

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COEME  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**WILLIAN KENITI DEL COL SARUHASHI**

**PROJETO, DIMENSIONAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SISTEMA DE PULTRUSÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2015**

**WILLIAN KENITI DEL COL SARUHASHI**

**PROJETO DIMENSIONAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SISTEMA DE PULTRUSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado á disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso superior de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa.

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2015**



Ministério da Educação  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Cornélio Procopio  
Departamento Acadêmico de Mecânica  
Curso de Engenharia Mecânica



---

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Willian Keniti Del Col Saruhashi**

### **Projeto, dimensionamento e desenvolvimento de um sistema de pultrusão**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:00 do dia 12/06/2015 como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a). Romeu Roney Cavalcante da Costa – Presidente (Orientador)

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Ferneda – (Membro)

\_\_\_\_\_  
Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior – (Membro)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho a todos que futuramente se utilizarão da pultrusora para pesquisas e produção científica e as pessoas que possam se beneficiar dos trabalhos desenvolvidos através dela.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha mãe, a qual sempre batalhou e me forneceu meios para chegar até o presente momento da minha vida e graduação, mesmo que para isso sacrifica-se seu lazer, bem-estar, entre outros que jamais conseguiria listar todos.

Ao meu pai que sempre admirei pela sua inteligência e almejei em alcançar e pela sua determinação em iniciar e dar continuidade em seu ensino superior mesmo em uma idade avançada e com tantas adversidades, a qual me serviu de incentivo em toda minha graduação.

Em especial João Luiz Del Col e a todos os funcionários da Metalúrgica Pérola LTDA. que confiaram neste projeto e se dedicaram para a realização do mesmo, sem os quais tal projeto dificilmente teria saído do “papel”.

A João Del Col vulgo João “Torneiro” o qual tenho o privilégio e imenso prazer de chamar de “vô”, minha principal fonte de inspiração no setor metal mecânico, que apesar de todas as adversidades durante a sua vida conseguiu traçar uma história de sucesso dentro da indústria brasileira a qual pretendo repetir um dia.

Por ter me presenteado com este tema, pela confiança e paciência durante a realização deste trabalho agradeço meu orientador Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa.

A todos os meus familiares que sempre me apoiarão durante a minha graduação.

Aos meus amigos e colegas de universidade que sempre me ajudaram durante todo o curso, em especial Orides, Victor, Ritiery e Fernando que quando mais precisei abriram as portas de sua casa sem hesitar para que eu pudesse ter onde residir.

Enfim a quem de alguma forma me ajudou e contribuiu para realizar este trabalho.

## RESUMO

SARUHASHI, Willian Keniti Del Col. **Projeto, dimensionamento e desenvolvimento de um sistema de pultrusão**. 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

A pultrusão por ser o processo de fabricação de compósito mais produtivo, aliada com um bom desempenho estrutural do material fabricado, tem sido tema de várias pesquisas. Pensando nisto, este trabalho buscou projetar e desenvolver um sistema de pultrusão para que tal processo possa ser estudado e pesquisado futuramente e a aplicabilidade de seus produtos, sendo a área odontológica o enfoque deste sistema desenvolvido, para fabricação de pinos odontológicos e estudado o uso de novos materiais para os mesmos. Além de desenvolver uma boa introdução ao processo de pultrusão através da pesquisa realizada, que é essencial para que se pudesse realizar o projeto do mesmo e que futuros pesquisadores da área possam se habituar ao tema.

**Palavras-chave:** Pultrusão. Compósitos. Projeto. Odontologia.

## ABSTRACT

SARUHASHI, Willian Keniti Del Col. **Project, sizing and development of a pultrusion system.** 2015. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

The pultrusion is the most productive process for manufacture composite, combined with a good structural performance; it has been subject to several researches. Focused on that aspect, this study aimed to project and develops a pultrusion system so that this process can be studied and researched in the future, the application of his products and the dental area the focus of this system developed, so that the use of new materials for dental implants pin will be studied. In addition to developing a good introduction to the pultrusion process through the research, which is essential so that it could carry out the project itself and that future researchers in this field can get used to theme.

**Keywords:** Pultrusion. Composite. Project. Odontology.

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Importância relativa das necessidades de baixo custo e desempenho estrutural em componentes compósitos utilizados em diferentes ramos da indústria. ....	11
Figura 2 - Produtividade e Performance.....	12
Figura 3 - Organograma de classificação dos materiais compósitos. ....	16
Figura 4 - Formas de aplicação da resina: a) Hand Lay-up e b) Spay-up Molding....	19
Figura 5 - Enrolamento filamental. ....	20
Figura 6 -Seções transversais típicas de compósitos pultrudados.....	22
Figura 7- Formas complexas de perfis pultrudados. ....	23
Figura 8 - Representação do Processo de Pultrusão.....	23
Figura 9 - Estrutura do compósito polimérico pultrudado. ....	24
Figura 10 - Sistema de guias que direcionam as fibras para o molde.....	25
Figura 11 - Tanque aberto de saturação de resina. ....	26
Figura 12 - Moldes de pultrusão com cavidades de diferentes geometrias.....	27
Figura 13 - Espaço viável, representado pela região escura, delimitada pela velocidade (u) e temperatura (T). ....	29
Figura 14 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida. ....	30
Figura 15 - Vista aérea da Metalúrgica Pérola. ....	31
Figura 16 - Estrutura metálica 1 (suporte da fibra de vidro). ....	32
Figura 17 - Pultrusora durante a fabricação (mínima extensão).....	33
Figura 18 - Pultrusora durante a fabricação (máxima extensão).....	34
Figura 19 - Banheira de impregnação e guas. ....	35
Figura 20 - Matriz aberta e parafusos. ....	36
Figura 21 - Resistência do tipo cartucho. ....	36
Figura 22 - Matriz e resistências. ....	37
Figura 23 - Matriz, sistema de aquecimento e fixação. ....	38
Figura 24 - Tracionador modelo SAG 1006.....	39
Figura 25 - Tracionador com roletes de poliuretano.....	39
Figura 26 - Painel de controle da máquina pultrusora.....	40
Figura 27 - Características do variac VM3140. ....	41
Figura 28 - Balança de precisão digital e medidas tomadas. ....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Comparação das faixas típicas de valores das propriedades das resinas .....	21
Tabela 2- Lista de tubos/barra/perfil/tarugo.....	42
Tabela 3- Lista de chapas. ....	42
Tabela 4- Lista de porca/parafusos .....	42
Tabela 5- Lista de componentes comerciais utilizados no projeto. ....	43

## LISTA DE SIGLAS

ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CAD	Computer aided desing

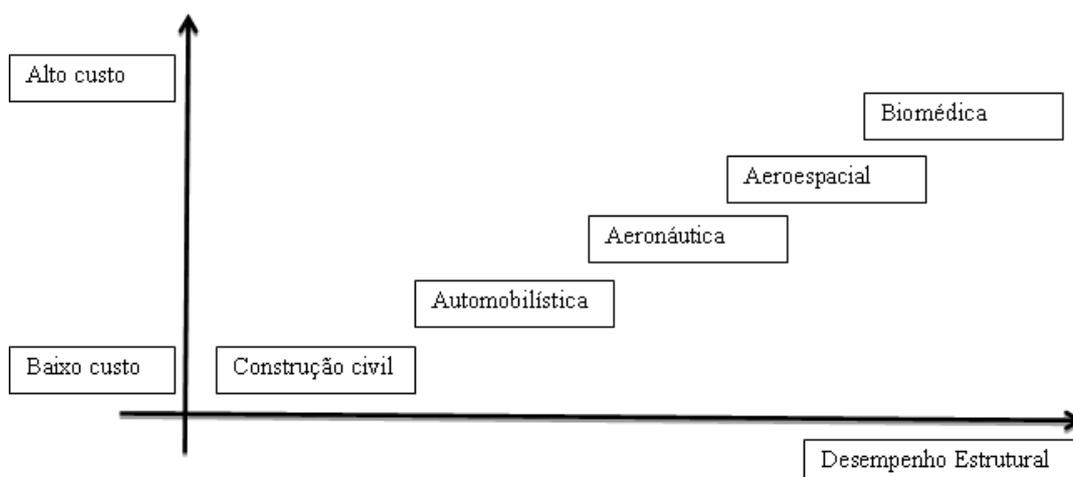
## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVO.....	13
2.1 COMPOSITOS .....	15
2.2 REGRA DA MISTURA.....	16
2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA..	18
2.3.1 Processos Com Molde Aberto .....	18
2.3.2 Enrolamento Filamentar .....	19
2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS.....	20
2.5 FIBRAS .....	21
2.6 PULTRUSÃO .....	22
2.6.1 Descrição Detalhada Do Processo.....	25
2.7 PARÂMETROS DO PROCESSO DE PULTRUSÃO .....	27
2.7.1 Molhabilidade .....	27
2.7.2 Cinética De Cura .....	28
3.1 ESTRUTURAS METÁLICAS.....	32
3.2 BANHEIRA DE IMPREGNAÇÃO E GUIAS.....	34
3.3 MATRIZ E SISTEMA DE AQUECIMENTO .....	35
3.4 TRACIONADOR.....	38
3.5 PAINEL DE CONTROLE.....	40
3.6 LISTA DE MATERIAL.....	41
3.7 MATERIAL PULTRUDADO .....	43
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>48</b>
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>50</b>
<b>APÊNDICE A- Croquis utilizados na fabricação</b> .....	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a necessidade das indústrias de obter materiais mais leves, resistentes à corrosão e aos raios ultravioletas entre outras exigências específicas para seus produtos, os materiais compósitos foram à alternativa encontrada para tal situação. “Inúmeras conquistas tecnológicas recentes, principalmente as relacionadas com aplicações relevantes em áreas, tais como aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil, e de artigos esportivos, entre outras, somente se tornaram viáveis após o advento dos compósitos estruturais.” (LEVY NETO; PARDINI, 2006, p.1).

