

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

**IAGO BRUNO SPIGOSSO**

**ESTUDO DA PÓS-CURA NO APRIMORAMENTO DAS  
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE COMPÓSITOS**

Joinville

2017

**IAGO BRUNO SPIGOSSO**

**ESTUDO DA PÓS-CURA NO APRIMORAMENTO DAS  
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador(a): Dr. Gabriel Benedet Dutra

Joinville

2017

IAGO BRUNO SPIGOSSO

**ESTUDO DA PÓS-CURA NO APRIMORAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS  
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS**

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de Engenheiro Naval, e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 27 de junho de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr. Eng.  
Orientador

---

Prof. Claudimir Antonio Carminatti, Dr. Eng.

---

Prof. Leonidas Cayo Mamani Gilapa, Dr. Eng.

---

Prof. Thiago Antonio Fiorentin, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a meus pais, Ademar Rudi Spigosso e Simone Denise Klein e a toda minha família, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

*A Deus por minha vida, família e amigos.*

*Aos meus pais, que apesar de todas as dificuldades ao longo desta jornada, mantiveram-se firmes como alicerces que me apoiaram nos momentos mais difíceis.*

*Aos meus avós, que sempre buscaram esclarecer a importância de ser uma pessoa humilde e comprometida com suas obrigações.*

*Aos meus amigos: Jhonny, Eduardo, Raphael, Thiago, Ricardo, Allan, Lucas, Arlindo, Caio e Luíz Cláudio que vêm participando da minha vida acadêmica e sabem o tanto que já batalhei para chegar até aqui. Em especial ao meu grande amigo de infância Gabriel Zilio, que além de me conhecer e me entender como um irmão, vem me ajudando muito desde que começamos o curso de Engenharia Naval.*

*Ao meu grande amigo Divino, que muito me ensinou sobre a importância do trabalho duro, da paciência, do comprometimento e da honra que um homem deve ter.*

*Ao meu orientador, Gabriel Benedet Dutra pela atenção e suporte no pouco tempo que lhe coube, sempre me incentivando e comprometido com este trabalho.*

*A Vanessa Vargas, técnica do Laboratório de Física e Química da UFSC - Joinville pela ajuda e contribuição para a realização deste trabalho.*

*Ao professor Luis Fernando Peres Calil que me ajudou com o tratamento estatístico dos dados e que também muito me motivou ao longo do curso, pela sua simplicidade e humildade.*

*Aos professores: Alexandre Mikowski, Claudimir Antonio Carminatti, Carlos Mauricio Sacchelli, Leonidas Cayo Mamani Gilapa, Thiago Antonio Fiorentin e Wagner Maurício Pachekoski que tanto me ajudaram nos experimentos para a realização deste trabalho.*

*Ao Instituto Federal de Santa Catarina - Campus de Joinville - e a Mastergel Compósitos pela recepção amigável e colaboração para este trabalho.*

*A Universidade Federal de Santa Catarina, por me abrigar como um amigo ao longo desses anos, fornecendo todo o conhecimento, que hoje carrego com muito orgulho e satisfação.*

*A banca: Gabriel Benedet Dutra, Claudimir Antonio Carminatti, Leonidas Cayo Mamani Gilapa e Thiago Antonio Fiorentin, que aceitaram fazer parte da avaliação deste trabalho.*

## RESUMO

A indústria náutica vem aprimorando seus processos de fabricação em compósitos nas última décadas visando melhores características mecânicas aliada a baixos custos de fabricação. Compósitos de fibra e resina são os mais utilizados na construção de embarcações de recreio e esportivas, e saber como unir as melhores características dos elementos constituintes do material final é a chave para a obtenção das características ótimas de projeto. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar a influência da pós-cura em material compósito de fibra de vidro e resina de poliéster nas características físicas e mecânicas do laminado. A metodologia aplicada se baseia em pesquisas na literatura sobre o processo da pós-cura em compósitos, seguido da confecção de corpos de prova pelo processo de laminação manual, realização da pós-cura, caracterizações mecânicas e análise dos resultados com auxílio das ferramentas estatísticas. As características do compósito sob tração foram investigadas seguindo a norma ASTM D3039, além da utilização das leis da micromecânica para a análise teórica. As características de massa e volume do compósito foram obtidas através de ensaio de combustão, regulamentado pela norma ASTM D2584-94. Também investigou-se as propriedades de dureza e de flexão pelas técnicas de Dureza Barcol e ensaio de vibração, respectivamente. A pós-cura é uma técnica que depende de muitas variáveis, sendo as duas principais o tempo e a temperatura de cura. Não pode-se dizer que a resistência à tração dos corpos de prova foi aprimorada com a pós-cura, o mesmo para dureza e módulos de elasticidade, o que pode estar relacionado às temperaturas e tempo de pós-cura utilizados. Conclui-se que nas condições especificadas neste trabalho, a pós-cura não apresentou uma mudança nas médias das características mecânicas dos corpos de prova, sendo necessário uma melhor avaliação das variáveis intrínsecas ao processo antes da realização da pós-cura.

**Palavras-chaves:** Compósitos, Embarcações, Laminação, Materiais, Pós-cura.

## ABSTRACT

The nautical industry has been improving its manufacturing process in composites in recent decades, aiming at better mechanical characteristics together with the low manufacturing costs. Composites of fiber and resin are the most used in the construction of recreational and sport boats, and knowing how to unite the best characteristics of the constituent elements of the final material is the key to obtaining the optimal design characteristics. In this context, the objective of this study is to evaluate the influence of post curing on composites material of glass fiber and polyester resin on the physical and mechanical characteristics of the laminate. The methodology applied is based on researches in the literature on the post cure process in composites, followed by the preparation of test specimens by the hand lay-up process, post cure, mechanical characterization and analysis of results using statistical tools. The traction composite characteristics were investigated following the standard of ASTM D 3039, in addition to the use of micromechanical laws for theoretical analysis. The composite mass and volume characteristics were obtained through a combustion test, regulated by ASTM D 2584-94. Hardness and flexural properties were also investigated by Barcol hardness and vibration test techniques, respectively. Post cure is a technique that depends on many variables, the two main being the time and the cure temperature. It can not be said that the tensile strength of the specimens has been improved with post cure, the same for hardness and modulus of elasticity, which may be related to the temperatures and time of curing used. It was concluded that under the conditions specified in this study, the post cure did not present a change in the means of the mechanical characteristics of the test specimens, and a better evaluation of the variables intrinsic to the process before the post-cure was required.

**Key-words:** Composites, Boats, Lamination, Materials, Post cure.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |   |  |    |
|-----------|---|--|----|
| Figura 1  | – | Tipos de resinas mais utilizadas na construção de barcos .....   | 5  |
| Figura 2  | – | Composição em massa para fibras do Tipo E-S .....  | 7  |
| Figura 3  | – | Processo de laminação manual .....   | 9  |
| Figura 4  | – | Confecção dos laminados: (a) impregnação da resina sobre a manta de fibra, (b) retirada do excesso de bolhas com o rolinho após a impregnação de todas as camadas de fibra. ....   | 11 |
| Figura 5  | – | Placas prontas: (a) laminado recém impregnado, (b) laminado curado e com bordas já recortadas. ....  | 12 |
| Figura 6  | – | Recorte dos corpos de prova: (a) desenho dos corpos de prova nas placas; (b) recorte; (c) corpos de prova prontos com bordas acabadas. ....  | 13 |
| Figura 7  | – | Ensaio de combustão: (a) posicionamento dos corpos de prova nos cadinhos; (b) medida da massa inicial; (c) aquecimento dos cadinhos; (d) cadinhos no dessecador; (e) combustão dos corpos de prova; (f) corpos de prova carbonizados. .... | 16 |
| Figura 8  | – | Ensaio de Dureza Barcol .....  | 17 |
| Figura 9  | – | Geometria dos corpos de prova .....  | 18 |
| Figura 10 | – | Ensaio de tração .....   | 19 |
| Figura 11 | – | Ensaio de vibração .....   | 20 |
| Figura 12 | – | Ensaio de vibração - Posicionamento das ferramentas .....  | 21 |
| Figura 13 | – | Ensaio de vibração - Posicionamento das ferramentas .....  | 22 |
| Figura 14 | – | Diferença na coloração das placas: (a) placa E1; (b) placa E2; (c) placa E3 e (d) placa E4. ....   | 24 |
| Figura 15 | – | ANOVA - Dureza Barcol .....  | 27 |
| Figura 16 | – | ANOVA - Ensaio de tração .....   | 29 |
| Figura 17 | – | Corpos de prova após o ensaio .....  | 29 |
| Figura 18 | – | Seção transversal .....  | 31 |
| Figura 19 | – | Comparação dos valores de resistência à tração .....   | 33 |
| Figura 20 | – | Comparação dos módulos de elasticidade (E) .....   | 35 |
| Figura 21 | – | Comparação dos módulos de cisalhamento (G) .....   | 36 |
| Figura 22 | – | Medidas E1 .....   | 41 |
| Figura 23 | – | Medidas E2 .....   | 42 |
| Figura 24 | – | Medidas E3 .....   | 43 |
| Figura 25 | – | Medidas E4 .....   | 44 |
| Figura 26 | – | Ensaio de combustão .....  | 45 |
| Figura 27 | – | Ensaio de combustão .....  | 46 |
| Figura 28 | – | Dureza Barcol .....  | 47 |
| Figura 29 | – | Tensões de ruptura .....   | 48 |

|           |   |                          |    |
|-----------|---|--------------------------|----|
| Figura 30 | – | Tensões de ruptura ..... | 48 |
| Figura 31 | – | Tensões de ruptura ..... | 48 |
| Figura 32 | – | Tensões de ruptura ..... | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|           |   |  |    |
|-----------|---|--|----|
| Tabela 1  | – | Identificação das placas .....                   | 12 |
| Tabela 2  | – | Varição da espessura média após a pós-cura ..... | 25 |
| Tabela 3  | – | Dados do ensaio de combustão .....               | 26 |
| Tabela 4  | – | Fração de massa de fibra para cada grupo .....   | 26 |
| Tabela 5  | – | Resultado da Dureza Barcol .....                 | 27 |
| Tabela 6  | – | Resultados do ensaio de tração .....             | 28 |
| Tabela 7  | – | Resultados da análise micromecânica .....        | 32 |
| Tabela 8  | – | Módulo de elasticidade .....                     | 32 |
| Tabela 9  | – | Módulo de cisalhamento .....                     | 33 |
| Tabela 10 | – | Medidas e frequências obtidas .....              | 34 |
| Tabela 11 | – | Módulos E e G .....                              | 34 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |  |
|---------------|--|
| A             | Área da seção transversal                            |
| ANOVA         | Análise de Variância                                 |
| ASTM          | American Society for Testing and Materials           |
| b             | Largura dos corpos de prova                          |
| E             | Módulo de elasticidade                               |
| E1            | Experimento grupo 1                                  |
| E2            | Experimento grupo 2                                  |
| E3            | Experimento grupo 3                                  |
| E4            | Experimento grupo 4                                  |
| F             | Força  |
| $f_f$         | Frequência de ressonância do modo de flexão          |
| $f_t$         | Frequência de ressonância do modo de torção          |
| G             | Módulo de cisalhamento                               |
| H0            | Hipótese nula para variação da média                 |
| H1            | Hipótese alternativa para variação da média          |
| MEKP          | Peróxido de metil-etil-cetona                        |
| $M_f$         | Fração mássica de fibra                              |
| $M_r$         | Fração mássica de resina                             |
| $\sigma$      | Tensão axial   |
| $\sigma_{xm}$ | Tensão unidirecional em compósitos apenas com mantas |
| $\sigma_c$    | Tensão axial do compósito                            |
| $\sigma_f$    | Resistência à tração da fibra                        |
| $\sigma_m$    | Resistência à tração da matriz polimérica            |
| $v_m$         | Volume específico da matriz polimérica               |

|              |   |
|--------------|---|
| $v_f$        | Volume específico da fibra                    |
| $\epsilon_c$ | Deformação do compósito                       |
| $\epsilon_f$ | Deformação da fibra de vidro                  |
| $\epsilon_m$ | Deformação da matriz polimérica               |
| $\rho_f$     | Densidade da fibra                            |
| $\rho_r$     | Densidade da resina                           |
| $\beta$      | Fator de eficiência do alinhamento das fibras |
| $\lambda$    | Fator de adesão entre fibra e matriz          |

