

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS GONÇALO MANSO DA COSTA JUNIOR

**FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO EM
COMPÓSITOS COM MATRIZ BIOPOLIMÉRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015

CARLOS GONÇALO MANSO DA COSTA JUNIOR

**FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO EM
COMPÓSITOS COM MATRIZ BIOPOLIMÉRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa

CORNÉLIO PROCÓPIO
2015



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Gonçalo Manso da Costa Junior

Fabricação de Corpos de Prova de Tração em Compósitos com Matriz Biopolimérica

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 12/06/2015 como requisito parcial para a 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 Rony Cavalcante da Costa - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Amauri Bravo Fereda - (Membro)

Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior - (Membro)

Dedico este trabalho, primeiramente, à Deus.

Da mesma forma, ao meu pai Carlos Gonçalo e minha mãe Maria Helena.

À minha irmã, Amanda Beatriz.

À minha namorada, Marcella Santana.

Dedico, também, a todos aqueles que acreditam que a pesquisa científica triunfa sobre a escuridão da ignorância e que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de mais nada, a Deus, pela saúde e pela benção concedida durante toda a minha vida.

Aos meus pais, que forneceram total apoio e todas as condições para que eu continuasse sempre engajado durante a pesquisa, além da paciência nos momentos finais e de apreensão.

À minha irmã, Amanda Beatriz, que sempre procurou estimular o meu comprometimento com o trabalho e estar a par de todos os detalhes.

À minha namorada, Marcella Santana, pelo carinho e pela compreensão quando ausente para cumprir os compromissos do trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de laboratório, em especial Ritiery Sezefredo, Amanda Albertin e Eduardo Sato, pelos sorrisos arrancados ao mesmo tempo em que passávamos juntos por todas as dificuldades.

Aos professores Amauri Bravo e José Aparecido, pelos momentos dedicados à pesquisa e amizade demonstrada.

Gostaria de deixar registrado, também, o meu reconhecimento aos responsáveis pelos laboratórios utilizados no campus Cornélio Procópio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que abriram as portas e disponibilizaram todos os equipamentos de forma amistosa e parceira.

Enfim, a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

“Todo mundo é um gênio. Mas, se você julgar um peixe pela sua capacidade de subir em árvores, ele vai gastar toda a sua vida acreditando ser estúpido”

Albert Einstein

RESUMO

COSTA JUNIOR, Carlos Gonçalo Manso da. Fabricação de corpos de prova de tração em compósitos com matriz biopolimérica. 2015. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

No presente caso, o material escolhido para ser analisado é um material compósito, fruto da união de uma matriz polimérica derivada do óleo da mamona (poliuretana) e do reforço de fibra de vidro. Assim, surge a necessidade de avaliar as propriedades mecânicas deste compósito e, para que sejam realizados os ensaios, faz-se necessário fabricar corpos de prova normalizados que atendam aos requisitos dos testes e reproduzam valores confiáveis acerca do comportamento mecânico. Para a fabricação dos corpos de prova, que seguem a norma ASTM D3039, foram utilizados dois processos de fabricação: *Hand Lay-UP* e *Spray-UP Modificado*. As placas de compósito foram analisadas e aquelas que apresentaram uma boa relação de homogeneidade e uma qualidade dimensional adequada passaram adiante. Delas foram extraídos os CDP. Os corpos de prova puderam, então, ser ensaiados. Seus respectivos destroços retornaram para análise. Com o auxílio de um forno de indução, pôde-se avaliar as características do corpo de prova após o ensaio e comparar os valores de fração mássica e volumétrica encontrados com os valores inseridos no início do processo, validando-os. Além disso, os resultados para o módulo de elasticidade foram muito satisfatórios (erros menores de 1%) pois se aproximaram dos cálculos teóricos, provando a eficiência dos processos de fabricação supracitados.

Palavras-chave: Materiais compósitos; Propriedades mecânicas; Matriz polimérica; Hand Lay-UP; Spray-Up.

ABSTRACT

COSTA JUNIOR, Carlos Gonçalo Manso da. Fabricação de corpos de prova de tração em compósitos com matriz biopolimérica. 2015. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

The crescent interest in validating new materials, for using within the universe of engineering in the technical aspects and economic issues and the growing environmental concernment have motivated this research. The increasing range of applicability of the composite materials within structural, automotive, aeronautical and mainly medical applications drives to a large necessity of ensuring the reliability of these elements. Thus, in order to avouch that a material is reliable some tests are necessary. In most cases, these tests are destructive. On this research, the group has chosen a composite material, compound of a polymeric matrix obtained from the castor oil (polyurethane) as a stress conveyor element and fiberglass as the reinforcing agent. Polymeric matrixes present several advantages comparing to those derived from petroleum, such as: they do not contaminate the environment where people in general deposit them and the natural decomposition time is shorter. Recognizing the mechanical properties of this material requires the fabrication of normalized test bodies in order to create the adequate atmosphere for the traction test, which can display reliable results of the polyurethane mechanical behavior. Therefore, two manufacturing processes are necessary to build the bodies according to the ASTM D3039: the Hand Lay-UP and the Spray-UP Modified. They consist of an interleaving of reinforcing boards with polymeric matrix, following by the cure process under pressure. The most significant difference between them is the way to insert the polymeric matrix. Hand Lay-UP add the polyurethane through the hands of the operator, directly on the reinforcing board. In the other hand, the process of Spray-UP Modified pulverizes the polymer along with compressed air. All of the boards obtained passed by an analyze that verified the quality of the homogeneity and the dimensional precision. Only after the analysis, the test bodies are valid to the traction test. Finally, the wreckage from the bodies were brought to the induction furnace in order to eliminate the polymeric matrix from the material. So that the material proprieties of the bodies could be obtained, proprieties such as mass and volumetric fraction. This knowledge is very important in validating the fabrication process. With this information, the comparison between the final and initial fractions obtained in the beginning of the mixture process is possible. Moreover, the results found for the Young Modulus (modulus of elasticity), presented values of standard deviation less than one per cent in comparison to the theoretical ones, ensuring the efficiency of Hand Lay-UP and Spray-UP as a manufacturing process to composite materials.

Keywords: Composite materials; Mechanical properties; Polymeric Matrix; Hand Lay-UP; Spray-UP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos Materiais de Engenharia.....	19
Figura 2 – Produtividade e Performance.....	21
Figura 3 – Estrutura Sanduíche.....	23
Figura 4 – Exemplos de Compósitos Reforçados.....	24
Figura 5 – Organograma de Classificação dos Materiais Compósitos.....	24
Figura 6 – Anisotropia.....	28
Figura 7 – Tecido Bidimensional de Fibra de Vidro.....	33
Figura 8 – Representação do Processo de <i>Hand Lay-UP</i>	38
Figura 9 – Representação do Processo de <i>Spray-UP</i>	39
Figura 10 – Representação do Processo de <i>Spray-UP Modificado</i>	40
Figura 11 – Frascos de Pré-polímero 329L e Polioliol 471.....	42
Figura 12 – Fibra de Vidro.....	43
Figura 13 – Balança Digital.....	45
Figura 14 – Partes Constituintes do Vaso de Pressão.....	46
Figura 15 – Alimentação de Ar Comprimido.....	47
Figura 16 – Pistola para Pulverização <i>Spray-UP</i>	48
Figura 17 – Forno de Indução Utilizado.....	49
Figura 18 – Dimensões do Molde de Silicone.....	51
Figura 19 – Dimensões do Corpo de Prova de Tração.....	55
Figura 20 – Placa de Compósito Obtida por <i>Hand Lay-UP</i>	57
Figura 21 – CDP Obtidos por <i>Hand Lay-UP</i>	57
Figura 22 – Placa de Compósito Obtida por <i>Spray-UP</i>	64
Figura 23 – Restos do CDP degradado – Fibras de Vidro.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Breve Histórico das Fibras de Alto Desempenho.....	20
Tabela 2 – Composição Básica do Óleo de Mamona.....	36
Tabela 3 – Catalogação das Placas de Compósito Obtidas por <i>Hand Lay UP</i> ...	54
Tabela 4 – Catalogação dos CDP Obtidos por <i>Hand Lay-UP</i> – Características Geométricas.....	58
Tabela 5 – Catalogação dos CDP Obtidos por <i>Hand Lay-UP</i> – Características Físicas.....	61
Tabela 6 – Resultados Mecânicos dos CDP por <i>Hand Lay-UP</i>	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades das Fibras Unidirecionais	44
Quadro 2 – Produtos da Mistura para Produção do Molde de Silicone	50

LISTA DE SIGLAS

CDP	Corpos de Prova
E-glass	Fibra de Vidro Tipo E
MCRF	Materiais Compósitos Reforçados por Fibra
MDI	Difenilmetano Diisocianato

LISTA DE ACRÔNIMOS

ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
ASTM	American Society for Testing and Materials
RAE	Royal Aircraft Establishment

LISTA DE SÍMBOLOS

v_f	Fração Volumétrica de Fibra
v_m	Fração Volumétrica de Matriz
V_f	Volume de Fibra
V_m	Volume de Matriz
V_c	Volume do Compósito
w_f	Fração Mássica de Fibra
w_m	Fração Mássica de Matriz
W_f	Massa de Fibra
W_m	Massa de Matriz
W_c	Massa de Compósito
ρ_f	Densidade da Fibra
ρ_m	Densidade da Matriz
ρ_c	Densidade do Compósito
X_c	Propriedade Aleatória do Compósito
E_f	Módulo de Elasticidade da Fibra
t	Espessura do CDP
ω	Largura do CDP

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.2.1 Objetivos gerais.....	17
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 EVOLUÇÃO.....	19
2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	20
2.2.1 Definição.....	22
2.2.2 Classificação.....	23
2.2.3 Constituintes dos Compósitos.....	29
2.3 POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DA MAMONA.....	34
2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS PLACAS.....	36
2.4.1 Laminação a Mão (<i>Hand Lay-UP</i>).....	37
2.4.2 Laminação com Spray (<i>Spray-UP</i>).....	38
2.4.3 Laminação com Spray Modificada (<i>Spray-UP Modificado</i>).....	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 MATÉRIA-PRIMA.....	41
3.1.1 Para a Confecção do Molde.....	41
3.1.2 Poliuretano.....	42
3.1.3 Fibra de Vidro.....	43
3.2 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS.....	45
4 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	50
4.1 A PARTIR DO PROCESSO <i>HAND LAY-UP</i>	50
4.2 A PARTIR DO PROCESSO <i>SPRAY-UP</i>	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5.1 ACERCA DO PROCESSO <i>HAND LAY-UP</i>	56
5.2 ACERCA DO PROCESSO <i>SPRAY-UP MODIFICADO</i>	63
5.3 VERIFICAÇÃO DA REGRA DE HYER (1998)	65
6 CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

O estudo de materiais compósitos vem ganhando importância no cenário de engenharia por atender várias necessidades em diferentes áreas de aplicações. Além disso, estes tipos de materiais apresentam algumas vantagens quando relacionados aos materiais comumente utilizados na engenharia convencional como, por exemplo: facilidades de combinações, abundância e baixo custo da matéria prima (derivada de fontes renováveis) e excelentes propriedades mecânicas aliadas a uma boa ductilidade que garante resistência mecânica e estabilidade dimensional.

Segundo LEVY NETO E PARDINI (2006), inúmeras conquistas tecnológicas foram possíveis com o advento dos materiais compósitos nas áreas de aeronáutica, aeroespacial, petroquímica, naval, bioengenharia, automobilística, construção civil e artigos esportivos. Estas conquistas são oriundas da necessidade da indústria por materiais mais leves e flexíveis, mas que também garantam a resistência mecânica necessária para a aplicação.

A importância econômica deste tipo de material é, também, muito relevante no universo da engenharia. Em um estudo realizado pela Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO), em 2012, o setor brasileiro deste segmento movimentou cerca de 700 milhões de reais nos primeiros três meses de 2012, superando em 1,6% a marca de 2011 e em 2,5% a marca de 2010, comprovando a crescente evolução comercial desta cadeia de materiais em território nacional.

1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os compósitos ocupam um lugar de destaque no interesse dos pesquisadores graças às suas capacidades de atuarem como materiais alternativos, correspondendo aos níveis de exigência de durabilidade, resistência, alcance de menor peso específico e maior rigidez específica e aplicabilidade nas mais diversas áreas. Uma de suas várias aplicações possíveis é a área médica, uma vez provado

que a matriz polimérica pode reparar defeitos decorrentes das perdas ósseas e/ou servir como matéria-prima para a produção de próteses (SILVESTRE FILHO,2001).

No entanto, o avanço tecnológico na área médica carrega consigo a necessidade de um alto grau de desempenho dos implantes ortopédicos associados à biocompatibilidade, ou seja, exigem que a parte substituída cumpra as funções requisitadas pelo corpo e, muitas vezes, estas funções estão atreladas intimamente com as propriedades mecânicas dos materiais utilizados nestes produtos. Surge, então, a necessidade de avaliar o comportamento mecânico do poliuretano reforçado com fibra de vidro para classificá-lo como hábil ou não para a aplicação médica, nos seus mais diversos casos. Esta avaliação é comumente realizada através de ensaios destrutivos de corpos de prova fabricados com o material a ser implantado na aplicação desejada, ou seja, existe a necessidade de fabricar-se alguns corpos de prova para que sirvam de modelo para a tabulação dos valores essenciais ao levantamento das propriedades mecânicas.

Como motivação para o presente estudo, verificou-se a biocompatibilidade da matriz polimérica escolhida (poliuretano derivado do óleo de mamona) em vários estudos como: IGNÁCIO (1995); OHARA et al. (1995); CARVALHO et al. (1997); KHARMANDAYAN (1997); FRASCINO (1998); BONINI (1999); IGNÁCIO (1999); MORALES (1999); KFURI JR (1999); PASCON (1999) e outros. Estes trabalhos citados partiram seus estudos do problema de preenchimento de falhas ósseas e do pouco material disponível sobre biopolímeros aplicados à área ortopédica.

O segundo fator fundamental para a realização do estudo é que a mamona, classe Dicotiledônea de ordem Geraneales e família Euforbaceae, é tipicamente tropical e o Brasil compõe uma das maiores reservas mundiais deste produto, apresentando um grande potencial óleo-químico que garante o fornecimento de matéria-prima de polióis e pré-polímeros inerentes ao nosso caso.

Como terceiro ponto vantajoso na utilização de uma matriz polimérica derivada do óleo da mamona destaca-se a alta degradabilidade, ou seja, o ambiente pode reabsorver este componente rapidamente. Os plásticos atualmente utilizados em larga escala possuem baixíssimos níveis de degradabilidade, chegando a demorar 400 anos para desaparecer completamente na natureza. Além disso, a quantidade de plástico encontrada em lixões e aterros sanitários é gritante. Cerca de 13 mil toneladas de resíduos plásticos são depositadas em locais potencialmente prejudiciais ao meio ambiente por ano, derivadas das imperfeições de projetos nas indústrias. Outro

aspecto negativo é a composição tóxica destes polímeros derivados do petróleo, que agridem severamente o meio ambiente e a saúde do operador em contato com tais materiais. Sendo assim, o poliuretano é encarado como uma alternativa ambiental, além de suas funções extremamente aplicáveis na engenharia.

1.2 OBJETIVOS

Frente aos avanços tecnológicos resultantes da crescente preocupação ambiental e do interesse em aplicar novos materiais em diferentes ramos da engenharia, este trabalho tem como objetivo principal fornecer corpos de prova de um material potencial (poliuretano derivado do óleo de mamona reforçado com fibra de vidro) para ensaios destrutivos que fornecerão os valores de resistência mecânica, que são calculados a partir das medidas de força suportada e área da seção transversal dos CDP, podendo ou não validar sua utilização.

1.2.1 Objetivos Gerais

Diante da oportunidade de aplicação dos materiais compósitos como elementos alternativos nos tratamentos ortopédicos e fabricações de próteses, surge a necessidade de avaliar mecanicamente os seus comportamentos. Tais avaliações são, geralmente, efetuadas através de ensaios mecânicos destrutivos que, por sua vez, requerem corpos de prova (CDP) normalizados. Este estudo objetiva, então, fabricar corpos de prova de um material compósito, formado de uma matriz polimérica e um reforço para oferecê-los aos ensaios de tração que serão realizados futuramente.