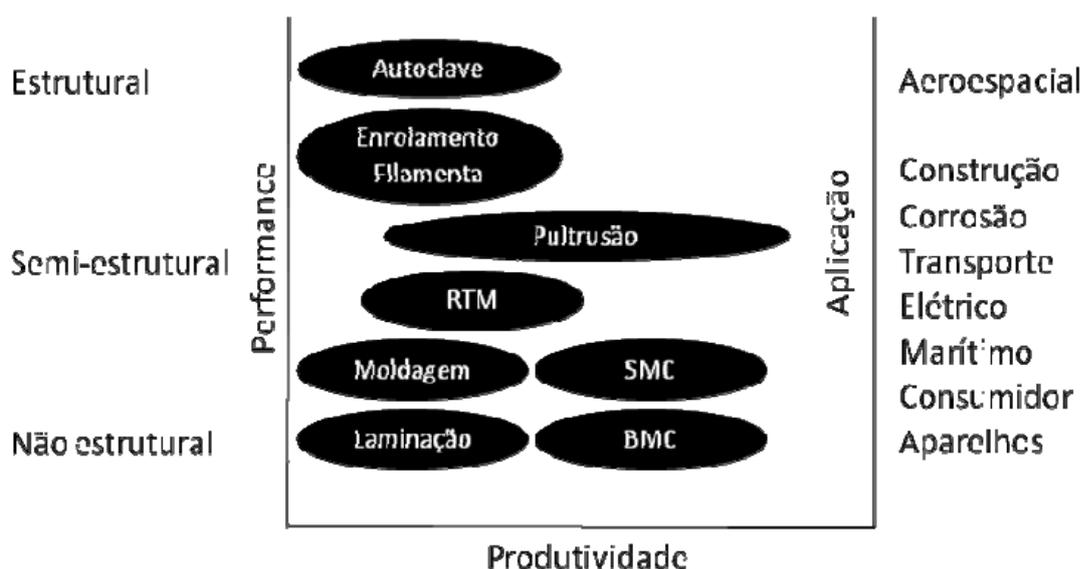
Tal vantagem apresentada pelos compósitos tornou-se de suma importância para o mercado em geral, de tal modo que o mercado de produção de materiais compósitos está em crescimento e com boas expectativas para o futuro. Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), com cerca de 180 empresas associadas a este segmento, o setor brasileiro de materiais compósitos faturou 733 milhões de reais no primeiro trimestre de 2012 com um aumento de 1,6% em comparação ao último trimestre de 2011 e uma alta de 2,5% se comparado ao mesmo período do ano anterior. Através da figura 1 pode-se ver os diversos campos em que são utilizados estes materiais tanto pelo seu desempenho como pelo seu baixo custo.



**Figura 1 - Importância relativa das necessidades de baixo custo e desempenho estrutural em componentes compósitos utilizados em diferentes ramos da indústria.**

Fonte: Adaptado de LEVY NETO; PARDINI (2006, p.7).

Um dos aspectos negativos dos materiais compósitos é a sua produção que não conseguem conciliar produtividade e desempenho do material. Materiais provenientes de processos produtivos como de autoclave e enrolamento filamentar possuem alto desempenho estrutural, porém uma produtividade baixa em torno de 100 a 1 mil peças por ano em relação à produção de 100mil peças ao ano através da pultrusão. Isto acaba tornando o processo de fabricação de elevado custo para manufatura de componentes em compósitos. Na figura 2 pode-se ver uma relação entre performance e produtividade dos principais processos de fabricação de compósitos.



**Figura 2 - Produtividade e Performance.**

Fonte: MARTINEZ (2011, p.9).

Uma alternativa a esta desvantagem é a pultrusão, processo de fabricação contínuo de compósitos. Este sistema tem como característica uma produtividade elevada, baixo custo de implementação, grande automação do sistema e pouca mão de obra requerida, fatores que diminuem custo final do produto para comercialização. Além de sua alta produção, o pultrudado tem elevado desempenho estrutural, sendo apenas inferior aos processos de autoclave e enrolamento filamentar que tem alto custo de implementação e baixa produção, o que resulta em um custo final elevado.

Assim este processo pode ser utilizado para a popularização da utilização dos materiais compósitos, que atualmente ainda não são utilizados em sua total aplicação, muito se deve ao fato de projetistas utilizarem anos de conhecimento e experiência no desenvolvimento de projetos com materiais mais usuais como aço, ferro, entre outros do que se dedicar ao estudo e projeto com materiais mais atualizados e recentes.

Surgida na década de cinquenta, a pultrusão por ser um processo relativamente recente ainda tem muito a ser estudada e desenvolvida, tendo ainda poucos estudos relacionados ao seu processo e produto. De tal modo, que este projeto trata do desenvolvimento deste sistema com o fim não industrial, mas acadêmico, para tanto futuramente desenvolver pesquisas relacionadas ao processo de pultrusão como também sobre as matérias primas e o produto final.

A revisão bibliográfica do presente trabalho foi estruturada de forma abrangente, pelo fato de se existir poucas fontes sobre o assunto. Assim os futuros usuários e pesquisadores que se utilizarão da máquina pultrusora desenvolvida poderão se basear e se interar sobre o assunto e a utilização da mesma através deste trabalho. Será realizada uma apresentação de materiais compósitos e de seus principais processos de fabricação. A pultrusão será um processo abordado, de forma detalhada, a parte dos outros métodos de fabricação para melhor entendimento do trabalho. Os materiais utilizados para compósitos serão abordados referentes aos mais usuais na pultrusão, sendo matriz a polimérica e para reforços o enfoque são as fibras, especificamente a fibra de vidro.

O capítulo de materiais e métodos aborda como foi realizado o projeto e desenvolvimento do mesmo e por fim a fabricação do pultrudado.

A conclusão abordara o material fabricado para validação e entendimento do projeto, para que os futuros usuários deste equipamento possam desenvolver da melhor maneira os estudos nesta área.

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema de pultrusão, levando em consideração o uso específico para pesquisa e não para o

uso industrial ou de elevada produção, limitações de espaço físico, matéria prima e um projeto de custo viável para o seu desenvolvimento e fabricação.

Como objetivo secundário a obtenção de um material pultrudado obtido através da pultrusora projetada, que definido por especificações de aplicações para uso em pinos odontológico um material cilíndrico de diâmetro de um milímetro.

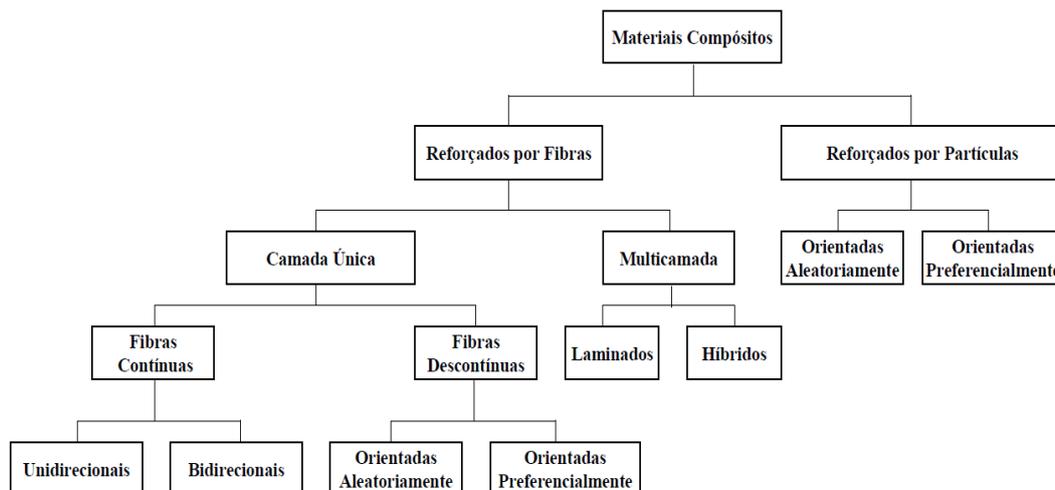
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 COMPOSITOS

“Compósitos são definidos como materiais compostos constituídos por duas ou mais fases macroscópicas e com propriedades mecânicas iguais ou melhores que as de cada componente isolado” (SANTOS, 2009, p.1). Ou seja, tem como objetivo obter e unir as melhores propriedades das matérias-primas que constituem sua formação. Essas fases são denominadas reforço e matriz que quando combinados possuem características que não se encontram isoladamente uma da outra. Os materiais compósitos podem ser de matriz cerâmica, matriz metálica ou matriz polimérica. Os materiais obtidos de matrizes poliméricas são uma das associações mais comuns, os quais são formados por uma fase polimérica (matriz) e reforçada por uma fase descontínua formada por reforços ou fibras podendo também conter aditivos para fins específicos como corantes para dar cor desejada ao material, agentes catalisadores para aceleração da reação de cura entre outros tipos de aditivos que são definidos de acordo com a necessidade e uso do produto final. A obtenção deste tipo de compósito se dá pela cura da resina, ou seja, a reação de polimerização da resina junto ao reforço utilizado.