## SUMÁRIO

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                            | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                             | <b>3</b>  |
| 2.1      | OBJETIVOS GERAIS                             | 3         |
| 2.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                        | 3         |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                 | <b>4</b>  |
| 3.1      | MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA NÁUTICA    | 4         |
| 3.2      | RESINAS                                      | 4         |
| 3.3      | FIBRAS DE REFORÇO                            | 6         |
| 3.4      | CURA E PÓS-CURA                              | 7         |
| 3.5      | ANÁLISE MICROMECAÂNICA                       | 8         |
| <b>4</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                   | <b>9</b>  |
| 4.1      | MATERIAIS                                    | 9         |
| 4.2      | OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS                        | 10        |
| 4.3      | PÓS-CURA                                     | 12        |
| 4.4      | DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA          | 13        |
| 4.5      | ENSAIO DE COMBUSTÃO                          | 14        |
| 4.6      | ENSAIO DE DUREZA BARCOL                      | 16        |
| 4.7      | ENSAIO DE TRAÇÃO                             | 18        |
| 4.8      | ENSAIO DE VIBRAÇÃO                           | 19        |
| 4.8.1    | Método da viga livre-livre                   | 19        |
| 4.8.2    | Frequências de ressonância do modo de flexão | 20        |
| 4.8.3    | Frequências de ressonância do modo de torção | 21        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>               | <b>24</b> |
| 5.1      | PÓS-CURA                                     | 24        |
| 5.2      | ENSAIO DE COMBUSTÃO                          | 25        |
| 5.3      | ENSAIO DE DUREZA BARCOL                      | 27        |
| 5.4      | ENSAIO DE TRAÇÃO                             | 28        |
| 5.4.1    | Análise Micromecânica                        | 30        |
| 5.4.2    | Comparação dos resultados                    | 33        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                             | <b>37</b> |
| <b>7</b> | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>      | <b>38</b> |
|          | APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA   | 41        |
|          | APÊNDICE B – ENSAIO DE COMBUSTÃO             | 45        |
|          | APÊNDICE C – ENSAIO DE DUREZA BARCOL         | 47        |
|          | APÊNDICE D – ENSAIO DE TRAÇÃO                | 48        |

## 1 INTRODUÇÃO

A busca por aperfeiçoamentos dos materiais de engenharia vem abrindo campo para estudos e desenvolvimento de novos materiais que atendam aos requisitos impostos pela indústria. No último século nos deparamos com uma gama de materiais aprimorados, resultado de muito estudo, os quais levaram a uma melhor compreensão das propriedades dos materiais, um bom exemplo disso é o aço e suas ligas. Porém, a necessidade de otimizar ainda mais o desempenho nos projetos, considerando a redução do peso e custo aliados à boas características mecânicas, levou a indústria a adotar um novo campo de materiais, os compósitos (GALVÃO, 2012).

Um material compósito é formado pela união de dois materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de performance superior àquela dos seus componentes tomados separadamente. Como resultado, obtém-se um material com um arranjo de fibras, podendo ser contínuas ou não. Este arranjo de fibras é o reforço do compósito, que é impregnado em uma matriz de resistência mecânica inferior as fibras (PEREIRA, 2003).

A indústria aeroespacial tem seu pioneirismo marcado por incentivos no desenvolvimento de compósitos, devido a grande necessidade de utilizar materiais leves e que garantam boas propriedades mecânicas, satisfazendo seus requisitos estruturais. Mais tarde essa ideia se alastrou para vários outros setores da engenharia, principalmente o setor automotivo e a indústria náutica. O início da construção de embarcações com fibra de vidro foi após a Segunda Guerra Mundial, onde a Marinha americana construiu uma classe de embarcações de 28 pés baseado no potencial para redução da manutenção e dos custos de produção (GREENE, 1999).

Uma vez adotada a utilização dos compósitos, começaram a surgir novos desafios no sentido de melhorar cada vez mais as suas propriedades. Uma técnica que vem sendo muito utilizada no aprimoramento dos compósitos de matriz de resina reforçados com fibra, os FRPs (Fiber-Reinforced plastics) é a pós-cura (BAGIS; RUEGEBERG, 1999).

A análise do processo da pós-cura e suas variáveis possibilita ampliar o conhecimento das características e do comportamento dos compósitos quando submetidos ao tratamento térmico, incentivando o desenvolvimento de peças e laminados que possam apresentar maior resistência térmica e mecânica, atingindo maior segurança no projeto e garantindo maior qualidade no produto final (GALVÃO, 2012). A possibilidade de atingir propriedades superiores em uma peça laminada de fibra/resina através da pós-cura é baseada na alteração do tempo e temperatura de cura. Saber como isso pode ser alcançado é o fator motivante deste trabalho.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar diferentes ciclos de pós-cura em laminados de material compósito, obtidos com fibras de vidro e resina de poliéster, avaliando o impacto dos processamentos em suas propriedades mecânicas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter corpos de prova de fibra de vidro e resina de poliéster ortoftálica pelo processo de laminação manual.
- Realizar distintos ciclos térmicos nas amostras após a cura, variando a temperatura de pós-cura;
- Avaliar a influência dos diferentes ciclos de pós-cura na fração mássica de resina e fibra dos compósitos.
- Avaliar o impacto dos diferentes ciclos de pós-cura nas propriedades mecânicas dos compósitos, por meio de testes de tração, Dureza Barcol e pela técnica de vibração para determinar os módulos de elasticidade e de cisalhamento.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA NÁUTICA

Os materiais compósitos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais que resultam em propriedades superiores às das dos materiais componentes individualmente utilizados. Estes materiais têm como características altas resistências e rigidez combinados com baixa densidade se comparados aos metais convencionais (KUMAR et al., 2015). Apesar de o termo compósito parecer algo moderno, sua origem data das primeiras civilizações agrícolas, que começaram a utilizar o linho, o algodão e a juta misturado com o barro para providenciar finalidades estruturais ou de revestimentos para seus abrigos, bem como arcos e carroças constituídos pela união de madeira e ossos de animais. O reaparecimento destes materiais começou com o uso de estruturas compósitas leves para soluções de engenharia. Os compósitos tiveram seu grande aparecimento na indústria por volta dos anos 1960, incentivado principalmente pela indústria aeroespacial, que buscava aprimoramento estrutural das aeronaves, utilizando materiais que pudessem acoplar rigidez e baixa densidade (VENTURA, 2012).

Compósitos são tipicamente formados por uma matriz que envolve um reforço. Estas matrizes podem ser metálicas, cerâmicas ou poliméricas e os reforços são geralmente utilizados em forma de fibras, partículas ou *wiskers*. Sua aplicação varia desde utensílios básicos do dia-a-dia até componentes de grande performance aplicados na indústria automotiva, náutica e aeroespacial (GALVÃO, 2012). As propriedades mecânicas dos compósitos dependem diretamente da geometria, dimensões e arranjo dos reforços. As matrizes têm como função principal, transferir as solicitações mecânicas para as fibras e protegê-las do ambiente externo. Matrizes podem ser do tipo resinosas (epóxi, poliéster ou vinílicas), minerais (carbono), e metálicas (ligas de alumínio) (PEREIRA, 2003).

A diversidade de configurações dos painéis e as vantagens de obter cascos com menos descontinuidades foram os fatores condutores no desenvolvimento de barcos com materiais compósitos. Os materiais compósitos ganharam a aceitação na construção de embarcações de recreio por causa do baixo peso, amortecimento de vibração, resistência à corrosão, resistência ao impacto, baixos custos e facilidade de fabricação (GREENE, 1999).

#### 3.2 RESINAS

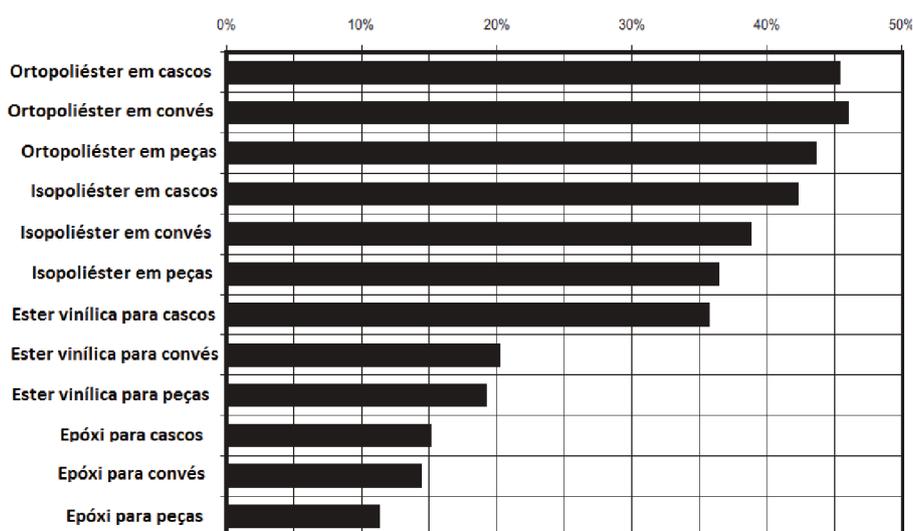
A matriz em um compósito pode ser metálica, polimérica ou cerâmica, e como citado anteriormente, sua função é transferir as cargas mecânicas para o reforço, protegê-lo do meio ambiente, de ataques químicos e da abrasão, mantendo o mesmo no seu devido lugar, garantindo

a forma geométrica do compósito. Na seleção da matriz devem ser considerados fatores químicos, térmicos, elétricos, ambientais, mecânicos, custo, inflamabilidade e requisitos de manufatura (GALVÃO, 2012). É de costume dividir as matrizes poliméricas em termorrígidos e termoplásticos. Os termorrígidos são aqueles que formam ligações cruzadas durante a etapa de cura, e uma vez produzidos, não podem ser reprocessados. Já os termoplásticos podem ser reciclados a determinadas condições de pressão e temperatura. Mesmo com estas características, as resinas, que são classificadas como polímeros termorrígidos, são amplamente utilizadas na indústria náutica, pelo fato de ser de fácil processamento, pois se encontram em estado líquido a temperatura ambiente.