1.2.2 Objetivos Específicos

Fabricar, através do procedimento de *Hand Lay-UP* e *Spray-UP Modificado*, corpos de prova de tração segundo a norma ASTM D3039 para o poliuretano derivado do óleo da mamona (matriz transmissora do esforço) reforçado com fibra de vidro (elemento de resistência). Além disso, levantar a fração volumétrica posterior ao ensaio e comparar à fração volumétrica no momento da mistura também faz parte dos objetivos específicos deste trabalho.

Finalmente, testar a efetividade do método inovador de *Spray-UP Modificado* e apresentar os seus resultados completam a lista dos objetivos do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EVOLUÇÃO

Existem mais de cinco mil tipos de materiais registrados disponíveis para a utilização em engenharia, classificados amplamente em: polímeros, cerâmicos, metais e compósitos (Figura 1).

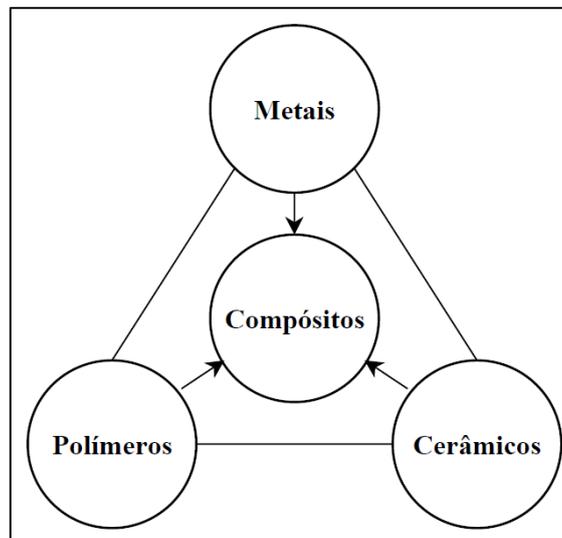


Figura 1- Classificação dos Materiais de Engenharia.

Fonte: adaptado de BEAUMONT (1989).

Para BEAUMONT (1989), uma das maneiras mais explícitas de se quantificar a riqueza de uma sociedade é a avaliação da quantidade de material de engenharia, já convertido através de algum sistema de produção agregador de valor, que ela consome. Historicamente, percebe-se que muitas sociedades determinaram o rumo da economia através da detenção de bronze, em torno de 1500 a.C., e do aço, mais recentemente, por volta de 1850 d.C. Em meados da década de 1960, pesquisas na *Royal Aircraft Establishment (RAE)*, na cidade de Farnborough, Inglaterra, levaram à descoberta das primeiras fibras que poderiam ser utilizadas para reforçar matrizes e servirem, unidas, como elemento estrutural. Essa fibra era a de carbono e apresentava alta rigidez e excelentes valores de resistência mecânica.

Com o passar dos anos e com o avanço nas pesquisas acerca das fibras muitos outros materiais acabaram incrementando a lista de possibilidades de utilização como reforços, apresentando excelentes resultados através dos processos

empíricos baseados na coleção de dados. Esta quantidade elevada de pesquisas e de tabulação de dados permite avaliar os valores de resistência mecânica para dado material por um modelo matemático confiável, que pode ser verificado por meio do confronto de seus resultados com as tabelas resultantes das pesquisas. A tabela 1 ilustra um breve histórico evolutivo da utilização de fibras como elementos reforçadores nas matrizes.

Tabela 1 – Breve Histórico das Fibras de Alto Desempenho

Tijolos de barro reforçados por palhas (Egito, 800 a.C.); Arcos laminados de madeira, tendões de animais e seda (Mongólia, 700 a.C.); Superfícies de aviões revestidas por tecidos (1910); Fenólicos reforçados por tecidos (1930); Plásticos reforçados por fibras de vidro (1940); Fibras de boro e carbono e seus compósitos (1960); Aramida (Kevlar 49®) e seus compósitos (1970)	
Fibras Mais Recentes	
Alumina (Al ₂ O ₃);	Diboreto de Titânio;
Carboneto de silicone (SiC);	Sílica;
1. monofilamentar	Quartzo;
2. multifilamentar (yarn)	Alumina-sílica (Kaowool®)
Alumina-boro-sílica (Nextel®);	Polietileno (Spectra®)
Nitreto de boro;	

Fonte: BEAUMONT (1989)

2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

O material compósito é fruto da união de diferentes materiais que pode ser estudado macroscopicamente como um único elemento. Para SMITH (1998), os componentes dos compósitos são química e morfologicamente diversos e essencialmente insolúveis. Essa classe de materiais é, fundamentalmente, formada de duas partes: a primeira é o elemento descontínuo responsável pela resistência mecânica (componente estrutural ou reforço) e a segunda é o elemento contínuo responsável por transmitir este esforço (matriz). “Na maioria dos casos, estas duas partes unidas apresentam melhores resultados de resistência mecânica do que quando analisadas separadamente” (SANTOS, 2009).

As matrizes que compõe o elemento binário podem ser, geralmente, de três tipos: feitas de cerâmica, metal ou polímero. Essas matrizes, quando “recheadas” com algum tipo de reforço disponível, apresentam efetivas mudanças nos valores de resistência mecânica. Porém, é muito importante avaliar a fração volumétrica com que é preenchida a porção da matriz, ou seja, a quantidade de reforço que será introduzida na receita de matriz (HULL, 1988).

Não podemos, infelizmente, associar o bom desempenho dos materiais compósitos com uma produção em larga escala. Ainda são poucos os processos envolvendo tais materiais e este fator impede com que o uso seja difundido. A figura 2 relaciona a utilização dos materiais compósitos na indústria com seus respectivos métodos de fabricação. Segundo MARTINEZ (2011), compósitos utilizados para fins estruturais e semiestruturais são produzidos através de autoclave, enrolamento, pultrusão e VRTM, que são meios pouco produtivos de fabricação.

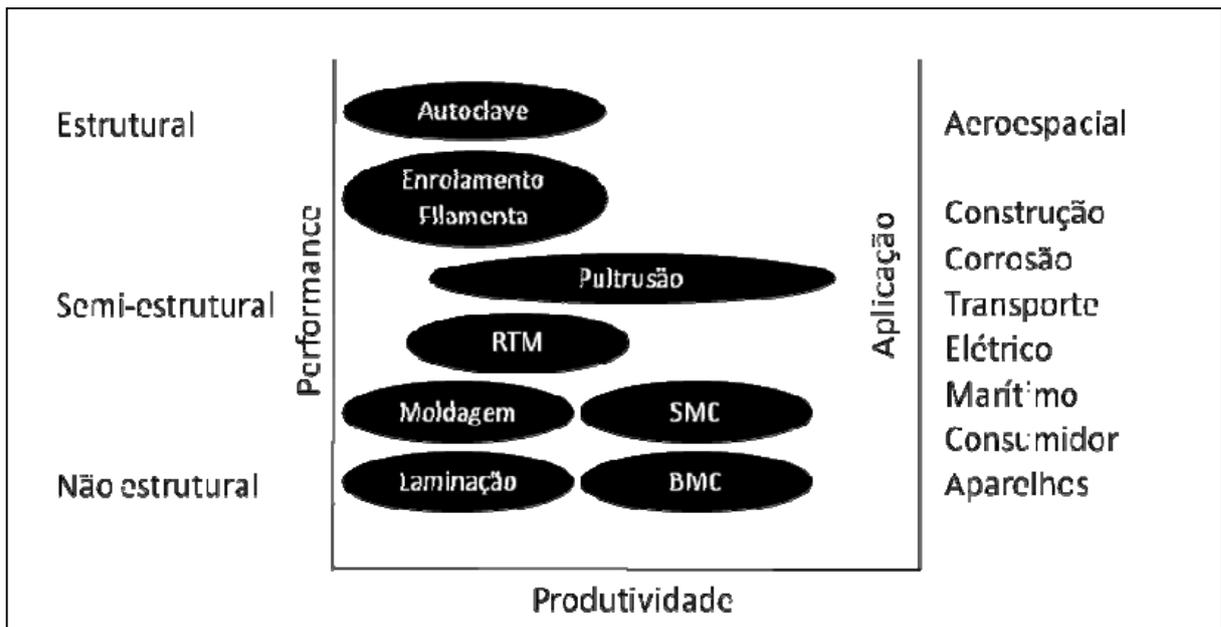


Figura 2- Produtividade e Performance.

Fonte: MARTINEZ (2011).

2.2.1 Definição

Não existe, adequadamente, uma definição para material compósito. Todavia, alguns conceitos já foram avaliados a partir dos estudos realizados acerca destes materiais. Por exemplo, segundo REINHART & CLEMENTS (1987), um compósito é a combinação de dois ou mais materiais distintos que estabelecem uma interface reconhecível entre eles e ao mesmo tempo não se dissolvem completamente, ou seja, mantêm suas identidades e trabalham em conjunto apresentando propriedades mecânicas mais adequadas às aplicações do que aquelas analisadas individualmente para cada elemento constituinte. Ainda segundo REINHART & CLEMENTS (1987), um elemento formador do compósito pode apresentar valores mais altos de resistência mecânica quando analisado separadamente, porém, quando combinado, o efeito é melhorado. Por exemplo, na união entre aço e concreto, o elemento compósito apresenta bons valores de resistência à tração e compressão, mutuamente. Separados, os formadores apresentariam maiores valores de tração (aço) e compressão (concreto). Juntos, as duas aplicações podem ser unidas para uma mesma utilização. Como a maioria dos casos de utilização desta classe de materiais se trata de situações onde o emprego do compósito é estrutural, vale a pena segregar a sua classificação apenas para aqueles materiais que apresentam uma matriz, material aglomerante, e um reforço. A função básica do material aglomerante, reconhecido na combinação como matriz, é manter as placas de reforços unida e transmitir a estes o carregamento solicitado, enquanto os reforços, por suas vezes, suportam tais carregamentos trazidos pelo aglomerante. Para efeito de ilustração, um material compósito pode ser, a grosso modo, um sanduíche onde existam uma ou mais fases descontínuas envolvidas por uma fase contínua (Figura 3).

A descontinuidade do elemento (reforços) apresenta maior rigidez e maior resistência em relação à fase contínua (matrizes), fato este que implica na necessidade da existência de uma fração volumétrica considerável de reforço na mistura a fim de que os esforços solicitados garantam o funcionamento adequado da estrutura.

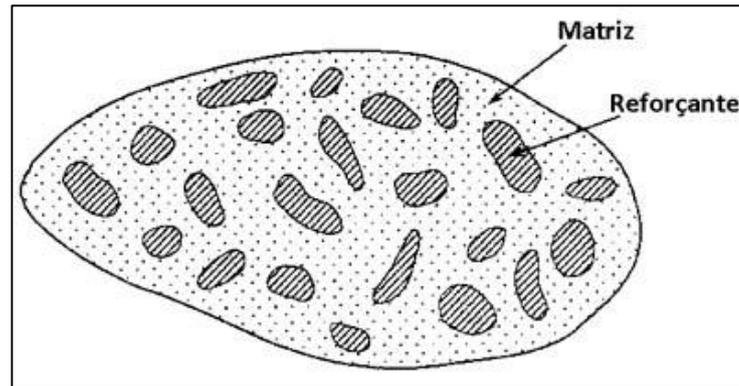


Figura 3 - Estrutura Sanduíche.

Fonte: REINHART E CLEMENTS (1987).

2.2.2 Classificação

Para o processo de classificação das inúmeras possibilidades de materiais compósitos leva-se em consideração, principalmente, a distribuição dos elementos de reforço na mistura analisada, visto que as propriedades mecânicas dependem substancialmente da forma, das dimensões e da fração volumétrica destes elementos atuantes. Usualmente, utilizam-se duas classificações básicas para se estudar os reforços. A primeira delas é o reforço particulado, com dimensões aproximadamente equivalentes em todas as direções e podem ser arranjados de forma aleatória ou orientada. Na maioria dos casos de compósitos reforçados por partículas os elementos de reforço são distribuídos de forma aleatória devido à praticidade da disposição e, também, porque é extremamente difícil garantir que o reforço particulado continue orientado depois da inserção da matriz, visto que sua viscosidade moveria facilmente as partículas introduzidas.

A segunda classificação utiliza como base os reforços fibrosos, caracterizados pelo seu comprimento muito maior do que a principal dimensão da seção transversal (diâmetro para reforços cilíndricos e medido da largura para reforços retangulares ou de manta). Esta razão do comprimento com o diâmetro ou da largura, conhecida como *aspect ratio*, pode variar consideravelmente. A figura 4 exemplifica alguns tipos de reforço inseridos nas matrizes.

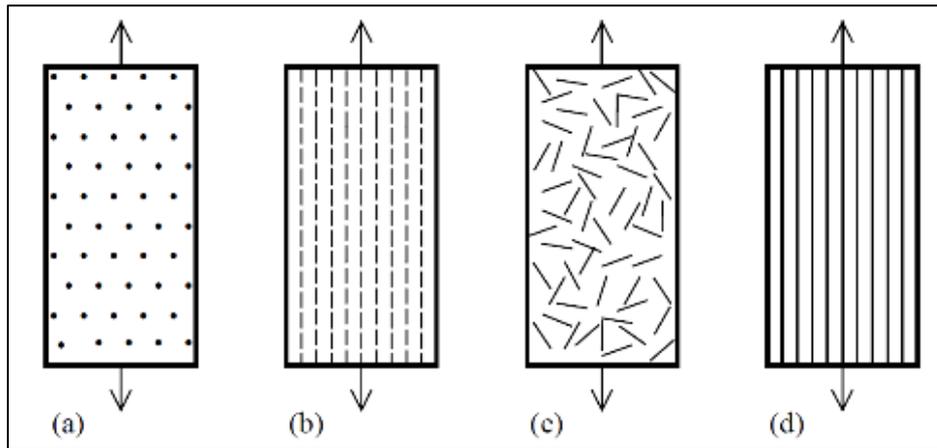


Figura 4 – Exemplos de compósitos reforçados: (a) por partículas aleatórias; (b) por fibras descontínuas unidirecionais; (c) por fibras descontínuas aleatórias; (d) por fibras contínuas unidirecionais.

Fonte: MATTHEWS E RAWLINGS (1994).

A figura 5 apresenta um organograma de classificação dos compósitos para a melhor visualização dos tipos de compósitos que se ramificam desde a classificação inicial proposta por MATTHEWS E RAWLINGS (1994).

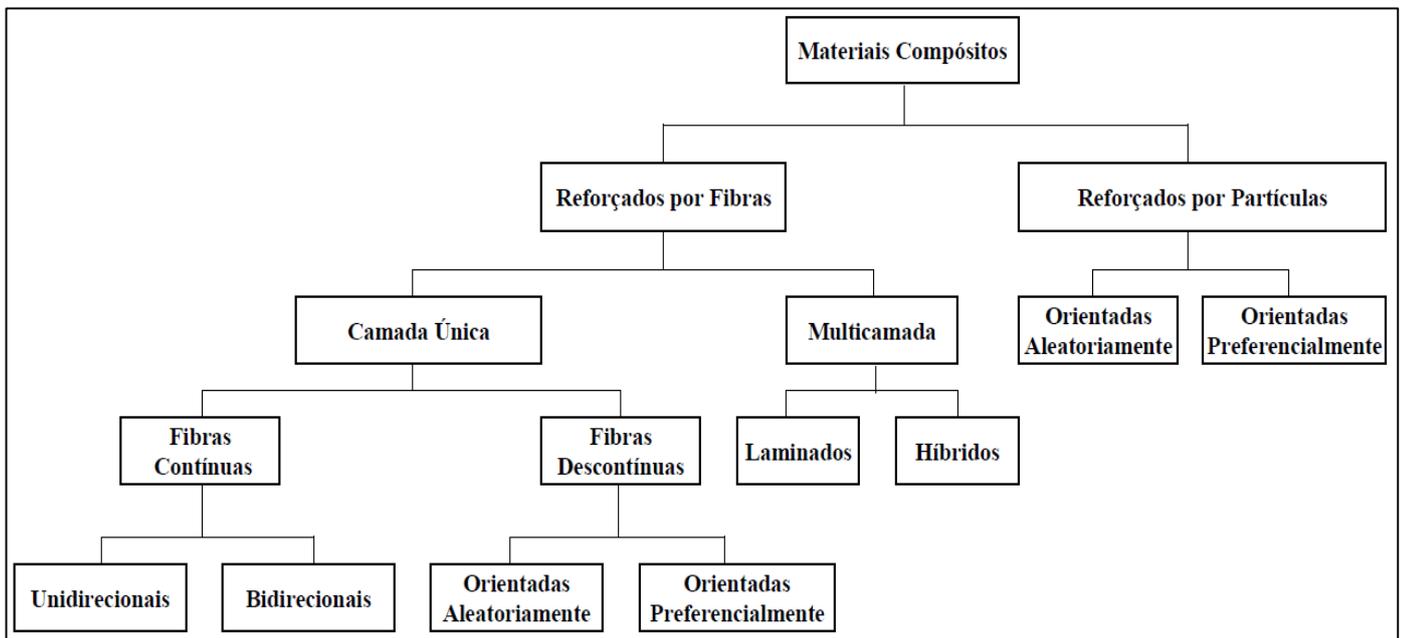


Figura 5 – Organograma de Classificação dos Materiais Compósitos.