Tipicamente os compósitos têm uma ou mais fase descontínua (reforços) que é mais rígida e resistente do que a fase contínua (matriz) que serve como aglomerante para o reforço. As matrizes atuam no papel manter a integridade estrutural do compósito, manter o perfil do material e arranjo da fase descontínua, transferir o carregamento para os reforços, além de proteger contra ataques ambientais como corrosão, abrasão, exposição ao sol entre outros, ou seja, contra possíveis danos do meio externo.

Consequente à fase descontínua atua no papel de suportar as tensões aplicadas. Tal função é influenciada pelo arranjo e das dimensões do reforço, o que influencia diretamente nas propriedades mecânicas dos compósitos. Assim classificamos estes materiais pela geometria desta fase. Como visto na figura 3 separam-se em dois grupos, os reforçados por fibras e os por partículas.



**Figura 3 - Organograma de classificação dos materiais compósitos.**

**Fonte: SILVESTRE FILHO (2001, p.10).**

Uma característica de extrema importância dos materiais compósitos, que deve ser levado em consideração ao se utilizar em um projeto é anisotropia deste material, ou seja, as características deste material como mecânica, física, térmica, elétrica variam nas diversas direções do material analisado. Assim para um projetista, deve-se levar em consideração tal condição e aplicar as condições mais críticas no sentido de melhores propriedades. Segundo Silvestre Filho (2001, p13), a vantagem principal destes compósitos esta na habilidade de controlar a anisotropia do componente através do projeto e da fabricação, assim se utiliza ao máximo as propriedades e vantagens dos materiais.

## 2.2 REGRA DA MISTURA

A proporção relativa de fibra e resina é um dos principais parâmetros de um material compósito, porém usualmente os valores teóricos das propriedades são relacionados ao volume o que em geral é algo inviável de se trabalhar, sendo mais fácil o uso e medição das massas relativas (MENDONÇA, 2005). Para correlacionar essas e outras propriedades utiliza-se a regra da mistura. Tem-se a seguinte relação para o volume (3.1) e massa (3.2) do compósito. Os índices subscritos utilizados

c, f, m e v utilizados adiante representam respectivamente o compósito, fibra, matriz e vazios.

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (3.1)$$

$$m_c = m_f + m_m \quad (3.2)$$

Para as frações volumétricas de fibra e matriz e vazios  $V_f$ ,  $V_m$  e as frações de massa  $M_f$ ,  $M_m$  defini-se:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, V_m = \frac{v_m}{v_c}, V_v = \frac{v_v}{v_c} \quad (3.3)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}, M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (3.4)$$

Assim para compósitos simples de dois componentes pode-se dizer:

$$V_f + V_m + V_v = 1 \quad (3.5)$$

$$M_f + M_m = 1 \quad (3.6)$$

A massa pode ser escrita em função da densidade,  $\rho$ , (massa/volume) assim reescrevendo a equação (3.2) como:

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.7)$$

Dividindo ambos os lados por  $v_c$  e usando as equações 3.3, obtêm-se:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (3.8)$$

Através da equação (3.8) é possível obter a densidade do compósito e através dela pode-se obter o formato da representação de varias equações que definem outras propriedades:

$$(\text{propriedade } X)_c = (\text{propriedade } X)_f + (\text{propriedade } X)_m \quad (3.9)$$

Uma relação importante que pode ser obtida entre as frações mássica e volumétrica pode ser obtida através da equação 3.4 Utilizando a densidade para substituir a massa assim obtendo:

$$M_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot V_f \quad (3.10)$$

$$M_m = \frac{\rho_m}{\rho_m} \cdot V_m \quad (3.11)$$

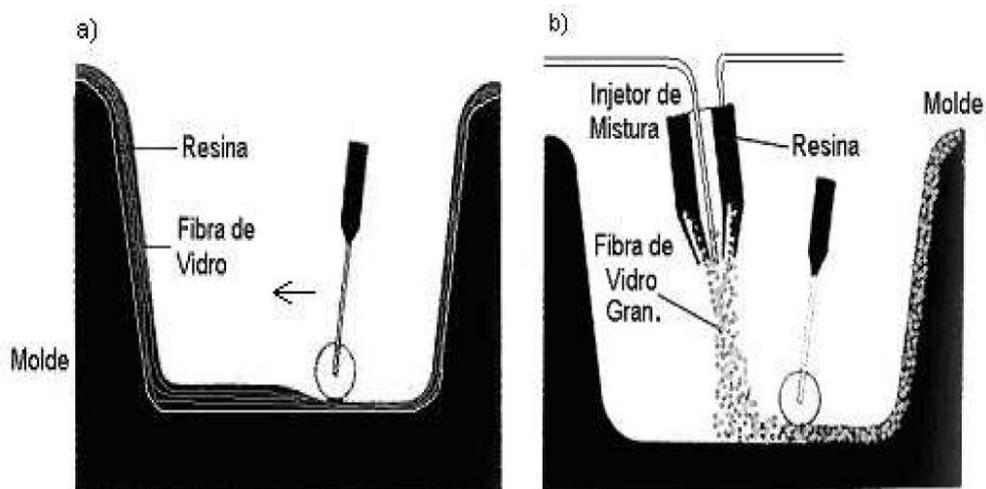
## 2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ POLIMÉRICA

Dentre os processos de fabricação mais conhecidos e utilizados pode-se destacar o de hand lay-up, spray up e de autoclave considerados de molde abertos e o enrolamento filamental de molde cilíndrico.

### 2.3.1 Processos com Molde Aberto

Os processos de molde abertos são utilizados para fabricação em pequena escala, como protótipos, itens simples ou no caso da autoclave para produtos de alto desempenho em que o custo de fabricação elevado não é considerado devido a sua necessidade de aplicação.

Os que se destacam pelo seu baixo investimento de aplicação do processo são o hand lay up e o spray up, no qual ocorre aplicações sucessivas de camadas de fibras e resina sobre o molde até atingir a espessura desejada. Tais métodos se diferenciam apenas na sua aplicação da mistura, sendo respectivamente um feito manualmente e o outro através de pistolas como ilustrado na figura 4, sendo que através do segundo método a uma maior homogeneização na distribuição das fibras.

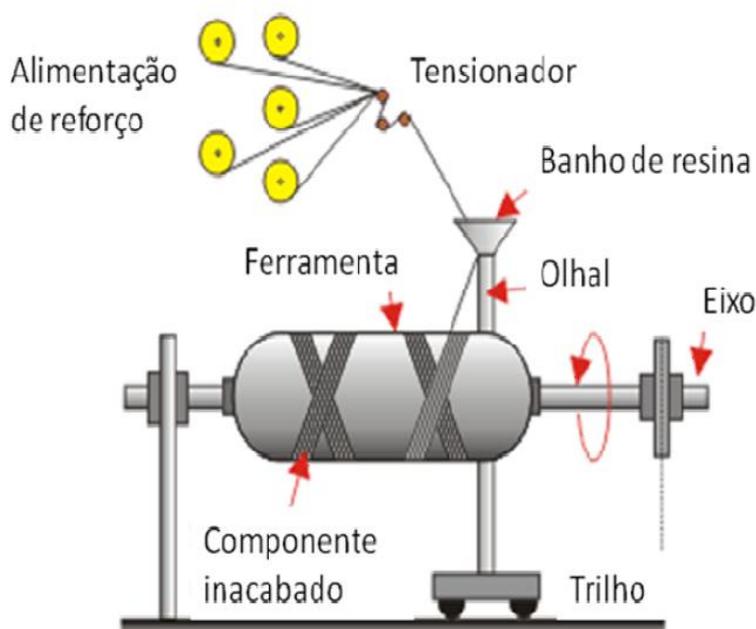


**Figura 4 - Formas de aplicação da resina: a) Hand Lay-up e b) Spay-up Molding.**  
**Fonte: KERSTING (2004, P.10).**

Para aplicações de alto desempenho utiliza-se o processo de autoclave, considerado a que garante as melhores propriedades mecânicas do laminado. A autoclave consiste no empilhamento de camadas de fibras pré-impregnadas no molde aberto que é levado a uma câmara onde se aplica pressão, energia e vácuo a fim de garantir a redução de vazio e a cura do material. Atualmente é o processo mais utilizado na indústria aeroespacial.

### 2.3.2 Enrolamento Filamentar

O enrolamento Filamentar também conhecido como filament winding assim como a autoclave é utilizado para produtos de alto desempenho como tubulações e vasos de pressão, porém é limitado em relação às formas de seu produto final, no geral formatos cilíndricos. Durante o processo os reforços são pré-impregnados com resina e são enrolados em um mandril com ângulos e tensionamento pré-definidos como é ilustrado na figura 5. Com o reforço aplicado a peça pode curar a temperatura ambiente, porém para agilizar a cura e conseqüentemente aumentar a produtividade é usual a utilização de uma estufa para a cura.



**Figura 5 - Enrolamento filamentar.**

Fonte: MARTINEZ (2011, P.11).

## 2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

“As matrizes poliméricas são as mais utilizadas devido ao baixo custo, fácil moldagem, boa resistência química e baixo peso específico.” (SILVESTRE FILHO, 2001, p.14). Também chamados comumente como resinas, às poliméricas se dividem em dois tipos denominados termofixos e termoplásticos, sendo o primeiro o mais utilizado.

Além das funções citadas anteriormente as matrizes também atuam como papel importante de barreira para a propagação de trincas e resistência ao cisalhamento do compósito. Porém devido as suas propriedades serem inferiores aos dos reforços à limitação de uso do material pode ser delimitada diretamente pelas características da resina, como por exemplo, a temperatura máxima de trabalho do material. Na tabela 1 são demonstrados os valores das propriedades das resinas.

