

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

FLAVIA TACIANE DO NASCIMENTO

**DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE ESPAÇOS VAZIOS EM
PULTRUDADOS FABRICADOS COM RESINA POLIURETANA E FIBRA
DE VIBRO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CORNÉLIO PROCÓPIO
2016**

FLAVIA TACIANE DO NASCIMENTO

DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE ESPAÇOS VAZIOS EM PULTRUDADOS
FABRICADOS COM RESINA POLIURETANA E FIBRA DE VIBRO

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

Orientador: Profa. Dra. Sandra Mara Domiciano
Coorientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



FOLHA DE APROVAÇÃO

Flavia Taciane do Nascimento

Determinação da fração de espaços vazios em pultrudados fabricados com resina poliuretana e fibra de vibro

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 8:30 do dia 18/11/2016 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.

Profa. Dra. Sandra Mara Domiciano – Presidente (Orientador)

Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa – (Coorientador)

Prof. Dr. Rogério Akihide Ikegami – (Membro)

Prof. Me. José Aparecido Lopes Junior – (Membro)

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

Dedico este trabalho a todos que futuramente estudarem o processo de fabricação de pultrusão e a formação de vazios no perfis pultrudados e as pessoas que possam se beneficiar dos resultados desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre me incentivaram a estudar, me dando todo o apoio durante o curso de engenharia. Eles, que me ensinaram desde cedo que sem esforço e empenho não é possível alcançar os objetivos, pela educação e apoio que recebi minha vida inteira serei eternamente grata.

Aos meus colegas de turma e da faculdade que durante todo o curso dividi conhecimentos e dúvidas e hoje tenho o prazer de chamá-los de amigos. Um agradecimento especial para Mayra A. Modos, Karoline da Silva Leite, Renan Rezende e Felipe Borreiro Sanches, que me ajudaram na fabricação dos perfis pultrudados apresentados nesse trabalho. Por ter me auxiliado durante todo o processo de confecção deste trabalho, pela paciência de sempre me ensinar e mostrar que eu podia fazer melhor, agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Sandra Mara Domiciano. Agradeço também ao meu coorientador Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante pelo auxílio a mim prestado.

Agradeço a todos os professores que contribuíram para que pudesse concluir o curso, seja com uma aula interessante ou com um conselho profissional. Um agradecimento em especial para o Prof. Dr. Adriano da Silva Borges que me inspirou com suas aulas e me aconselhou sobre o caminho profissional que quero estar seguindo.

RESUMO

DO NASCIMENTO, Flavia Taciane. **Determinação da fração de espaços vazios em pultrudados fabricados com resina poliuretana e fibra de vidro.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Devido a ampla aplicabilidade, materiais compósitos vêm sendo cada vez mais utilizados. Dentre os vários processos de fabricação, o processo de pultrusão se destaca por ser um processo contínuo e de baixo custo para implementação. Neste trabalho foi fabricado compósitos pelo processo de pultrusão utilizando como matriz polimérica a resina poliuretana e como reforço fibra de vidro e foi abordado o defeito da formação de espaços vazios no perfil pultrudado por meio do cálculo da fração de vazios presentes. A metodologia usada para calcular a fração de espaços vazios foi a regra da mistura que faz uso das massas relativas dos compostos envolvidos. Por fim, foi relacionada a fração de vazios com o processo de fabricação e a máquina pultrusora utilizada.

Palavras-chave: Pultrusão; Compósitos; Vazios.

ABSTRACT

DO NASCIMENTO, Flavia Taciane. **Determination of empty spaces present in pultrudates made of polyurethane resin and fiberglass.** 2016 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Due to the wide applicability, composite materials have been increasingly used. Among the various manufacturing processes, the pultrusion process stands out as a continuous process and low cost for implementation. In this work the composites were manufactured by the pultrusion process using as polymer matrix the polyurethane resin and as reinforcement the glass fiber and the defect of the formation of empty spaces was approached in the pultruded profile through the calculation of the current fraction of voids. The methodology used to calculate the fraction of voids was the rule of the mixture that makes use of the relative masses of the involved compounds. Finally, it was related the fraction of voids with the manufacturing process and the pultrusion machine used.

Keywords: Pultrusion. Composites. Voids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do Processo de Pultrusão	17
Figura 2 - Espaço viável, representado pela região escura, delimitada pela velocidade (u) e temperatura (T).....	19
Figura 3 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida Fibras de vidro sendo puxada dos rolos de fibra de vidro.....	20
Figura 4 - Imagem digitalizada de material compósito de vidro/poliéster (perfil “U”). Seção transversal usada para determinar fração volumétrica de vazios, de matriz e fibras)	25
Figura 5 - Máquina pultrusora no laboratório de Materiais Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Cornélio Procópio.....	26
Figura 6 - Matriz aquecedora.....	27
Figura 7 - Banheira de impregnação da Resina.....	27
Figura 8 - Matriz aquecedora.....	28
Figura 9 - Mecanismo Tracionador.....	28
Figura 10 - Painel de controle.....	29
Figura 11 - Sistema improvisado para tracionando dos fios de fibra de vidro.....	30
Figura 12 - Banheira improvisada com guias cilíndricas e bastão de plástico.....	30
Figura 13 - Massa da fibra de vidro presente em cada amostra fabricada com 6 fios de fibra de vidro.....	31
Figura 14 - Perfis pultrudados fabricados com 6 fios de fibra de vidro	32
Figura 15 - Perfis pultrudados fabricados com 4 fios de fibra de vidro.....	32
Figura 16 - Temperatura x Velocidade – 6 fios de fibra de vidro.....	37
Figura 17 - Temperatura x Velocidade – 4 fios de fibra de vidro.....	37
Figura 18 - Projeto banheira de impregnação PTC Creo.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planilha de cálculo fração de espaços vazios.....	33
Tabela 2 - Planilha de cálculo detalhada.....	34
Tabela 3 - Fração de vazios dos perfis pultrudados fabricados com 6 fios de fibra de vidro.....	35
Tabela 4 - Fração de vazios dos perfis pultrudados fabricados com 4 fios de fibra de vidro.....	35
Tabela 5 - Perfil pultrudado ideal utilizando 6 fios de fibra de vidro.....	39
Tabela 6 - Perfil pultrudado ideal utilizando 4 fios de fibra de vidro	39

LISTA DE SIGLAS

ALMACO

Associação Latino-Americana de
Materiais Compósitos

UTFPR

Universidade Tecnológica
Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1. PROCESSO DE PULTRUSÃO.....	15
3.2. DESCRIÇÃO DETALHADA DO PROCESSO DE PULTRUSÃO.....	16
3.3. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DE VAZIOS.....	18
3.4. DEFEITOS NA FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE PULTRUSÃO.....	21
3.5. DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS.....	22
3.5.1.Regra da mistura.....	22
3.5.2. Outros métodos para determinar a fração de vazios.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4. 1 EQUIPAMENTO DE PULTRUSÃO.....	26
4.2 FABRICAÇÃO DOS PERFIS PULTRUDADOS.....	29
4.3 CÁLCULO DA FRAÇÃO DE VAZIOS, MATRIZ E FIBRA DE VIDRO.....	32
5. DISCUSSÕES E RESULTADOS.....	36
6. CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS.....	44

1. INTRODUÇÃO

De acordo com IGLESIAS et al. (2002), materiais compósitos correspondem aos materiais formados por dois ou mais componentes que se delimitam fisicamente uns dos outros. E quando combinados, ocorre, então, um efeito sinérgico entre as propriedades dos diversos componentes.

Para os compósitos simples que envolvem somente dois componentes, estes são chamados de reforço e matriz e que quando combinados possuem propriedades que não seriam encontradas separadamente uma da outra. Os materiais compósitos podem ser de matriz cerâmica, metálica ou polimérica. Os materiais compósitos obtidos de matrizes poliméricas são os mais comuns. Os compósitos pode ainda conter aditivos para acelerar a reação de cura, dar cor desejada ao material entre outros.

Segundo a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), A fase polimérica é composta normalmente por uma resina termofixa do tipo poliéster insaturada (ortoftálica, tereftálica, isoftálica ou bisfenólica), ou ainda uma resina éster vinílica ou epóxi, frequentemente dissolvida em solvente reativo como o estireno. Resinas especiais como as fenólicas, de poliuretano e de silicone são utilizadas em aplicações especiais. A resina poliuretana, por exemplo é utilizada como adesivo, pneus e colchões.