Quando falamos de compósitos de fibra/resina, nosso interesse são os polímeros termorrígidos, que são responsáveis pela maior demanda de matrizes para a produção de compósitos estruturais, isto devido principalmente às propriedades como boa processabilidade a temperatura ambiente, estabilidade térmica e dimensional, alta rigidez e resistência química (GALVÃO, 2012). As resinas mais utilizadas na fabricação de compósitos de fibra são resinas epóxi, poliéster, fenólica e vinílica.

Embora as resinas epóxi e vinílicas apresentem propriedades mecânicas superiores, elas ainda estão limitadas à aplicações mais especializadas devido ao seu alto custo. Dentre as resinas disponíveis, uma se destaca pelo baixo custo, facilidade de uso e grande disponibilidade no mercado, a resina poliéster, fazendo desta a mais utilizada pelos fabricantes de barcos, como ilustra a Figura 1. As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeia longa lineares (NETO; PARDINI, 2006).

Figura 1 – Tipos de resinas mais utilizadas na construção de barcos



Fonte: Adaptado pelo autor de Greene (1999, p. 72)

Os dois tipos básicos de resina poliéster utilizadas na indústria náutica são as isoftálicas e ortoftálicas. As resinas isoftálicas geralmente apresentam melhores propriedades mecânicas e resistência à ataques químicos e sua boa impermeabilidade faz com que sejam muitas vezes utilizadas como gel coat na proteção de superfícies laminadas (GREENE, 1999). As resinas ortoftálicas formam o grupo original de resinas poliéster desenvolvidas e ainda são as mais utilizadas. Estas resinas apresentam certa limitação à estabilidade térmica, resistência química e características de processamento (GREENE, 1999). Mas o seu baixo custo e grande aplicação levaram à sua escolha para a utilização no presente trabalho.

### 3.3 FIBRAS DE REFORÇO

As fibras, forma mais comum de reforços na indústria náutica, são responsáveis por suportarem carregamentos mecânicos, devido as suas boas propriedades de resistência e módulo de elasticidade na direção dos filamentos. Os tipos mais comuns comercialmente são as fibras de carbono, de vidro e de aramida (INACIO, 2016)

A história das fibras de vidro começou em 1836, quando foi patenteado na Europa um método de tecer vidro maleável. Em 1839, tecidos de fibra de vidro foram então colocados pela primeira vez em uma exposição industrial e por volta de 1840 essa mesma fábrica começou a receber seus primeiros pedidos (NASSEH, 2011).

Fibras de vidro representam mais de 90% das fibras utilizadas em reforços de polímeros pois são relativamente baratas para produzir e oferecem boas propriedades mecânicas. Adicionalmente, fornecem boa resistência química e processamento (GREENE, 1999). As fibras de vidro são produzidas a partir do vidro em forma líquida que é resfriado em alta velocidade. Através do controle da temperatura e velocidade de escoamento do vidro são produzidos vários tipos de filamentos com diâmetros diferentes (NASSEH, 2011).

As fibras de vidro são produzidas em uma variedade de composições químicas, cada uma delas exibindo diferentes propriedades mecânicas e químicas, sendo as mais utilizadas as do tipo C, E e S. A mais popular entre construtores de barcos são as do tipo E que possuem baixo teor alcalino, boa resistência à tração e relativamente boa rigidez em relação à flexão (NASSEH, 2011). A Figura 2 mostra a composição por peso das fibras do tipo E e S.

Figura 2 – Composição em massa para fibras do Tipo E-S

|                            | TIPO - E  | TIPO - S |
|----------------------------|-----------|----------|
| Dióxido de Silício         | 52 - 56%  | 64 - 66% |
| Óxido de Cálcio            | 16 - 25%  | 0 - .3%  |
| Óxido de Alumínio          | 12 - 16%  | 24 - 26% |
| Óxido de Boro              | 5 - 10%   | —        |
| Óxidos de Sódio e Potássio | 0 - 2%    | 0 - .3%  |
| Óxido de Magnésio          | 0 - 5%    | 9 - 11%  |
| Óxido de Ferro             | .05 - .4% | 0 - .3%  |
| Óxido de Titânio           | 0 - .8%   | —        |
| Fluoretos                  | 0 - 1.0%  | —        |

Fonte: Adaptado pelo autor de Greene (1999, p. 72)

### 3.4 CURA E PÓS-CURA

A cura da resina de poliéster é uma polimerização por radicais livres na qual a resina é transformada do estado líquido em uma estrutura rígida reticulada (WORZAKOWSKA, 2006). A cura da resina poliéster ocorre como uma reação exotérmica que é iniciada com a adição de um iniciador. O tipo e quantidade de iniciador utilizado irá determinar o tempo de cura. O tempo de cura pode variar de apenas 15 segundos como pode levar vários dias para ser completado. Uma vez curada, a resina de poliéster se torna um material duro, de cor clara e aspecto transparente. As condições de cura podem variar bastante, no entanto, a maior parte das aplicações podem ser realizadas a temperatura ambiente (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1995).

O aprimoramento da cura resulta da aplicação de calor para iniciar a cura ou adicionalmente à reação de polimerização (FERRACANE; CONDON, 1992). A pós-cura em materiais compósitos é atualmente uma técnica restaurativa muito popular. Este método sujeita um compósito polimerizado embutido à um imediato tratamento por aquecimento, com propósito de aumentar a cura do material, aprimorando assim suas propriedades (BAGIS; RUEGEBERG, 1999).

A pós-cura foi inicialmente elaborada com o objetivo de aprimorar superfícies duras, tensão de ruptura, resistência à flexão, garantir estabilidade de cor ao laminado e aumentar a temperatura de transição vítrea. O laminado quando submetido à pós-cura deve sofrer um aumento no grau de cura, ou seja, deverá formar mais ligações cruzadas, diminuindo assim o número de monômeros residuais, formando uma estrutura altamente reticulada (BAGIS; RUEGEBERG, 1999). O principal benefício da pós cura seria a liberação de tensões entre a interface carga/matriz e o alívio interno proveniente do estado gel de polimerização (GOMES, 2008).

Vários estudos têm relatado o efeito do tratamento por aquecimento nas propriedades mecânicas dos compósitos. Wendt (1987) relatou aumento de 10-20% na resistência à tração

diametral e na dureza e 40-50% de aumento na resistência ao desgaste para alguns compósitos que passaram pela pós-cura. Bagis e Ruegeberg (1999) mostraram que a pós-cura aumentou o grau de conversão, diminuindo a quantidade de monômeros residuais em compósitos fabricados com resinas comerciais. Ferracane e Condon (1992) relataram significativo aumento na resistência à fratura, no módulo de elasticidade e no módulo de flexão, ocorrendo conversão adicional de ligações cruzadas que variaram de 7-9% e 10-20%. Galvão (2012) relatou um aumento médio de 14% na resistência à tração de laminados pós curados em estufa comparados aos curados em molde pré-aquecido, e constatou que esta vantagem pode ser atribuída à maior homogeneidade do fluxo de calor na estufa em relação ao molde aquecido.

Conforme o processo de cura segue ao longo do tempo, as interligações são favorecidas pelo aumento da temperatura proveniente da exotermia da resina. Porém, conforme as ligações são formadas, as vibrações moleculares tendem a diminuir e assim se contrapõem ao aumento da temperatura, chegando à um ponto em que o processo de cura é travado. Quando chega a este ponto, diz-se que a resina vitrificou e a partir deste momento a cura segue muito lentamente (NASSEH, 2007).

A vitrificação pode ser retardada ou até mesmo anulada dependendo da temperatura. Para atingir o máximo grau de interligações, a temperatura deve atingir um valor crítico, necessário para vencer a vitrificação e assim a temperatura deve ser mantida por tempo suficiente para que as interligações sejam completadas. Mas essas condições são muito difíceis de serem obtidas na cura a temperatura ambiente, daí a necessidade de efetuar a pós-cura (NASSEH, 2007).

Se o laminado for aquecido acima da temperatura de transição vítrea, as interligações são retomadas e prosseguem até estabilizar em outro patamar de vitrificação, ou seja, em uma nova temperatura de transição vítrea, até atingir a cura plena (NASSEH, 2007).

São vários os parâmetros que influenciam no processo de pós-cura. As duas principais variáveis são temperatura e tempo, mas também o tempo entre o início da cura e a pós-cura e o gradiente de temperatura também desempenha um importante papel. Dessa forma, o processo de pós-cura pode retornar propriedades mecânicas e térmicas ótimas para os compósitos de matrizes poliméricas (KUMAR et al., 2015).