Fonte: adaptado de MATTHEWS E RAWLINGS (1994).

Segundo AGARWAL E BROUTMAN (1990), os compósitos apresentam propriedades mecânicas fortemente influenciadas pela distribuição, interação e propriedades dos seus constituintes. Muitas destas propriedades podem ser estimadas se for conhecida a fração volumétrica (v) ou a fração mássica (w) do material. Experimentalmente, é muito mais fácil conhecer a fração mássica do compósito pois se trata de um aferimento direto realizado por balança, enquanto que a fração volumétrica é resultado de cálculos que envolvem a própria massa e as densidades dos constituintes. Existe, felizmente, uma conexão analítica entre estes dois parâmetros essenciais que permite converter a fração mássica em volumétrica e vice-versa. Esta ferramenta é muito importante pois o conhecimento da fração volumétrica é essencial para os cálculos das propriedades elásticas dos materiais compósitos. As principais equações que sofrerão combinações e arranjos para se obter a equação responsável pela conversão são dadas a seguir, onde os subscritos m, f e c referem-se à matriz, à fibra e ao compósito, respectivamente, e V ao volume e W à massa:

Fração Volumétrica	Fração Mássica	
$v_f = \frac{V_f}{V_c}$	$w_f = \frac{W_f}{W_c}$	(1)
$v_m = \frac{V_m}{V_c}$	$w_m = \frac{W_m}{W_c}$	(2)

A partir das equações mostradas verifica-se que:

$$v_f + v_m = 1 \quad (3)$$

$$w_f + w_m = 1 \quad (4)$$

O relacionamento de massa com volume é dado pela densidade, que deve ser introduzida no desenvolvimento da relação. Sabe-se que a massa do compósito é, obviamente, a soma das massas de seus constituintes (matriz e reforço). Então

$$W_c = W_f + W_m \quad (5)$$

Na equação (5), W_c é a massa total do compósito, enquanto que W_f e W_m são as massas de fibra e matriz, respectivamente. Como $W = \rho V$, tem-se:

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (6)$$

Onde ρ_c é a massa específica do compósito, ρ_f é a massa específica de fibra, ρ_m é a massa específica da matriz. O termo V refere-se ao volume para cada subscrito (compósito, fibra e matriz). Dividindo-se a equação (6) por V_c em ambos os lados tem-se a equação em relação a fração volumétrica:

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad (7)$$

A equação (7) pode ser expressa em função das massas dos elementos constituintes do compósito, ou seja:

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (8)$$

Dividindo-se todos seus termos por W_c , obtém-se

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \quad (9)$$

Relacionando, agora, massa volume e densidade, verifica-se a expressão para fração mássica de fibra:

$$w_f = \frac{W_f}{W_c} = \frac{(\rho_f V_f)}{(\rho_c V_c)} = \frac{\rho_f}{\rho_c} v_f \quad (10)$$

Similarmente para a matriz tem-se:

$$w_m = \frac{W_m}{W_c} = \frac{(\rho_m V_m)}{(\rho_c V_c)} = \frac{\rho_m}{\rho_c} v_m \quad (11)$$

A relação entre v_f e v_m pode ser obtida de forma rápida fazendo a inversão das equações (10) e (11), desde que sejam conhecidas a densidade do reforço (ρ_f) e da matriz (ρ_m). Para VINSON E SIERAKOWSKI (1987), as relações de conversão entre a fração mássica e volumétrica podem ser expressas analiticamente através das combinações das equações (7) e (10) e, também, entre as equações (7) e (11). Tais relações serão exibidas, respectivamente, a seguir:

$$w_f = \frac{\left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right)}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \cdot v_f + v_m} \cdot v_f \quad (12)$$

$$w_m = \frac{v_m}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_m}\right) \cdot (1 - v_m) + v_m} \quad (13)$$

A equação (13) mostra que a densidade do material compósito é resultado da média ponderada da densidade de cada constituinte, ou seja, depende das proporções aplicadas na fabricação dos materiais. É cabível estender este conceito para outras propriedades do compósito, além da densidade, tornando possível a criação de um termo geral que possa reger estas situações. Este termo é:

$$X_c = X_m v_m + X_f v_f \quad (14)$$

Na equação acima o termo X_c diz respeito à qualquer propriedade que se deseja calcular em relação ao compósito desde que ela respeite a mesma regra de proporção, ou seja, é possível utilizar a equação (14) para levantar qualquer propriedade desde que a mesma obedeça à regra da mistura. Tal premissa intitula a equação, que é conhecida como Regra da Mistura (*Rule of Mixtures*). Ainda na equação (14), X_m diz respeito a uma propriedade da matriz, X_f a uma propriedade da fibra e v_m e v_f às frações volumétricas de matriz e fibra, respectivamente.

Porém, infelizmente, assim como na maioria dos fenômenos observados na natureza, a maior parte das propriedades não obedece à esta regra simples de proporção e apresenta caminhos complexos para os cálculos. A análise feita pela

regra da mistura não considera a característica morfológica e química dos componentes, sendo, então, apenas uma boa aproximação para os valores que se deseja calcular. Geralmente, determinar tais propriedades exigem a análise de vários parâmetros onde os constituintes interagem de forma sinérgica e, tais avaliações, não são levadas em consideração na regra da mistura. Nestes casos, as características químicas e morfológicas dos constituintes, bem como suas particularidades de resistência na interface de contato são muito importantes para determinar as propriedades dos compósitos.

Comumente verificado nas análises dos compósitos, os mesmos apresentam uma característica anisotrópica, ou seja, as propriedades mecânicas, físicas, térmicas e elétricas dadas num certo ponto do material variam de acordo com a direção em que estão sendo analisadas (CALLISTER, 1994), conforme ilustrado na Figura 6.

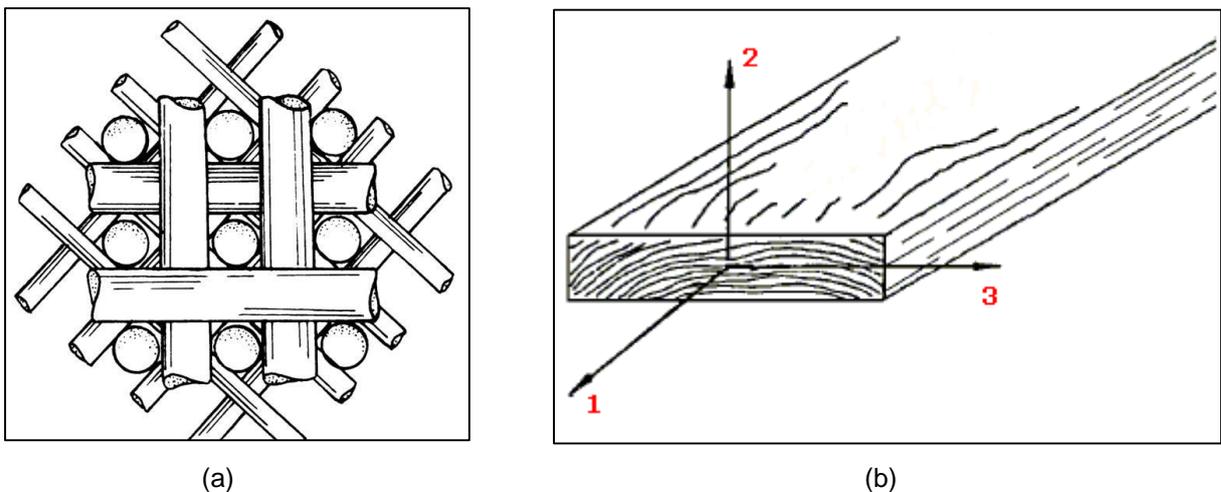


Figura 6 – Anisotropia: (a) disposição dos elementos de reforço feita em 3 ângulos diferentes; (b) vetores de resistência à tração diferentes nas 3 direções-eixos.

Fonte: adaptado de CALLISTER (1994).

O efeito de anisotropia verificado nos materiais compósitos é, por mais que possa parecer uma desvantagem, a maior vantagem que eles apresentam pois permitem ao engenheiro projetar não só as características geométricas e funcionais, mas, também, as próprias propriedades mecânicas do material em questão. Por exemplo, um projetista pode escolher reforçar um certo trecho de uma viga de

compósito, utilizando uma maior quantidade de reforço apenas naquela localidade, porque sua análise estática da estrutura identificou nesta exata seção a tensão máxima oferecida pelo carregamento. Este reforço local permite ao engenheiro uma minimização de custos em detrimento à utilização de algum outro material já que, normalmente, as estruturas são definidas a partir do ponto onde a tensão e o momento fletor são máximos, deixando o restante da estrutura superdimensionado. Com a utilização dos compósitos o engenheiro reforçaria apenas a seção submetida à maior tensão e ao maior momento fletor, mantendo o restante da estrutura com as mesmas dimensões, respeitando as normas de segurança e dimensionamento. Este reforço local garante o funcionamento seguro da estrutura e diminui os custos se comparados a utilização de um material superdimensionado. Esta análise é muito utilizada quando o compósito é reforçado com fibras laminadas uni ou bidimensionais. De fato, o controle da anisotropia durante o projeto e fabricação do compósito é sua principal vantagem econômica.

2.2.3 Constituintes Dos Compósitos

EDWARDS (1998) explica que, quando um projetista utiliza um compósito, ele deve considerar, além dos dados convencionais já especulados quando se trata de um material estrutural para a engenharia, a proporção, o tipo, a distribuição e orientação, o processo, a geometria e os requisitos de produção. Deste modo, é conveniente analisar os constituintes do compósito (matrizes, reforços e suas interfaces comuns), porém, como existem diversos tipos de matrizes e reforços, uma análise mais profunda será feita apenas acerca das matrizes poliméricas e dos reforços fibrosos contínuos, utilizados neste estudo.

a) Matrizes

Estes elementos que constituem os compósitos podem ser do tipo cerâmico, metálico e polimérico. Escolher qual tipo de matriz utilizar no projeto de um material compósito depende da utilização do mesmo, ou seja, das propriedades mecânicas, físico-químicas e térmicas que serão exigidas no momento da solicitação.

Atualmente, na maioria dos casos, as matrizes poliméricas são as mais utilizadas pois apresentam baixo custo, fácil moldagem, boa resistência aos ataques químicos e seu peso específico é relativamente baixo. Em contrapartida, os valores de resistência mecânica, módulo de elasticidade e baixa temperatura de serviço são destacadas como desvantagens se comparadas às matrizes cerâmicas e metálicas. AGARWAL e BROUTMAN (1990) mostram que as matrizes poliméricas também podem sofrer degradação se expostas durante um longo período ao à luz ultravioleta e à alguns solventes.

A missão estrutural da matriz é manter a integridade do compósito, ligando os elementos de reforço, graças às suas características de adesão e coesão. Além de ligar os reforços, a matriz ainda transmite o esforço até eles e protege a estrutura contra as adversidades ambientais (abrasão e corrosão). CALLISTER (1994) diz que é essencial que as forças adesivas da interface fibra-matriz sejam fortes o suficiente para garantir a funcionalidade do compósito. Dito isto, escolher a combinação fibra-matriz também exige uma análise do comportamento da fibra-matriz. A resistência à ruptura do compósito depende desta adesão: uma adesão adequada garante que o esforço seja totalmente transmitido para as fibras reforçadoras e que a ruptura ocorra quando o limite de tais elementos seja alcançado.

Os polímeros utilizados para compor estas matrizes são conhecidos como resinas, o componente fraco no compósito, pois não resistem às mesmas faixas de tensão que as fibras podem suportar (na maioria dos casos). Além disso, se imersa em um ambiente adverso, ou seja, onde exista alguma composição agressiva ou valores inadequados de umidade e exposição à luz, a matriz pode perder sua capacidade e apresentar danificações inesperadas na estrutura. Para HYER (1998), como funções essenciais das matrizes destacam-se: a manutenção da direção e da orientação das fibras, garantindo que o compósito suporte a carga desejada; a distribuição quase que uniforme das cargas entre as fibras, que serve como uma barreira à propagação de trincas e falhas, tornando a mistura confiável e resistente ao cisalhamento interlaminar. Ainda de acordo com HYER (1998), as limitações básicas do compósito são funções das propriedades mecânicas da matriz como, por exemplo, a estabilidade térmica e a temperatura máxima de utilização do compósito que são determinadas pela resistência da matriz. No presente estudo, esta afirmação de HYER (1998) foi verificada quando os corpos de prova já ensaiados foram levados ao forno e apenas a parte da matriz se desintegrou, enquanto que as mantas de fibra de vidro

se mantiveram intactas, deixando explícito que quem determina a temperatura máxima de utilização do compósito e a matriz. Maiores detalhes serão demonstrados durante os resultados (seção 5.3).

SHACKELFORD (1996) apresenta uma classificação para os polímeros de acordo com os seus comportamentos quando expostos a grandes quantidades de calor. Segundo ele, os polímeros podem ser termoplásticos ou termofixos. Os termoplásticos se tornam substâncias viscosas quando aquecidos, suscetíveis ao processo de extrusão. Já os polímeros termofixos sofrem decomposição porque passam por um processo químico específico, resumidamente explicado a seguir: no momento da polimerização a resina passa por um processo químico irreversível, conhecido como processo de cura. Neste momento são formadas ligações covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes que promovem estruturas tridimensionais. Tais ligações cruzadas, à medida que se formam, causam a diminuição da mobilidade das cadeias moleculares, solidificando a mistura. Em alguns casos a reação é exotérmica, ou seja, a temperatura influencia no tempo de cura, podendo ser acelerado com a inserção de calor na mistura através de um catalisador ou utilização de uma autoclave (dispositivo mecânico que oferece elevada pressão e alta temperatura para a mistura). A mistura curada, mesmo que reaquecida não se refunde e, caso seja exposta ao calor exacerbado, sofre combustão e se desintegram, impossibilitando sua reutilização (SHACKELFORD, 1996). A pesquisa em questão utilizou uma matriz termofixa e, por isso, não é conveniente aprofundar o estudo das matrizes termoplásticas.

Para TITA (1999), o maior índice de utilização das resinas termofixas é encontrado no uso estrutural em materiais compósitos devido ao fato de suas características finais se aproximarem muito daquela desejada. Além disso, como fator colaborador ao uso das resinas termofixas ao invés das termoplásticas, seu custo é relativamente menor. SMITH (1998) lista algumas vantagens da utilização de resinas termofixas:

- Alta estabilidade térmica;
- Alta rigidez;
- Estabilidade dimensional;
- Resistência à fluência e à deformação sob carregamento;
- Baixo peso específico (ρ);
- Excelentes propriedades de isolamento térmico e elétrico.

b) Fibras

Conforme descrito anteriormente, as fibras podem ser contínuas ou descontínuas. Como componente estrutural ambas possuem a função de suportar a tensão exercida no elemento, porém as suas características mecânicas distintas são quem determinam o desempenho do compósito. De acordo com CALLISTER (1994), as características mecânicas do material compósito não dependem exclusivamente das propriedades da fibra, mas, também, de como esta tensão é transmitida ao reforço. Este fenômeno de transferência de carregamento é função do comprimento da fibra e da adesão interfacial entre fibra e matriz. Para cada combinação estudada é preciso descobrir qual o comprimento mínimo necessário da fibra para que ela garanta a resistência e a rigidez do compósito. Dois outros fatores importantes a serem considerados são a orientação e a fração volumétrica, que apresentam influencia considerada sobre a resistência e outras propriedades do material compósito. As propriedades dos MCRF (materiais compósitos reforçados por fibras) do tipo contínua são anisotrópicas, apresentando níveis de resistência máxima na direção do alinhamento da fibra, enquanto os valores na direção perpendicular ao alinhamento são mínimos. Para o desenvolvimento do estudo foram utilizadas como reforço tecidos bidirecionais de fibras de vidro (especificações técnicas no 3.1.3). Cabe, então uma análise rápida sobre este tipo de reforço.