**Tabela 1- Comparação das faixas típicas de valores das propriedades das resinas**

Propriedades	Termofixos	Termoplásticos
Módulo de Elasticidade (GPa)	1,3 – 6,0	1,0 – 4,8
Resistência à Tração (GPa)	0,02 – 0,18	0,04 – 0,19
Temperatura Máxima de Serviço (°C)	50 – 450	25 – 230

Fonte: SILVESTRE FILHO (2001, P.15).

Além das propriedades demonstradas, a principal diferenciação dos dois tipos de matrizes poliméricas é no que se diz respeito ao seu comportamento quando aquecidas. As termoplásticas se fundem como um líquido viscoso enquanto as termofixas se deterioram através do processo de fusão. Tal comportamento demonstra que produtos originados de termoplásticos podem ser aquecidos e “amolecidos”, ou seja, pode-se utilizar deste fator para se reciclar tais materiais, o que não pode ser realizado para o termofixos, pois se aquecidos eles não se refundem e entram em combustão. Mesmo com esse fator contrário eles continuam sendo mais utilizados devido ao seu custo menor que as termoplásticas e por terem uma grande quantidade de aplicações e características mais desejáveis.

## 2.5 FIBRAS

“Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. As fibras ou filamentos são o elemento de reforço dos compósitos estruturais.”(LEVY NETO; PARDINI, 2006, P.59). A fibra mais utilizada com matriz polimérica é a de fibra de vidro, sendo facilmente encontrada com baixo custo, alta resistência à tração e grande inércia química.

As fibras por si só não tem utilidade estrutural se não trabalhadas em conjunto com uma matriz para sua aglutinação. Devido a sua geometria, fios de pequenos diâmetros e grande comprimento permite uma boa área de interface entre fibra e matriz, o que ajuda na transferência de tensões da matriz para o reforço.

Tal geometria se deve ao fato de que na medida em que se tornam mais finos os fios da fibra, menos defeitos que induzem uma falha são apresentados no material, assim ao seguir essa tendência de afinar a fibra a resistência os valores de resistência do material vão se aproximando dos valores teóricos do material.

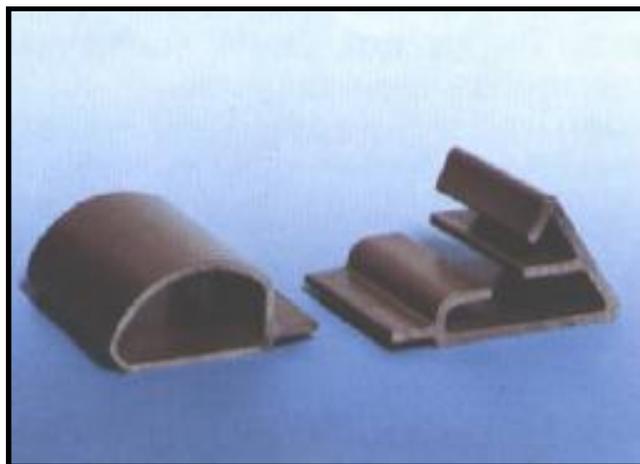
## 2.6 PULTRUSÃO

Um dos meios de se obter materiais compósitos é o processo de fabricação contínuo denominado pultrusão, utilizado para fabricação de perfis de seção transversal contínua, como vigas, tubos, barras e perfis de formas complexas como demonstrado nas figuras 6 e 7.



**Figura 6 -Seções transversais típicas de compósitos pultrudados.**

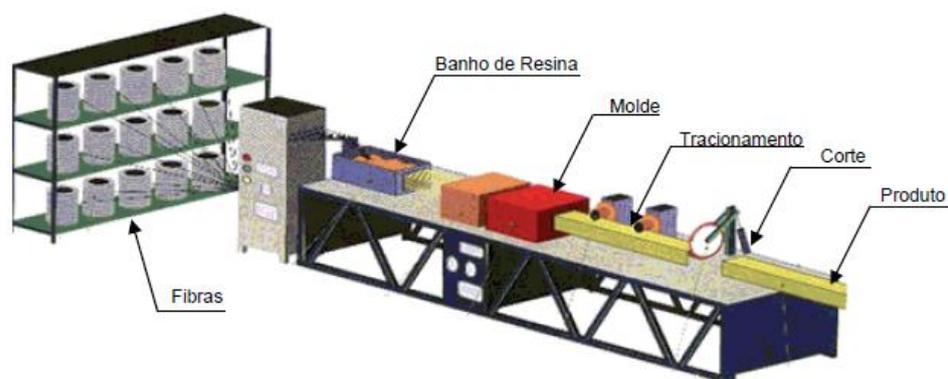
**Fonte: SANTOS (2009, p.12).**



**Figura 7- Formas complexas de perfis pultrudados.**

Fonte: ALMEIDA (2004, p.2)

Neste processo fibras são impregnadas por uma resina através de um banho em uma banheira preenchida com resina e puxadas continuamente até passar pela matriz, um molde metálico aquecido, onde se obtém a forma final do produto e ocorre a reação de cura. Através da representação do processo da figura 8 pode-se dividi-lo em seis partes.



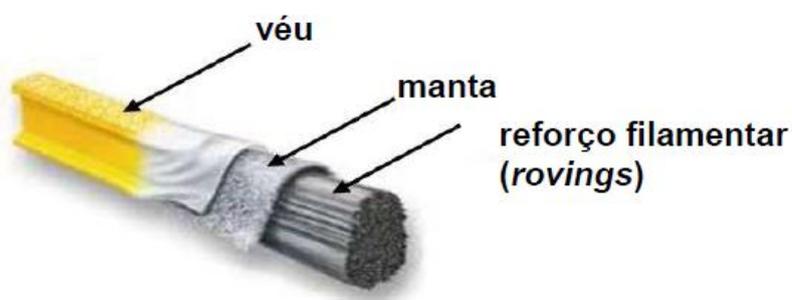
**Figura 8 - Representação do Processo de Pultrusão**

Fonte: STRÖHER (2005, p.20).

As duas primeiras etapas consistem nas estantes onde são posicionadas as fibras utilizadas durante o processo e o banho de resina através da banheira que impregna a resina nas fibras. A terceira etapa é na qual ocorre à cura e a formação

do perfil final do material através de um molde. O molde é aquecido na grande maioria dos casos por resistências elétricas acopladas na superfície do mesmo e com uma cavidade interna com o formato final do perfil desejado na qual a fibra impregnada de resina irá passar e curar e obter a geometria do produto desejado. Após esta etapa o material já curado passa por um tracionador responsável pela automatização do processo. Por fim o material deverá ser cortado no tamanho desejado no final do sistema de produção, obtendo assim o material pultrudado. O processo de corte também é parte da automatização do processo sendo necessário que a ferramenta utilizada acompanhe a velocidade imposta pelo tracionador de forma que tanto a ferramenta como o produto estejam estáticos um em relação ao outro durante o corte.

A figura 9 ilustra as camadas de um material obtido através deste processo. Os rovings, filamentos de fibras, que atuam como reforços neste material são responsáveis por suportar os esforços no sentido longitudinal, materiais que apenas se utilizam deste tipo de reforço raramente oferecem algum tipo de resistência transversal considerável. Para suprir esta deficiência são utilizadas mantas que atuam neste sentido e suportando tal esforço nesta direção. O véu apesar de não ser obrigatório para a composição do pultrudado é praticamente necessário em todas as aplicações deste material. Ele atua como uma proteção superficial e acabamento do material, assim protege o interior do material de danos externos como corrosão, raios ultravioletas, ataques químicos e também dando a cor final do produto quando adicionado ao banho de resina este elemento.



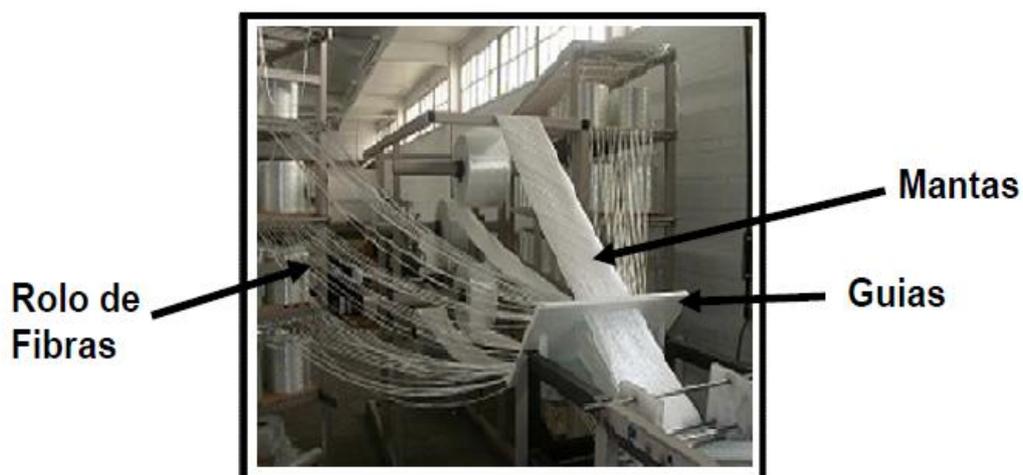
**Figura 9 - Estrutura do compósito polimérico pultrudado.**

**Fonte: SANTOS (2009, p.9).**

As maiores dificuldades deste tipo de processo são determinar a faixa operacional adequada para a situação. Uma velocidade de produção alta necessitará de um aquecimento elevado, causando um aumento considerável no gasto de energia para a produção, ou até mesmo se a potência não for suficiente para tal velocidade o material não ira curar por completo causando alterações negativas para as propriedades do material. Outra possibilidade é um fluxo de calor além do necessário para a reação de cura assim degradando a resina e comprometendo o material o final. Assim esses parâmetros são considerados os mais críticos de todo o sistema, sendo parte de grande importância e tempo na hora de se determinar os parâmetros de operação do sistema.