### 3.5 ANÁLISE MICROMECAÂNICA

Para análise inicial das tensões nos materiais compósitos, é comum utilizar teorias da micromecânica. A micromecânica estuda as interações microscópicas entre os elementos que constituem o laminado. Esta ciência se aplica principalmente na obtenção dos módulos e tensões de ruptura de materiais compósitos. Na análise micromecânica, o estudo é dirigido principalmente para os elementos que formam o material, que são as fibras e a matriz. O objetivo da análise é determinar as propriedades mecânicas em termos dos elementos que constituem o material como um todo, bem como as proporções relativas de reforço e matriz (MARINUCCI, 2011).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

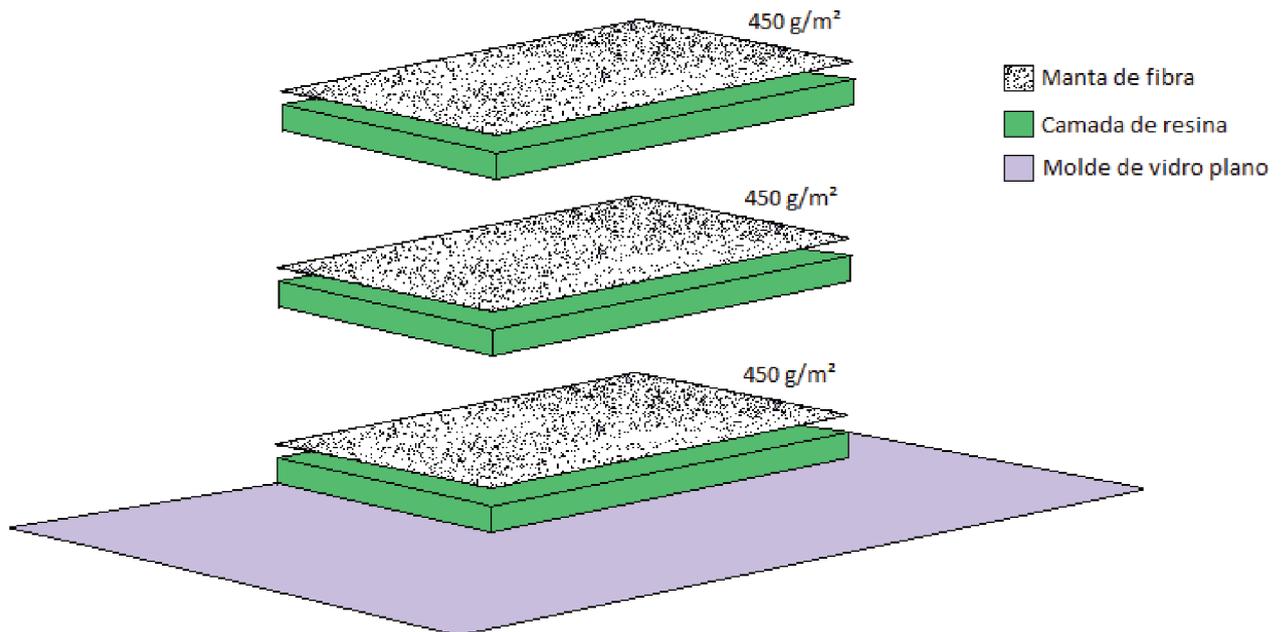
### 4.1 MATERIAIS

Os corpos de prova foram confeccionados utilizando apenas mantas de fibra de vidro de  $450 \text{ g/m}^2$ , sem tecidos, e resina de poliéster ortoftálica da marca SAMA. Como agente desmoldante foi utilizado a cera TecGlaze-N. Não foi utilizado gelcoat.

Quanto aos itens utilizados na fabricação dos laminados foram: recipientes plásticos para diluição da resina, tesoura, fita crepe, dosador de reagentes, balança digital SF-400, palitos de madeira, espátula, pincéis, rolete para retirar excesso de bolhas, calculadora, régua métrica e micro retífica.

A Figura 3 ilustra como são organizadas as camadas de manta na laminação, onde a resina é acrescentada entre cada uma das camadas.

Figura 3 – Processo de laminação manual



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 4.2 OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

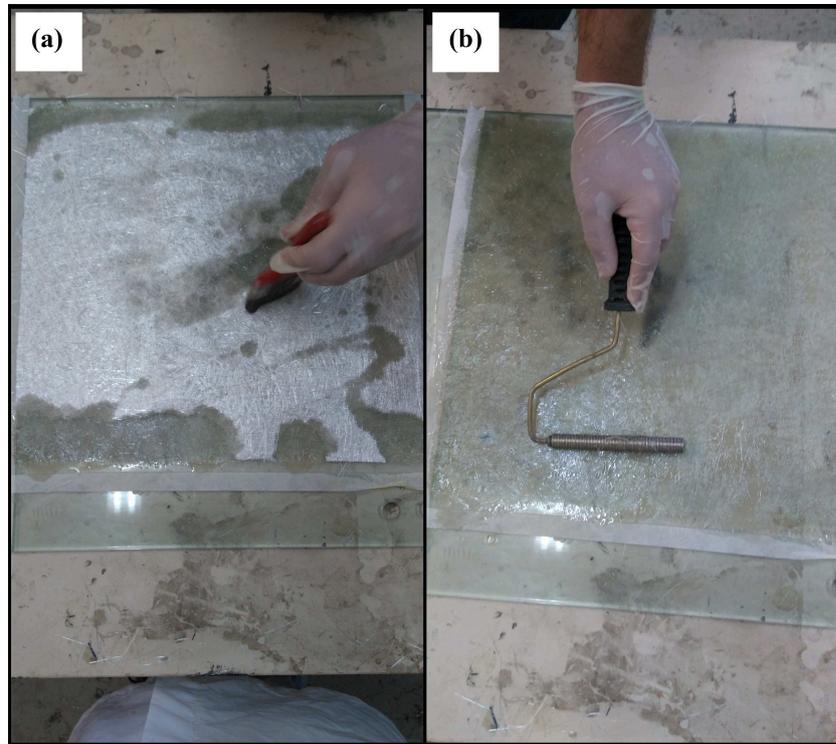
Os corpos de prova foram confeccionados no laboratório de fabricação de modelos da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - no dia 07 de março de 2017. Primeiramente foi estimada a quantidade necessária de laminado para todas as caracterizações mecânicas a serem realizadas, e ainda foi acrescentado uma margem caso fosse necessário refazer algum ensaio, respeitando os limites geométricos internos da estufa.

Foram fabricadas 4 placas de laminado com dimensões de 400 x 400 mm sobre uma superfície plana de vidro liso, que serviu como molde. Todas as placas foram laminadas pelo processo manual que teve início com o recorte das mantas de fibra, com dimensões de 400 x 400 mm com sobra de 50 mm cada lado para rebarbas. Em seguida foi feita a limpeza do vidro com solução de limpeza para retirar a poeira e restos de resina seca. Então foi aplicado o agente desmoldante sobre uma área pré-delimitada por fitas, com as dimensões de cada laminado.

Logo após a secagem do desmoldante, foi retirado o excesso do mesmo com estopas de algodão e só então foi posicionada a primeira manta de fibra. O próximo passo foi realizar a diluição da resina com o iniciador de peróxido de metil etil cetona (MEKP) em uma fração de 2,5% da massa de resina. Primeiramente foi feito para 600 g de resina e então começou o processo de impregnação, utilizando 3 camadas de mantas de fibra de vidro. Quando as 3 mantas já estavam completamente impregnadas para o primeiro laminado, o recipiente com o restante de resina foi pesado novamente para saber quanto de resina sobrou, obtendo-se assim a massa total de resina utilizada na laminação do primeiro laminado. Desta forma, a mesma massa de resina foi utilizada na fabricação das outras 3 placas, que foi de 371 g.

O procedimento de impregnação da resina na fibra de vidro é apresentado na Figura 4:

Figura 4 – Confeção dos laminados: (a) impregnação da resina sobre a manta de fibra, (b) retirada do excesso de bolhas com o rolinho após a impregnação de todas as camadas de fibra.

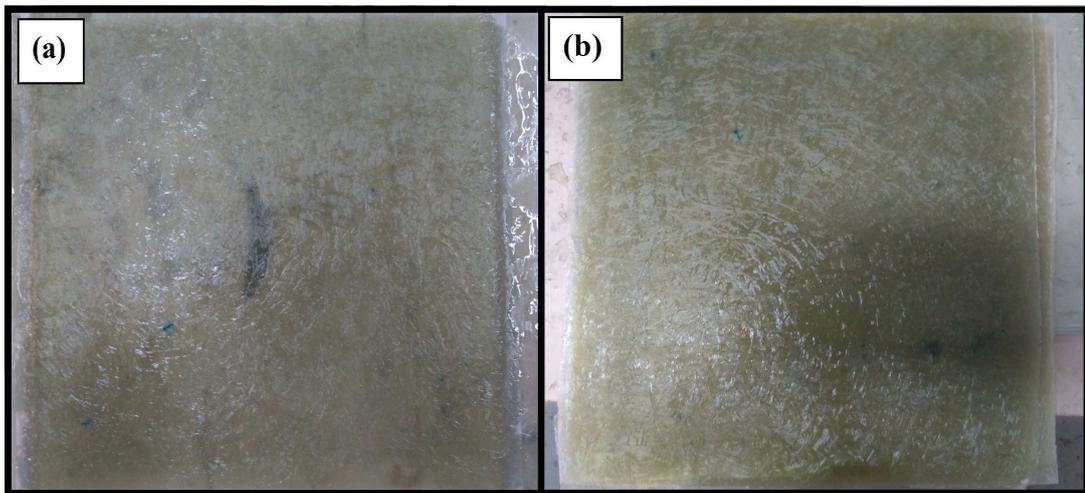


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Após o término da fabricação, as placas de laminado foram deixadas sobre a mesa curando a temperatura ambiente por 24 horas. Concluído o tempo de cura determinado, as placas foram retiradas do molde de vidro com auxílio de espátulas e em seguida foram removidos 50 mm de borda de cada laminado com uma ferramenta de micro retífica.

As amostras prontas são apresentadas na Figura 5:

Figura 5 – Placas prontas: (a) laminado recém impregnado, (b) laminado curado e com bordas já recortadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

### 4.3 PÓS-CURA

A pós-cura foi realizada no Laboratório de Ensino de Química da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - no dia 08 de março de 2017, em uma estufa de secagem FANEM 515. O primeiro passo foi determinar as principais variáveis de pós-cura - tempo e temperatura - baseando-se nas propriedades da resina de poliéster, definindo-se que a temperatura máxima seria de 100° C. O tempo de cura estipulado foi de 30 minutos na estufa à 50, 75 e 100°C. No total foram fabricadas 4 placas, sendo que em uma delas não foi realizada a pós-cura, nomeada de placa E1, e as outras três placas foram pós-curadas da seguinte forma: E2 - 50° C por 30 minutos; E3 - 75° C por 30 minutos; E4 - 100° C por 30 minutos. Quanto ao aquecimento da estufa, não foi realizado nenhum controle do mesmo, apenas esperou-se a temperatura estabilizar nos devidos valores utilizando um termômetro, para cada ciclo térmico. Também não foi realizado um controle específico de resfriamento, sendo que as placas foram resfriadas à temperatura e exposição do ambiente do laboratório. A Tabela 1 detalha melhor como os grupos foram divididos.

