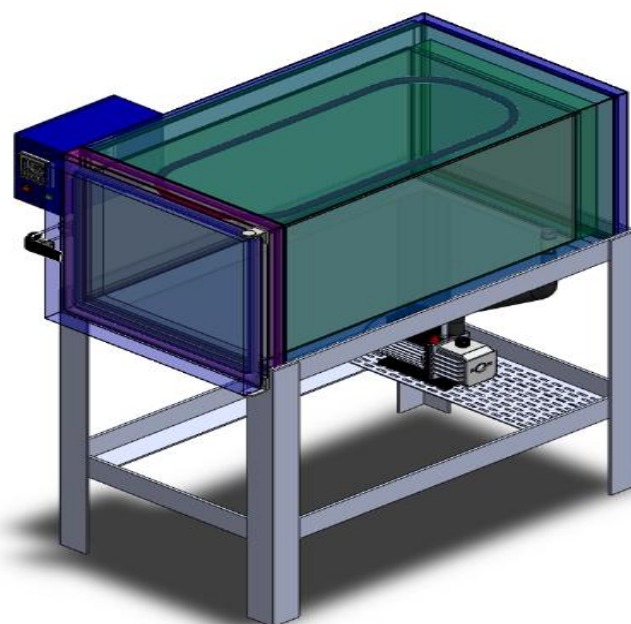
Para o dimensionamento das principais medidas da estufa foi analisado anteriormente os produtos a serem curados nessa estufa e a relação entre o custo e o benefício entre eles, sendo que a partir daí chegou-se às medidas conforme figura 10, que representam uma estufa para secagem de componentes principalmente estruturais e peças pequenas, pois fibras de carbono geralmente são utilizadas para componentes estruturais.

Figura 10: Desenho da estufa montada



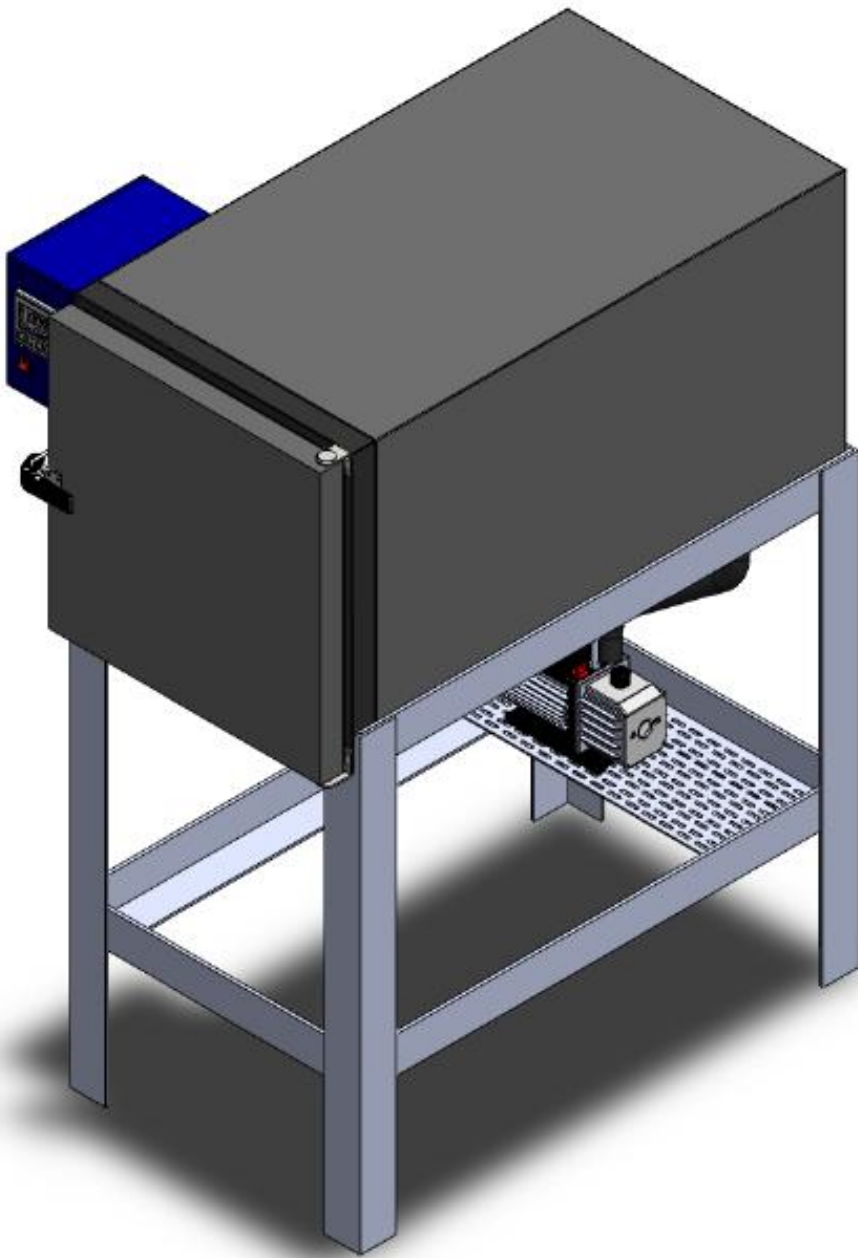
Fonte: Próprio, 2013.