### 2.6.1 Descrição Detalhada do Processo

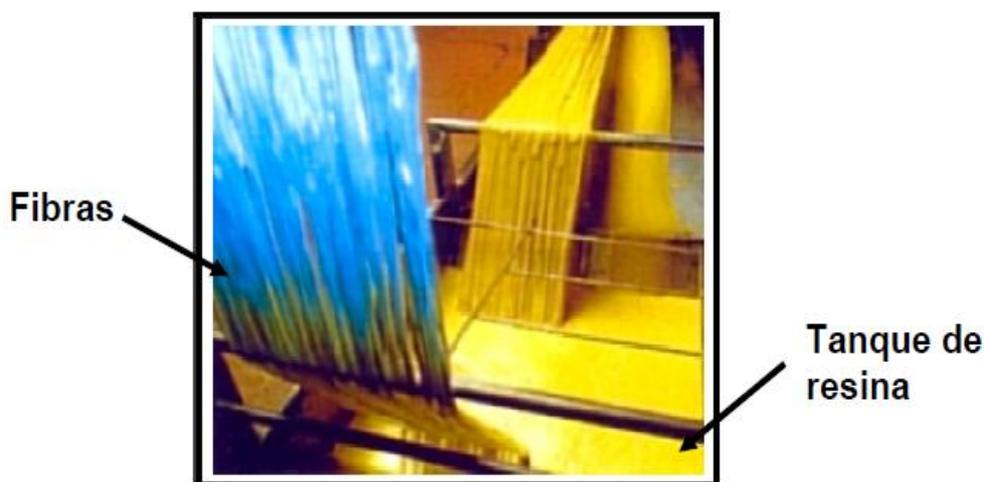
O processo se inicia nos suportes em que se encontram os rovings, mantas e véus para alimentação do sistema, logo após a saída destes materiais dos suportes eles passam por guias ou pré-formas, que atuam no sentido de alinhar e posicionar cada camada em sua posição, como pode ser visualizado na figura 10.



**Figura 10 - Sistema de guias que direcionam as fibras para o molde.**

**Fonte: SANTOS (2009, p.10).**

Pré-alinhadas ocorre o processo de impregnação do material com a resina conforme mostrado na figura 11, através de um banho em uma banheira na qual se encontram a resina e os aditivos que darão proteção contra ataques químicos e do meio ambiente. É nesta fase em que se pode adicionar a cor do final do produto quando desejado, além de cores usuais também é possível adicionar colorações que imitam materiais como madeira, mármore entre outros, o que proporcionou diversas possibilidades de aplicações principalmente na área da arquitetura.



**Figura 11 - Tanque aberto de saturação de resina.**

**Fonte: SANTOS (2009, p.10).**

Com o material impregnado ocorre o processo de cura e definição da geometria do material através de uma matriz aquecida com uma cavidade com o formato final do produto por na qual passa todo o material, a figura 12 mostra alguns tipos de moldes de pultrusão e suas cavidades.



**Figura 12 - Moldes de pultrusão com cavidades de diferentes geometrias.**

**Fonte: SANTOS (2009, p.11).**

No final do processo se encontram o tracionador e a seção de corte, na qual é usual a utilização de um espaçamento físico de três metros entre a saída da matriz e o dispositivo de tracionamento, para que as reações de cura iniciadas dentro molde terminem antes de serem tracionadas, assim evitando danos externos ao material. Após todas estas etapas o material é cortado no comprimento desejado na seção de corte através de uma serra.

## 2.7 PARÂMETROS DO PROCESSO DE PULTRUSÃO

Para a pultrusão são considerados dois parâmetros de extrema importância, o banho e impregnação das fibras, que são relacionados com a viscosidade da resina, e a cinética de cura que se relaciona com a temperatura do matriz aquecida e a velocidade imposta pelo tracionador, sendo o segundo parâmetro o mais estudado e pesquisado e crítico do sistema.

### 2.7.1 Molhabilidade

Para se obter a impregnação do material corretamente durante o banho, é considerado um fator denominado molhabilidade, na qual sempre se busca o maior valor para tal parâmetro. Segundo Kersting (2004, p27), pode-se definir a molhabilidade matematicamente como:

$$\text{molhabilid\text{e}} = k_m(T_r \cdot W_f \cdot t_i) / (u_0) \quad (3.12)$$

Onde:

$k_m$ : constante de proporcionalidade para molhabilidade;

$T_r$ : temperatura de resina;

$W_f$ : trabalho fornecido às fibras no banho de resina;

$t_i$ : tempo de imersão;

$u_0$ : viscosidade inicial.

É fácil identificar através da equação 3.12 que para aumentar o fator molhabilidade a variável crucial é a viscosidade inicial, assim para definir e melhorar este parâmetro é comum se basear apenas nesta variável, assim sempre buscando utilizar uma resina com baixa viscosidade o que eleva a molhabilidade do processo.

### 2.7.2 Cinética de Cura

Este parâmetro, apesar de simples o entendimento do problema é complexo a determinação dos fatores envolvidos, temperatura e velocidade. Para temperatura baixas devera ser adotado velocidades baixas e para temperaturas altas velocidades altas. Devido às reações e características da cinética e da transformação do estado físico do material dentro do molde há um limite mínimo e máximo para estes parâmetros, ou seja, uma faixa de operação que é esquematizada na figura 13. Isto acontece que para valores muito baixos a cura pode não ser completa no material e para valores altos pode degradar o material final, em ambos os casos o pultrudado produzido é inutilizado.

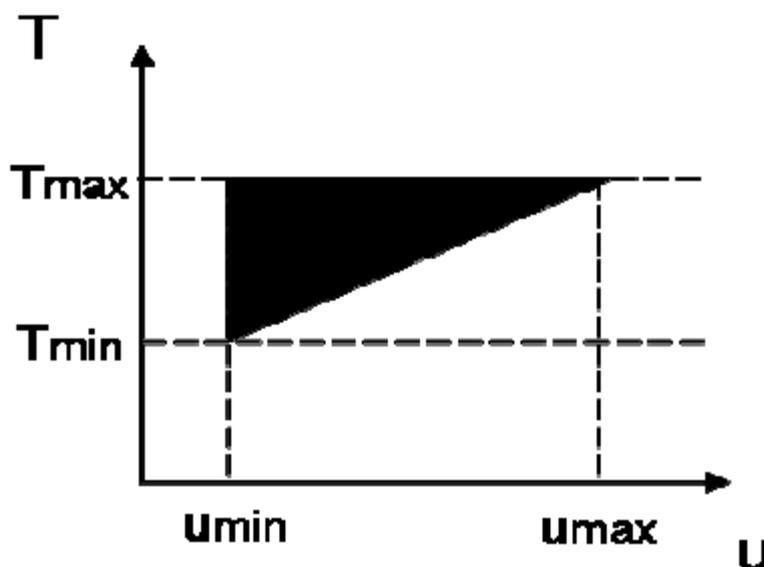


Figura 13 - Espaço viável, representado pela região escura, delimitada pela velocidade ( $u$ ) e temperatura ( $T$ ).

Fonte: SANTOS (2009, p.13).

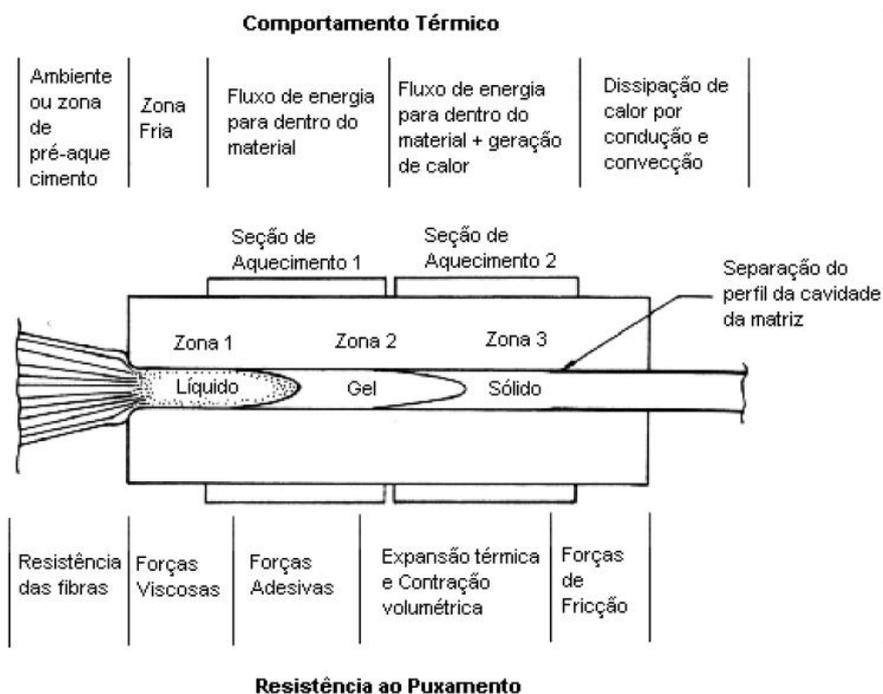
Dentro do molde pode-se dividir em três etapas o processo de cura do material em zona líquida, zona de gel e por fim a zona sólida.