Na moldagem da fase da matriz e da fase de reforços ocorre um processo de cura ou polimerização, que acopla essas duas fases proporcionando ao material final propriedades especiais como leveza, flexibilidade, durabilidade, resistência, propriedades que tem feito os compósitos ganhar destaque na indústria pela ampla aplicabilidade.

Apesar da larga aplicabilidade a fabricação de perfis compósitos ainda necessita de pesquisa e apresenta, muitas vezes, baixa produtividade e custo elevado. Dentre os vários processos de fabricação de compósitos o processo de pultrusão é uma boa alternativa ao problema acima citado, pois possui custo relativamente baixo de fabricação e se trata de um processo contínuo de fabricação. Este processo de fabricação apresenta grande automação do sistema e baixo custo de implementação, fatores que diminuem custo final do produto para comercialização. Além disso, o perfil pultrudado também apresenta elevado desempenho estrutural.

Com o crescimento da utilização do processo de pultrusão, surge então a necessidade de fabricar compósitos pultrudados que atendam as exigências do mercado.

Conforme DE ALMEIDA e SÉRGIO (2001) durante o processo de fabricação de

perfis pultrudados, um defeito que pode ocorrer é a presença de espaços vazios, que se deve geralmente a bolhas de ar aprisionadas no sistema. De modo geral, os vazios diminuem a resistência a carregamentos estáticos e a carregamentos cíclicos. Ainda de acordo com DE ALMEIDA e SÉRGIO (2001) essa influência é bastante enfatizada na resistência ao cisalhamento, compressão, tração, entre outras, em que as propriedades mecânicas da matriz exercem maior ação sobre o comportamento do compósito que faz com que o compósito não apresente as propriedades esperadas, logo tais vazios devem ser minimizados ao máximo. De acordo com DANIEL (1994) quando a fração de vazios é inferior a 1 % pode-se garantir que o material compósito tem uma quantidade desprezível ou nula de porosidade garantindo, assim, um perfil pultrudado de qualidade.

Dentro deste contexto, surgiu a motivação de determinar as frações de vazios presente nos perfis pultrudados fabricados nesse trabalho de conclusão de curso.

O processo de pultrusão será abordado de forma detalhada na revisão bibliográfica. Os perfis pultrudados serão fabricados utilizando a máquina pultrusora projetada e fabricada por Willian Keniti Del Col Saruhashi. Os materiais utilizados para a fabricação dos compósitos terá como matriz, a resina poliuretana e para reforços a fibra de vidro.

O capítulo de materiais e métodos aborda os parâmetros de fabricação dos compósitos pultrudados e por fim o cálculo das frações volumétricas de vazios, de fibras e de matriz presente em cada perfil pultrudado fabricado.

A conclusão terá como enfoque o processo de fabricação e a relação entre a fração de vazios obtidas no perfil pultrudado.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho de tem como objetivo fabricar material compósito pelo processo de pultrusão utilizando resina poliuretana e fibra de vidro sob diferentes parâmetros de fabricação para posterior determinação das frações de espaços vazios, matriz e reforços.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- compreender o processo de pultrusão em compósitos formados por fibra de vidro e resina poliuretana;
- identificar os parâmetros que influenciam na formação de vazios dos compósitos pultrudados;
- fabricar compósitos por meio do processo de pultrusão sob diferentes parâmetros de processo;
- calcular a porcentagem da fração de fibras, matriz e vazios.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSO DE PULTRUSÃO

Segundo ALMEIDA (2004) pultrusão é um processo industrial para produção contínua de formas estruturais de resina plástica reforçada. As matérias-primas são uma mistura de resina líquida (contendo resina e elementos aditivos), sendo este a matriz do compósito e fibras flexíveis como reforço.

Os reforços são utilizados para conferir aos compósitos características físicas como alta resistência, alta dureza, e densidade relativamente baixa, assim o reforço aumenta a resistência do compósito sem ter grande impacto no peso. O tipo de reforço pode ser fibras de vidro, carbono, aramida entre outros. Essas fibras podem ser na forma de roving, mantas ou tecidos. Para este trabalho os reforços utilizados são as fibras de vidro do tipo roving. "É indicado que de 40 a 70 por cento do perfil pultrudado seja composto de reforços."(CALLISTER, 2008, p.446).

Ainda segundo CALLISTER (2008), uma característica interessante da maioria dos materiais, é que a adição de fibras de pequeno diâmetro torna o material compósito muito mais resistente que o material principal, chamado de matriz. Assim, a adição desses materiais diminui a probabilidade de uma falha crítica que pode levar a fratura.

Segundo descreve CALLISTER (2008) a fibra de vidro é o material mais utilizado como reforço por várias razões, como:

1. É facilmente obtido em fibras de alta-resistência à partir do estado fundido.
2. É encontrado facilmente e pode ser fabricado utilizando uma grande variedade de técnicas industriais viáveis economicamente.
3. Como fibra, é relativamente resistente. E quando embutida em uma matriz de plástico, produz um compósito com uma resistência específica muito alta.
4. Quando associada a alguns tipos de plásticos, possui uma inércia química que produz um compósito resistente à vários ambientes corrosivos.

Com relação a matriz do compósito, esta desempenha três funções muito importantes. Segundo ALMEIDA (2004) a matriz liga primeiramente as fibras, sendo o meio pelo qual uma tensão externa aplicada é transmitida e distribuída às fibras. Só uma fração muito pequena da carga aplicada é absorvida pela matriz. A segunda função da matriz é a de proteger as fibras individuais de danos de superfície

provocados por abrasão mecânica ou ambientes agressivos. E por último, a matriz interfaceia as fibras e, graças a sua relativa plasticidade, evita a propagação de fraturas frágeis de fibra para fibra que poderiam resultar em ruptura catastrófica. Sendo assim, a matriz serve como uma barreira para propagação de fissuras.

Segundo DANIEL (1994), quatro tipos de matrizes são usadas em compósitos: polimérica, metálica, cerâmica e de carbono. As matrizes metálicas, são indicadas para aplicações sujeitas a altas temperaturas, aproximadamente 800° C. Para aplicações que precisam resistir a temperaturas muito alta, da ordem de 1000° C, são utilizadas matrizes cerâmicas.

Conforme CALLISTER (2008) os polímeros são usados como matriz na maioria das aplicações de compósitos, em função de suas propriedades e da facilidade na fabricação do compósito.

Neste trabalho a matéria prima utilizada como matriz polimérica será a resina poliuretana (PU) derivada do óleo de mamona, obtida através da reação de polimerização de um pré-polímero e um poliol. A resina PU é uma resina biodegradável e não apresenta riscos ao meio ambiente, além de ser uma das resinas mais versátil do mercado, sendo utilizada amplamente para confecção de espumas, elastômeros, adesivos entre outros. Sendo a resina PU a mais utilizada em linha de pesquisas no Laboratório de Compósitos da UTFPR-CP, optou-se por fabricar os pultrudados utilizando esta resina como matéria prima.

3.2 DESCRIÇÃO DETALHADA DO PROCESSO DE PULTRUSÃO

O equipamento de pultrusão puxa as matérias-primas (resina e fibra de vidro) através de um molde de aço aquecido. Os materiais de reforço alimentam o equipamento de forma contínua com rolos de fios. Os reforços são impregnados com a mistura de resina fora da forma, e atravessam o molde aquecido. O endurecimento da resina é iniciado pelo calor do molde e com isso obtem-se um perfil rígido e curado. O processo de fabricação de perfis pultrudados é basicamente representado na figura 1.