Tabela 1 – Identificação das placas

| Placa | Condição de pós-cura |
|-------|----------------------|
| E1    | Sem pós-cura         |
| E2    | Pós-cura a 50°C      |
| E3    | Pós-cura a 75°C      |
| E4    | Pós-cura a 100°C     |

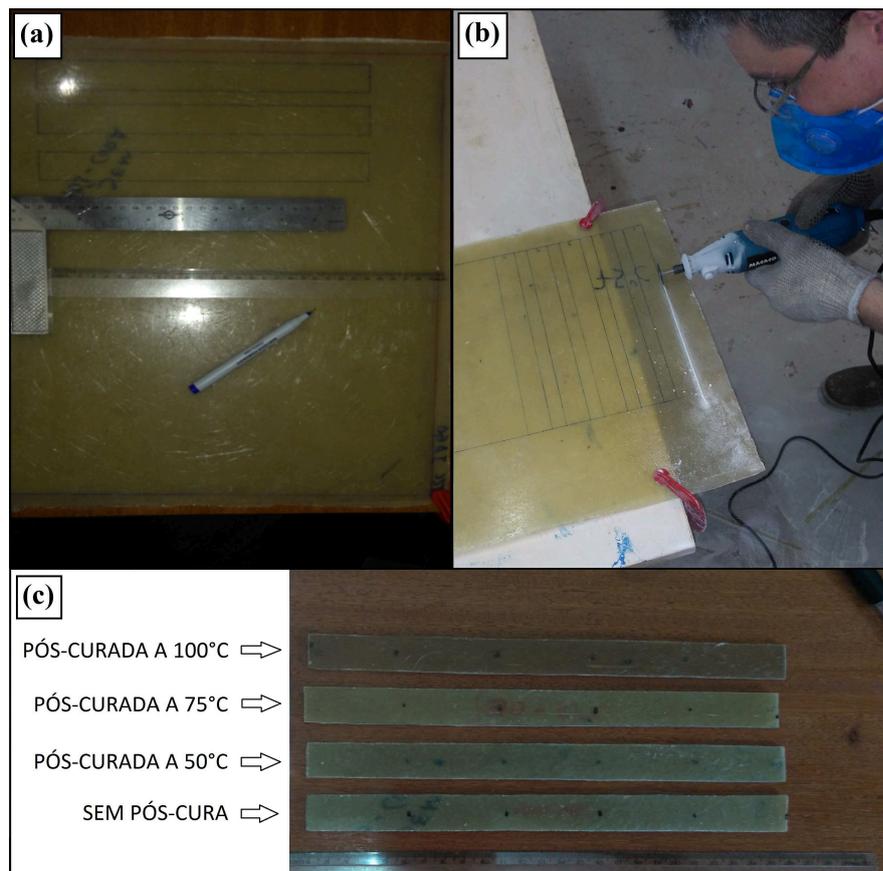
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram obtidos pelo recorte das placas para realização das caracterizações mecânicas. Primeiramente foi consultada a norma para ensaio de tração para materiais compósitos, para saber quantos corpos de prova seriam necessários para cada condição. A norma utilizada foi a ASTM D3039 que regulamenta testes de tração em materiais compósitos de matriz polimérica. A norma especifica um número mínimo de 5 corpos de prova por condição de ensaio, como são 4 condições de cura, foram recortados 20 corpos de prova no total para o ensaio de tração. Quanto à geometria dos corpos de prova, a norma não determina um tamanho específico, entretanto sugere fabricá-los com 25 mm de largura por 250 mm de comprimento com seção transversal retangular constante, não sendo necessário o estrangulamento na seção. Desta forma, o que se obteve foram barras de seção constante de 25x250 mm.

O procedimento de obtenção dos corpos de prova é apresentado na Figura 6:

Figura 6 – Recorte dos corpos de prova: (a) desenho dos corpos de prova nas placas; (b) recorte; (c) corpos de prova prontos com bordas acabadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Cada corpo de prova recebeu uma numeração e foi separado em seus respectivos grupos E1, E2, E3 e E4 para que houvesse um controle de qual corpo de prova foi ensaiado, facilitando

posteriormente as atribuições de cada valor de tensão de ruptura para cada corpo de prova. Por fim, foram retiradas as medidas de espessura e largura em cinco pontos ao longo do comprimento de cada corpo de prova, utilizando um paquímetro com resolução de 0,05 mm. Estes valores são apresentados no apêndice A.

Para o ensaio de combustão, os corpos de prova foram recortados em geometria quadrangular com 25 x 25 mm, seguindo a norma ASTM 2584-94 que regulamenta ensaios de perda de ignição de resina. Para o ensaio de Dureza Barcol foram utilizados os recortes remanescentes de laminado, sem seção específica, apenas delimitando regiões centrais do material.

#### 4.5 ENSAIO DE COMBUSTÃO

O ensaio de combustão foi realizado no Laboratório de Ensino de Química da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - no dia 04 de abril de 2017. Foi utilizado um forno mufla ZEZIMAQ com capacidade de elevar a temperatura a 1200°C. O ensaio foi baseado na norma ASTM D2584 - 94 que regulamenta ensaios de perda de ignição de matrizes poliméricas. O objetivo do ensaio de combustão é estimar a fração mássica de fibra de vidro obtida no processo manual de laminação. Desta forma, estes resultados serão utilizados nos cálculos da micromecânica, no intuito de fazer uma estimativa da tensão de ruptura dos corpos de prova para o ensaio de tração.

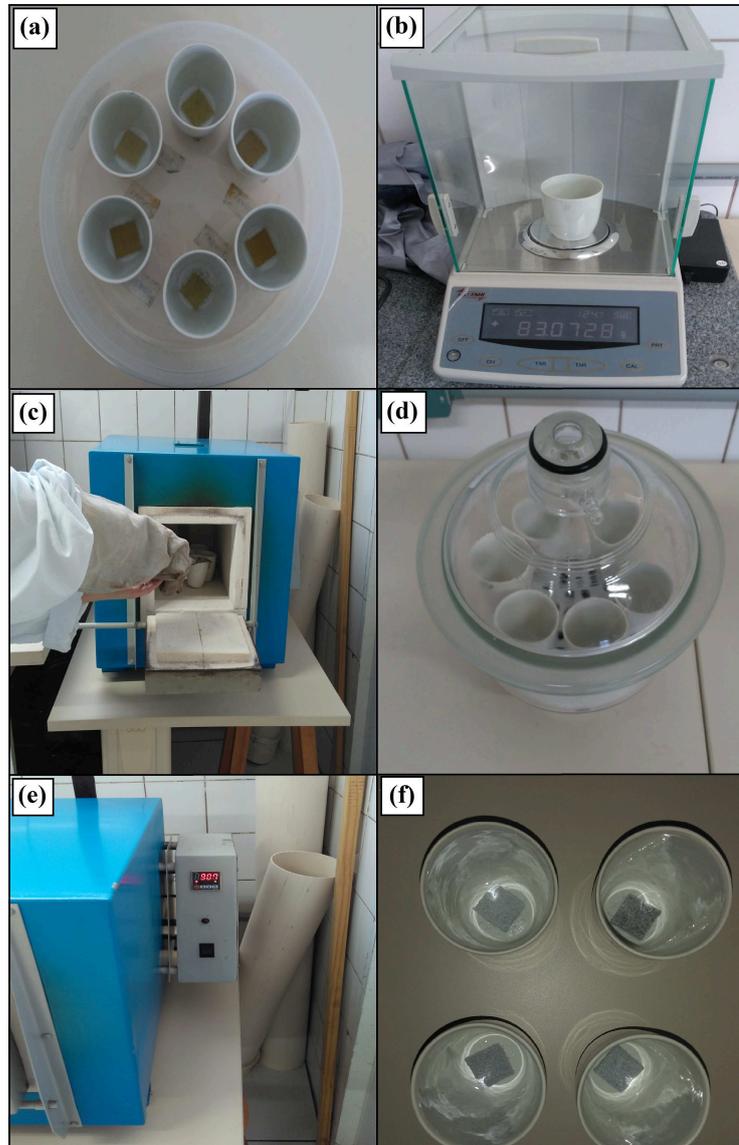
A norma aconselha utilizar uma temperatura de 565°C para o ensaio, por um período médio de 6 horas. Como são 12 corpos de prova no total, e sendo que a capacidade volumétrica interna da mufla é de no máximo 6 cadinhos por vez, levaria um tempo muito longo para realizar os ensaios. Optou-se por se basear em um trabalho anterior de (INACIO, 2016) que realizou testes antes do ensaio, alcançando resultados satisfatórios com uma temperatura de 900°C ao longo de 2 horas de ensaio.

O procedimento do ensaio é apresentado a seguir:

- Medida da massa dos cadinhos na balança de precisão e identificação de cada cadinho separadamente;
- Medida da massa inicial dos corpos de prova juntamente com os cadinhos na balança de precisão;
- Cadinhos vazios foram levados para aquecer na mufla por 10 minutos a 200°C para remoção de possíveis resíduos remanescentes de algum ensaio anterior, como aconselhado pela norma;
- Cadinhos foram retirados da mufla e colocados para resfriar em um dessecador, a temperatura ambiente;
- Após o resfriamento dos cadinhos, os corpos de prova já pesados foram colocados nos cadinhos devidamente identificados e levados até a mufla a 900°C por duas horas. Não foi realizado o controle do aquecimento, apenas esperou-se a temperatura da mufla estabilizar em 900°C;
- Após duas horas na mufla (tempo estimado para a combustão completa da resina), os cadinhos foram retirados e colocados novamente no dessecador, para resfriar até o dia posterior a temperatura ambiente. Não foi realizado nenhum controle do resfriamento;
- Finalmente, depois de resfriados, os corpos de prova já carbonizados foram pesados novamente, para medir a massa remanescente de fibra.

A Figura 7 apresenta o procedimento do ensaio:

Figura 7 – Ensaio de combustão: (a) posicionamento dos corpos de prova nos cadinhos; (b) medida da massa inicial; (c) aquecimento dos cadinhos; (d) cadinhos no dessecador; (e) combustão dos corpos de prova; (f) corpos de prova carbonizados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

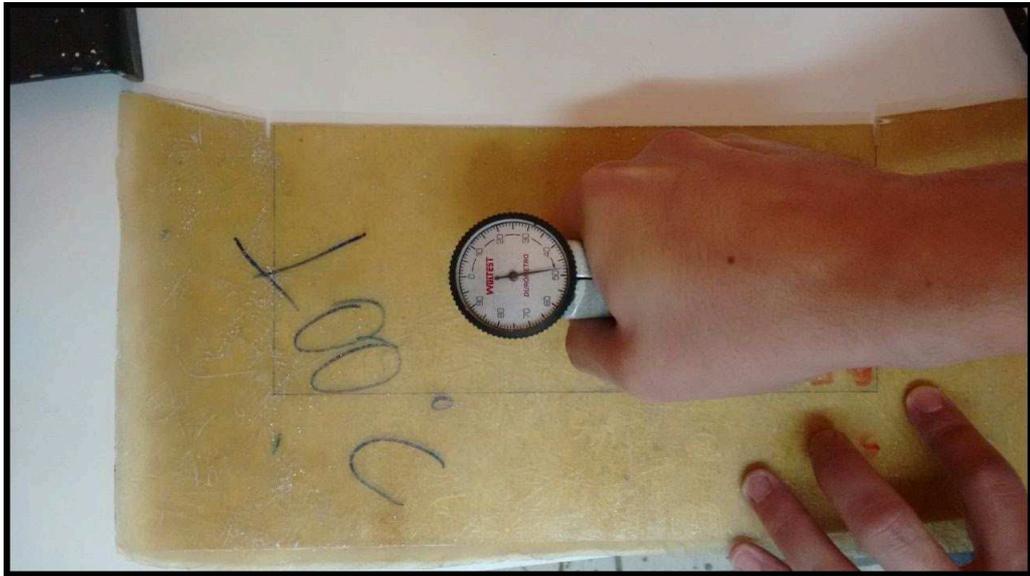
#### 4.6 ENSAIO DE DUREZA BARCOL

O ensaio de Dureza Barcol foi realizado na Mastergel Compósitos na cidade de Joinville no dia 29 de março de 2017. Foi utilizado um durômetro WOLTEST para obtenção da dureza Barcol em 12 pontos aleatórios das placas para cada condição de pós-cura. Evitou-se pegar pontos muito próximos da borda, uma vez que nestas regiões pode ocorrer uma maior variação da espessura do laminado.