Figura 11: Vista interna da estufa



Fonte: Próprio, 2013.

Figura 12: Vista externa da estufa.



Fonte: Próprio, 2013.

5 CONCLUSÕES

Através da pesquisa e dos dados levantados foi possível a elaboração do desenho da estufa usando o software de desenho *SolidWorks*, ainda que não tenha sido possível construir a estufa na prática, o grupo conclui que a experiência proporcionada durante este trabalho foi de grande valia. O conceito e dimensionamento da estufa foram conduzidos de acordo com o que o grupo desejava, uma estufa a vácuo de dimensões reduzidas capaz de ser usada em várias aplicações diferentes, auxiliando os projetos dos alunos da FAHOR.

Através das simulações no software *FlowSimulations* pôde-se comprovar que a transferência de calor, seja por convecção ou radiação, é muito melhor na presença do vácuo, ainda que em pequena escala. Apesar das dificuldades em encontrar algumas informações durante a pesquisa, o grupo tentou projetar a estufa da melhor maneira possível. O resultado final ficou de acordo com aquilo que o grupo esperava, uma estufa capaz de ser usada na fabricação de vários componentes diferentes, independentemente do tamanho.

Em relação aos objetivos propostos, pode-se considerar que o grupo conseguiu elaborar com sucesso o conceito de um sistema de secagem a vácuo, assim como conseguiu projetar uma estufa capaz de se adequar a várias possibilidades diferentes, confirmando através de cálculos e de simulações que o uso do vácuo é indispensável na cura adequada de compósitos.

Espera-se que este projeto ajude a equipe Águia FAHOR no futuro a construir uma estufa que os ajude a fabricar componentes de melhor qualidade, usando as informações e dados coletados pelo grupo durante a elaboração deste trabalho. Também espera-se que este trabalho seja de alguma valia para outros estudantes interessados em aprender mais sobre o assunto, da mesma forma que este trabalho permitiu ao grupo conhecer melhor o processo de secagem de compósitos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros o grupo sugere a construção de uma estufa de maior capacidade, visto que a estufa apresentada neste trabalho não é capaz de produzir componentes de dimensões muito elevadas, como asas inteiriças, fuselagens e peças com grande volume ou comprimento, que porventura a equipe ou qualquer outra pessoa, possa ter a necessidade de produzir.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER, William D. JR. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Quinta edição LTC – SaltLakeCity, Utah, Janeiro de 1999.

CAPELLA, M. C.; SOUFEN, C. A.; CORREIA, G. V.; GRIZOLA, O. S.; PINTÃO C. A. F.; IMAIZUMI, M. **Propriedades Mecânicas em Laminados Fibras de Vidro e Carbono em Resina Epóxi**. Departamento de Engenharia Mecânica - Unesp - Bauru SP, 2012.

CARNEIRO, L. A.; TEIXEIRA, A. M. **Propriedades e Características dos Materiais Compósitos Poliméricos Aplicados na Engenharia de Construção**. Rio de Janeiro, 2008.

CESTILE, Marlon; **Materiais elétricos: Compêndio de trabalhos.- Fornos elétricos**. Universidade Estaduais do Oeste do Paraná. Fox do Iguaçu – PR, 2010.

CHIAVERINI, Vicente, 1914. **Tecnologia Mecânica**, 2ª Ed.-São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986. 2ª Ed.