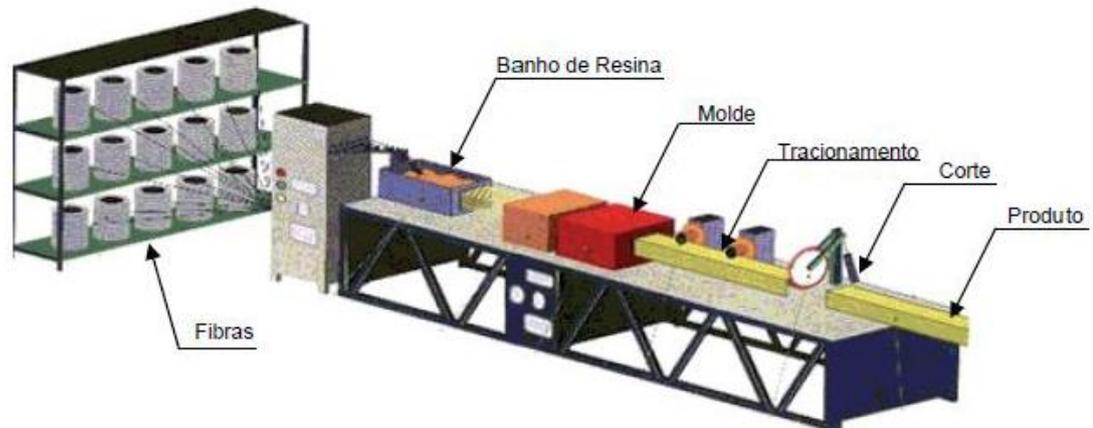


Figura 1 -Representação do Processo de Pultrusão.
Fonte: STRÖHER (2005, p.20).

Na figura 1 é possível visualizar que o processo de pultrusão está dividido em 6 etapas. A primeira etapa consiste na estante onde são posicionados os reforços que serão utilizadas durante o processo e a segunda etapa consiste no banho de resina através da banheira que impregna a resina nas fibras. A terceira etapa é responsável pela cura e forma final do perfil pultrudado através de um molde. O molde é geralmente aquecido por resistência elétrica acopladas na sua superfície e possui um canal interno com o formato final do perfil desejado, canal este que o reforço já impregnado com resina irá passar e curar e sair com a geometria do produto desejado. Após esta etapa, o perfil pultrudado já curado passa por um tracionador responsável pela automatização do processo. Finalmente o perfil pultrudado deverá ser cortado na medida desejada ao final do sistema de produção, obtendo assim o perfil 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 esteja estático um em relação ao outro durante o corte.

3.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DE VAZIOS

1. Molhabilidade da resina

A escolha da resina termofixa também interfere na porcentagem final de vazios do pultrudado, já que cada resina tem sua faixa de temperatura ideal e características próprias, uma das mais importantes é a molhabilidade. Segundo Kersting (2004), a molhabilidade pode ser definida como:

$$\text{molhabilidade} = \frac{K_m(T_r W_f T_i)}{U_o} \quad (1.1)$$

Na equação anterior:

K_m : constante de proporcionalidade para molhabilidade;

T_r : a temperatura da resina;

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

T_i o tempo de imersão

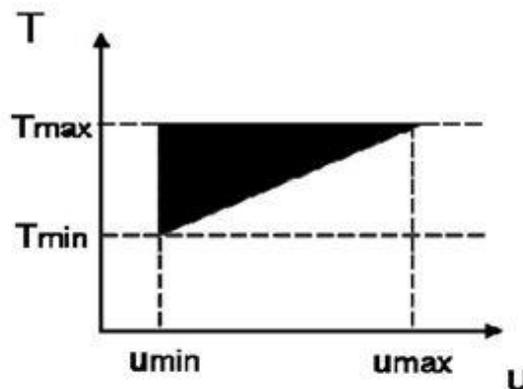
U_o representa a viscosidade inicial.

A impregnação da resina na fibra de vidro depende da molhabilidade da resina. A partir da equação 1.1 é possível observar que a molhabilidade é inversamente proporcional a viscosidade inicial da resina, sendo assim uma resina com uma viscosidade inicial baixa terá grande molhabilidade e logo sua impregnação na banheira de resina será mais efetiva. Quando ocorre uma impregnação incompleta da fibra de vidro pela resina termofixa durante o processo de fabricação têm-se como consequência a presença de ar no sistema causando assim espaços vazios.

2. Cinética de Cura e velocidade de tracionamento do fio

No que diz respeito a qualidade do pultrudado obtido e consequentemente da porcentagem de vazios presentes no mesmo, a cinética de cura é um dos

parâmetros mais complexos e de maior importância. Temperaturas de cura acima da ideal (temperatura depende da resina empregada) para a resina podem danificar o produto final e em temperaturas abaixo do ideal o processo de cura é insuficiente. Com relação ao tempo de cura, a velocidade e a temperatura estão fortemente associadas, para temperaturas baixas devem ser adotadas velocidades baixas e para temperaturas altas velocidades altas e devem ser configuradas com valores dentro de um espaço de restrições, conforme esquematizado na figura 2, onde o eixo x corresponde a temperatura e o eixo y corresponde à velocidade.



**Figura 2 - Espaço viável, representado pela região escura, delimitada pela velocidade (u) e temperatura (T).
Fonte: SANTOS (2009, p.13).**

Quando os valores da temperatura e da velocidade são inadequados, a qualidade final do compósito pode ser comprometida, resultando na fabricação de um perfil pultrudado defeituoso.

O processo de cura do material se divide em três etapas dentro do molde, sendo as etapas zona líquida, zona de gel e 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.

Na segunda etapa ocorre a fase intermediária, a fase de gel, que atuam as forças coesivas e ocorre a adesão entre a matriz e reforço. As forças atuam até que o material tenha curado o bastante pra se tornar sólido e entrar na ultima fase.

Na última fase, já com o material sólido, ocorre uma contração da resina separando o material da cavidade do molde.

As 3 fases presentes dentro da matriz durante o processo de cura é esquematizado na figura 3 abaixo.

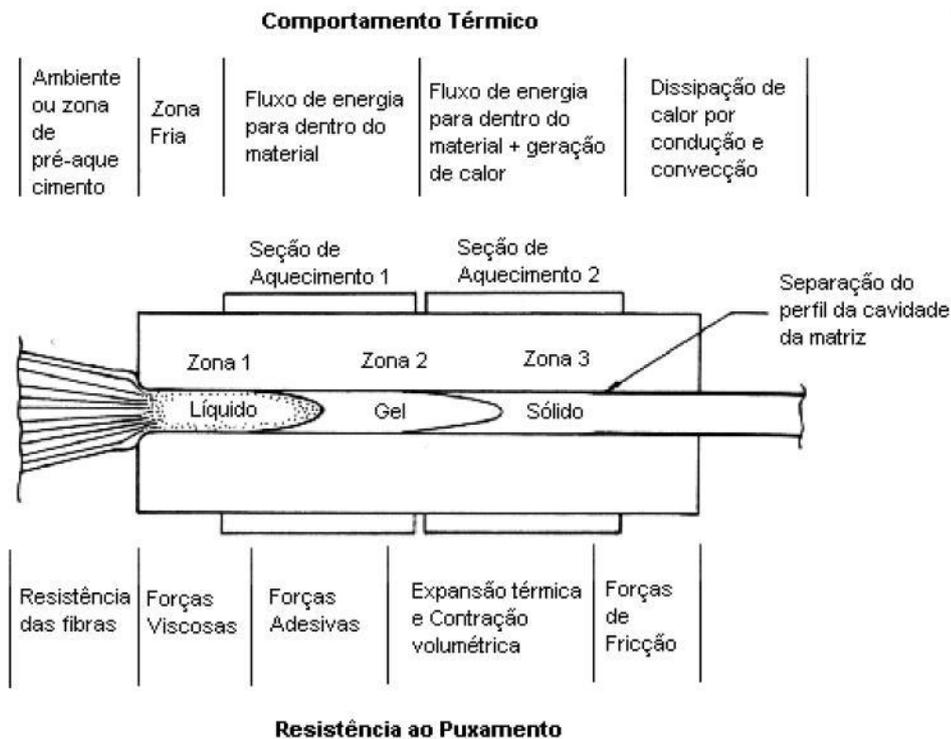


Figura 3 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida.
Fonte: KERSTING (2004, p.29).

3. Quantidade de fios de fibra de vidro no perfil pultrudado

Para a fabricação dos compósitos pultrudados apresentados nesse trabalho foi utilizado 4 e 6 fios de fibra de vidro como reforço, afim de verificar a influência da quantidade de fios de fibra de vidro com a fração de vazios obtido no material pultrudado.

3.4 DEFEITOS NA FABRICAÇÃO DE COMPÓSITOS PELO PROCESSO DE PULTRUSÃO

Segundo ALMEIDA (2004) os defeitos mais importantes e comuns que interferem nas propriedades do compósito são:

Bolha - uma elevação arredondada em forma de bolha que pode ser superficial ou interna. Essas bolhas podem existir dentro do pultrudado como uma área de delaminação oca (normalmente cheia de gás) debaixo de uma elevada camada superficial. Se essas bolhas forem de pequeno diâmetro são chamadas de poros, se forem de diâmetro maior são chamados de vazios.