A fibra de vidro teve sua produção iniciada na antiga Síria, Grécia e Egito de forma artesanal. Trabalhadores aqueciam uma vara de vidro e a aplicavam sobre superfícies para gerar relevos nas superfícies. Segundo OTA (2004), a fibra de vidro começou a ser desenvolvida comercialmente em 1939, durante a Segunda Guerra Mundial, com o intuito de fornecer rigidez aos equipamentos bélicos e, ao mesmo tempo, torná-los mais leves. Ainda segundo OTA (2004), mais de 35 mil produtos utilizam a fibra de vidro como matéria-prima, sendo que as mais utilizadas são as do tipo E (*E-glass*), obtidas a partir de uma mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg e muito utilizadas como reforço para matrizes poliméricas devido ao seu baixo custo. Um tecido bidimensional de fibra de vidro é ilustrado na Figura 7. Este tipo de material é composto por inúmeros filamentos muito finos de vidro, que se agregam por meio de aplicações de resinas, silicones, fenóis e outros solúveis em solventes orgânicos (SOARES et al, 2007). Existem vários tipos de vidro utilizados para a fabricação das

fibras, porém, segundo MATTHEUS e RAWLINGS (1994), a sílica é a mais apropriada para a utilização em compósitos.

De acordo com MATTHEUS e RAWLINGS (1994), as fibras podem ser facilmente obtidas através de um processo de moldagem que utiliza a força gravitacional para puxar o vidro aquecido por um mandril que contém aproximadamente 200 canais de diâmetro 10 μm . Logo, a cada passe são fabricados 200 filamentos. Segundo WAMBUA (2003), a fibra pode apresentar falhas nas superfícies e provocar irritabilidade na pele humana quando em contato. Compósitos reforçados com fibras de vidro apresentam como características favoráveis o elevado quociente entre resistência e peso, boa estabilidade, resistência ao calor e facilidade de fabricação a custo relativamente baixo (BARCELLOS, 2009).

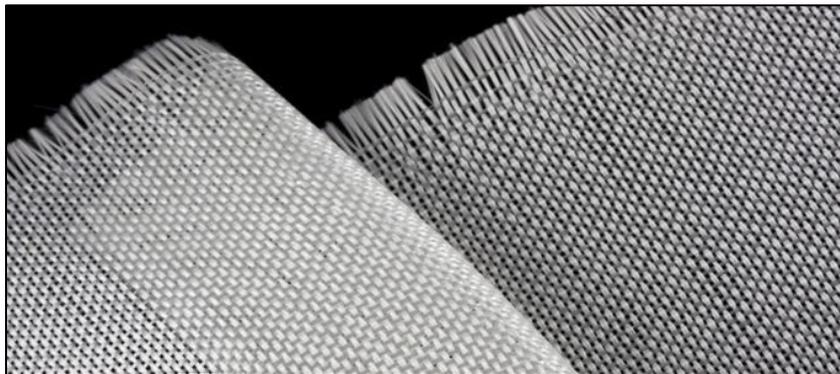


Figura 7 – Tecido Bidimensional De Fibra De Vidro.

Fonte: Aatoria Própria (2015).

c) Interface fibra-matriz

Tão importante quanto a análise das matrizes e dos reforços é a avaliação da interface onde ocorre o contato direto entre os constituintes do material compósito. Para HULL (1988), as tensões que atuam na matriz são transmitidas para a fibra através da interface e são cabíveis algumas hipóteses com relação à interface:

- Matriz e fibra se comportam elasticamente;
- Interface infinitamente delgada;

- Não são consideradas descontinuidades na interface, ou seja, a interação entre fibra e matriz é considerada perfeita;
- A interface que se forma ao redor da fibra possui propriedades de um material sólido;
- A geometria no empacotamento é tida como regular.

Entretanto, as hipóteses (ii) e (v) são teóricas, já que existem inúmeras falhas na superfície das fibras e a estrutura física e química soa complexas. Em alguns casos, para garantir que o compósito apresente uma interface confiável, faz-se necessário realizar alguns processos para melhorar a superfície da fibra a fim de aumentar a interação com a matriz como, por exemplo, tratamento superficial a base de ácido.

2.3 POLIURETANO DERIVADO DO ÓLEO DA MAMONA

O termo poliuretano refere-se à classe de polímeros que apresentam ligação uretana. Estes elementos não contêm unidades uretanas repetidas de modo regular e não possuem uma fórmula geral empírica que possa representar o todo. Além dos grupos uretanos, um poliuretano típico pode apresentar conjuntos de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, éster, éter, ureia, amida e etc. Duas estruturas básicas podem ser diferenciadas: segmentos poliéster moderadamente flexíveis e segmentos curtos e relativamente rígidos compreendendo os grupos uretano e aromáticos. A razão desses dois elementos tem influência nas propriedades mecânicas finais do poliuretano. Segundo SILVESTRE FILHO (2001), WURTZ foi quem propôs as primeiras reações de formação dos uretanos em 1849, mas, somente em 1930, BAYER encontrou uso comercial para o produto da reação de grupos hidroxila e isocianatos.

Atualmente, a procura por materiais que sejam biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa tem aumentado paralelamente ao incentivo à proteção ambiental, fazendo com que as pesquisas com poliuretanos derivados do óleo da mamona se tornem mais frequentes e promovendo novas perspectivas com relação às suas utilizações. A partir destas necessidades de novos materiais menos

agressivos, o uso do óleo da mamona como polioliol (só ou modificado) vem se tornando cada vez mais difundido a partir das recentes referências literárias existentes sobre suas propriedades estruturais (COSTA, 2007, por exemplo). A versatilidade do poliuretano em se obter materiais com propriedades diferentes fez com que ele se tornasse um dos principais polímeros deste século, ao lado de polímeros também naturais e abundantes como os derivados do óleo de soja, canola, milho e outros.

a) Polioliol

Chamados de compostos hidroxilados, os poliolióis são importantes componentes na síntese do poliuretano. São muitos os tipos de poliolióis que podem ser utilizados na fabricação de poliuretanos (desde naturais, como o óleo derivado da mamona que possui 3 grupos hidroxila que produzem polímeros entrecruzados, até os sintéticos especialmente preparados para a produção de polímeros). Os poliolióis devem ser fabricados de modo a apresentar uma estrutura molecular e funcionalidades adequadas para que seja promovida a reação com um pré-polímero ou um diisocianato comercial para poder gerar um poliuretano com propriedades específicas. Para PLEPLIS (1991), a escolha do polioliol controla o grau de entrecruzamento obtido no polímero devido ao seu tamanho e flexibilidade de estrutura molecular. Neste trabalho foi utilizado um polioliol do tipo poliéster derivado do ácido ricinoléico (COSTA, 2007), denominado polioliol 471.

b) Pré-polímero

Em alguns casos uma pré-polimerização do polioliol é feita ao se adiciona um pré-polímero, aumentando a massa molecular da mistura, deixando uma porcentagem de isocianato livre para reagir com o polioliol final. No presente caso foi utilizado um pré-polímero sintetizado a partir do difenilmetano diisocianato (MDI) e de um polioliol derivado do óleo da mamona (CLARO NETO, 1997), chamado de pré-polímero 329L.

c) Óleo derivado da mamona

O óleo que se pode obter da mamona é extraído diretamente da semente da planta *Ricinus Communis*, encontrada em regiões tropicais, abundantes no território brasileiro. Este óleo é uma das poucas fontes naturais que podem ser consideradas como compostos puros já que, aproximadamente, noventa por cento de sua composição é de ácido ricinoléico, enquanto os dez por cento restante são constituídos de ácidos graxos não hidroxilados. Este ácido em especial se difere dos demais por apresentar, no carbono 12, um grupo hidroxila em sua estrutura molecular. Tal particularidade faz deste ácido um poliol natural trifuncional. A tabela 2, a seguir, apresenta a composição básica do óleo da mamona.

Tabela 2 – Composição Básica do Óleo de Mamona.

Componente	Percentagem
Ácido ricinoléico	89,5
Ácido palmítico	1,0
Ácido linoleico	4,2
Ácido linolênico	0,3
Ácido dihidroxiesteárico	0,7
Ácido estereático	1,0
Ácido oleico	3,0
Ácido eicosanóico	0,3

Fonte: PLEPLIS (1991)

2.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DAS PLACAS

Existem inúmeros processos de fabricação para materiais compósitos, conforme brevemente descrito na introdução. Alguns deles são de enorme importância para a indústria, como por exemplo: (i) a Centrifugação, que molda formas cilíndricas e ocas. Este sistema é basicamente constituído de um molde giratório, onde o *roving* (fibra) é cortado e depositado diretamente sobre as paredes internas do molde juntamente com a resina e/ou com cargas em camadas sucessivas, que variam de acordo com o projeto (MATTHEWS e RAWLINGS, 1994); (ii) o Enrolamento Filamentar Contínuo, processo de molde aberto automatizado que utiliza um mandril

rotativo como molde usado para fabricar produtos compósitos ocios, geralmente cilíndricos, de alta resistência, tais como postes, tubos, tanques de estocagem e vasos de pressão; (iii) o *Head Liner*, processo que consiste na fabricação de painéis, onde o roving é cortado e depositado em uma esteira contínua cujos filamentos são unidos por um adesivo, sendo estes painéis prensados em moldes aquecidos, juntamente com espumas originando peças para a indústria automobilística; (iv) a Moldagem por Vácuo, utilizada para a produção de grandes peças de compósito através de uma bolsa de vácuo posicionada sobre peça pré-impregnada; (v) a Pultrusão, onde os reforços de fibra de vidro, após serem impregnados com a resina, são puxados através de uma ferramenta aquecida já fabricada no formato da peça final e então curados e cortados.

Além dos processos supracitados, existem muitos outros que dão forma aos compósitos e compõe o elenco de processos de fabricação. Para este trabalho foram escolhidos dois tipos de processos de fabricação de compósitos (*Hand Lay-UP* e *Spray-UP Modificado*) que serão, a seguir, discutidos com mais detalhes. Outro pormenor que deve ser relevado é que ainda não existem processos de fabricação extremamente eficientes para os materiais compósitos como ocorre com aços e outros materiais convencionais para a engenharia, o que encarece a aquisição desta classe para os devidos fins de aplicação.

2.4.1 Laminação a Mão (*Hand Lay-Up*)

Um dos meios de se obter materiais compósitos é o processo de fabricação denominado de laminação a mão, *Hand Lay-UP*. Neste processo, que é um dos mais antigos do mundo por se tratar de um procedimento tão artesanal, fibras do reforço são adicionadas às camadas de matrizes até se atingir a fração volumétrica desejada e depois espera-se pela cura. Logo após, segundo à norma adequada, são definidos e produzidos os *shapes* necessários para as aplicações desejadas com o material. Neste estudo, depois de curado o material compósito, serão produzidos os corpos de prova necessários para os ensaios mecânicos planejados. Em alguns casos, é adicionado ao processo algum tipo de material antiaderente responsável por não

prejudicar a resistência mecânica e a qualidade superficial do material compósito no momento de retirada do molde, conforme ilustrado na figura 8.

No presente caso, o procedimento de *Hand Lay-UP* foi executado da seguinte maneira: o reforço fibra de vidro foi adicionado à matriz de poliuretano derivado do óleo de mamona camada por camada, recortada de acordo com as dimensões do molde de silicone. À cada camada adicionada foi vertida uma quantidade plausível de matriz polimérica a fim de impregnar cada recorte de tecido de fibra de vidro. Posteriormente, o molde com a mistura é levado para dentro de um vaso de pressão sob, aproximadamente, 8 bar por 12 horas com o objetivo de extrair a maior quantidade possível de bolhas no elemento e garantir a precisão dimensional da espessura da placa. Além disso, tarugos de aço são posicionados de forma uniformemente distribuída sobre a placa para contribuir no efeito de homogeneidade dimensional de espessura. Finalmente, foram extraídos os corpos de prova para os ensaios a serem realizados.

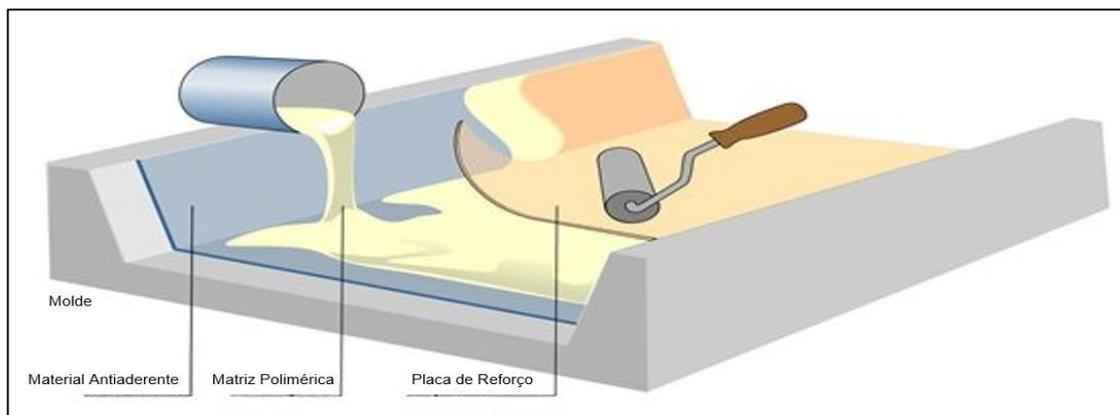


Figura 8 - Representação do processo de *Hand Lay-UP*.

Fonte: STRÖHER (2005).

2.4.2 Laminação Com Spray (*Spray-Up*)

A laminação feita através de spray é um dos processos muito utilizados para se obter grandes placas de materiais compósitos, como na produção de embarcações e caixas d'água. Neste tipo de processo a matriz e o reforço são adicionados por jatos de ar comprimido (Figura 9). A pistola injetora é equipada com

3 entradas, sendo uma para o ar comprimido, outra para a matriz polimérica e a última para o filamento (*roving*). O filamento é triturado na saída da pistola por um dispositivo específico e atinge o molde juntamente com a matriz polimérica. O operador conta, ainda, com o auxílio de um rolete para prensar a mistura e diminuir a incidência de bolhas no interior do material. No caso estudado, o reforço escolhido é um tecido bidimensional de fibra de vidro. Este fato exigiu uma adaptação do processo de *Spray-UP*, que passará a inserir apenas a matriz polimérica no molde, conforme explicado na seção posterior.

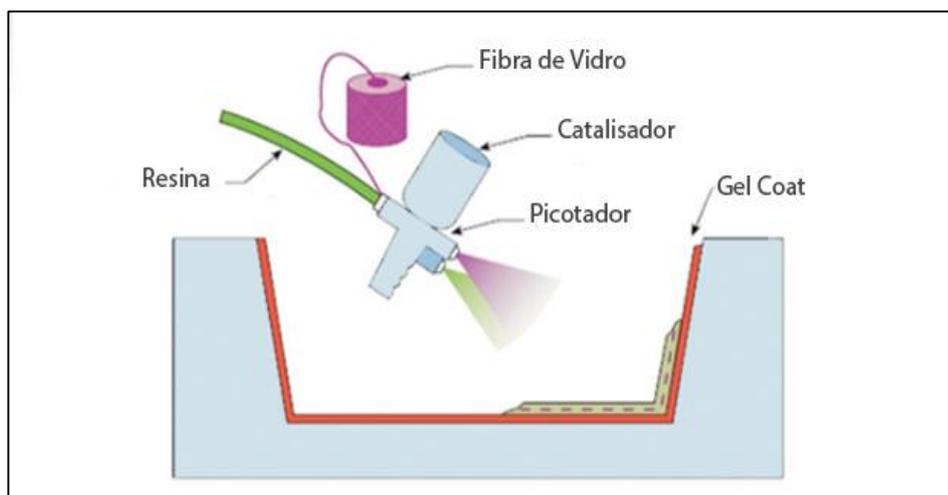


Figura 9 - Representação do processo de *Spray-UP*.

Fonte: STRÖHER (2005).

2.4.3 Laminação Com Spray Modificada (*Spray-Up Modificado*)

Este processo é bem semelhante ao descrito anteriormente. Porém, nesta adaptação, apenas a matriz polimérica é inserida no molde através de pulverização. Para o *Spray-UP* modificado, cada iteração de adição de matriz é feita através de pistola pneumática conectada a uma linha de ar comprimido e a um reservatório contendo o polímero já misturado e em estado de pré-cura. O recorte de reforço é inserido manualmente pelo operador justamente quando a fibra anterior já estiver impregnada. Mais uma vez, algum acessório como o rolete deve ser utilizado para prensar as placas na matriz a fim de reduzir a quantidade de bolhas internas à placa.