A fase líquida ocorre na entrada da matriz, e esta fase é responsável pelo aumento da tensão de puxamento do processo devido às forças viscosas e o início da formação do perfil.

No segundo estágio ocorre uma fase intermediária o gel, nesta fase atuam as forças coesivas e ocorre a adesão entre a matriz e reforço. As forças atuam até que o material tenha curado o suficiente pra se tornar sólido e entrar na última fase.

No estágio final com o material sólido, ocorre uma contração da resina separando o material da cavidade do molde.

Na figura 14 é esquematizado as 3 fases que ocorrem dentro da matriz e durante o processo de cura.



**Figura 14 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida.**

Fonte: KERSTING (2004, p.29).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Cornélio Procópio e fabricado na Metalúrgica Pérola LTDA. (figura 15) localizada na cidade de Cambará do estado do Paraná.



**Figura 15 - Vista aérea da Metalúrgica Pérola.**

**Fonte: Site da Metalúrgica Pérola (2011).**

As matérias primas e os componentes utilizados no sistema desenvolvido foram disponibilizados pela indústria responsável pela fabricação, de tal modo que o projeto além de se basear nos conceitos teóricos referentes a materiais compósitos, resinas, fibras, teve que se adequar aos materiais e processos de fabricação disponíveis para a realização deste trabalho.

Foram desenvolvidos croquis para determinação das dimensões da máquina e auxílio na fabricação que se encontra em anexos no presente trabalho.

A lista completa de materiais utilizados na fabricação será relacionada na parte de resultados, pois é parte integrante do projeto, que será discutido em tal capítulo.

Para a validação da máquina foram realizados testes para obtenção do pultrudado utilizando rovings de fibra de vidro e resina epóxi disponibilizados nos laboratórios da UTFPR-CP.

Após o teste foi utilizado à regra da mistura para comparação de valores de massa e volume das fibras do material obtido com a literatura.

O projeto da máquina pultrusora foi dividido em estruturas metálicas, banheira de impregnação e guias, matriz e sistema de aquecimento, tracionador e por ultimo painel de controle.

Todos os croquis utilizados e as dimensões das máquinas se encontram no APÊNDICE A. Os desenhos foram desenvolvidos através do software CAD, Solidworks®.

### 3.1 ESTRUTURAS METÁLICAS

A estrutura da máquina fabricada em tubos quadrados de aço foi dividida em três partes que correspondem ao inicio meio e fim do processo. A primeira é destinada apenas aos suportes suporte dos rovings e não faz parte do conjunto da máquina podendo ser considerada como uma estrutura secundária, como vista na figura 16. A parte intermediária serve como apoio as guias, banheiras e matriz. E por ultimo a estrutura que suporta o tracionador e o painel de controle. As estruturas foram nomeadas de estrutura 1, estrutura 2 e estrutura 3.



**Figura 16 - Estrutura metálica 1 (suporte da fibra de vidro).**

**Fonte: Autoria própria.**

A estrutura 1 foi desenvolvida em uma altura menor do que o resto do conjunto. O suporte gera uma leve inclinação no roving quando o mesmo posicionado na estrutura, pois o tubo de suporte da fibra foi posicionado de forma não perpendicular com o plano da estrutura. Tudo isto acaba suavizando o processo de tracionamento do sistema, pois ao invés de gerar uma tração que tenderia a rotacionar, desta forma os rovings são desenrolados, não influenciando na força de tracionamento final necessária para o sistema.

As estruturas 2 e 3 se conectam através de um sistema de encaixe de forma que a distância entre a saída da matriz e o início do tracionador possa ser variada. Tal sistema foi adotado, pois para o material fabricado uma distância de três metros, utilizada para pultrusão em geral, era extremamente superior à necessária e dificultaria a utilização da máquina devido ao espaço físico disponível. Futuramente pode ocorrer à utilização deste equipamento em outros tipos de perfis que necessitem de uma maior distância para o seu resfriamento e cura total, assim foi decidido à utilização desse sistema retrátil para variação desta distância. As figuras 17 e 18 tiradas durante a fabricação mostram o sistema em sua extensão mínima e máxima respectivamente.



**Figura 17 - Pultrusora durante a fabricação (mínima extensão).**

**Fonte: Autoria própria.**



**Figura 18 - Pultrusora durante a fabricação (máxima extensão).**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.2 BANHEIRA DE IMPREGNAÇÃO E GUIAS

Foram utilizados duas guias para os rovings, posicionadas antes e depois do banho cada uma, com o intuito de começar o alinhamento antes do banho e após manter o alinhamento das fibras e remover parte do excesso da resina. Compostas por uma cantoneira soldada a uma chapa de aço, cada uma, com cinco furos para a passagem dos reforços. O posicionamento e a regulação da altura são definidos através de um sistema porca e rosca, que esta soldado a Estrutura 2.

Para a definição da banheira de impregnação foi levado em consideração à economia de resina para utilização da máquina, pois como a aplicação da mesma não será para grande produtividade, o tamanho dela deveria ser reduzido para não exigir um grande volume de resina para o início do processo. De tal modo que a banheira foi desenvolvida como na figura 19 com três hastes de posicionamentos para que guiem a fibra rente ao fundo da banheira.



**Figura 19 - Banheira de impregnação e guas.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3 MATRIZ E SISTEMA DE AQUECIMENTO

A matriz foi desenvolvida a partir de dois tarugos de alumínio, assim seria bipartido unido por oito parafusos, facilitando a limpeza após a utilização, e com uma boa condutividade térmica o que facilitaria o aquecimento e o processo de cura do material. Devido à aplicação do pultrudado para pinos de implantes odontológicos, era necessário um perfil final de um milímetro de diâmetro, ou seja, para cada parte foi usinado através do processo de fresamento meia circunferência de raio de meio milímetro como pode ser visto na figura 20.



**Figura 20 - Matriz aberta e parafusos.**

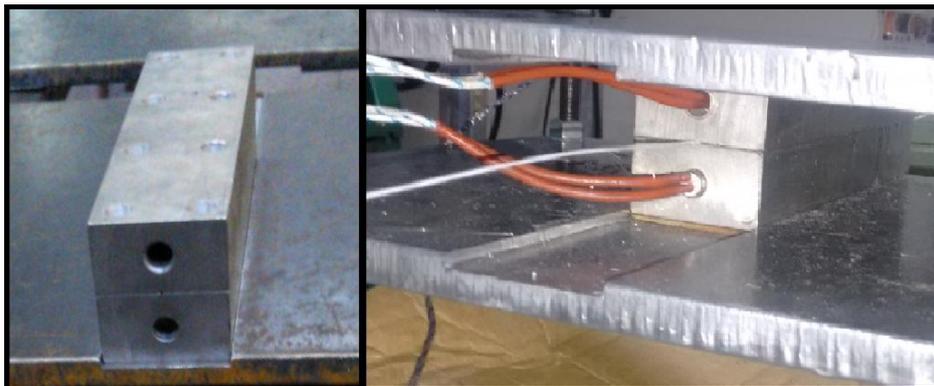
**Fonte: Autoria própria.**

Para o aquecimento da matriz, foram utilizado duas resistências do tipo cartucho de quatrocentos watts e cento e dez volts, similares ao da figura 21, para cada tarugo, introduzidas em um orifício usinado em cada uma das partes como demonstrado na figura 22, assim têm se um maior aproveitamento da potencia da resistência para o aquecimento do alumínio. Para o controle da temperatura junto as resistências foi utilizado um termopar do tipo J, que tem como faixa de trabalho temperaturas de 0 a 760°C, tendo como principal característica seu baixo custo o que também foi fator determinante para a escolha do mesmo.



**Figura 21 - Resistência do tipo cartucho.**

**Fonte: ITAQUÁ RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS. (2014, p.3).**



**Figura 22 - Matriz e resistências.**

**Fonte: Autoria própria.**

Para fixação e posicionamento um sistema similar aos das guias do roving foi escolhido. Duas placas de alumínio usinadas com um rebaixo para centralização da matriz que se posiciona entre elas foram utilizadas. As placas são alinhadas através do ajuste de porcas em uma barra rosca, o que também gera uma pressão das placas na matriz para que a mesma não se movimente durante a fabricação do pultrudado. Tal força aplicada foi um dos fatores de escolha da resistência do tipo cartucho, pois as forças são aplicadas diretamente na matriz protegendo-as de possíveis danos. Além de posicionar estas placas exercem uma função de isolar a matriz. A temperatura atingida no exterior é bem amena se comparada a utilizada no aquecimento, assim evitando que operadores ou transientes do laboratório se queimem durante a operação. Na figura 23 pode-se ver o sistema completo.