Trincas - uma separação visual que acontece internamente ou penetra abaixo da superfície de pultrudados. Pode provocar ruptura.

Fissuras -. múltiplas trincas em pultrudados. Podem ser finas como fios de cabelo e com formato de estrelas. Essas fissuras são uma região de concentração de tensões, e podem ser superficiais ou penetrarem no reforço. Este defeito é bastante prejudicial porque impedirá a matriz de transmitir normalmente os esforços à fibra.

Delaminação - é a separação de duas ou mais camadas de material ou planos de reforço dentro de um pultrudado.

Cura insuficiente - uma anormalidade de pultrusão criada por falta de cura, ou cura incompleta em uma seção da resina. Esta condição normalmente provoca redução na dureza e nas propriedades físicas. Seções espessas, curadas de fora para dentro, podem revelar cura insuficiente no centro da seção embora completamente curadas na superfície. Esta condição pode ser causada por temperatura de cura insuficiente, catalisador impróprio, ou deslizamento muito rápido para a temperatura de cura.

Os defeitos mais relevantes para esse trabalho são as bolhas, que originam os vazios e o processo deficiente de cura, já que este defeito contribui para a formação de espaços vazios e entrada de ar no perfis pultrudados.

3.5 DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS

3.5.1 REGRA DA MISTURA

Para o cálculo das frações de fibras de vidro, matriz e vazios utilizamos os cálculos proposto por Mendonça (2005). A proporção relativa de resina e fibra é um dos principais parâmetros de um material compósito, mas usualmente os valores teóricos das propriedades são relacionados ao volume o que em geral é algo difícil de se trabalhar, sendo mais fácil o uso e medição das massas relativas. A regra da mistura é utilizada para correlacionar essas e outras propriedades. A partir da regra da mistura as frações de fibras, matriz e vazios será determinado. A seguinte relação para o volume (1.2) e massa (1.3) do compósito são relacionadas. Os índices utilizados c,v,f e m que são utilizados representam respectivamente o compósito, vazios, fibra e matriz.

$$V_c = V_f + V_m + V_v \quad (1.2)$$

$$M_c = M_f + M_m \quad (1.3)$$

Tem se para as frações volumétricas de fibra, matriz e vazios v_f , v_m e v_v e as frações de massa de fibra e matriz m_f , m_m :

$$v_f = \frac{V_f}{V_c}, v_m = \frac{V_m}{V_c}, v_v = \frac{V_v}{V_c} \quad (1.4)$$

$$m_f = \frac{M_f}{M_c}, m_m = \frac{M_m}{M_c} \quad (1.5)$$

Logo para compósitos simples de dois componentes tem-se:

$$v_f + v_m + v_v = 1 \quad (1.6)$$

$$m_f + m_m = 1 \quad (1.7)$$

A massa pode ser escrita em função da densidade, ρ , (massa/volume) do compósito da matriz, assim reescrevendo a equação (1.3) como:

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (1.8)$$

Dividindo ambos os lados por V_c (Volume do compósito) e utilizando a equação 1.3, obtêm-se:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (1.9)$$

Com a equação (1.9) pode-se obter a densidade do compósito e através dela é possível obter o formato da representação de varias equações que definem outras propriedades:

$$(propriedadeX)_c = (propriedadeX)_f + (propriedadeX)_m \quad (1.10)$$

Através da equação 1.4 uma relação importante entre as frações mássica e volumétrica pode ser obtida. Utilizando a densidade para substituir a massa obtêm-se:

$$M_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} \cdot V_f \quad (1.11)$$

$$M_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} \cdot V_m \quad (1.12)$$

A determinação do volume de vazios presente nos pultrudados será obtida com o auxílio de uma balança de precisão digital (d= 0,01g) presente no Laboratório de Compósitos da UTFPR - CP.

3.5.2 OUTROS MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA FRAÇÃO DE VAZIOS

Além da possibilidade da determinação da fração de vazios, fibras e matriz por meio das equações da regra da mistura, outros métodos mais sofisticados e precisos podem ser utilizados para a determinação de vazios como o método da queima e análise de imagem.

Os métodos de queima D 297 (1975) e ASTM D 2584 (1990), podem ser aplicados a compósitos que têm fibras inorgânicas em uma matriz orgânica, como vidro/epóxi. Uma amostra do material compósito é seca em estufa e sua massa tomada, sendo então essa amostra aquecida até a matriz estar completamente queimada. O resíduo das cinzas é lavado, seco e pesado. A relação de volume de fibra é obtida como:

$$V_f = \frac{W_f/Y_f}{W_c/Y_c} \quad - \quad (1.13)$$

no qual: W_c e W_f são os pesos do compósito e fibras, respectivamente.

A técnica de análise de imagem consiste na análise de fotomicrografia de seções transversais às fibras no compósito. Uma aproximação consiste em contar o número de fibras da seção transversal de uma fração dentro da região da fotomicrografia, então é possível calcular a área total das seções de fibra e dividir pela área total fotografada.

A relação de volume de vazios (ou relação de porosidade) pode ser obtida como descrito na norma ASTM D 2734-70, isto é, expresso em termos das quantidades medidas na dissolução ácida ou métodos de queima, ASTM D 2584 (1990):

$$V_v = 1 - \frac{W_f/Y_f + (W_c - W_f)/Y_m}{W_c/Y_c} \quad (1.14)$$

ou, segundo Chawla (1987), através da equação:

$$V_v = 1 - \rho_c \left(\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m} \right) \quad (1.15)$$

De acordo com Daniel (1994), o método preferido para determinação de porosidade em um compósito é o método de análise de imagem. A fotomicrografia da seção transversal de um compósito, mostra as fibras, matriz e vazios com tonalidades cinza claro, cinza escuro, e negro, respectivamente, conforme pode ser observado na figura 4.

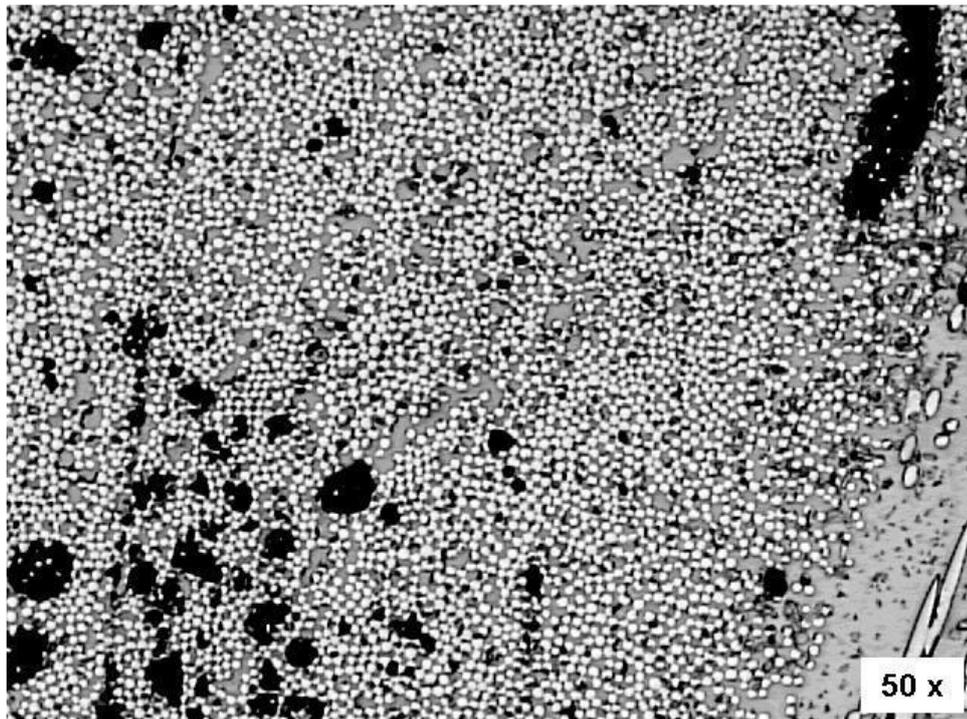


Figura 4 - Imagem digitalizada de material compósito de vidro/poliéster (perfil "U"). Seção transversal usada para determinar fração volumétrica de vazios, de matriz e fibras.