Primeiramente foi realizada a limpeza da superfície de cada placa com um pano seco de algodão, dessa forma é possível retirar possíveis resíduos que possam influenciar na penetração da agulha do durômetro. Então iniciou-se a coleta dos dados, posicionando a parte anterior do equipamento sobre a mesa, mantendo o pulso firme para não ocorrer deslizamento no momento da indentação. Assim que se obtém firmeza suficiente, aplica-se um movimento angular com o pulso na parte posterior do equipamento, pressionando a agulha do medidor sobre a superfície da amostra e então é feita a leitura da Dureza Barcol.

A Figura 8 apresenta o ensaio de Dureza Barcol efetuado na amostra E4.

Figura 8 – Ensaio de Dureza Barcol



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

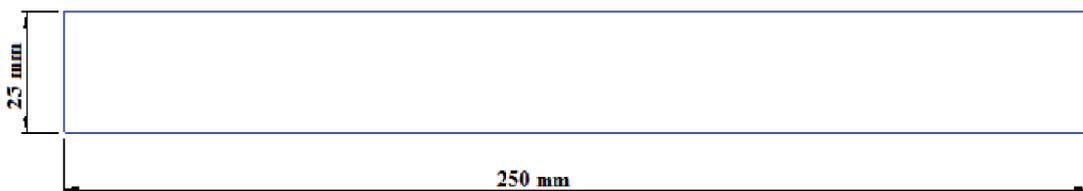
#### 4.7 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Santa Catarina - Joinville - no dia 12 de abril de 2017. O ensaio foi conduzido com base na norma ASTM D3039 que regulamenta ensaios de tração em materiais compósitos de matriz polimérica. Foi utilizado uma máquina universal EMIC com capacidade de carga de 100 kN.

Foram ensaiados 20 corpos de prova no total - cinco de cada condição de pós-cura - de dimensão retangular com 25 mm de largura x 250 mm de comprimento x espessura do laminado e seção transversal retangular uniforme sem abas. Antes da realização dos testes foram medidas a largura e espessura de cada corpo de prova utilizando um paquímetro com resolução de 0,05 mm, que são necessárias tanto para a configuração da máquina em cada teste como também para os cálculos da micromecânica, estas medidas são apresentadas no apêndice A.

A geometria sugerida pela norma é apresentada na Figura 9 .

Figura 9 – Geometria dos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Primeiramente foi feita a calibração da máquina, utilizando 2 corpos de prova extras. O ensaio começou configurando as características do material e velocidade do teste no software, para o corpo de prova E1 -1 (Corpo de prova 1 do laminado sem pós-cura). Uma vez informadas as características ao software, o corpo de prova é posicionado na máquina, prendendo suas extremidades nas garras e o ensaio começa a uma velocidade constante de 2 mm/s até ocorrer a ruptura do material. O mesmo procedimento é repetido para o restante dos corpos de prova e como resposta, para cada corpo de prova, foi obtido a força máxima de ruptura.

A utilização de abas nas extremidades não é obrigatório pela norma, dessa forma o corpo de prova ficou preso diretamente em contato com as garras da máquina, como apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

## 4.8 ENSAIO DE VIBRAÇÃO

O ensaio de vibração foi realizado no Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Joinville - no dia 25 de maio de 2017. O objetivo deste ensaio é estimar o módulo de elasticidade dos corpos de prova, para verificar se a pós-cura aprimorou esta característica do compósito.

Para realização deste experimento foram utilizados um suporte de metal, um martelo de impacto, um microfone, um analisador de sinais e um computador.

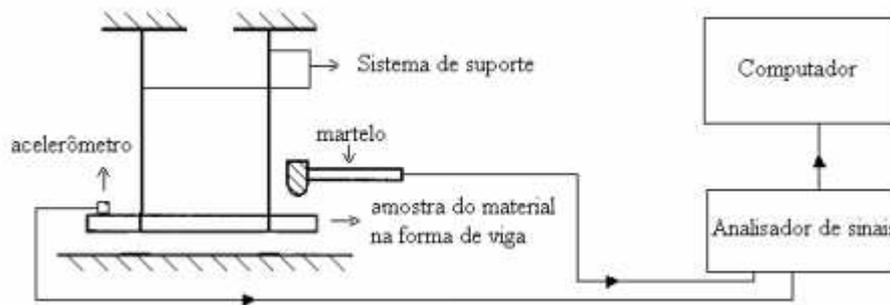
### 4.8.1 MÉTODO DA VIGA LIVRE-LIVRE

Este método se baseia na norma ASTM E 1876-01 e seu objetivo consiste em determinar as propriedades dinâmicas de materiais elásticos à temperatura ambiente, onde o módulo de elasticidade é determinado utilizando a frequência de ressonância do modo de flexão da viga, e o módulo de cisalhamento é obtido através da frequência de ressonância do modo torcional (FIORENTIN, 2007).

Este método consiste em obter a frequência de ressonância de uma amostra através da excitação por um martelo de impacto. Utiliza-se um acelerômetro ou um microfone para captar a vibração, transformando-a em um sinal elétrico que será passado ao analisador de sinais (FIORENTIN, 2007).

Os equipamentos utilizados no experimento são: um martelo de impacto; um microfone; um analisador de sinais; um suporte rígido que possa representar a amostra como uma viga livre-livre e um corpo de prova com formato de viga. A Figura 11 apresenta um esquema dos equipamentos utilizados e como eles são arranjados.

Figura 11 – Ensaio de vibração

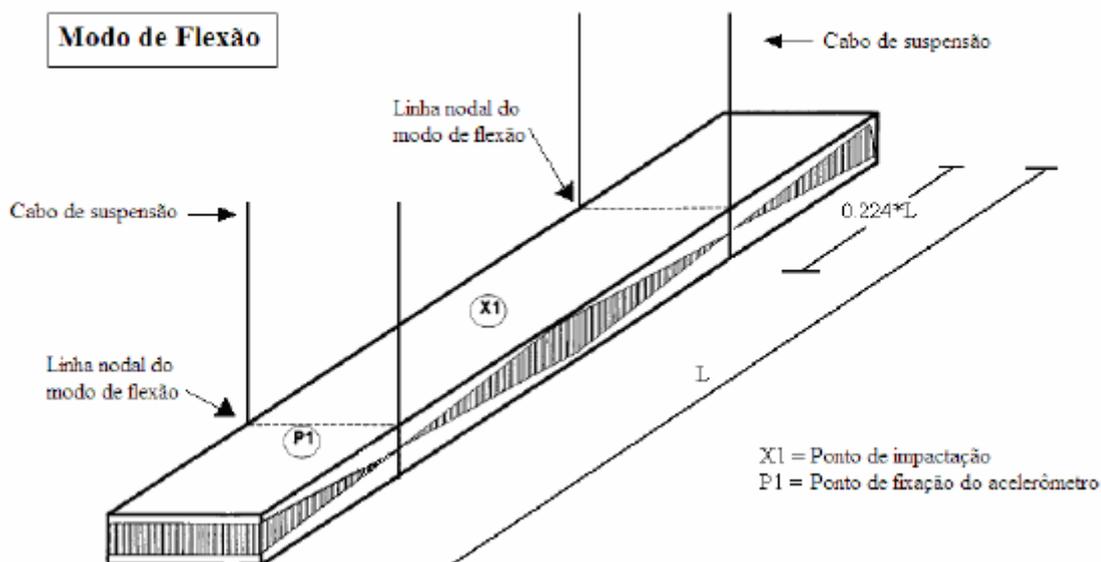


Fonte: Fiorentin (2007, p. 44)

#### 4.8.2 FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO MODO DE FLEXÃO

Primeiramente, foram retiradas as medidas de comprimento, largura, espessura e massa dos corpos de prova. O ensaio iniciou com o posicionamento do corpo de prova à uma distância de  $0,224 L$  das extremidades, onde  $L$  representa o comprimento do corpo de prova. Esta distância refere-se às linhas nodais, ou seja, os pontos da viga onde não ocorre deslocamento no primeiro modo de flexão. O posicionamento do martelo de impacto e do microfone/acelerômetro são especificados pela norma, e são indicados na Figura 12.

Figura 12 – Ensaio de vibração - Posicionamento das ferramentas

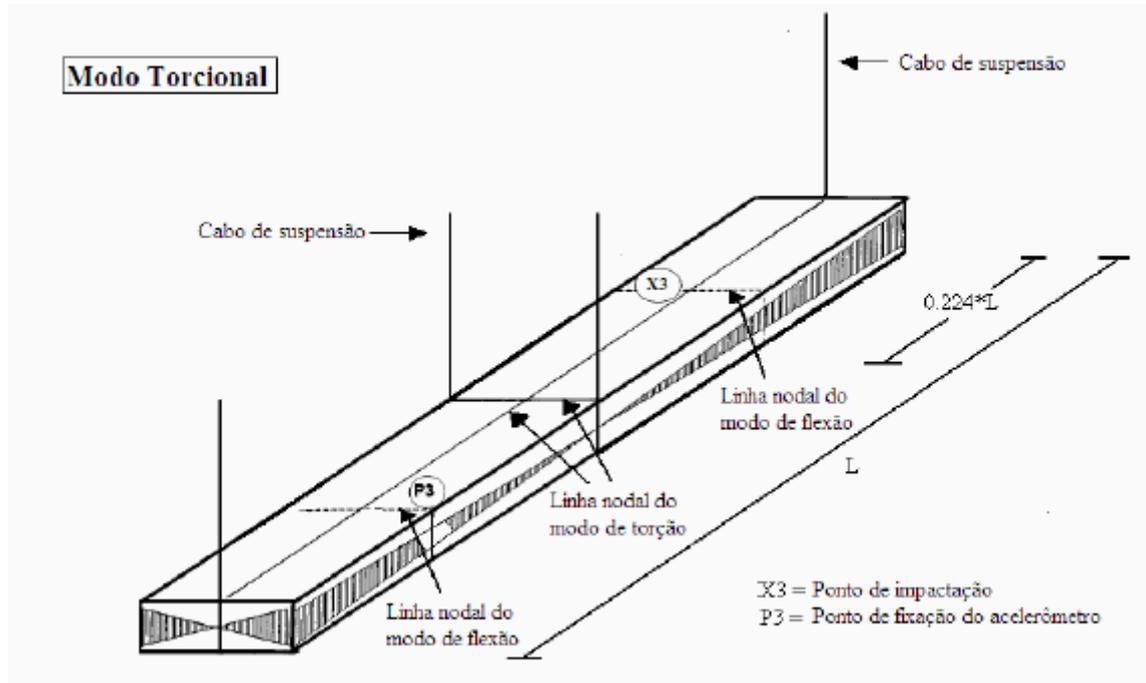


Fonte: Fiorentin (2007,p. 45)

#### 4.8.3 FREQUÊNCIAS DE RESSONÂNCIA DO MODO DE TORÇÃO

Neste caso, os suportes da viga devem estar posicionados no ponto médio da largura e do comprimento da viga. O microfone foi posicionado em um quadrante da viga, a uma distância de  $0,224 L$  da extremidade. Pelo fato de se tratar de um ponto nodal do modo de flexão, a possibilidade de detecção desse modo durante a análise de torção é minimizada (FIORENTIN, 2007). A impactação deve ser realizada no quadrante oposto diagonalmente ao acelerômetro, a uma distância de  $0,224 L$  da extremidade da viga. Este posicionamento é para evitar que o modo de flexão seja excitado (FIORENTIN, 2007). A Figura 13 apresenta o posicionamento dos apoios, do acelerômetro e do martelo de impacto.