COSTA, Ennio Cruz. **Secagem Industrial**. Editora Blücher, São Paulo, 2007.

COSTA, M. L.; REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. **Estabelecimento de Ciclo de Cura de Pré-Impregnados Aeronáuticos Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 15, nº 3, p. 224-231, São José dos Campos, SP, 2005.

FELIPE, Renata Carla T. S. **Materiais Compostos**. Centro de Educação Tecnológica do RN; Departamento acadêmico de tecnologia industrial. Rio Grande do Norte, 2008.

GAMA, Sergio. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo**, São Paulo, 2002.

HECK, Nestor Cezar. **Metalurgia Extrativa dos Metais Não-Ferrosos**. DEMET, Porto Alegre.

MANO, Eloisa Biasotto Mano. **Polímeros como Materiais de Engenharia**. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1991.

MARTINEZ, Caetano Belda. **Estudo da Influencia do Ciclo de Cura Nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Fabricados Pelo Processo de Infusão de Resina**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MOUTINHO, Augusto M. C.; SILVA, Maria E. S. F.; CUNHA, Maria A. I. **Tecnologia de Vácuo**. Universidade Nova de Lisboa. Lisboa: Lisboa Codex, 1899.

LEITÃO, Eduardo. **Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados em Diversas Orientações do Reforço** - São Paulo, 2007.

PARK, K. J. B.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D.; PARK, K. J. **Seleção de Secadores: Fluxograma**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.9, n.2, p.179-202, 2007

QUEIROZ, Daniel M.; **PRINCÍPIOS BÁSICOS DA SECAGEM**. Vicososa, MG, 2013.

Saint-Gobain Vidros S.A, Divisão Isover Brasil, 2006. Disponível em <<http://www.mussoi.com.br/catalogos/MantasMI.pdf>>.

STEMPNIAK, Roberto A. **A Ciência e a Tecnologia do Vácuo**. Faculdade de Ciências Aplicadas de São José dos Campos, São Paulo, 2002.

SOUZA, Z. **Projetos de Máquinas de Fluxo: Tomo I, Base Teórica e Experimental**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Minas Gerais: Editora Acta, 2011.

SOUZA, Diego. **As Resinas Epoxídicas e Sua Aplicação no Tratamento de Superfícies**. Centro Universitário de Jaraguá do Sul, Jaraguá do Sul, SC, 2009.

TRIVELIN, Paulo C. O.;Bendassolli, José A. **Técnicas com Vácuo**.

WEBER, Érico Aquino. **Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos**. Editora Salles. Panambi, RS, 2005.

ANEXO 01- Catálogo da Bomba Escolhida



New Pump

Bomba de Vácuo livre de Óleo

Equipamento com alta qualidade, design moderno e compacto.

Características exclusivas de construção garantem uma maior vida útil, operação livre de óleo, reduzido nível de ruído, e perfeito funcionamento mesmo após longos períodos de uso.

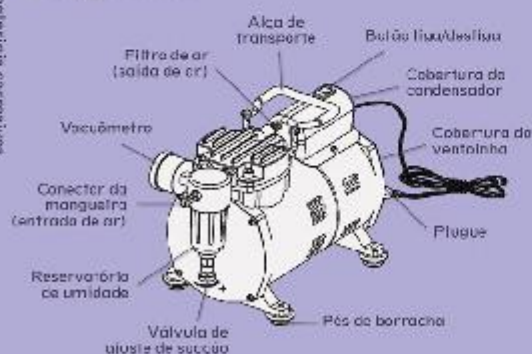
OBS.: Esse bomba não é indicada para utilização com materiais corrosivos.

Aplicações

Equipamento bastante utilizado em laboratórios químicos, clínicos, consultórios odontológicos, hospitais, para diversos usos, como:

- Sistemas de filtração à vácuo;
- Fotômetro de chama;
- Dessecadores;
- Estufas à vácuo;
- Quaisquer outras aplicações que exijam vácuo.

Diagrama



Distribuidor

Características Gerais

- Design moderno, compacto e robusto.
- Operação sem óleo ou qualquer tipo de atrito entre as partes móveis, assegurando maior durabilidade do equipamento.
- Sistema de segurança que automaticamente desliga a bomba em caso de superaquecimento.
- Baixo nível de ruído.
- Frasco reservatório para retenção de umidade.
- Devido a todas essas características, a bomba à vácuo possui extenso período de vida útil, praticamente sem manutenção.