Fonte: DE SOUZA ALMEIDA (2004, p.30).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EQUIPAMENTO DE PULTRUSÃO

Para a fabricação dos perfis pultrudados foi utilizado a máquina pultrusora projetada e fabricada por Willian Keniti Del Col Saruhashi como Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Cornélio Procópio (UTFPR-CP) em 2015/2, que se encontra no Laboratório de Compósitos da UTFPR-CP. A máquina em questão pode ser visualizada na figura 5.



**Figura 5 - Máquina pultrusora no laboratório de Materiais Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Cornélio Procópio.
Fonte: Autoria própria.**

Considerando a máquina pultrusora projetada e fabricada por Saruhashi, o processo de fabricação de perfis pultrudados a base de fibra de vidro e resina termofixa é entendido considerando as etapas que são descritas a seguir.

O processo inicia com o puxamento da fibra de vidro. Esta é adquirida em um extenso rolo. Para facilitar o processo e utilizar menos espaço, a fibra de vidro é realocada em rolos menores, como é possível visualizar na figura 6 abaixo.



Figura 6 - Fibras de vidro sendo puxada dos rolos de fibra de vidro.

Fonte: Aatoria própria.

Os fios de fibra de vidro passam pela banheira de impregnação (Figura 7), onde são impregnadas por uma resina termofixa e são então puxadas continuamente até passar pela matriz, um molde metálico aquecido, no qual ocorre o processo de cura e a definição da geometria do pultrudado.



Figura 7 - Banheira de impregnação da Resina.

Fonte: Aatoria própria.

A matriz aquecedora, que pode ser visualizada na figura 8, é a responsável pelo processo de reticulação, a reação de reticulação de resinas termofixas é um processo complexo, tido como uma mudança irreversível nas propriedades químicas e físicas de uma determinada formulação resina/promotor/iniciador, causada por uma reação química (COSTA et. al (1999) e ASLAN et. al (1997)). A matriz aquecedora da máquina em questão é uma matriz metálica bipartida com um canal de 1 mm de diâmetro, dando origem assim a um perfil pultrudado em forma de pino cilíndrico.



Figura 8 - Matriz aquecedora.
Fonte: Autoria própria.

Os fios de fibra de vidro são puxados por um tracionador, na máquina em questão é utilizado um tracionador mecânico devido ao perfil leve dos pultrudados a serem fabricados e o modelo utilizado nessa máquina é o SAG 1006 Bambozzi (Figura 9).



Figura 9 - Mecanismo Tracionador
Fonte :Autoria própria.

Finalmente, a máquina de pultrusão conta com um painel de controle (Figura 10) que é utilizado para o controle da velocidade do tracionador, todos os comandos e ajustes dos parâmetros necessários são englobados somente nesse painel. O setup da temperatura é realizado por um controlador de temperatura do modelo TC4y-14R Autonics e para definição da velocidade é utilizado um variac modelo VM3140.



**Figura 10 - Painel de controle.
Fonte: Autoria própria.**

4.2 FABRICAÇÃO DOS PERFIS PULTRUDADOS

Para a fabricação do perfil pultrudado foi utilizado como matriz a resina poliuretano da marca Kehl obtida da mistura do componente A (pré-polímero) AG201 e do componente B (poliol) AG201 com relação 1:1 sem uso de aditivos, por indicação do fabricante para garantir à reação de polimerização, a parte A e parte B foram misturadas por aproximadamente três minutos com o auxílio de um bastão de plástico. Como reforços foram utilizados seis e quatro fios de fibra de vidro tipo E em forma de roving. Para os compósitos fabricados utilizando como reforços seis fios de fibra de vidro, o processo de pultrusão foi realizado nove vezes com uma temperatura de cura que vai de 65 °C até 89 °C e uma velocidade de tração de 2,47 m/s até 18,18 m/s afim de analisar e determinar a quantidade de espaços vazios nos nove processos. Já para os compósitos fabricados utilizando como reforços quatro fios de fibra de vidro, o processo de pultrusão foi realizado seis vezes com uma temperatura de cura que vai de 148 °C a 230 °C e uma velocidade de tração de 2,56 m/s a 8,30 m/s, também a fim de analisar e determinar a quantidade de espaços vazios nos seis processos e comparação quanto a fração de vazios para o compósitos fabricados com seis e quatro fios de fibra de vidro.

Durante a fabricação dos compósitos, foi notado que o sistema utilizado para puxar as fibras de vidro, como é ilustrado na figura 7, não é eficiente, sendo que os fios de fibra de vidro enroscam e paralizam o processo. Para contornar esse

problema, um sistema improvisado foi montado para que os fios fossem puxados mais facilmente, que pode ser visualizado na figura 11.



Figura 11: Sistema improvisado para tracionando dos fios de fibra de vidro
Fonte: Autoria própria.

Após os fios serem puxados do sistema improvisado apresentado na figura 11, os fios de vidro foram impregnados de resina PU na banheira de impregnação com o auxílio de um bastão de plástico e uma banheira improvisada com guias cilíndricas para garantir o contato do fio de vidro com a PU, como pode ser visualizada na figura 12.



Figura 12: Banheira improvisada com guias cilíndricas e bastão de plástico.
Fonte: Autoria própria.

Após o processo de impregnação, os fios foram marcados com caneta vermelha logo antes de entrar na matriz metálica para o processo de cura. Com o auxílio de um cronometro foi possível determinar o tempo que o material compósito esteve na matriz, utilizando a marcação da caneta vermelha como referência. Esse

processo foi realizado para todos os compósitos fabricados e o tempo anotado para cada processo. A fim de se obter a velocidade de tração para cada compósito fabricado, o tempo cronometrado para cada processo foi dividido pelo comprimento da matriz.

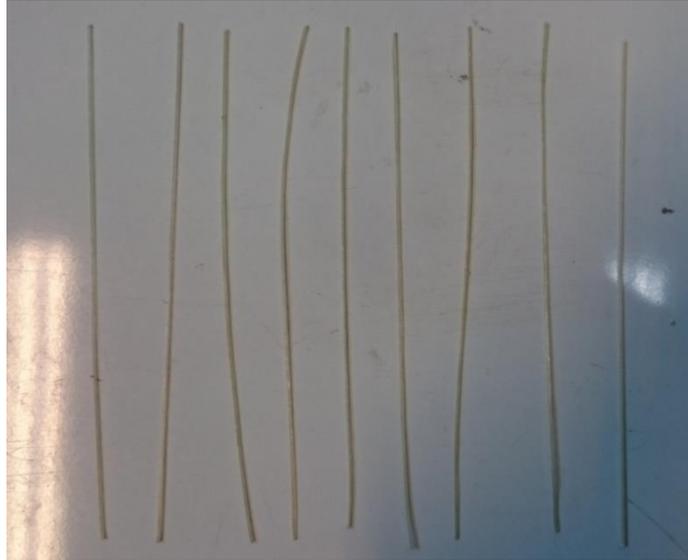
. Após a obtenção do perfil pultrudado, foi considerada uma amostra aceitável visualmente, observando principalmente a cura do material. Assim obteve-se um material de 120,00 milímetros de comprimento e um milímetro de diâmetro. Para a medição das amostras foi utilizado um paquímetro da marca Starret com escala de 0,05 mm.

A massa da amostra foi obtida com o auxílio de uma balança BL3200H ($d=0,01g$). E a massa de reforços utilizado para fabricar as amostras com seis fios de fibra de vidro totalizou 0,06 gramas, como pode ser visualizado na figura 13. Enquanto a massa de reforços utilizada para fabricar as amostras com quatro fios de fibra de vidro totalizou 0,04 gramas. Os pinos cilíndricos utilizando seis fios de fibra de vidro podem ser visualizados na figura 14, enquanto os pinos cilíndricos utilizando quatro fios de fibra de vidro podem ser visualizados na figura 15.



Figura 13 - Massa da fibra de vidro presente em cada amostra fabricada com 6 fios de fibra de vidro.

Fonte: Autoria própria.