Figura 13 – Ensaio de vibração - Posicionamento das ferramentas



Fonte: Fiorentin (2007, p. 46)

Obtidas as frequências de ressonância de flexão e torção, calcula-se os módulos de elasticidade (E) e de cisalhamento (G). As equações para o cálculo dos módulos são fornecidas pela norma. Para o cálculo do módulo de elasticidade (E), tem-se:

$$E = 0,9465(m f_f^2/b)(L^3/t^3)T_1 \quad (1)$$

Onde  $T_1$  é um fator de correção para o modo de flexão que está relacionado com o coeficiente de Poisson, definido pela norma, e (b) e (t) são a largura e espessura da viga, respectivamente.

A norma cita que se a razão do comprimento pela espessura do corpo de prova (L/t) for maior ou igual a 20, o que realmente aconteceu nos corpos de prova ensaiados,  $T_1$  pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$T_1 = [1,000 + 6,585(t/L)^2] \quad (2)$$

Para o cálculo do módulo de cisalhamento (G), tem-se:

$$G = \frac{4Lm f_t^2}{bt} [A1/(1 + A2)] \quad (3)$$

Onde A1 e A2 correspondem aos fatores de correção que dependem da razão entre largura e espessura, definidos pela norma como:

$$A1 = \frac{b/t + t/b}{4(t/b) - 2,52(t/b)^2 + 0,21(t/b)^6} \quad (4)$$

e

$$A2 = \frac{0,5062 - 0,8778(b/t) + 0,3504(b/t)^2 - 0,0078(b/t)^3}{12,03(b/t) + 9,892(b/t)^2} \quad (5)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

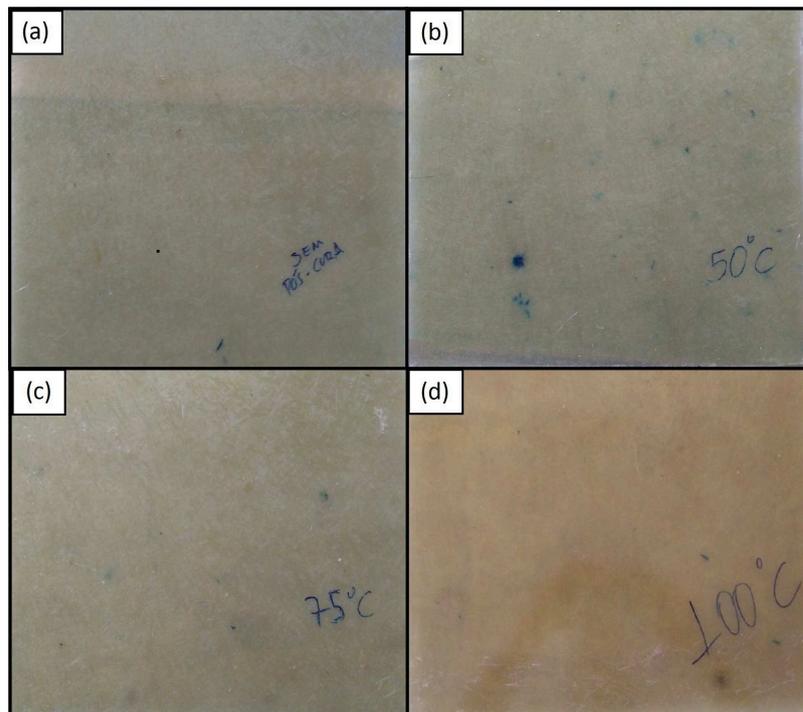
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no experimento de pós-cura, ensaio de combustão, ensaio de Dureza Barcol, ensaio de tração e ensaio de vibração. Para a validação dos resultados dos ensaios mecânicos será utilizado Análise de Variância (ANOVA), e para os ensaios de tração e de vibração também será utilizado os conceitos da micromecânica para estimar a tensão de ruptura e módulos dos corpos de prova, assim é possível comparar os valores de tensão de ruptura e módulos teóricos com os valores reais obtidos nos ensaios.

### 5.1 PÓS-CURA

A pós-cura foi realizada em 4 placas planas de fibra de vidro com resina de poliéster como já discutido neste trabalho.

Após o experimento, observou-se uma certa variação na coloração das placas, que inicialmente apresentavam um tom esverdeado, passando aos poucos para um tom laranja, com o aumento da temperatura de cura, sendo significativamente maior para a placa que foi curada a 100° C, como pode-se observar na Figura 14:

Figura 14 – Diferença na coloração das placas: (a) placa E1; (b) placa E2; (c) placa E3 e (d) placa E4.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

As espessuras dos corpos de prova foram medidas antes e depois da pós-cura. Constatou-se um aumento na espessura média dos copos de prova, em função da temperatura de pós-cura. A Tabela 2 apresenta a variação destas espessuras.

Tabela 2 – Variação da espessura média após a pós-cura

| Grupo | Espessura inicial [mm] | Espessura final [mm] | Desvio padrão | Aumento % |
|-------|------------------------|----------------------|---------------|-----------|
| E1    | 2,42                   | 2,42                 | 0,19          | 0,00      |
| E2    | 2,42                   | 2,51                 | 0,14          | 3,72      |
| E3    | 2,42                   | 2,78                 | 0,15          | 14,87     |
| E4    | 2,42                   | 3,08                 | 0,15          | 27,27     |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Uma das etapas da cura é a evolução de voláteis. Dentro da composição química da resina de poliéster, existe um percentual considerável de estireno. Este estireno tem por função reduzir a viscosidade do sistema e formar as ligações cruzadas durante o processo de cura. Em muitos casos, após a vitrificação da resina, ainda há algum estireno residual na peça. Este estireno tende a sair do laminado com o tempo, ou de maneira acelerada com a pós-cura.

Mediante estas condições, para as amostras que passaram por ciclos de pós-cura, a saída do estireno pode ter sido acelerada demasiadamente, proporcionando uma rápida migração do volátil para a superfície do compósito. Assim, algum estireno residual pode ter volatilizado devido a temperatura, porém podem ter sido retidos dentro do laminado, fazendo com que o mesmo aumentasse de espessura/volume, embora na literatura não tenha sido encontrado relatos a este acontecimento. De acordo com (NASSEH, 2011), alguns ciclos de pós-cura requerem taxas de aquecimento em torno de 1° C/minuto, o que não foi utilizado neste trabalho.

Quanto à variação da coloração das placas, segundo (NASSEH, 2007) isto pode ter ocorrido em função das altas temperaturas de pós-cura. Em um estudo do comportamento térmico da resina de poliéster, por calorimetria exploratória diferencial (DSC), (JÚNIOR et al., 2011) obtiveram um valor de 79,7° C para a Tg da mesma, quando curada a uma temperatura de 40° C. Neste contexto, a temperatura de 100° C utilizada neste estudo pode ter sido muito alta para a resina de poliéster, o que acabou ocasionando a degradação da resina, alterando sua coloração. Isto normalmente ocorre quando a resina de poliéster é pós-curada muito além da sua temperatura de transição vítrea (Tg).

## 5.2 ENSAIO DE COMBUSTÃO

Como discutido anteriormente neste trabalho, este ensaio serviu como base para obter a fração de massa de fibra das amostras, desta forma, é possível utilizar os resultados na análise micromecânica para estimar a tensão de ruptura teórica dos corpos de prova. Adicionalmente, os

resultados do ensaio de combustão revelaram como a fração de massa de fibra se comportou com a pós-cura.

O experimento é baseado na medição da massa inicial e final de cada corpo de prova antes e após o ensaio de combustão, respectivamente. A Tabela 3 apresenta os valores das massas obtidas, a tabela completa é apresentada no anexo B.

Tabela 3 – Dados do ensaio de combustão

| Massas médias de fibra e resina obtidas no ensaio de combustão |                 |                     |                    |
|--|-----------------|---------------------|--------------------|
| Grupo  | Massa total [g] | Massa de resina [g] | Massa de fibra [g] |
| E1   | 2,0131          | 1,2347              | 0,7647             |
| E2   | 2,0662          | 1,2490              | 0,8013             |
| E3   | 1,9915          | 1,2375              | 0,7540             |
| E4   | 2,0454          | 1,3549              | 0,6905             |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Finalmente, dividindo a massa de fibra de cada corpo de prova pela massa total inicial do mesmo, obteve-se a fração de massa de fibra média para cada grupo, como ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Fração de massa de fibra para cada grupo

| Fração de massa de fibra nos laminados [massa fibra/massa total] |                          |               |
|--|--------------------------|---------------|
| Grupo  | Fração de massa de fibra | Desvio padrão |
| E1   | 0,3829                   | 0,005         |
| E2   | 0,3897                   | 0,005         |
| E3   | 0,3786                   | 0,006         |
| E4   | 0,3376                   | 0,004         |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Mesmo com a volatilização do estireno durante a pós-cura, o que pode ocasionar uma redução da massa do compósito como um todo, nenhuma modificação de fração mássica de fibras foi evidenciada para as amostras que passaram por ciclos de pós-cura. Em volume, a quantidade de estireno volatilizada pode ter sido alta o suficiente para modificar a espessura da peça, mas não para modificar a fração mássica de resina e fibras nos compósitos. Algumas variações nos valores foram observadas, o que pode ser intrínseco do próprio sistema de laminação adotado, a laminação manual.