**Figura 23 - Matriz, sistema de aquecimento e fixação.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.4 TRACIONADOR

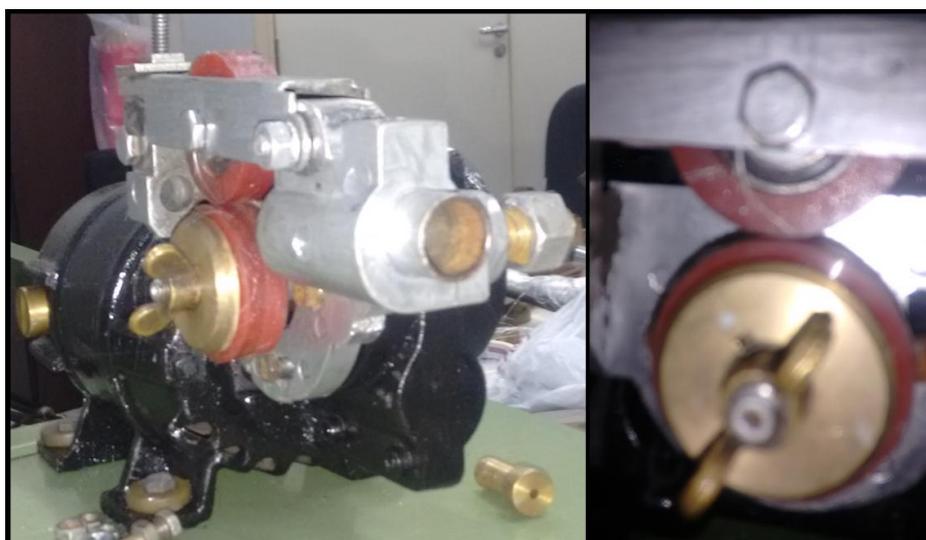
A elevada automatização do processo de pultrusão se deve basicamente ao tracionador, para a quase que toda aplicabilidade industrial, os perfis utilizados demandam uma grande força de tração assim é comum se utilizar de tracionadores hidráulicos para atender tal necessidade. Pela aplicação do projeto, apenas para perfis leves, este tipo de sistema seria superdimensionado e de elevado custo, assim adotou-se um tracionamento mecânico. Inicialmente seria desenvolvido o projeto do mesmo, porém ao perceber a grande similaridade de utilização do tracionador de uma máquina de solda MIG com a do processo projetado, e a disponibilidade deste produto que se encontrava em desuso na Metalúrgica Pérola, optou-se em adotar este produto comercial para este projeto sendo o modelo utilizado SAG 1006 Bambozzi, similar ao da figura 24.



**Figura 24 - Tracionador modelo SAG 1006.**

**Fonte: BAMBOZZI SOLDAS LTDA. (2014, p.10).**

Para implementar este produto foi necessário uma adaptação, por ser utilizado para tracionamento de arames metálicos, os roletes utilizados poderiam danificar o pultrudado ao tracionar. Assim substituíram-se os originais por dois roletes de poliuretano, um material com menor dureza que os anteriores. Na figura 25 pode ser visto o tracionador utilizado já com as devidas alterações.



**Figura 25 - Tracionador com roletes de poliuretano.**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.5 PAINEL DE CONTROLE

Para facilitar a operação da pultrusora, todos os comandos e ajustes dos parâmetros necessários foram englobados em um só painel (figura 26).



**Figura 26 - Painel de controle da máquina pultrusora.**

**Fonte: Autoria própria.**

Através dele podem ser controlados tanto a resistência como o tracionador, ou seja, temperatura e velocidade. Duas chaves tic-tac têm a função de ligar ou desligar a resistência ou o tracionador. O setup da temperatura é realizado por um controlador de temperatura do modelo TC4y-14R Autonics, o qual além de definir a temperatura de operação é mostrado a mesma no instante. Para definição da velocidade foi utilizado um variac modelo VM3140, as especificações fornecidas pelo fabricante se encontram na figura 27. Adesivos foram posicionados no painel para fácil visualização das operações neles contidas.

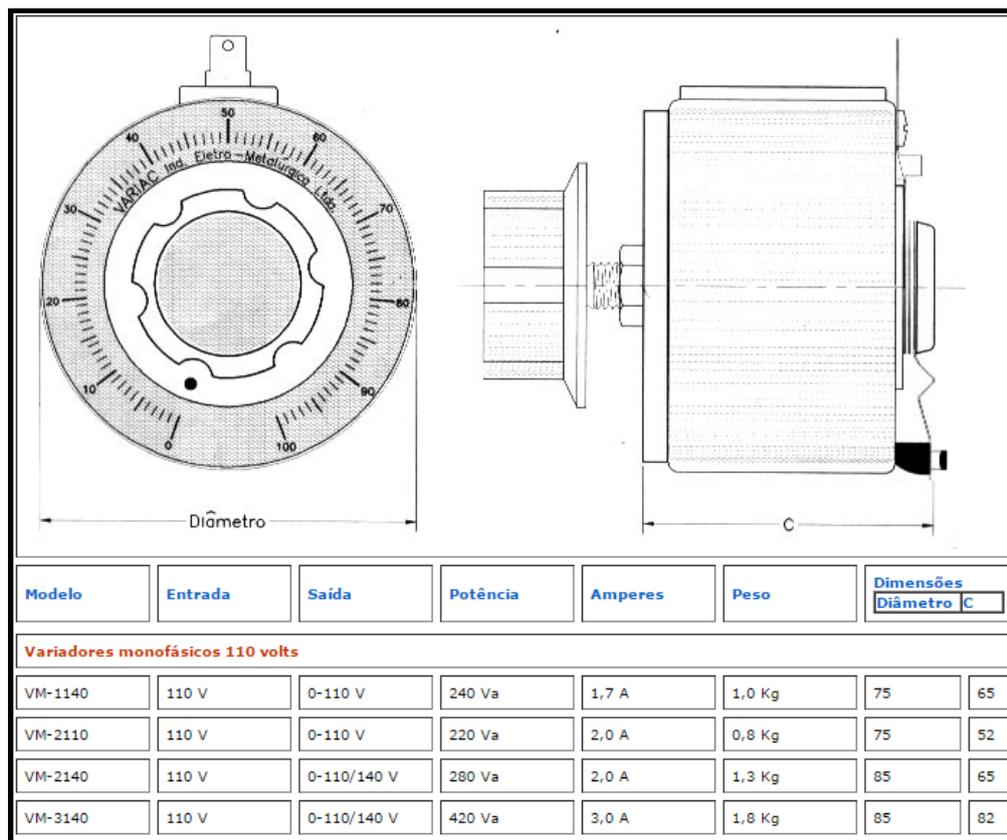


Figura 27 - Características do variac VM3140.

Fonte: VARIAC INDÚSTRIA ELETRO METALURGICA LTDA.

### 3.6 LISTA DE MATERIAL

Através da análise dos croquis e dos componentes comerciais necessários para a realização do projeto foi gerado uma lista de materiais. Para facilitar o entendimento da mesma foram subdivididos em tabelas através de suas semelhanças. A seguir são demonstradas todas as tabelas geradas e consequentemente a matéria prima utilizada em toda a fabricação.

Tabela 2- Lista de tubos/barra/perfil/tarugo.

LISTA DE TUBOS/BARRA/PERFIL/TARUGO		
QUANTIDADE	MATERIAL	DIMENSÃO(mm)
3	BARRA CIRCULAR	77XΦ5
5	TUBO QUADRADO	15x15x480
4	TUBO QUADRADO	15x15x390
4	TUBO QUADRADO	15X15X495
1	TUBO CIRCULAR	150XΦ15
2	TUBO QUADRADO	30X30X2300
4	TUBO QUADRADO	30X30X885
6	TUBO QUADRADO	30X30X290
2	TUBO QUADRADO	20X20X310
2	TUBO QUADRADO	20X20X1010
2	TUBO QUADRADO	20X20X890
2	CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS	40X40X350
8	BARRA ROSCADA	M10X150
2	TARUGO DE ALUMINIO	25X50X200

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3- Lista de chapas.

LISTA DE CHAPAS		
QUANTIDADE	MATERIAL	DIMENSÃO(mm)
2	CHAPA DE AÇO	1,5X80X350
1	CHAPA DE AÇO	1,5X80X200
2	CHAPA DE AÇO	1,5X80X110
2	CHAPA DE AÇO	15X37X50
2	CHAPA DE AÇO	1,5X30X350
6	CHAPA DE AÇO	1,5X140X140
1	CHAPA DE AÇO	8X300X350
1	CHAPA DE ALUMÍNIO	15X300X400

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4- Lista de porca/parafusos

LISTA DE PORCAS/PARAFUSOS		
QUANTIDADE	MATERIAL	DIMENSÃO(mm)
8	PARAFUSOS CABEÇA TIPO FENDA	M6X40
24	PORCA SEXTAVADA	M10

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5- Lista de componentes comerciais utilizados no projeto.

LISTA DE COMPONENTES		
QUANTIDADE	DESCRIÇÃO	MODELO
1	CONTROLADOR TEMPERATURA	TC4y-14R Autonics
1	RELE NO ESTADO SÓLIDO	SSR 40ª Lukma
1	VARIAC	VM3140
1	CABO TERMOPAR TIPO J	oFT 2621
2	RESISTÊNCIAS TIPO CARTUCHO	Alta carga 400 w 110 v SHT 7375
1	TRACIONADOR	SAG 1006 Bambozzi
2	CHAVE TIC TAC	Liga / desliga

Fonte: Autoria própria.

### 3.7 MATERIAL PULTRUDADO

Para pultrusão é usualmente adicionado reforços em concentrações de 40 a 70% de fração volumétrica. (CALLISTER, 2008, p.446), assim para realizar os testes da pultrusora, utilizou-se a combinação de fibra de vidro e uma matriz polimérica, neste caso a epóxi pela sua disponibilidade e seu custo ser menor para realização dos testes em relação às outras resinas disponíveis.

Com a realização do processo foi retirada uma amostra considerada aceitável visualmente, observando principalmente a cura do material, observando se houve a cura total e não degradação da resina. Assim obteve-se um material de 180 milímetros de comprimento e um milímetro de diâmetro.

A massa do produto foi obtida com o auxílio de uma balança de precisão digital (figura 5.10), totalizando 0,24 gramas. Uma amostra com a mesma quantidade de reforço utilizado foi pesado totalizando 0,19 gramas.