**Figura 14 - Perfis pultrudados fabricados utilizando seis fios de fibra de vidro.
Fonte: Autoria própria**



**Figura 15 - Perfis pultrudados fabricados utilizando 4 fios de fibra de vidro.
Fonte: Autoria própria**

4.3 CÁLCULO DA FRAÇÃO DE VAZIOS, MATRIZ E FIBRA DE VIDRO

Para a determinação da fração de vazios, matriz e fibra de vidro é primeiramente calculado o volume das amostras de 120 mm. Por se tratar de um fio cilíndrico, usou-se a equação abaixo:

$$V_c = \pi \frac{d^2}{4} L \quad (1.16)$$

Na equação anterior:

Vc: volume do compósito;

d: diâmetro do compósito;

L: comprimento do compósito.

Com o diâmetro de 1mm e comprimento de 120 mm, o volume obtido para a amostra foi de 0,0942 cm³. Foi considerado que todas as amostras possuem um comprimento de 120 mm e um diâmetro de 1 mm, embora isso não seja verdade, devido a imprecisão de medidas pelo paquímetro e possível irregularidades no canal da matriz, fazendo assim o diâmetro variar, para efeito de simplificação esses erros foram desconsiderados.

Com os dados de densidade da fibra de vidro e da resina poliuretano que são respectivamente de aproximadamente 2,5 g/cm³ e 0,96 g/cm³ e os dados de massa do reforço e do compósito é possível determinar a fração de matriz, reforços e vazios com o auxílio da regra da mistura e das equações 1-6 , 1-11 e 1-12.

Para otimizar os cálculos e evitar erros, o software Excel foi utilizado para construir uma planilha de cálculo onde a partir dos dados de entrada de densidade, comprimento e massa do compósito a fração de espaços vazios, matriz e reforços pudesse ser calculada. Abaixo a planilha pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1: Planilha de cálculo fração de espaços vazios

Densidade poliuretana PU (g/cm ³):	0,96	Comprimento em mm matriz:	200
Densidade fibra de vidro (g/cm ³):	2,5	Tempo em s :	11
Comprimento L do compósito (cm):	12	Velocidade de puxamento mm/s:	18,18182
Diâmetro d do compósito (cm):	0,1	Temperatura de cura em C:	81
Volume do compósito (cm ³):	0,0942		
Massa de fibra de vidro (g):	0,06		
Massa do compósito (g):	0,11		
Massa Poliuretana (g):	0,05		
% massa fibra de vidro:	0,545455		
% massa poliuretana:	0,454545		
Densidade do compósito (g/cm ³):	1,167728		
Fração volumétrica fibra de vidro:	0,254777		
Fração volumétrica Pu:	0,552902		
Fração de vazios:	0,192321		

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 2 apresentada a seguir é possível ter um melhor entendimento de como a planilha foi construída. Na planilha os dados de entrada são: densidade poliuretana PU (D1), densidade fibra de vidro (D2), comprimento do compósito (D3), diâmetro do compósito (D4), massa de fibra de vidro (D6) e massa do compósito (D7), a partir desses dados a fração volumétrica de fibra de vidro, da resina poliuretana e de vazios pode ser calculada.

Tabela 2: Planilha de cálculo detalhada

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Densidade poliuretana PU (g/cm ³):			0,96						
2	Densidade fibra de vidro (g/cm ³):			2,5						
3	Comprimento L do compósito (cm):			12						
4	Diamêtro d do compósito (cm):			0,1						
5	Volume do compósito (cm ³):			0,0942	➔					=3,14*(D4^2)/4)*D3
6	Massa de fibra de vidro (g):			0,06						
7	Massa do compósito (g):			0,11	➔					=D7-D6
8	Massa Poliuretana (g):			0,05	➔					=D6/D7
9	% massa fibra de vidro:			0,545454545	➔					= 1 - D9
10	% massa poliuretana:			0,454545455	➔					=D7/D5
11	Densidade do compósito (g/cm ³):			1,167728238	➔					=(D6/(D2*D5))
12					➔					=(D8/(D1*D5))
13	Fração volumétrica fibra de vidro:			0,25477707	➔					= 1 -D13-D14
14	Fração volumétrica Pu:			0,552901628	➔					
15	Fração de vazios:			0,192321302	➔					

Fonte: Autoria própria.

Assim como todas as amostras apresentam o mesmo comprimento, mesmo volume e densidade da resina PU e da fibra de vidro, somente alterando a entrada: massa do compósito na tabela 1 foi possível obter a fração de espaços vazios para todos os compósitos fabricados nesse trabalho. Para melhor apresentação do resultado, a fração calculada de todos as amostras é demonstrada abaixo com o auxílio das tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Fração de vazios dos perfis pultrudados fabricados com 6 fios de fibra de vidro

PERFIS PULTRUDADOS COM 6 FIOS DE VIDRO				
	Velocidade (m/s)	Temperatura (C°)	Massa (g)	Porcentagem de vazios (%)
Perfil pultrudado 1	2,46	65	0,08	52
Perfil pultrudado 2	2,56	71	0,10	30
Perfil pultrudado 3	6,66	75	0,09	41
Perfil pultrudado 4	5,40	78	0,08	52
Perfil pultrudado 5	2,85	80	0,11	19
Perfil pultrudado 6	6,66	81	0,08	52
Perfil pultrudado 7	18,18	81	0,11	19
Perfil pultrudado 8	5,12	84	0,09	41
Perfil pultrudado 9	5,88	89	0,12	8
Média da Porcentagem de Espaços Vazios				34,9

Fonte: A autoria própria.

Tabela 4: Fração de vazios dos perfis pultrudados fabricados com 4 fios de fibra de vidro

PERFIS PULTRUDADOS COM 4 FIOS DE VIDRO				
	Velocidade (m/s)	Temperatura (C°)	Massa (g)	Porcentagem de vazios (%)
Perfil pultrudado 1	2,56	148	0,06	60
Perfil pultrudado 2	5,40	148	0,05	71
Perfil pultrudado 3	5,40	175	0,06	60
Perfil pultrudado 4	6,66	175	0,06	60
Perfil pultrudado 5	6,66	230	0,07	49
Perfil pultrudado 6	8,30	230	0,08	38
Média da Porcentagem de Espaços Vazios				56,33

Fonte: A autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No que diz respeito aos materiais pultrudados fabricados utilizando 6 fios de fibra de vidro, a menor porcentagem da fração de vazios se deu com o perfil pultrudado de número 9 com temperatura de cura: 89° C e velocidade de 5,88m/s e os perfis pultrudados de número 6, 4 e 1 apresentaram a maior porcentagem de vazios: 52,4 %, o perfil 6 foi fabricado com uma temperatura de cura de 81 °C e velocidade de puxamento do fio de 6,66m/s, o perfil pultrudado 4 foi fabricado com uma temperatura de cura de 78 °C e velocidade de puxamento do fio de 5,40m/s, e finalmente o perfil 1 foi fabricado com uma temperatura de cura de 81 °C e velocidade de puxamento do fio de 6,66m/s.

Os perfis pultrudados 6, 4 e 1 apresentaram massa de 0,08 g, sendo que 0,06 g da massa total do pultrudado são os reforços da fibra de vidro, logo a massa da resina é somente 0,02 g da massa do compósito, o que representa 25 % da massa total do compósito. Enquanto a massa do compósito 9 com menor porcentagem de vazios é 0,12 g, tendo que 0,06 g da massa total é de reforços de fibra de vidro, o perfil pultrudado com menor porcentagem de espaços vazios contém 0,06 g de resina PU, o que representa 50 % da massa total do compósito.

Uma vez que as amostras dos materiais pultrudados eram de mesmo diâmetro e comprimento e contêm a mesma quantidade de massa em reforços, essa grande diferença indica que os perfis pultrudados 6, 4 e 1 não foram bem impregnados de resina PU, indicando defeito na fabricação dos compósitos.

Com relação aos pultrudados fabricados utilizando 4 fios de fibra de vidro, o perfil pultrudado que apresentou menor porcentagem da fração de vazios foi o pultrudado de número 6 com maior temperatura (230 °C) e maior velocidade (8,30 m/s), apresentando fração de espaços vazios de 38 %, enquanto o perfil pultrudado de número 2, fabricado com temperatura de 148 ° e velocidade de 5,40 m/s apresentou a maior fração de espaços vazios, sendo esta de 71 %, mais uma vez essa diferença na porcentagem de espaços vazios se deve a diferença de massa entre o perfil pultrudado 2 (0,05 g) e o perfil pultrudado 6 (0,08 g), indicando que a impregnação insuficiente também foi um defeito para os pultrudados fabricados com 4 fios de fibra de vidro.