A agilidade do operador é, então, muito importante para os casos de utilização deste processo de fabricação. No caso estudado, a pistola foi conectada à

linha de ar comprimido controlado em, aproximadamente, 3 bar de pressão e a matriz polimérica foi misturada e depositada no copo da pistola para que fosse pulverizada juntamente com o ar (Figura 9). Vale ressaltar que este processo de fabricação não é encontrado na literatura, caracterizando uma inovação referente aos processos de fabricação de materiais compósitos.

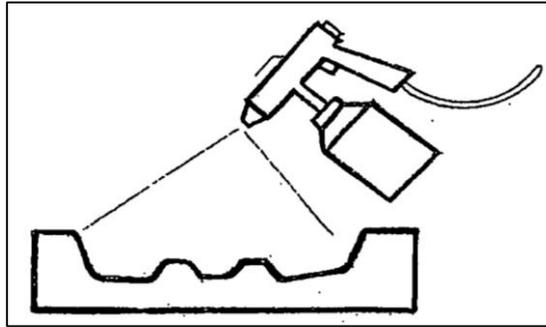


Figura 10 - Representação do processo de *Spray-UP Modificado*.

Fonte: adaptado de STRÖHER (2005).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção de corpos de prova exige um alto grau de confiabilidade, visto que estes devem estar em condições adequadas de homogeneidade e precisão dimensional para que sejam validados os testes com eles realizados. Uma pequena alteração nas dimensões, na espessura ou na quantidade de vazios de um corpo de prova pode implicar em uma análise não-confiável, que exibirá valores não condizentes com a real capacidade mecânica de um material, além de não garantir a repetibilidade das respostas por eles apresentadas. Sendo assim, o desenvolvimento da fabricação dos corpos de prova de poliuretano reforçado com fibra de vidro foi realizado de maneira a atender, da melhor maneira possível, a necessidade de precisão dimensional e homogeneidade requerida para os ensaios.

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Nesta seção serão exibidos, com a maior quantidade possível de pormenores, os elementos utilizados em todo o processo de fabricação dos CDP, desde o molde, para que fiquem explícitos todos os passos e de que forma foram alcançados os resultados intermediários aos ensaios.

3.1.1 Para a Confeção Do Molde

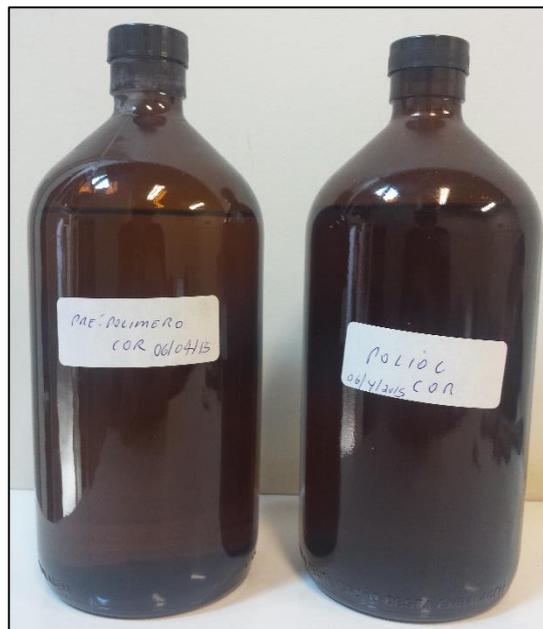
Para a confecção do molde de obtenção de placas de compósito através do processo de *Hand Lay-UP* foi utilizada uma mistura de borracha de silicone Plastil 71-40 RTV que deve ser misturada na razão estequiométrica de 1A:5B, onde B é a borracha de silicone e A é o catalisador.

3.1.2 Poliuretano

A matriz polimérica utilizada no estudo foi o composto derivado do óleo da mamona, o poliuretano. Para sua obtenção foram utilizados os seguintes produtos:

- Pré-polímero 329L;
- Polioli 471.

Os componentes citados acima (descritos na seção 2.3), com seus frascos exibidos na Figura 11, foram cordialmente cedidos pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (QGATP) do Instituto de Química da USP em São Carlos. Para a síntese do poliuretano foi realizada a mistura dos componentes na razão estequiométrica de 1:0,7, ou seja, uma parte de pré-polímero para 0,7 parte de polioli em medidas de massa.



**Figura 11 – Frascos de pré-polímero 329L e polioli 471, respectivamente.
Fonte: Autoria Própria (2015).**

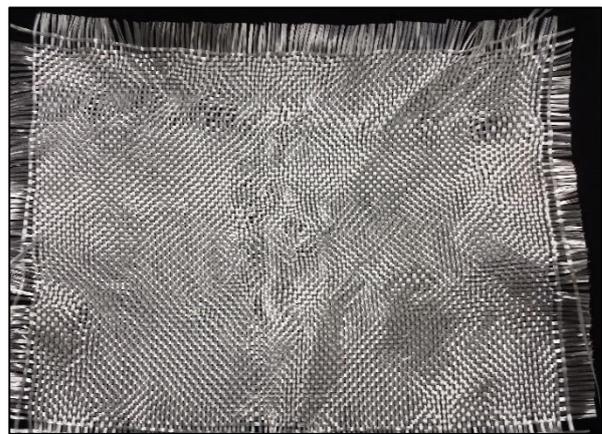
3.1.3 Fibra De Vidro

Como reforço para a matriz, citada no item anterior, foi utilizada a fibra de vidro, aprofundada na seção 2.2.3. Para o presente caso a fibra escolhida foi o tecido de fibra de vidro 330, adquirida junto à distribuidora REDELEASE®, que se trata de um tecido bidirecional de fibra de vidro tipo E, confeccionado para utilização em resinas poliésteres, epóxi, fenólicas ou éster vinílica. O tecido adquirido é armazenado em forma de bobina com 5m de comprimento e largura 0,65m (vide Figura 12). As principais vantagens deste tipo de fibra são: (i) excelente combinação entre as propriedades mecânicas e elétricas do vidro E com a resistência à corrosão de ácidos do vidro E-CR; (ii) o tratamento superficial das fibras de vidro confere boa manuseabilidade e rápida molhagem aos tecidos, além de excelentes propriedades mecânicas. Este tipo de material é largamente utilizado em fabricação de pranchas de surf, caixas d'água, para-choques de automóveis e revestimentos em geral. As especificações exibidas anteriormente foram extraídas do catálogo on-line da fabricante, disponível em sua página na web.

Para o estudo neste projeto o tecido bidirecional de fibra de vidro 330 g/m² foi disposto em uma mesa plana (Figura 12 – a) e recortado em placas retangulares (Figura 12 – b) que foram associadas à matriz no processo de Hand Lay-UP e Spray-UP.



(a)



(b)

Figura 12 – Fibra de vidro: (a) em rolo e (b) recortada.

Fonte: Autoria Própria (2015).

No quadro 1 ACI 440.2R de propriedades das fibras, de 2002, para um reforço de fibra de vidro tipo E com 1mm de espessura e distribuição unidirecional, o módulo de elasticidade E_f [GPa] varia entre 69 e 72. Já para o CEB, de 2001, o mesmo tipo de material apresenta um módulo de elasticidade de 70 [GPa] (Quadro 1).

Tipos de Fibras		Resistência à Tração f_f (NPa)	Módulo de Elasticidade E_f (GPa)	Deformação Última E_{f_u} (%)
CEB (2001)				
Carbono	Alta f_f	3500 a 4800	215 a 235	14,0 a 20,0
	Ultra-alta f_f	3500 a 6000	215 a 235	15,0 a 23,0
	Alto E_f	2500 a 3100	350 a 500	5,0 a 9,0
	Ultra-alto E_f	2100 a 2400	500 a 700	2,0 a 4,0
Vidro	Tipo E	1900 a 3000	70	30,0 a 45,0
	Tipo S	3500 a 4800	85 a 90	45,0 a 55,0
Aramida	Baixo E_f	3500 a 4100	70 a 80	43,0 a 50,0
	Alto E_f	3500 a 4000	115 a 130	25,0 a 35,0
ACI 440.2R (2002)				
Carbono	Alta f_f	3790 a 4820	220 a 240	14,0 (mínimo)
	Ultra-alta f_f	4820 a 6200	220 a 240	15,0 (mínimo)
	Alto E_f	1720 a 3100	340 a 520	5,0 (mínimo)
	Ultra-alto E_f	1380 a 2400	520 a 690	20,0 (mínimo)
Vidro	Tipo E	1860 a 2680	69 a 72	45,0 (mínimo)
	Tipo S	3440 a 4140	86 a 90	54,0 (mínimo)
Aramida	Baixo E_f	3440 a 4140	69 a 83	25,0 (mínimo)
	Alto E_f	3440 a 4140	110 a 124	16,0 (mínimo)

Quadro 1 – Propriedades das fibras unidirecionais.

Fonte: CEB – Comitê Euro-Internacional de Béton (2001); ACI – American Concrete Institute 440.2R (2002).

No presente caso, o estudo foi desenvolvido com tecidos bidirecionais de fibra de vidro, que apresentam módulo de elasticidade E_f variando entre 14 e 35 [GPa], segundo Ana Maria Abreu Jorge Teixeira, professora e chefe do laboratório de construção e concreto da seção de ensino de engenharia de fortificação e construção do Instituto Militar de Engenharia.

3.2 EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS

Levando sempre em consideração a busca por confiabilidade na obtenção de corpos de prova, foi utilizada – durante todos os processos de medição de massa e controle de misturas – uma balança digital da fabricante SHIMADZU modelo BL3200H (Figura 13), que opera entre 0,5g – 3200g e apresenta um erro de 0,1g.

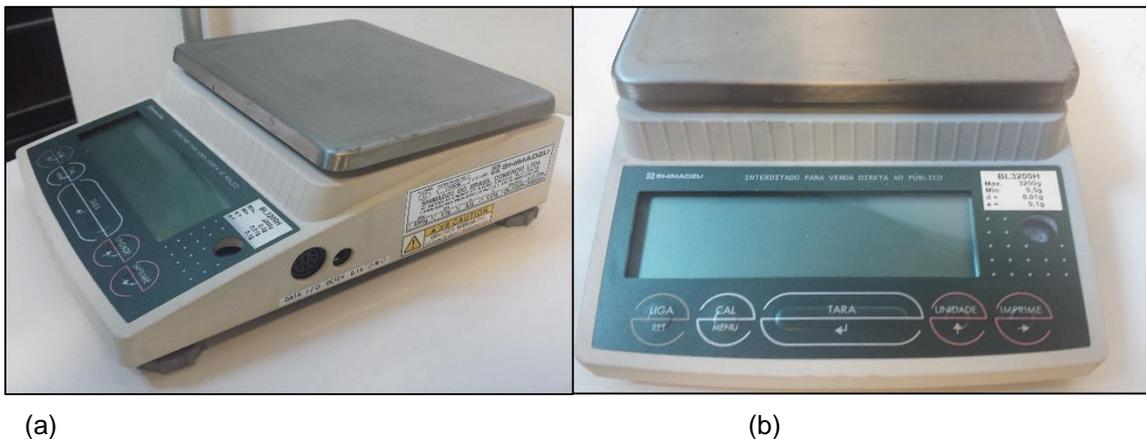


Figura 13 – Balança digital: (a) vista lateral e (b) painel frontal.

Fonte: Autoria Própria (2015).

Para garantir que a espessura de toda a placa de compósito (sua obtenção será descrita na seção 4) fosse homogênea e que ocorresse a menor quantidade de bolhas no seu interior, foi utilizado um vaso de pressão de diâmetro interno de 40 cm e profundidade de 70 cm, vedado por anel de borracha e seu sistema de fechamento se dá através de uma disposição uniforme de 16 parafusos no flange da tampa. Este dispositivo, vide Figura 14, apresenta entrada de linha de ar comprimido no seu topo controlada por uma válvula de restrição. A saída de ar, responsável pelo alívio de pressão ao final do processo de cura da placa, se encontra na parte inferior do vaso cilíndrico e é também constituída por uma válvula de restrição. Vale destacar que este vaso não é uma autoclave, já que não conta com os efeitos do aumento da temperatura durante seu processo de atuação.

Ainda como componentes do vaso de pressão estão presentes o manômetro, indicador da pressão relativa interna atuante, e a válvula de segurança, que deve se abrir se o nível de pressão no interior do vaso ultrapassar uma faixa selecionada pelo usuário. A regulação da pressão máxima admitida na câmara do

vaso é feita através de parafuso de acordo com a necessidade específica para cada aplicação. Ao interior do vaso foi adaptada uma estante para servir de apoio à placa de compósito que deveria passar pelo processo de cura sob pressão, nivelada através de régua com nivelador hidrostático com o intuito de garantir a espessura constante.

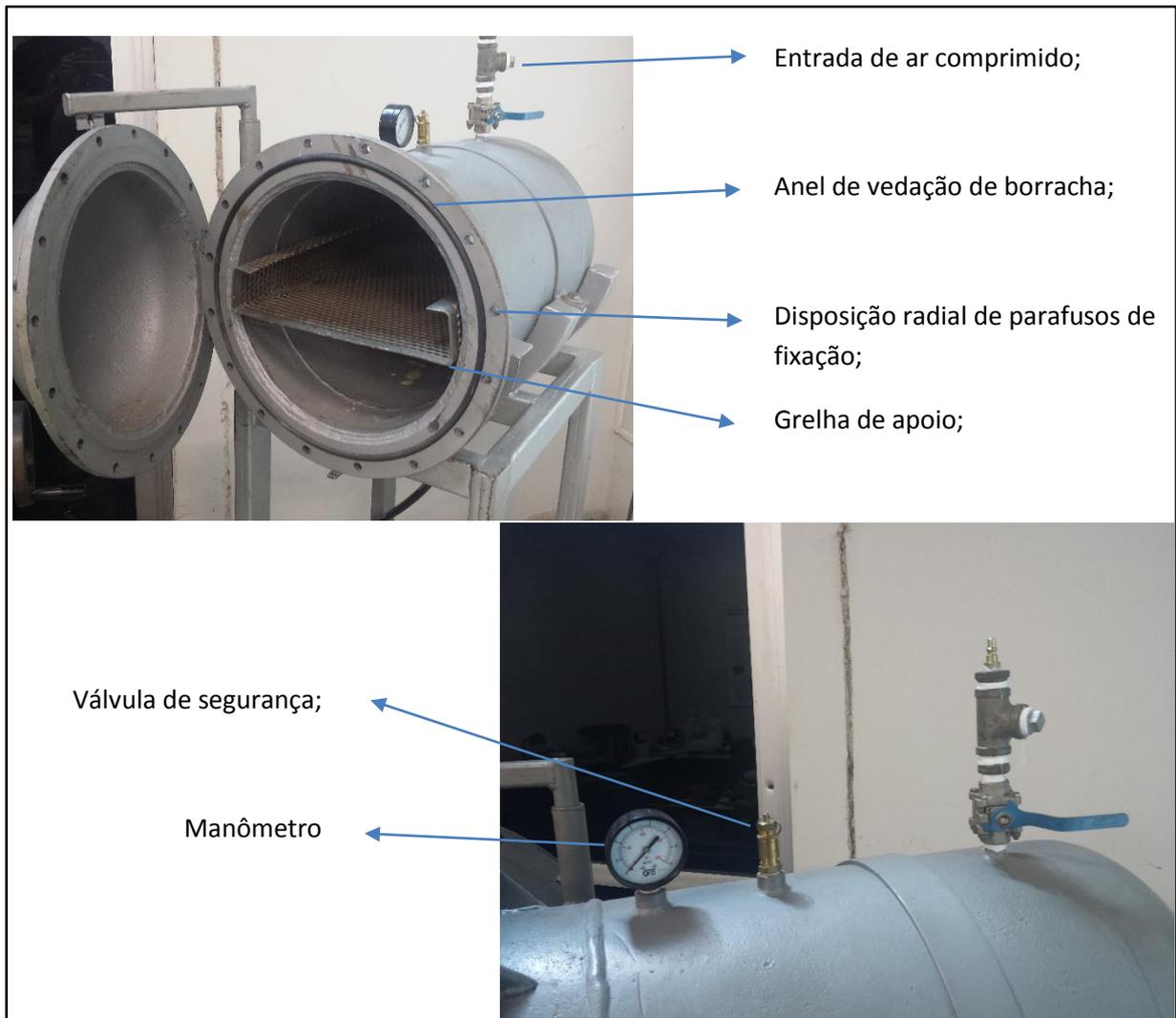


Figura 14 – Partes constituintes do vaso de pressão.