**Figura 28 - Balança de precisão digital e medidas tomadas.**

**Fonte: Autoria própria.**

Pela equação 3.11 foi possível calcular a fração volumétrica de fibra, para tal determina-se a densidade do compósito pela equação 3.7 e a fração mássica através de 3.4. Segundo Silvestre Filho (2001) a densidade da fibra de vidro e da resina epóxi é respectivamente de aproximadamente 2,5 g/cm<sup>3</sup> e 1,2g/cm<sup>3</sup>.

Pelo formato cilíndrico o volume do compósito é dado por:

$$V_c = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot L$$

Para o caso estudado obteve-se um volume de 0,14cm<sup>3</sup>. Aplicando este resultado em 3.7 e sabendo que o lado direito da equação se refere à massa total do compósito e isolando a densidade do compósito:

$$\rho_c = \frac{m_c}{v_c} = \frac{0,24}{0,14}$$

Através de 3.4 tem-se:

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} = \frac{0,19}{0,24} = 0,79 = 79\%$$

Substituindo os valores encontrados em 3.11:

$$\frac{0,19}{0,24} = \frac{2,5}{0,24 / 0,14} \cdot V_m$$

Isolando o termo da fração volumétrica:

$$V_m = 0,54 = 54\%$$

Calcula-se a fração mássica de matriz através de 3.6, substituindo o valor encontrado para a fração da fibra e isolando o termo da matriz, assim:

$$M_m = 0,21 = 21\%$$

De forma similar ao método para definição da fração volumétrica da fibra, foi obtido para a matriz resultando em:

$$V_f = 0,3 = 30\% .$$

Com as frações volumétricas obtidas, utiliza-se a equação 3.5 para determinar a fração volumétrica dos vazios isolando o termo do mesmo obtendo:

$$V_v = 0,16 = 16\%$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto da máquina, após o funcionamento da mesma e realização dos testes, demonstrou atender as necessidades de operação, com algumas ressalvas. A banheira de impregnação, apesar de ter se levado em consideração a minimização da quantidade necessária de resina a ser preenchida para realizar a operação, ainda se exigiu uma elevada quantia em relação ao necessário. O processo de limpeza da mesma, devido à forma como foi disposta no projeto, acabou sendo pouco prático e aplicável nela. Pequenas medidas adaptativas e de simples execução foram realizados e aprovados, não atrapalhando o funcionamento de todo o sistema, de tal forma que uma mudança imediata em tal componente não é necessária. Os roletes de poliuretano utilizados no tracionador não foram totalmente eficientes, pela sua pequena largura ao tracionar o sistema, em alguns momentos, devido às forças viscosas geradas na zona líquida dentro da matriz, a tração necessária atingiu um nível que ocasiona o escape do material pultrudado do curso do rolete, assim parando toda a operação. Uma simples substituição por roletes mais largos ou um sistema de encaixa entre eles do tipo macho e fêmea deverá ser realizado para melhor aproveitamento da pultrusora.

Para o material pultrudado obtido através do sistema desenvolvido a fração volumétrica de fibra de 54% atendeu ao que era esperado para materiais pultrudados em torno de 40 a 70%. Porém com relação aos vazios gerados durante a fabricação já não foi obtido uma porcentagem aceitável algo entre 1 a 5%, a fração volumétrica de vazios gerados foi de 16%, muito elevada o que indica que ocorreram erros ou defeitos durante a fabricação.

A matéria prima utilizada no compósito durante o processo não era adequada para esta aplicação específica dificultando a realização do mesmo e contribuindo para a geração de vazios. Em relação ao roving utilizado, pela sua granulometria ser alta para o perfil desejado, acabou demandando elevado tempo de preparação da mesma e mão de obra. Foi necessário separar cada segmento de fibra para se utilizar o necessário, tarefa altamente trabalhosa e pouco viável que demandou mais tempo neste processo de preparação do que na real fabricação do material. A resina epóxi utilizada, provavelmente devido ao seu tempo e conservação inadequada apresentava-se mais viscosa do que o esperado, o que diminuiu consideravelmente o valor da molhabilidade e conseqüentemente

dificultando a impregnação da resina na fibra, sendo um fator que pode ter sido um dos mais agravantes para geração dos vazios. Para futuros testes é essencial que se utilize outra fibra de vidro de menor granulometria e mais adequada ao perfil final do pultrudado e uma resina com menor viscosidade para melhor impregnação dos reforços.

## 5 CONCLUSÃO

Devido a pouca utilização do processo de pultrusão ainda nos dias de hoje, a falta de habituação com tal processo e até mesmo de bibliografias sobre este assunto acabou demandando grande parte do desenvolvimento do presente trabalho em pesquisas para melhor entendimento das possíveis variáveis do projeto. Assim uma parte essencial foi trazer de forma mais abrangente todos os conhecimentos obtidos durante a execução do mesmo, para que leigos ou pessoas pouco familiarizadas com o tema possam ter uma boa base na revisão bibliográfica realizada. Portanto além do desenvolvimento da pultrusora tal trabalho poderá também ser utilizado como uma referência detalhada do processo, mas não de forma aprofundada em assuntos específicos, dando uma visão geral do processo de pultrusão e suas etapas.

A falta de conhecimento e a grande complexidade para determinação dos parâmetros adequados para a operação no que se diz respeito principalmente à cinética de cura acabou dificultando toda a operação de fabricação. Inicialmente adotou-se uma temperatura de operação abaixo da necessária assim não ocorrendo a cura completa do material, ao aumentar-se a temperatura apesar de se obter uma cura aceitável, isto não aconteceu de forma homogênea. Ambas as temperaturas não forneceram o calor necessário para que toda a cura ocorresse dentro da matriz. Isto gerou um aumento da zona de gel dentro da matriz e conseqüentemente aumentando as forças adesivas dentro do canal da mesma e atrasando a zona sólida para fora da matriz. Ou seja, o material acabava não se desprendendo da matriz e deixando parte da resina não curada presa dentro da matriz, isto também acabou diminuindo a fração volumétrica e conseqüentemente aumento dos vazios. O material não desprendido e que ficou depositado, por estar constantemente aquecido acaba por curar completamente dentro da matriz e obstruindo a passagem e por fim selando a matriz, parando toda a operação e exigindo a abertura e limpeza dela. Um estudo mais aprofundado relacionado aos parâmetros de operação e a cinética de cura da resina a ser utilizada é essencial para o bom funcionamento do sistema de pultrusão projetado. Com os parâmetros bem definidos caso ainda seja notado uma dificuldade no desprendimento entre o pultrudado e a matriz, deverá ser considerado o uso de um aditivo desmoldante na banheira de impregnação junto à resina.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do projeto e da fabricação da máquina pultrusora surgem novas possibilidades de desenvolvimentos de pesquisas e estudos, tanto para aprimorar e otimizar a máquina como também de materiais pultrudados, resinas, fibras e o processo de pultrusão.

Como todo o projeto foi desenvolvido para um material com utilização para pinos de implantes odontológicos a tendência é que os próximos trabalhos continuem tal ideal, estudando especificamente tal aplicação.

Dentro da UTFPR-CP já se tem uma linha de pesquisa voltada para a resina de poliuretano derivada do óleo da mamona, assim seria extremamente proveitoso realizar um estudo específico com esta resina para aplicação no processo de pultrusão mais especificamente sobre a cinética de cura do mesmo. Como também para o material pultrudado obtido com o fim odontológico focando em relação à caracterização das propriedades físicas e mecânicas.

Por fim estudos na área de simulação computacional podem ser aplicados para otimizar o processo da cinética de cura através da fluidodinâmica computacional e uma análise estrutural através do método dos elementos finitos para uma melhor compreensão do comportamento do material pultrudado em suas aplicações.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Sandra Penha de Souza. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro**. 2004. 101f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS (ALMACO). **Quem somos**. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/quemsomos.cfm>> Acesso em: 7 de jun. 2014.

BAMBOZZI SOLDAS LTDA. **Manual de instruções SAG 1006**. Matão-São Paulo, 14p.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

CORREIA, Sônia Maria Maciel Leitão. **Estudo da Tolerância ao dano de tubagens em prfv**. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, Porto, 2008.

ITAQUÁ RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS. **Itaquaquecetuba**. São Paulo: catálogo, 2014. 6 p.

KERSTING, Daniel de Freitas. **Avaliação de resinas epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MARTINEZ, Caetano Belda. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina**. 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. 1. ed. Barueri: Manole, 2005.

METALÚRGICA PÉROLA LTDA. **Empresa**. Disponível em <<http://metalurgicaperola.ind.br/empresa.php>> Acesso em: 15 de jan. 2015.

PAGANO, Rogério Luz. **Modelagem, simulação e otimização de processos contínuos de produção de materiais compósitos**. 2009. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, Lizandro de Sousa. **Simulação e otimização do processo de pultrusão**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SILVESTRE FILHO, Geraldo Dantas. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo da mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de haste de implante de quadril**. 2001. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

STRÖHER, Gylles Ricardo. **Modelagem e simulação térmica do processo de pultrusão**. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Estudos de Mestrado no Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica Área de Aerodinâmica, Propulsão e Energia, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2005.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR). **Fachada UTFPR campus Cornélio Procópio-2010**. Disponível em <[http://www.utfpr.edu.br/cornelioprocopio/o-campus/historico/campus/imagens/fachada\\_utfprcp\\_2010.jpg/view](http://www.utfpr.edu.br/cornelioprocopio/o-campus/historico/campus/imagens/fachada_utfprcp_2010.jpg/view)> Acesso em: 15 de jan. 2015.

## **APÊNDICE A- Croquis utilizados na fabricação**