O objetivo era relacionar a velocidade de tracionamento com a temperatura de cura empregada, para determinar a faixa ideal de velocidade e temperatura na

qual se obteria a menor porcentagem de vazios. Porém com os resultados obtidos não foi possível determinar a faixa ideal de velocidade e temperatura, uma vez que o processo de fabricação apresentou falhas. Porém mesmo com os defeitos de fabricação, é possível observar com base nos dados, que os perfis pultrudados com menor fração de espaços vazios foram os perfis fabricados com temperatura de cura mais alta e velocidades mais altas, abaixo é possível visualizar a disposição dos compósitos pultrudados com relação a temperatura e velocidade na figura 16 para os compósitos fabricados com 6 fios de fibra de vidro e na figura 17 para os compósitos fabricados com 4 fios de fibra de vidro.

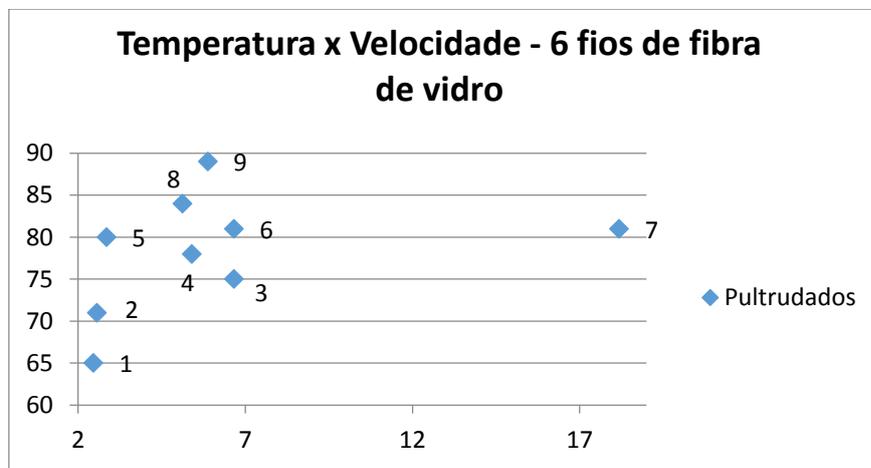


Figura 16: Temperatura x Velocidade – 6 fios de fibra de vidro
Fonte: autoria própria.

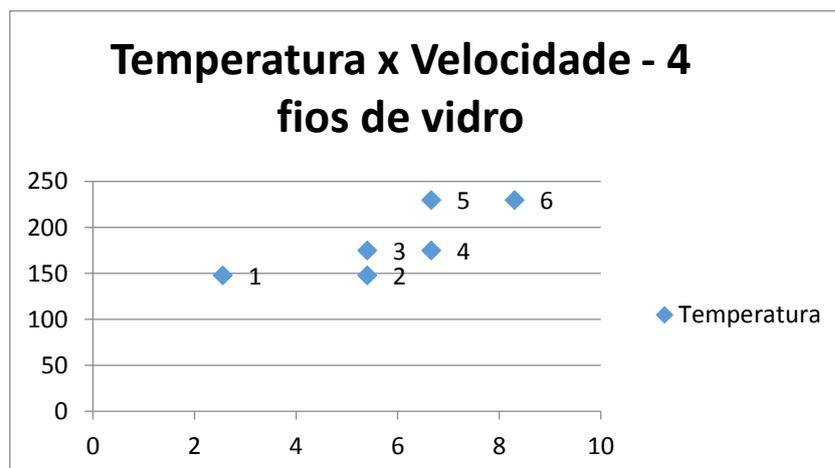


Figura 17: Temperatura x Velocidade – 4 fios de fibra de vidro
Fonte: autoria própria.

Os materiais compósitos fabricados com 6 fios de fibra de vidro apresentou-se parcialmente curado, mostrando que ocorreram falhas no processo de fabricação, o que pode ser observado pela fração muita elevada de vazios e que também a temperatura de cura empregada poderia ser mais elevada. Já os materiais compósitos fabricados com 4 fios de fibra de vidro apresentou-se totalmente curado, o que indica que para a máquina em questão, temperaturas de cura para o processo envolvendo resina PU e fibra de vidro apresenta melhor resultados quanto a cura do compósito quando superior à 150 °C e inferior a 250 °C. Porém, embora os materiais pultrudados fabricados com 4 fios de fibra de vidro apresentaram um melhor aspecto quanto a cura, estes apresentaram uma fração de vazios mais elevada do que os materiais pultrudados fabricados com 6 fios de fibra de vidro. À essa elevada fração de espaços vazios também é atribuída a dificuldade de impregnação da resina na fibra de vidro. Uma vez que os compósitos fabricados utilizando 4 fios de fibra de vidro possuem massa menor de reforços do que os compósitos fabricados com 6 fios de fibra de vidro, mas terão o mesmo diâmetro final, já que são fabricados utilizando a mesma matriz metálica que conforma a geometria final do perfil pultrudado, a diferença de massa no reforço teria que ser compensada na resina, e graças a dificuldade de impregnação da resina na fibra de vidro, a fração de espaços vazios foi ainda maior nos compósitos fabricados utilizando menos reforços.

Visando determinar a massa ideal que os pultrudados fabricados com 4 e 6 fios de fibra de vidro deveriam apresentar para conter uma fração inferior a 1 % de espaços vazios, colocou-se a fração de espaços vazios como entrada na tabela de cálculos no Excel para se obter a massa. Assim foi possível determinar que o perfil pultrudado de comprimento de 120 mm fabricados com 6 fios de fibra de vidro deveria ter massa de aproximadamente 0,126 g para que a fração de espaços vazios fosse inferior que 1 %, como pode ser observado na tabela 5. Já o perfil pultrudado fabricado com 4 fios de fibra de vidro e comprimento de 120 mm deveria ter massa de aproximadamente 0,114 g para que sua fração de espaços vazios fosse inferior a 1%, como pode ser visualizado na tabela 6.

Tabela 5 - Perfil pultrudado ideal utilizando 6 fios de fibra de vidro

Densidade poliuretana PU (g/cm ³):	0,96	Comprimento em mm matriz:	
Densidade fibra de vidro (g/cm ³):	2,5	Tempo em s :	
Comprimento L do compósito (cm):	12	Velocidade de puxamento mm/s:	
Diamêtro d do compósito (cm):	0,1	Temperatura de cura em C:	
Volume do compósito (cm ³):	0,0942		
Massa de fibra de vidro (g):	0,06		
Massa do compósito (g):	0,1265		
Massa Poliuretana (g):	0,0665		
% massa fibra de vidro:	0,474308		
% massa poliuretana:	0,525692		
Densidade do compósito:	1,342887		
Fração volumétrica fibra de vidro:	0,254777		
Fração volumétrica Pu:	0,735359		
Fração de vazios:	0,009864		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 – Perfil pultrudado ideal utilizando 4 fios de fibra de vidro

Densidade poliuretana PU (g/cm ³):	0,96	Comprimento em mm matriz:	
Densidade fibra de vidro (g/cm ³):	2,5	Tempo em s :	
Comprimento L do compósito (cm):	12	Velocidade de puxamento mm/s:	
Diamêtro d do compósito (cm):	0,1	Temperatura de cura em C:	
Volume do compósito (cm ³):	0,0942		
Massa de fibra de vidro (g):	0,04		
Massa do compósito (g):	0,1142		
Massa Poliuretana (g):	0,0742		
% massa fibra de vidro:	0,350263		
% massa poliuretana:	0,649737		
Densidade do compósito:	1,212314		
Fração volumétrica fibra de vidro:	0,169851		
Fração volumétrica Pu:	0,820506		
Fração de vazios:	0,009643		

Fonte: Autoria própria.