Fonte: Autoria Própria (2015).

Para a alimentação do vaso de pressão, bem como da pistola do *Spray-UP*, foi utilizada, durante todo o estudo, uma linha de ar comprimido de pressão máxima igual a 8 bar, que chegava ao laboratório filtrada e podia ser controlada através de uma válvula de restrição com manômetro de acordo com a necessidade (Figura 15).

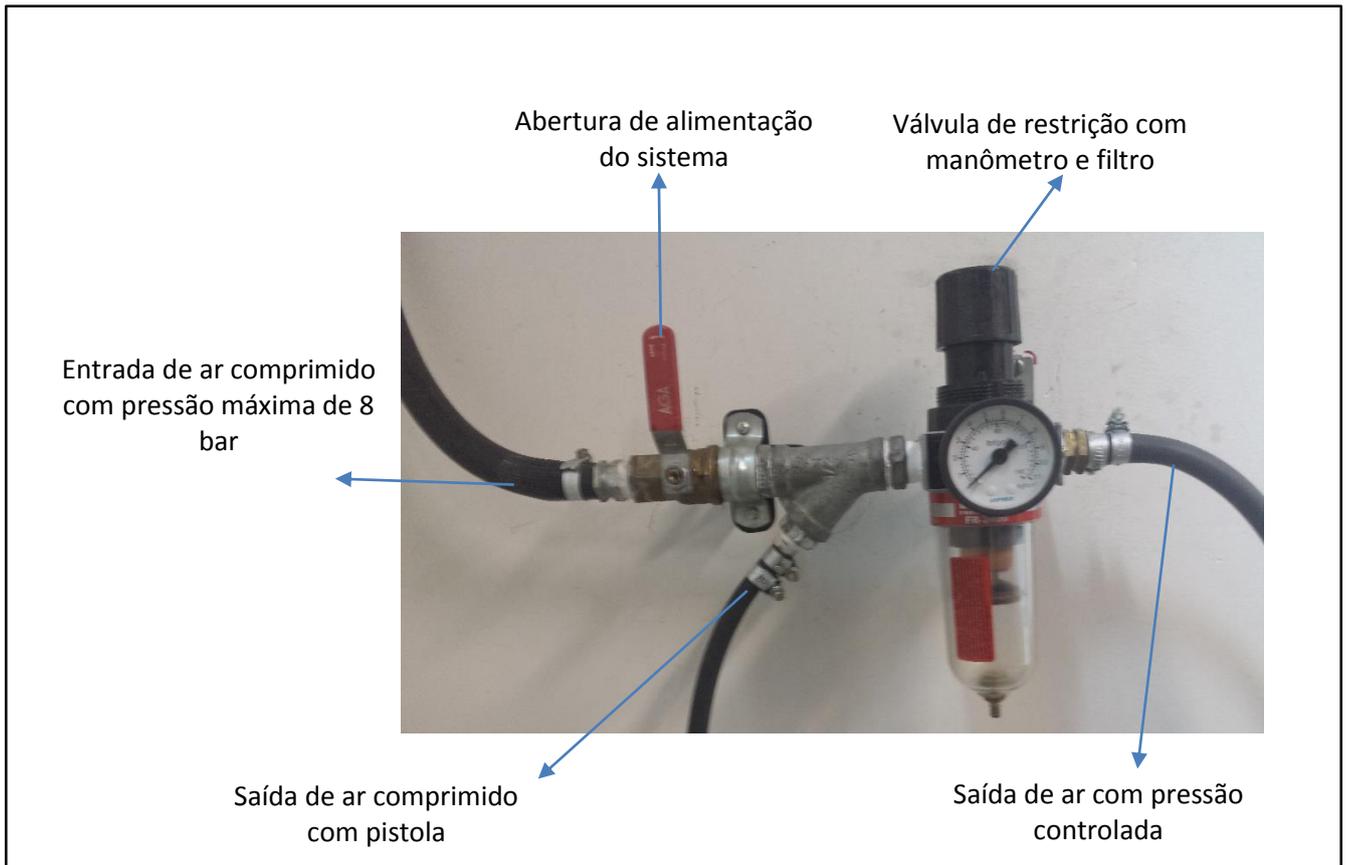


Figura 15 – Alimentação de ar comprimido.

Fonte: Autorial Própria (2015).

Finalmente, para o processo de fabricação *Spray-UP*, fez-se necessária a aquisição de uma pistola de metal, dessas utilizadas para pintura com ar comprimido, equipada com reservatório superior onde foi depositado o polímero já misturado (Figura 16). Na parte traseira da pistola se encontra o conector da mangueira de ar comprimido com regulagem de vazão feita por parafuso. O gatilho deste dispositivo conta com dois estágios: no primeiro apenas o ar passa pelo bico pulverizador, enquanto que no segundo é aberta a válvula superior e o polímero escoia juntamente com o ar. O bico pulverizador possui controle de foco para o fluido dispersado: fechando o bico se obtém um fluxo convergente orientado num único ponto; abrindo o bico obtém-se um fluxo divergente do fluido em forma de névoa.



Figura 16 – Pistola para pulverização *Spray-UP*.

Fonte: Aatoria Própria (2015).

Todos os equipamentos e dispositivos descritos até o momento podem ser encontrados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio. As ferramentas que serão apresentadas agora também estão disponíveis para pesquisas na UTFPR-CP. O processo de serragem das placas de compósito reforçado foi realizado com o auxílio de uma esmerilhadora angular de 4 1/2", potência nominal de 720W, modelo GWS 7115 da fabricante Bosch®. Esta ferramenta foi equipada com o disco de corte Standard Metal Bosch - 7" X 1/8" X 7/8", da mesma fabricante, disponível no laboratório de mecânica.

Depois de ensaiados, os CDP fraturados foram levados à um forno de cerâmica da fabricante Sanchis®, com câmara quente formada de placas de fibras de cerâmica e equipadas com resistores incrustados que irradiam calor de forma homogênea sobre a carga inserida. O programa de seleção de temperaturas é eletrônico e encontra-se em um painel situado ao lado esquerdo da porta do forno (Figura 17).



(a)



(b)

Figura 17 – Forno de indução utilizado: (a) parte interna e (b) painel de controle de temperatura.

Fonte: Autoria Própria (2015).

4. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como já estabelecido anteriormente, dois processos de fabricação foram escolhidos para a confecção dos CDP de tração. São eles: *Hand Lay-UP* e *Spray-UP Modificado*. A determinação dos métodos de produção aconteceu de acordo com a disponibilidade dos dispositivos necessários para a execução e a facilidade de operação, ou seja, não seria necessário adquirir aparelhos ou equipamentos de produção específicos como, por exemplo, uma pultrusora ou uma centrífuga, como ocorre nos casos de pultrusão e centrifugação.

4.1 A PARTIR DO PROCESSO *HAND LAY-UP*

O processo de laminação a mão exige um molde, conforme mostrado na figura 7. Para o desenvolvimento do molde foi utilizado o silicone descrito na seção 3.1.1. O quadro 2, abaixo, indica a quantidade inserida de cada elemento formador do silicone:

Produto	Descrição	Massa (g)	Partes na Mistura
1. Silicone	Plastil 71-40 RTV parte B	600	5
2. Catalisador	Plastil 71-40 RTV parte A	120	1

Quadro 2 – Produtos da mistura para produção do molde de silicone.

Fonte: A autoria Própria.

O silicone foi vertido no recipiente plástico posicionado sobre a balança digital. Após ser alcançada a massa de silicone adequada à mistura foi adicionado o catalisador, compondo a massa total do molde. Com o auxílio de um bastão plástico, toda a composição foi homogeneizada através de agitação manual e, então, vertida sobre uma superfície de vidro que estava limitada por barras de alumínio que formavam o perfil do molde. Finalmente, toda a mistura foi conduzida ao vaso de pressão para passar pelo processo de cura por 8 horas sob 3 bar de pressão. A Figura 18 traz as dimensões internas do molde, que serão exatamente as mesmas dimensões da placa de compósito obtida através dele. Estas dimensões não foram

escolhidas de forma arbitrária, mas, sim, através da escolha das medidas ótimas de recorte para obtenção do maior número possível de placas para cada rolo comprado de fibra de vidro. Tais dimensões são 325 mm de comprimento por 255 mm de largura. Além disso, outro fator considerado foi a quantidade de CDP que seria possível extrair de cada recorte. A equipe de pesquisa decidiu por oito corpos de prova por placa de compósito, porém os resultados obtidos não atenderam a essa expectativa (mais detalhes na seção de resultados e discussões).

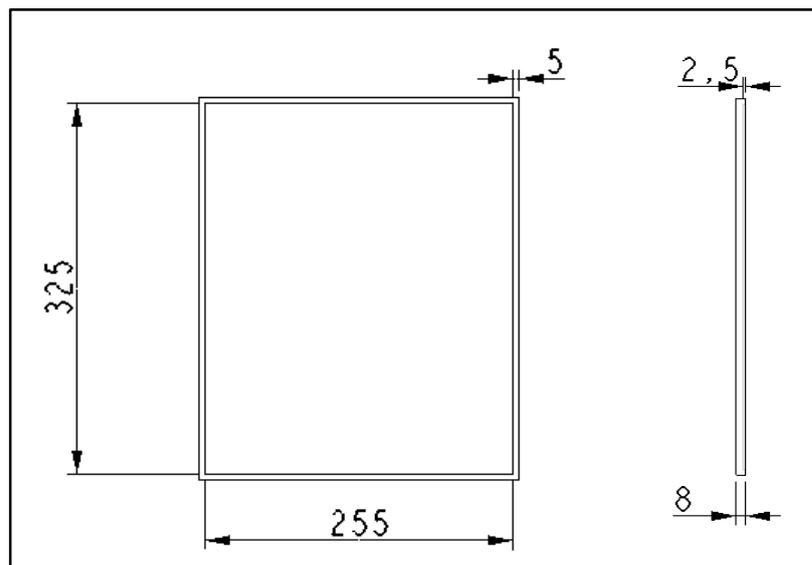


Figura 18 – Dimensões do Molde de Silicone.

Fonte: Autoria Própria (2015).

Com o molde pronto é possível aplicar as etapas de fabricação da placa de compósito através do *Hand Lay-UP*. A primeira delas é, certamente, a mais simples: recortar a manta na dimensão definida como ótima. Para o recorte da manta foram definidos dois gabaritos de alumínio com as dimensões de comprimento e largura (325 x 255 mm, respectivamente) responsáveis por agilizar o processo. Com o auxílio de uma tesoura comum, o tecido foi recortado respeitando as restrições de dimensões. Um cuidado muito especial foi tomado durante esta primeira etapa: sempre foram utilizadas luvas para o manuseio das fibras de vidro. Este adendo deve ser respeitado porque o contato da pele com a fibra de vidro provoca uma irritação considerável naquela região. Além disso, o suor presente na pele do operador pode comprometer o resultado da placa, já que o nível de umidade daquele recorte estará muito alto e a gordura humana pode implicar em imperfeições na interface fibra-matriz. Com os recortes de fibra de vidro em mãos passamos à segunda etapa da fabricação.

Na segunda etapa, são adicionados a um recipiente plástico o pré-polímero e o polioliol na razão estequiométrica de 1:0,7, respectivamente. Durante dois minutos é necessário agitar a mistura para que seja alcançada a homogeneização. Neste ponto do processo de produção vale ressaltar um conceito muito importante, o *pot life*. Este termo é o tempo necessário para que a matriz produzida alcance valores muito altos de viscosidade e se torne inadequada ao processamento. Em outras palavras, o *pot life* é quanto tempo o operador tem para, a partir do início da mistura, impregnar todo o molde e levá-lo ao vaso de pressão sem que ele se torne um gel muito viscoso e impossível de ser espalhado. No estudo em questão, a matriz polimérica poliuretano derivado do óleo da mamona possui *pot life* de aproximadamente 20 minutos.

Dessa maneira, o operador responsável pela laminação tem 20 minutos para a realização do processo, intercalando os tecidos de fibra de vidro recortados até atingir o limite superior do molde. Este procedimento constitui a etapa 3. Com o molde vazio, uma pequena quantidade de matriz é vertida e espalhada na superfície interna. Logo após é adicionada, manualmente, a primeira lâmina recortada de fibra de vidro. Verte-se, então, uma quantidade semelhante à primeira sobre a lâmina recortada espalhando-a de forma a molhar todo o recorte. Adiciona-se mais um pedaço de tecido de fibra de vidro, que também deve ser impregnado por matriz. O processo continua até que o limite superior seja alcançado, ou seja, quando todo o molde estiver preenchido de matriz e reforço, cada um à sua camada.

Na quarta etapa o molde preenchido é levado ao vaso de pressão para sofrer o processo de cura *under pressure*. O molde de silicone, apoiado por uma chapa de sustentação, é posicionado sobre a grelha do vaso e nivelado com o auxílio da régua equipada com nível hidrostático. Sobre o molde é colocada uma folha de plástico espessa para que a superfície externa da placa apresente baixa rugosidade. Aplica-se, então, uma carga distribuída com pequenas barras de aço para distribuir a tensão sobre todo o conteúdo do molde, garantindo uma melhor homogeneidade da mistura da matriz e, também, que a espessura final da placa seja a mais constante possível. Finalmente, a porta do vaso é lacrada e o dispositivo alimentado pelo ar até atingir o valor de 8 bar. O molde com o novo material aguarda por 12 horas até ser retirado.

A quinta e última etapa do processo de obtenção de CDP por *Hand Lay-UP* é composta pela retirada do molde do vaso de pressão, após 12 horas de cura, e pelo recorte da placa nas dimensões dos corpos de prova. Antes de ser recortada, a placa

de compósito obtida passa por uma pré-análise, onde são avaliadas a homogeneidade (quantidade de bolhas ou vazios perceptíveis a olho nu) e a estabilidade da espessura, ou seja, se a placa possui valores próximos de espessura durante toda a sua seção transversal. Passando por este teste, a placa é recortada pela esmerilhadora nas dimensões do corpo de prova, segundo a norma ASTM D3039. O CDP de tração normalizado é ilustrado na Figura 19, apresentando 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2,5 mm de espessura.

Dois adendos devem ser salientados neste ponto do trabalho. Para adquirir habilidade sobre o processo, já que o mesmo se trata de um procedimento manual, muitas placas foram desenvolvidas utilizando a matriz epóxi. Assim, o operador desenvolvia sua habilidade com o processo de laminação a mão e ao mesmo tempo economizava a matriz polimérica derivada do óleo da mamona. A segunda ressalva é que, com o desenrolar das atividades, foi detectada a vantagem de se utilizar o *Hand Lay-UP* sem molde, apenas impregnando as mantas sem um limitador lateral. A vantagem percebida foi na espessura. Sem o limitador lateral (parede do molde) a matriz pode fluir livremente sob pressão. Com a parede do molde impedindo este movimento, a matriz tende a forçar o reforço para cima, resultando numa disposição irregular de reforço no sanduíche formado. Duas placas de compósito foram feitas utilizando esse modo alternativo de *Hand Lay-UP*.

4.2 A PARTIR DO PROCESSO *SPRAY-UP*

O processo de laminação através de pulverização *Spray-UP* é muito semelhante ao de obtenção por laminação a mão, descrito anteriormente. A principal diferença é que a adição da matriz polimérica na etapa 3 é feita através de pistola alimentada por ar comprimido. Dessa maneira, os tecidos recortados são impregnados através de jato de polímero misturado ao ar comprimido. A matriz polimérica já misturada é colocada no copo superior da pistola para ser pulverizada no molde. Um detalhe importante aqui observado é o fato de ser extremamente necessário utilizar máscaras para proteger os pulmões, visto que o polímero pulverizado pode ser facilmente aspirado pelo operador da pistola. Ainda como EPI, é

aconselhável a utilização de óculos pois o fluido pulverizado provoca irritação aguda nos olhos.

A tabela 3 traz os detalhes de cada placa de compósito produzida através da técnica de laminação a mão e de pulverização. É válido enfatizar que a coluna referente à fração mássica diz respeito à mistura inicial, ou seja, ainda não é descrita a fração mássica de cada corpo de prova dada pela massa do reforço dividida pela massa total do compósito.