Especificações Técnicas

Modelo	NOF 650
Potência do motor	¼ HP
Velocidade de vazão	53 a 58 litros/minuto
Vácuo máximo	650 mmHg / 85.5 kPa
Rotação do motor	2.800 rpm
Abertura do coletor de ar	5/16"
Temperatura ambiente	15 a 40°C
Temperatura da bomba (em funcionamento)	~ 95°C
Ruído	64 a 66dB
Potência	200 Watts
Tensão	220 Volts, 50/60Hz
Peso	5,9 kg
Dimensões totais (L x P x A)	16 x 30,5 x 20 cm

ANEXO 02 - Valores do coeficiente de convecção “h” para situações de convecção natural

SITUAÇÃO	h [W/m ² .K]
Paredes internas	8,0
Forros internos	6,0
Pisos internos	10,5
Paredes externas (sem vento)	25,0
Superfícies horizontais externas (sem vento)	29,0

Fonte: Neto 2010

ANEXO 03 - Classificação do Isolamento térmico de manta MI.

Características			
Composição	Manta de lã de vidro sem resina aglomerada sustentada em um dos lados por tela de aço galvanizado.		
Referência	Rendimento (°C)	Espessuras (mm)	Dimensões (m)
MI 46 CT	até 350	50-75-100	3,0x1,25
MI 41 CT	até 350		
MI 39 CT	até 550		

Fonte: Saint-Gobain Vidros S.A., 2006.

ANEXO 04 - Carga específica superficial – W/m²

Tipo de liga	Temperatura do forno(°C)						
	600	700	800	900	1000	1100	1200
80%Ni – 20%Cr	5	3.2	2.2	1.5	1.1	0.9	-
30%Ni – 20%Cr	4.6	3.0	2.0	1.4	1.0	0.8	-
20%Cr – 5% Al	8.0	5.8	4.3	3.1	2.2	1.3	-
Cr-Al-Co	3.9	3.5	3.0	2.4	1.5	-	0.8

Fonte: Cestile, 2010.

ANEXO 05 - Propriedades de alguns materiais utilizados como resistência

Material	Composição	Resistividade $\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$	Ponto de fusão (°C)	Resistência à tração (kg/mm ²)
Nicromo	Ni-Fe-Cr	1.1221	1350	66.79
Nicromo V	Ni-Cr	1.0806	1400	70.31
Cromax	Fe-Ni-Cr	0.9975	1380	49.22
Nirex	Ni-Cr-Fe	0.9809	1395	56.25
Nilvar	Fe-Ni	0.8046	1425	49.22
Bronze comercial	Cu-Zn	0.0415	1040	26.01
Ni puro	Ni	0.0997	1450	42.18
Platina	Pt	0.1060	1773	34.00
Aço	Fe	0.0999	1535	35.15
Zinco	Zn	0.0592	419	15.47
Molibdênio	Mo	0.0569	2625	70.31
Tungstênio	W	0.0552	3410	344.542
Alumínio	Al	0.0267	660	24.61
Ouro	Au	0.0242	1063	27.00
Cobre	Cu	0.0172	1083	24.61
Prata	Ag	0.0163	960	-

Fonte: Cestile, 2010.

ANEXO 06 - Características das ligas Cromel e Copel

Diâmetro do fio (mm)	Resistência (Ω/m)	
	80%Ni – 20%Cr	55%Cu – 45%NI
10.414	0.01269	0.005742
8.255	0.02017	0.009121
6.553	0.03205	0.014502
5.182	0.05124	0.022467
4.115	0.08136	0.036747
3.251	0.13025	0.058861
2.591	0.20506	0.092850
2.057	0.32515	0.146990
1.626	0.52102	0.235570
1.295	0.82020	0.370750
1.016	1.33210	0.602720
0.813	2.08340	0.941650
0.6426	3.3368	1.5092
0.5105	5.2791	2.3886
0.4038	8.4322	3.8158
0.3200	13.4190	6.0764
0.2540	21.3300	9.6461
0.2032	33.3350	15.0600
0.1600	53.7100	24.3120
0.1270	85.3060	38.5840
0.1143	105.3200	47.6400
0.1016	133.2100	60.2720
0.0890	174.2200	78.7400
0.0787	221.790	100.4000

Fonte: Cestile, 2010.