Na tabela 5 é possível observar que para esse perfil pultrudado ideal a fração volumétrica de fibra de vidros seria de 25,47 % e porcentagem da massa de fibra de vidro seria de 47,43 %, já a fração volumétrica PU seria de 73,53% e a porcentagem de massa da PU seria de 52,57%. Assim, utilizando como matriz a resina PU, para se obter uma fração de vazios inferior a 1 % é necessário que a massa da resina PU seja superior a 50% do total da massa do compósito pultrudado. No que diz respeito ao perfil pultrudado ideal utilizando como reforços 4 fios de fibra de vidro apresentado na tabela 6, a fração volumétrica de fibra de vidro seria de 17 % e a

porcentagem de massa de fibra de vidro seria de 35 %, já a fração volumétrica PU seria de 82 % e a porcentagem de massa da PU seria de 65 %. Nesse caso a massa da resina PU teria que ser quase 65% da massa total do compósito, e como é indicado que a massa de reforços corresponda de 40 a 70 % da massa total do compósito, os perfis pultrudados utilizando 4 fios de fibra de vidro não atendem esse requisito, assim a quantidade mínima para fabricação de perfis pultrudados utilizando o equipamento em questão é 6 fios de fibra de vidro.

6. CONCLUSÃO

Foi possível fabricar os compósitos pelo processo de pultrusão utilizando o equipamento proposto e a utilização de uma planilha no software Excel se mostrou eficiente para o cálculo da fração de vazios nos pultrudados fabricados. Porém o devido a impregnação insuficiente durante o processo, que levou o perfil pultrudado a ter uma massa menor que a ideal quando se leva em conta a formação de espaços vazios, resultou em perfis pultrudados com uma fração muito elevada de espaços vazios, muito aquém do 1 % de espaços vazios que é tido como ideal para um perfil pultrudado de qualidade.

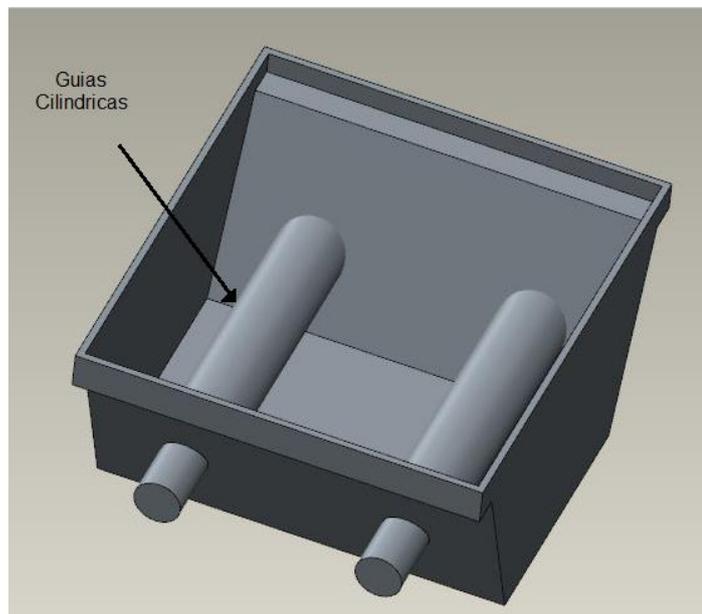
Visando facilitar o processo de impregnação, é esperado que uma resina com viscosidade inicial menor do que a resina Poliuretana, resultaria em uma molhabilidade mais elevada, parâmetro que influencia diretamente na impregnação da resina. Como a viscosidade inicial da resina epóxi (em torno de 800 - 1000 MPa.s) é menor do que a viscosidade inicial da resina PU (em torno de 3000 Mpa.s), seria esperado resultados melhores com a resina epóxi, por exemplo. Mas ainda assim a troca da resina poderia facilitar o processo, mas somente com um sistema de impregnação mais eficiente e maior diâmetro do canal da matriz seria possível obter melhores resultados.

A matriz metálica aquecida apresentou irregularidade na condução de calor , já que o perfil pultrudado apresentava-se mais curado em determinados locais do que outros. Sendo assim, melhorias na máquina devem ser realizadas, como um melhor sistema de impregnação da resina e a troca da matriz metálica por outra matriz com melhor condução de calor e maior diâmetro do canal. Como já mencionado no tópico anterior, o diâmetro de 1 mm do canal da matriz dificulta a entrada no canal de toda a resina PU. Assim, mesmo que os fios de fibra de vidro tenham sido bem impregnados, parte da resina ainda é perdido antes de entrar no canal da matriz, resultando em um perfil pultrudado com menos resina do que o ideal.

Assim, dos 15 perfis pultrudados fabricados, somente o perfil pultrudado de número 9 teve uma impregnação razoável, então para perfis pultrudados com uma fração volumétrica de vazios menor é necessário primeiro garantir que o processo de

pultrusão seja realizado da melhor forma possível. Para que o processo possa ser melhor realizado algumas melhorias na máquina são comentadas abaixo.

Primeiramente um sistema de impregnação mais eficiente deverá ser instalado na máquina de pultrusão, uma sugestão é projetar uma banheira de impregnação que contenha guias cilíndricas no meio da banheira que mantenha o fio de vidro sempre em contato com a resina para dispensar o uso de um bastão para a impregnação da resina. Uma sugestão simplificada de banheira pode ser vista abaixo na figura 18. Os fios de vidro passariam por baixo das guias cilíndricas sendo obrigadas assim a estarem sempre em contato com a resina.



**Figura 18: Projeto banheira de impregnação Software PTC Creo Parametric
Fonte: Autoria própria.**

A matriz metálica precisa ser substituída, pois o canal de 1 mm pelo qual o pultrudado é curado não é concêntrico e o método de aquecimento por meio de resistências não conduz o calor igualmente por toda a matriz metálica. Para uma nova matriz metálica também seria interessante aumentar o canal de 1 mm para 2 mm, uma vez que o canal é pequeno para fabricar pultrudados com 6 fios fibras de vidro.

Embora o sistema de puxamento da fibra de vidro apresentado na figura 12 se mostrou eficiente, ainda existe a necessidade de um estudo para uma melhoria definitiva do processo de puxar os fios de fibra de vidro.

Por fim, perfis pultrudados podem ser fabricados utilizando outras resinas para posterior comparação da fração de vazios, assim como também podem ser utilizados os métodos de queima e de análise de imagem para determinação das frações de espaços vazios, matriz e reforços.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Sandra P. de S. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro.** 2004.87f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Tecnológica Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ASLAN, S., Immirzi, B., Laurienzo, P., Malinconinco, M., Martuceslli, E., Volpe, M.G., Pelino, M., Savini, L. **Journal of Materials Science.** v.32, 2329-2336, 1997.

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS (ALMACO). **compósitos.** Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/compositos.cfm>> Acesso em: 29 de abril 2016.

ASTM D 2584-68, **Standards and Literature References for Composite Materials:** 2nd Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1990).

ASTM D 2734-70, **Standard Test Methods for Void Content of Reinforced Plastics:** American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1970).

ASTM D 297-74, **Standards Methods of Chemical Analysis of Rubber Products:** American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, (1975).

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

CHAWLA, K. K., **Composite Materials Science and Engineering:** Springer-Verlag New York Inc. (1987).

COSTA, M.L., REZENDE, M.C., PARDINI, L.C. **Polímeros: Ciência e Tecnologia.** 37-44, 1999.

DANIEL, I. M.; ISHA, O., **“Engineering Mechanics of Composite Materials”**, Oxford University Press (1994).

DE ALMEIDA, Michelle L. Costa, Sérgio F. M. **Resistência ao Cisalhamento Interlaminar de Compósitos com Resina Epóxi com Diferentes Arranjos das Fibras na Presença de Vazio, Polímeros: Ciência e Tecnologia,** vol. 11, nº 4, p. 182-189, 2001.

IGLESIAS, J. G.; GONZÁLEZ-BENITO, J.; AZNAR, A. J.; BRAVO, J.; BASELGA, J. **Effect of glass fiber surface treatments on mechanical strenght of epoxy based composite materials. Journal of Colloid and Interface Science,** Madri, Espanha, 2002.

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.

LI, Q. F.; SMITH, R. and McCARTNEY, D. G., **Quantitative Evaluation of Fiber Distributions in a Continuously Reinforced Aluminum Alloy Using Automatic Image Analysis**. Materials Characterization 28, 189-203 (1992).

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**. 1. ed. Barueri: Manole, 2005.
New York Inc. (1987).

RUDNAYOVÁ, E.; GLOGAR, P. and KOHÚTEK, I., **Qualitative Microstructure Study of the Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Carbon Composites**. Prakt.Metallogr. 37, 452-467 (2000).

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, 2009.

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.

STARR, Trevor F.. **Pultrusion for Engineers**. CPR Press. Cambrigde. England. 2000.

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.