Tabela 3 – Catalogação das Placas de Compósito Obtidas por *Hand Lay-UP*

Nº	Tipo de Laminação	U.R. (%)	Temperatura (°C)	Massa Pré-Polímero (g)	Massa de Polioliol (g)	Massa da Fibra de Vidro (g)	Fração Mássica da Mistura (%)
1	<i>Hand Lay-UP</i>	77	24,5	185	130	190	40,00
2	<i>Hand Lay-UP</i>	70	23,1	185	130	184,3	36,91
3	<i>Hand Lay-UP</i>	68	23,7	172,8	120,3	190,1	39,34
4	<i>Hand Lay-UP</i>	66	25,7	185	130	190,5	37,68
5	<i>Hand Lay-UP</i>	76	25,0	185	130	187,6	37,33
6	<i>Hand Lay-UP*</i>	63	24,7	65,3	44,5	162	59,60
7	<i>Hand Lay-UP*</i>	59	22,8	67	45,1	162,1	59,11
8	<i>Spray-UP*</i>	60	25,4	117,6	82,4	253,3	55,87
9	<i>Spray-UP*</i>	61	25,3	99,3	69,5	251	59,79

Fonte: Aatoria Própria (2015).

O sobreposto que acompanha o processo de *Hand Lay-UP* nas placas 6 e 7 são referentes ao processo sem molde. Ressalta-se, também, que o processo utilizado para *Spray-UP* é o modificado, onde apenas a matriz polimérica é inserida através de pulverização.

Os valores em massa de pré-polímero e polioliol foram acrescidos em 10% para que as perdas no vasilhame plástico onde ocorria a mistura fossem consideradas e compensadas. Por exemplo, a soma das massas de polioliol e pré-polímero na placa 1 é igual a 315 g. Como procura-se uma fração mássica inicial de 40%, seriam necessários 210 g de fibra de vidro para a obtenção deste valor percentual. Porém, empiricamente foi percebido que cerca de 10% da mistura da matriz polimérica ficava impregnada no recipiente de mistura, reduzindo a massa total de matriz polimérica

inserida no molde para 285 g. Agora, a massa de reforço necessária para que seja garantida a razão de 40% é de 190 g, conforme mostrada na sétima coluna da tabela 3. Todas as placas foram levadas ao vaso de pressão e ali foram mantidas por 12 horas sob, aproximadamente, 7 bar de pressão.

Retiradas as placas do vaso de pressão, tanto para o processo de laminação manual como para o processo de laminação por pulverização, as mesmas eram analisadas e classificadas como aptas ou não a fornecerem corpos de prova. Tais análises levavam em consideração, substancialmente, a homogeneidade alcançada e a concordância dimensional da espessura. Na seção 5 uma abordagem mais aprofundada é feita acerca da qualidade da placa obtida. Após a classificação das placas, passa-se a fase de desenho dos CDP normalizados (Figura 19) sobre a superfície do material e corte dos mesmos através da esmerilhadora. Para o teste com materiais compósitos reforçados por tecidos bidimensionais de reforço (0-90°), a norma ASTM D3039 exige o dimensionamento padrão de 250 mm de comprimento, 25 mm de largura e 2,5 mm de espessura.

Finalmente, os corpos de prova podem ser lixados e ajustados para os ensaios de tração, sendo todos eles catalogados.

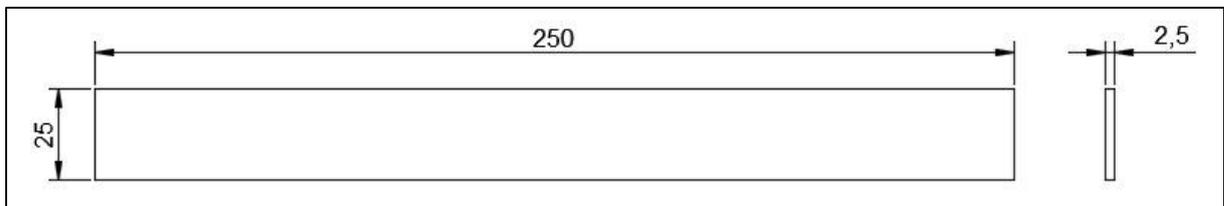


Figura 19 – Dimensões do Corpo de Prova de Tração.

Fonte: Autoria Própria (2015).

Os corpos de prova são, então, entregues para os posteriores ensaios de tração. Depois de realizados os ensaios, os CDP retornam para o laboratório para que seja feita a degradação no forno de indução e medida a massa de fibra de vidro restante com o objetivo de levantar a fração volumétrica de cada CDP e comparar àquela inserida no momento da mistura. Essa degradação ocorre em poucos segundos, a aproximadamente 600 °C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão avaliados os resultados obtidos nas placas e nos processos utilizados para a obtenção das mesmas. Além disso, alguns aspectos teóricos como fração volumétrica e limitação da faixa de temperatura de utilização do compósito serão abordados.

5.1 ACERCA DO PROCESSO HAND LAY-UP

Como ilustrado na tabela 3, as placas de compósito de número 1 até 5 foram obtidas através do processo de *Hand Lay-UP*. Depois de retiradas dos vasos, tais placas foram analisadas visualmente para a verificação da ocorrência de bolhas interiores, resultado da ruim polimerização que ocorre no vaso de pressão quando os critérios de pressão e de mistura não estão de acordo com o adequado. Através desta inspeção um detalhe saltou aos olhos dos operadores. A maior ocorrência de falhas de homogeneização (bolhas ou vazios) estava próxima às laterais das placas, ou seja, na região onde atuava a parede do molde como limitador (Figura 20). Dessa maneira, procurou-se retirar das placas estas áreas com má formação e aproveitar apenas as áreas onde a homogeneização estava garantida. Com isso, uma boa parte da placa foi inutilizada devido à presença de vazios resultantes das bolhas de ar aprisionadas nas lâminas.

Com o procedimento citado, foram extraídos 21 CDP para serem levados aos ensaios de tração (alguns deles são mostrados na Figura 21). Estes corpos de prova foram todos catalogados na tabela 4, que avalia as principais características de cada um deles, tanto geométricas quanto nos critérios de mistura.



Figura 20 – Placa de Compósito Obtida por *Hand Lay-UP*.

Fonte: Aatoria Própria (2015).

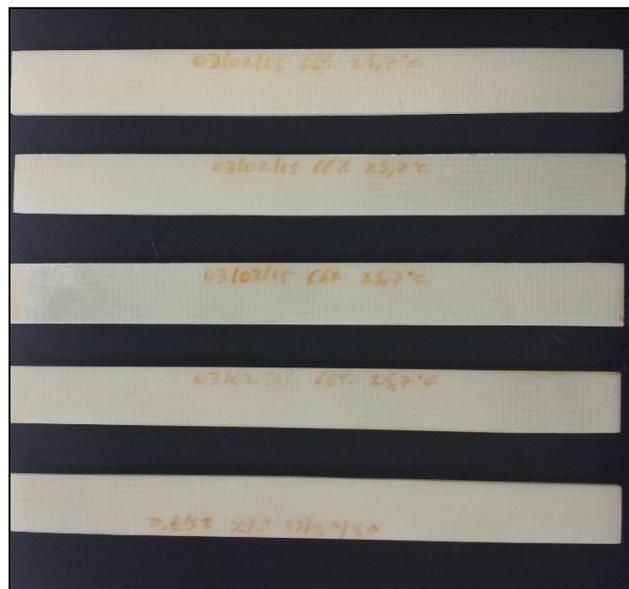


Figura 21 – CDP Obtidos por *Hand Lay-UP*.

Fonte: Aatoria Própria (2015).

Na tabela 4 são dadas as principais características dos corpos de prova, onde t refere-se à espessura, w à largura e o subscrito m aos valores médios encontrados. Foram levantados valores de espessura e largura em 3 pontos do CDP para que pudesse ser calculado o valor médio de tal dimensão. A área calculada é referente à seção transversal do CDP, considerando os valores médios de largura e espessura.

Tabela 4 – Catalogação dos CDP Obtidos por *Hand Lay-UP* – Características Geométricas

Nº	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)	t_m (mm)	ω_1 (mm)	ω_2 (mm)	ω_3 (mm)	ω_m (mm)	Área (mm ²)	Volume (m ³)
1	4,50	4,30	3,75	4,18	23,65	24,20	24,80	24,22	101,31	2,53266E-05
2	4,40	4,20	4,35	4,32	22,00	22,75	22,90	22,55	97,34	2,43352E-05
3	4,10	4,10	4,30	4,17	25,30	25,25	25,20	25,25	105,21	2,63021E-05
4	3,85	4,80	4,45	4,37	25,60	25,60	25,05	25,42	110,99	2,77465E-05
5	4,65	4,50	4,20	4,45	24,60	25,15	25,15	24,97	111,10	2,77754E-05
6	3,85	4,80	4,40	4,35	25,15	25,20	25,05	25,13	109,33	2,73325E-05
7	4,05	4,25	3,75	4,02	25,30	24,75	24,90	24,98	100,35	2,50874E-05
8	3,50	5,00	3,15	3,88	25,15	25,75	25,35	25,42	98,70	2,46753E-05
9	3,60	4,10	4,30	4,00	25,50	26,85	25,85	26,07	104,27	2,60667E-05
10	4,40	4,05	4,15	4,20	24,90	25,00	25,60	25,17	105,70	0,000026425
11	4,15	4,65	4,65	4,48	24,60	25,15	25,30	25,02	112,16	2,80395E-05
12	4,60	4,40	4,20	4,40	25,90	25,45	23,95	25,10	110,44	0,00002761
13	3,70	3,55	3,90	3,72	23,60	23,50	23,60	23,57	87,59	2,18974E-05
14	4,00	3,70	3,80	3,83	23,35	23,50	23,00	23,28	89,25	2,23132E-05
15	4,00	3,60	3,65	3,75	23,65	23,50	23,85	23,67	88,75	2,21875E-05
16	3,85	3,80	4,15	3,93	22,90	22,65	22,50	22,68	89,22	2,23053E-05
17	3,90	3,80	4,00	3,90	23,35	23,55	23,90	23,60	92,04	0,00002301
18	4,00	3,55	3,75	3,77	23,55	23,80	24,00	23,78	89,58	2,2396E-05
19	3,90	3,65	3,75	3,77	23,75	23,70	23,50	23,65	89,08	2,22704E-05
20	3,80	3,60	4,20	3,87	23,35	23,55	23,75	23,55	91,06	0,000022765
21	3,85	3,75	4,15	3,92	23,50	25,40	25,40	24,77	97,00	2,42507E-05

Fonte: Autoria Própria (2015).

a) Análise da espessura do corpo de prova

Como regido pela norma ASTM D3039, o corpo de prova deveria apresentar 2,5 mm de espessura para serem válidos os ensaios. A tabela 4 ilustra a ineficiência do processo de *Hand Lay-UP* para o controle da espessura. Os valores médios de espessura tabulados ultrapassaram, em todos os casos, o valor descrito pela norma, mesmo o molde apresentando 2,5 mm de altura. Para corrigir este problema, foi testado usinar os CDP até atingir o valor desejado e, então levá-los aos ensaios. Porém, a usinagem acabou descaracterizando o compósito pois, para regular a espessura em 2,5 mm, a fresa precisava invadir uma quantidade considerável do

CDP, atingindo a fibra, que ficava exposta e não impregnada por uma matriz polimérica.

O fato da espessura não atender às normas no processo de *Hand Lay-UP* deve-se ao molde exercer uma força na mistura quando dentro do vaso de pressão e também ao fato de a pressão ser insuficiente para a remoção do excesso de matriz. Esta força exercida pelo molde faz com que a mistura seja comprimida e, conseqüentemente, elevada, aumentando a espessura. Além de comprometer a precisão dimensional, esta força exercida pelo molde também desregula a orientação da fibra de vidro (que já apresenta um erro considerável devido ao processo manual de fabricação), o que prejudica a homogeneização do material compósito, uma vez que a fibra desorientada altera os resultados mecânicos do material.

Como os resultados dos ensaios de tração podem ser interpretados levando em consideração a área da seção transversal do corpo de prova, foi decidido que, mesmo inadequados, os CDP seriam ensaiados. Sendo assim, todos os 21 corpos de prova foram levados aos ensaios de tração.

Como citado anteriormente, duas placas foram produzidas sem o molde, apenas intercalando fibra e matriz. Estas placas apresentaram resultados excelentes no quesito precisão dimensional de espessura. A sucessão de tecidos de reforço foi feita até que se atingisse a espessura normalizada do CDP (2,5 mm). Como não existiam moldes para desorganizar as fibras e forçar o crescimento vertical do volume dentro do vaso de pressão, a espessura pôde se manter constante dentro da especificação. Infelizmente, as placas de compósito obtidas através do *Hand Lay-UP* modificado foram recortadas e ensaiadas nos laboratórios da USP, em São Carlos, com a supervisão do orientador deste trabalho, Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa, ainda não publicado. Como prévia dos resultados pode-se afirmar que os CDP produzidos sem molde atingiram bom nível de confiabilidade.

b) Análise da largura do corpo de prova

Como o CDP foi retirado diretamente da placa de compósito utilizando a esmerilhadora, sua dimensão referente à largura atende à norma. A norma ASTM D3039 sugere que a largura apresente no máximo 1% de imprecisão. Porém, o erro verificado é muito maior (o maior erro encontrado foi de 9,8% no CDP 2) e corresponde exatamente ao fato do processo ser totalmente manual, ou seja, a precisão e a

habilidade na operação da ferramenta por parte do operador é determinante para a qualidade dimensional da largura do CDP. Mesmo assim, como os valores para a resistência à tração são dados com relação a área, é possível utilizar estes CDP e depois compensar os valores insatisfatórios de medidas. Em outras palavras, um maior nível de força suportado pelo CDP é compensado pela maior área de seção transversal ocorrido pela medida da largura maior que a regida pela norma. A satisfação quanto à medida da largura dos CDP se deu tanto no processo de *Hand Lay-UP* quanto no processo de *Hand Lay-UP* sem molde.

c) Análise da fração mássica e volumétrica do CDP

Este item analisado é de extrema importância para a validação de um processo de fabricação pois indica se a mistura mantém as proporções de entrada dos constituintes até o momento da aplicação. Em outras palavras, criar uma placa de compósito onde 40% da massa é de fibra de vidro não quer dizer que 40% da massa do corpo de prova obtido desta placa seja de fibra de vidro. Levantar, após o ensaio destrutivo de tração, quanto em massa de cada elemento compõe o CDP ensaiado é de grande importância para a validação dos valores de resistência mecânica obtidos.

Sendo assim, os corpos de prova foram levados ao forno e carbonizados, restando apenas a parte de reforço do mesmo. Como é conhecida a massa inicial de cada um deles, pode-se mensurar a massa de fibra restante e avaliar a fração mássica daquele componente. Ainda, através de utilização das equações 12 e 13, podemos levantar o volume de fibra e matriz, descobrindo a fração volumétrica do compósito. A utilização destas equações permite, também, descobrir qual é o volume de vazios para cada CDP, uma vez que é possível calcular o volume inicial do corpo de prova e subtraí-lo do somatório de massas de matriz e reforço.

Matematicamente,

$$\text{volume de vazio} = v_v = v_c - (v_f + v_m) \quad (15)$$

A tabela 5 organiza os valores de massa e exhibe o resultado dos cálculos convenientes ao CDP.

Tabela 5 – Catalogação dos CDP Obtidos por *Hand Lay-UP* – Características Físicas

Nº	Massa CDP (g)	Massa da fibra (g)	$\frac{w_f}{w_c}$	ρ (kg/m ³)	$\frac{v_f}{v_c}$	$\frac{v_m}{v_c}$	$\frac{v_v}{v_c}$
1	34,83	13,79	39,59231	1375,23409	0,209418032	0,748191735	0,042390233
2	32,90	12,39	37,65957	1351,95062	0,195822635	0,759057378	0,045119987
3	36,32	13,43	36,97687	1380,87921	0,196386954	0,783789891	0,019823209
4	38,51	14,84	38,53545	1387,92141	0,205708345	0,768304947	0,025986708
5	37,14	13,72	36,94135	1337,15366	0,189985384	0,759399527	0,050615093
6	37,50	14,15	37,73333	1371,99305	0,199114889	0,769398867	0,031486244
7	35,57	14,03	39,44335	1417,84149	0,215093923	0,773274217	0,011631865
8	37,59	15,00	39,90423	1523,38282	0,233805454	0,824511985	0,058317445
9	35,24	12,39	35,15891	1351,91816	0,182815267	0,789486523	0,027698211
10	36,41	13,43	36,88547	1377,86187	0,195473401	0,783211477	0,021315122
11	36,24	14,84	40,94923	1292,46178	0,203558889	0,687364831	0,109076285
12	35,50	13,72	38,64789	1285,76603	0,191123617	0,710453214	0,098423169
13	31,67	12,98	40,99568	1446,29345	0,228045275	0,768571145	0,003383584
14	31,27	12,98	41,52009	1401,41297	0,223795376	0,738102732	0,038101892
15	32,35	13,20	40,80371	1458,02817	0,228819068	0,777328198	0,00614727
16	30,15	12,60	41,79104	1351,69803	0,217264896	0,708620153	0,074114952
17	32,50	13,15	40,46154	1412,42938	0,219804099	0,757370465	0,022825436
18	28,38	12,98	45,74818	1267,19214	0,222968206	0,619157021	0,157874774
19	31,94	12,98	40,64913	1434,18965	0,224225252	0,766615588	0,009159163
20	31,80	12,98	40,82809	1396,88118	0,219353821	0,744421746	0,036224432
21	35,45	12,98	36,62435	1461,81381	0,205915333	0,834369608	0,040284945

Fonte: Autoria Própria (2015).

A terceira coluna da tabela 5 refere-se à massa de fibra de vidro de cada CDP que teve sua matriz degradada no forno. Na quarta coluna, esta massa é utilizada para o cálculo da fração mássica das fibras, apenas dividindo-a pela massa total do CDP inicial. A quinta coluna traz consigo os valores da massa específica do material, calculada diretamente através da divisão da massa do CDP pelo seu volume total. Conhecendo a massa de matriz e de reforço, separadamente, podemos desmembrar as equações 8 e 9, descobrir os volumes referentes a cada um dos elementos e, finalmente, levantar a fração volumétrica de fibra e matriz, permitindo calcular a quantidade de vazios presente em cada CDP.

Analisando a fração mássica de cada CDP, pode-se garantir que existe uma relação de confiabilidade de 98,55% de cada CDP apresentar a mesma fração mássica da sua placa de origem.

$$1 - \frac{\left(40 - \frac{\sum_1^n w_f}{w_c}\right)}{40} = 0,9855$$

O fator limitador n do somatório acima refere-se à quantidade de corpos de prova estudados, no caso 21. Deste modo, pode-se dizer que o processo de *Hand Lay-UP* garante que o CDP mantenha a constituição da placa, ou seja, a mistura inicial será ensaiada sem maiores interferências.

Para o caso da fração volumétrica vale a mesma linha de raciocínio. Como as massas específicas de fibra e matriz são diferentes entre si, é necessário encontrar uma relação entre massa e volume de cada componente no interior do CDP. No caso da fibra de vidro, nota-se que para uma composição média em massa de 40% tem-se uma composição média em volume de 20%. Em outras palavras, 20% do volume do CDP carrega 40% de sua massa. Ainda se tratando de fração volumétrica, percebe-se que quando se soma a fração de matriz e de fibra de vidro o resultado não é exatamente um. Isso se dá porque existem, por menores que sejam, vazios no interior do CDP. O volume teórico calculado através das dimensões do CDP é ligeiramente maior. Sendo assim, subtrai-se desse valor as frações volumétricas de matriz e reforço somadas, resultando no volume do vazio (equação 15). Olhando para a tabela percebe-se que o *Hand Lay-UP* produz bons CDP, sólidos e com poucos vazios. Cerca de 4%, em média, do volume dos CDP são vazios. Apenas o corpo número 12 foge consideravelmente desta média, apresentando 9,8% de vazio em seu interior.

Todas as considerações feitas valem para o processo de fabricação *Hand Lay-UP* sem molde.

SEZEFREDO (2015) apresenta os resultados do ensaio de tração (tabela 6), ASTM 3039, dos 7 primeiros CDP, obtidos através da primeira placa de compósito feita por *Hand Lay-UP*. Percebe-se que os resultados foram muito satisfatórios para o módulo de elasticidade.

Tabela 6 – Resultados Mecânicos dos CDP Obtidos por *Hand Lay-UP*

CDP	Módulo de Elasticidade Teórico	Módulo de Elasticidade Empírico
1	4,48	4,62
2	4,32	4,61
3	4,61	5,21
4	4,82	4,49
5	4,75	4,86
6	4,64	4,14
7	4,55	4,41
Média	4,60	4,62

Fonte: SEZEFREDO (2015).

É notável, também, que o módulo de elasticidade empírico é ligeiramente maior que o encontrado teoricamente. Isso ocorre, pois, a área média da seção transversal não é constante e, na maioria dos casos, apresenta pontos onde o valor da área é maior do que a área média. Nestes pontos a resistência à tração é maior, já que a área disponível para a distribuição da tensão é maior do que se todo o perfil possuísse a área média. Mesmo assim, a diferença calculada está na casa de 0,44% de erro.

Logo, os corpos de prova ensaiados se comportaram como previu a regra da mistura que calcula os valores teóricos para a tensão.

5.2 ACERCA DO PROCESSO SPRAY-UP MODIFICADO

Através do processo pulverizado foram fabricadas duas placas de compósito. A primeira delas apresentou resultados excelentes quanto a sua geometria, ou seja, apresentaram resultados praticamente constantes para a espessura. Mais uma vez, a placa obtida foi levada aos laboratórios da USP de São Carlos para ensaios e análises, que ainda não foram publicados. Uma prévia demonstrada pelo orientador, Dr. Romeu Rony Cavalcante da Costa, traz que a placa mostrou porções onde houve uma boa impregnação e outras que não foram bem impregnadas. Com isso, pode-se inferir:

- 1- A quantidade de matriz foi insuficiente para a completa impregnação das fibras;
- 2- Com o aumento da viscosidade a homogeneização da camada de matriz sobre o tecido de fibra de vidro ficou deficitária. Ainda, a pressão também não foi suficiente para que a matriz fosse forçada a penetrar em todas as camadas de reforço inseridas.

Já para a segunda placa produzida, que foi inteiramente descartada, um teste foi realizado. As partes constituintes da matriz polimérica (poliol e pré-polímero) foram mantidas na geladeira, a 5°C. O problema dessa tentativa é que a viscosidade destes elementos quando frios aumenta e o processo de mistura manual não ocorre facilmente. Além disso, o fluido frio já misturado escoava de forma muito mais lenta na pistola, o que acaba por inviabilizar o método de fabricação. Desse modo, toda a placa não impregnou, exibindo as fibras para o meio externo (Figura 22), não caracterizando o sanduíche desejado.



**Figura 22 – Placa de Compósito Obtida por *Spray-UP*.
Fonte: Autoria Própria (2015).**

Assim, poucos resultados podem ser avaliados para o método de *Spray-UP*, mas, a partir da análise visual primária, boas expectativas podem ser criadas a respeito de sua utilização.

Como alerta sobre a utilização deste sistema de produção vale salientar a necessidade de utilização de máscara, uma vez que o poliuretano pulverizado volatiliza e é facilmente aspirado pelos operadores no local da aplicação.

5.3 VERIFICAÇÃO DA REGRA DE HYER (1998)

A fase de degradação dos corpos de prova no forno de indução garantiu a afirmação de Hyer (1998) de que quem determina a faixa de temperatura dentro da qual um compósito pode operar é a matriz polimérica. Ficou claro, logo no início do processo de aquecimento, que a matriz não resiste a elevadas temperaturas de atuação. Ao final do ciclo de aquecimento foram recolhidos de dentro do forno apenas o reforço do compósito (Figura 23).



Figura 23 – Restos do CDP degradado – Fibras de Vidro
Fonte: Autoria Própria (2015).

6 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou dois processos de fabricação de materiais compósitos e extraiu algumas informações importantes acerca da utilização de um material alternativo à engenharia: o compósito formado de matriz biopolimérica (poliuretano derivado do óleo da mamona) reforçado com fibra de vidro bidimensional. Foram testados dois métodos de fabricação de corpos de prova deste material para serem oferecidos aos ensaios de tração normalizados: o processo manual de laminação, chamado de *Hand Lay-UP* (com e sem moldes) e o processo de pulverização *Spray-UP*. Tais processos de fabricação apresentaram bons resultados quanto a homogeneidade do corpo de prova. Através da inspeção visual é possível dizer que o material impregnou adequadamente e criou uma interface fibra-matriz razoavelmente constante. Porém, trabalhos posteriores podem analisar a interface fibra-matriz através da microscopia eletrônica de varredura e garantir a qualidade da impregnação e melhorar as conclusões acerca do processo.

Para o caso do *Hand Lay-UP*, foi garantido que a composição em massa de fibra e matriz no momento da fabricação da placa é mantida até os corpos de prova, ou seja, a matriz não oferece muitas mudanças na organização das fibras e as mantém dispostas corretamente. Com os resultados dos ensaios de tração em mãos pôde-se comprovar a qualidade dos corpos de prova oferecidos, já que o erro entre o resultado teórico e o coletado nos testes para o módulo de elasticidade foi de menos de 1%.

Para o *Spray-UP* modificado, ainda não estudado anteriormente, foram detectados resultados muito promissores acerca da sua utilização. A placa obtida através deste formato de produção foi a que melhor se comportou quanto à consistência das medidas de espessura. É muito provável que os seus resultados se aproximem ainda mais dos teóricos especulados.

Como alternativa de proposta para um novo material, conclui-se que o poliuretano derivado da mamona reforçado por fibra de vidro ocupa lugar de destaque, já que sua manipulação é muito simples e sua obtenção pode ser feita em larga escala devido à quantidade de matéria-prima disponível no território brasileiro. A atenção deve estar voltada para o tempo de *pot life*, que deve ser bem cuidado pelos operadores para não inviabilizar o processo de fabricação. Além de possuir excelentes

propriedades mecânicas, o que possibilita a utilização do material como elemento estrutural, o fato da matriz polimérica ser biocompatível permite ao material ser aplicado em necessidades médicas, como próteses e afins.

Com base no presente estudo vem sendo desenvolvida a dissertação do aluno Fellipe Biagi, na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Cornélio Procópio, que aborda a aplicação do material aqui estudado em hastes de próteses para quadril humano.

Para os próximos estudos vale a pena avaliar alguns outros aspectos acerca dos processos de fabricação de *Hand Lay-UP* e *Spray-UP*, com o objetivo de torná-los mais eficientes e descobrir alternativas para automatizar a produção das peças obtidas a partir deles. Finalmente, ressalta-se que o estudo acerca das matrizes poliméricas derivadas de fontes naturais também deve ser levado em consideração no ponto de vista ambiental, já que é uma solução efetiva para a utilização exacerbada de polímeros derivados do petróleo, que agravam a crise ambiental devido ao fato de demorarem muitos anos para se decompor e por agredirem quimicamente o ambiente onde estão depositados. As matrizes poliméricas podem facilmente substituir tais elementos e ajudar a promover a saúde do planeta.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, B. D; BROUTMAN, L. J. **Analysis and performance of fiber composites, second edition**. 1990. New York, John Wiley & Sons, Inc.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 440.2R. **Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. 2002. 45f. ACI COMMITTEE 400, Farmington Hills, Michigan, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Terminology for Composite Materials 1**. 2007. 13 f. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. (D3039).

ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DE MATERIAIS COMPÓSITOS (ALMACO). Quem somos. Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/quemsomos.cfm>> Acesso em: 09 de novembro de 2014.

BARCELLOS, I. O; SOUZA, A. C; SELKE, A. E. **Incorporação de Lodo Industrial em Compósitos de Resina Poliéster**. 2009. 5 f. Departamento de Química, Universidade Regional de Blumenau, SC. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v19n2/v19n2a14.pdf>>. Acesso em 17 de abril de 2015.

BEAUMONT, P. W. R. **The failure of fibre composites: an overview**. 1989. Journal of Strain Analysis. V. 24, n4, p. 189-205.

BONINI, S. **Avaliação da resposta inflamatória à poliuretana derivada do óleo de mamona: estudo experimental em camundongos**. 1999. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto – SP.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and engineering: an introduction**. 1994. p. 521 – 531. Terceira Edição. New York, John Wiley & Sons, Inc.

CARVALHO, T. L; ARAÚJO, C; TEÓFILO, J. M; BRENTGANI, L. G. **Histologic and histometric evaluation of rat alveolar wound healing around polyurethane resin implants**. 1997. p. 149 – 152. International Journal of Oral Maxillofacial Surgery. V. 26, n.2.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-química de um poliuretano derivado do óleo de mamona utilizado para implantes ósseos.** 1997. 127 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON, CEB-FIP TG 9.3 FRP. **Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures.** 2001. 138f. Technical Report Bulletin n.14, Lausanne, Switzerland.

COSTA, R. R. C. **Aplicabilidade de modelos constitutivos para analisar o comportamento mecânico de um biopolímeros.** 2007. 171 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

EDWARDS, K. L. **An overview of the technology of fibre-reinforced plastics for design purposes.** *Materials & Design.* 1998. p. 1-10. V. 19.

FERNEDA, A. B. **Estudo técnico-experimental do comportamento elastoplástico do poliuretano derivado do óleo da mamona (*Ricinus Communis*).** 2006. 135 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FRASCINO, L. F. **Implante de resina poliuretana vegetal em cranioplastia: Estudo experimental em coelhos.** 1998. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto, São José do Rio Preto – SP.

FREIRE, E; MONTEIRO, E. E. C; CYRINO, J. C. R. **Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro.** 1994. 8 f. Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1994.

HULL, D. **Introduction to composite materials.** 1988. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra, 1988.

HYER, M. W. **Stress Analysis of reinforced composite materials.** 1998. Singapore, WCB/McGraw-Hill.

IGNÁCIO, H. **Utilização do cimento derivado do polímero da mamona no preenchimento de falha óssea. Estudo experimental em coelhos.** 1995. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

IGNÁCIO, H. **Avaliação da poliuretana da mamona nas formas compacta e porosa no preenchimento de falha óssea. Estudo experimental em cães.** 1999. 92 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

KFURI JR, M. **Comparação entre pinos absorvíveis de poliparadiioxanona e de poliuretana da mamona na fixação de segmentos osteocondrais do fêmur distal de coelhos.** 1999. 108 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

KHARMANDAYAN, P. **Estudo da interface de contato entre osso e implantes de poliuretano com e sem carbonato de cálcio, empregando microscopia de luz e eletrônica de varredura em coelhos.** 1997. 175 f. Tese (Doutorado) – Escola Paulista de Medicina, Universidade Federal de São Paulo.

LEVY NETO, F; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 336 f. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

MARTINEZ, C. B. **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.

MATTHEWS, F. L; RAWLINGS, R. D. **Composite Materials: Engineering and Science.** Chapman and Hall, UK, 1994.

MORALES, A. **Emprego experimental da poliuretana derivada de óleo de mamona (*Ricinus Communis L.*) em implantes lamelares, interlamelares e penetrantes na córnea de coelhos (*Oryctolagus cuniculus L.*).** 1999. 72 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade de São Paulo.

OHARA, G. H. **Estudo experimental da biocompatibilidade do polímero poliuretano da mamona implantada intra-óssea e intra-articular em coelhos.** 1995. p. 62-80. V.3,n.2. Acta Ortopédica Brasileira.

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** 2004. 104 f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, PR. Disponível em: <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/058.pdf>> Acesso em: 9 de abril de 2015.

PASCON, E. A. **Projeto biocompatibilidade dos materiais endodônticos: biocompatibilidade da resina poliuretana derivada da mamona.** 1999. 167 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.

PLEPLIS, A. M. G. **Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas de óleo da mamona.** 1991. 155 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

REINHART, T. J; CLEMENTS, L. L. **Engineered materials handbook v.1, Composites.** 1987. p. 27-34. Ohio, ASM International.

SANTOS, L. S. **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.

SEZEFREDO, R. M. **Ensaio de corpos de prova de tração em compósitos com matriz biopolimérica.** 2015. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio.

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

SHACKELFORD, J.F. **Introduction to materials science for engineers, fourth edition.** 1996. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.

SMITH, W. F. **Materials science and engineering.** 1993. 330 f. Singapore. McGraw-Hill, Inc.

STRÖHER, G. R. **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.

TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados.** 1999. 125 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

VINSON, J. R; SIERAKOWSKI, R. L. **Behavior of structures composed of composite materials.** 1987. Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers.

WAMBUA, P; IVENS, J; VERPOEST, I. **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?** 2003. Elsevier Science, Belgium.