### 5.3 ENSAIO DE DUREZA BARCOL

O ensaio de Dureza Barcol foi a primeira caracterização mecânica realizada, e teve por objetivo avaliar se a pós-cura aumentou a dureza superficial das placas laminadas. A Dureza Barcol foi medida em 12 pontos aleatórios de cada placa e os resultados são apresentados na Tabela 5. A tabela completa é apresentada no apêndice C.

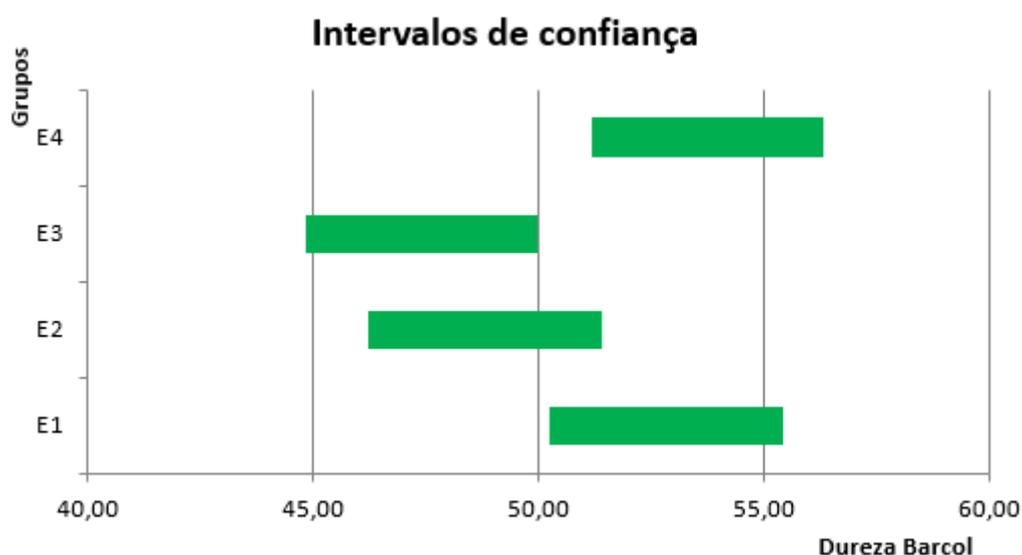
Tabela 5 – Resultado da Dureza Barcol

| Grupo | Dureza Barcol média |
|-------|---------------------|
| E1    | 52,83               |
| E2    | 48,83               |
| E3    | 47,42               |
| E4    | 53,75               |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Como apresentado na Tabela 5, a média dos dados não foi suficiente para concluir se a dureza aumentou ou se manteve a mesma, pois os valores das médias diminuíram de E1 para E3, crescendo repentinamente para E4. Desta forma, foi realizado um tratamento estatístico por Análise de Variância (ANOVA) ao nível de significância de 5%, assim pode-se verificar se as médias de dureza são diferentes ou não através da comparação das 4 médias. O gráfico da Figura 15 apresenta o intervalo de confiança das médias com base nos resultados da ANOVA.

Figura 15 – ANOVA - Dureza Barcol



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Com base na ANOVA pode-se rejeitar a hipótese de que todas as médias são iguais (H0), assumindo a hipótese alternativa (H1) de que pelo menos uma das médias é diferente - com uma probabilidade de significância de 0,22%. Observando a Figura 15, pode-se dizer que a média de dureza do grupo E4 é maior que a média do grupo E3, mas não podemos afirmar que é maior do que E2 e E1. Pode-se, também, afirmar que a média do grupo E1 é maior que a do grupo E3, mas não pode-se afirmar que é maior do que os grupos E2 e E4.

A etapa de pós-cura não refletiu em um aumento da Dureza Barcol. Isto pode ser decorrente de que mesmo com elevadas temperaturas, o estireno tendeu a volatilizar antes da formação de ligações cruzadas que possivelmente iriam influenciar em um aumento da dureza dos compósitos pós-curados, o que poderia ser identificado através deste ensaio. Além disso, para uma análise mais precisa, seria necessário realizar medidas de Dureza Barcol na resina pura, sem adição de reforços, uma vez que a fibra pode interferir na penetração da agulha do durômetro, mascarando os resultados.

#### 5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração forneceu os valores das forças de ruptura de cada corpo de prova. Com os valores de força de ruptura, e as medidas da geometria de cada corpo de prova, calculou-se a área da seção transversal para os mesmos. Dividindo a força de ruptura pela área da seção transversal, como ilustra a Equação 6, obteve-se os valores de tensão de ruptura para todos os corpos de prova ensaiados. A tabela das tensões de ruptura juntamente aos pontos onde ocorreram as falhas é apresentada no apêndice D.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

A Tabela 6 apresenta os resultados das tensões de ruptura para cada grupo.

Tabela 6 – Resultados do ensaio de tração

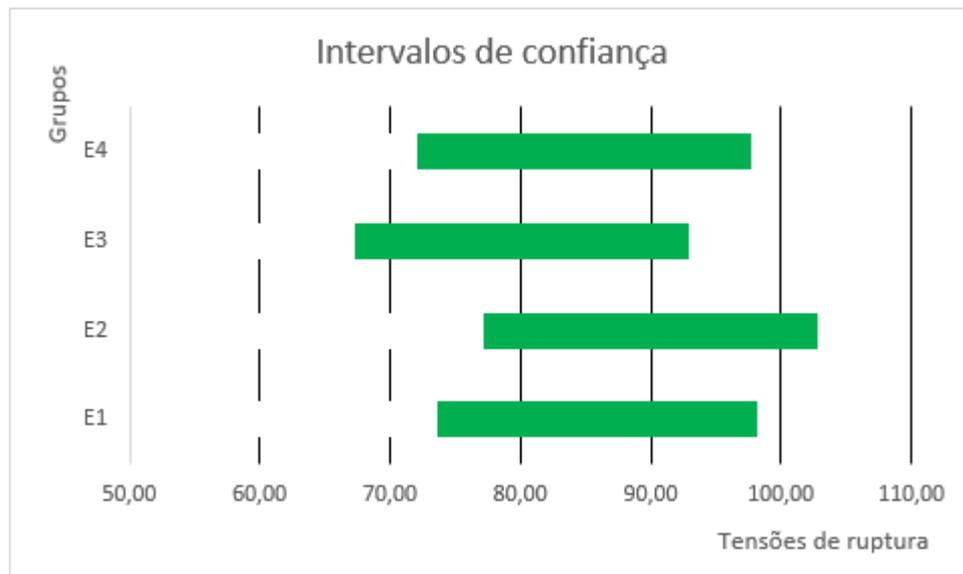
| E1 [Mpa] | E2 [Mpa] | E3 [Mpa] | E4 [Mpa] |
|----------|----------|----------|----------|
| 112,95   | 54,52    | 62,01    | 84,89    |
| 85,71    | 89,99    | 80,07    | 84,96    |
| 86,43    | 99,32    | 81,32    | 84,10    |
| 80,12    | 86,79    | 74,86    | 78,51    |
| 89,21    | 98,79    | 101,34   | 92,60    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Realizou-se uma ANOVA ao nível de significância de 5% para o ensaio de tração. Pelo resultado da ANOVA, aceita-se a hipótese nula ( $H_0$ ), ou seja, não houve diferença significativa entre as médias das tensões de ruptura - com uma probabilidade de significância de 65%.

O gráfico da Figura 16 apresenta os intervalos de confiança da ANOVA para o ensaio de tração.

Figura 16 – ANOVA - Ensaio de tração

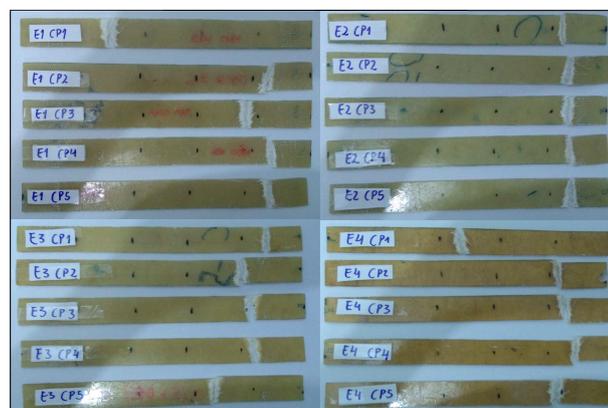


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Como pode-se observar na Figura 16, não é possível dizer que houve alguma média diferente, neste sentido, não pode-se dizer que a pós-cura aumentou a média de resistência à tração dos corpos de prova.

A Figura 17 apresenta os corpos de prova após o ensaio de tração, onde é possível observar os locais de fratura.

Figura 17 – Corpos de prova após o ensaio



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Analisando a Figura 17 percebe-se que a maioria dos corpos de prova falharam em uma região muito próxima da extremidade, justamente onde os mesmos foram fixados nas garras da máquina. Isto indica que possivelmente os corpos de prova sofreram uma influência de concentração de tensão nestas regiões, oriunda provavelmente de um alinhamento não muito eficaz dos mesmos nas garras, que pode ter interferido no limite de ruptura de cada corpo de prova.

Deve-se ressaltar também, que o fato de não ter sido utilizado abas nas extremidades dos corpos de prova, pode ter inserido concentração de tensão pelo aperto das garras diretamente no material compósito, o que também pode ter influenciado no limite de ruptura. Em um estudo anterior de (CAIN et al., 2006), foi realizado pós-cura em corpos de prova com tecidos orientados em diferentes ângulos e outros apenas com manta. Neste estudo obteve-se resultados de que a pós-cura melhorou os limites de resistência à tração dos corpos de prova fabricados com tecidos orientados, porém, para os corpos de prova fabricados apenas com mantas, não houve uma diferença entre as médias, o que indica que a pós-cura pode ser viável para compósitos fabricados com tecidos de fibra de vidro orientados, mas não para aqueles fabricados apenas com mantas de fibra de vidro. CAIN et al. (2006) ainda realizou ensaio de fadiga para as duas condições, e observou que a pós-cura para os laminados fabricados apenas com mantas melhorou a vida em fadiga para os mesmos, concluindo que existe a possibilidade de que quando se trabalha na direção transversal às fibras, a resina tem uma influência significativa no comportamento mecânico do laminado. No caso de laminados fabricados com mantas, a peça é quase isotrópica, de forma que quem domina o comportamento mecânico são as fibras, e não a resina.

#### 5.4.1 ANÁLISE MICROMECAÂNICA

O modelo do qual se obtém as propriedades elásticas na direção das fibras assume que as deformações da fibra, matriz e compósito na direção longitudinal são iguais (MARINUCCI, 2011). Então:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (7)$$

Para o cálculo da tensão de ruptura e dos módulos de um compósito de fibra e resina, utiliza-se a regra das misturas, como ilustrado na Equação (8), e para isto, é necessário saber os valores de resistência à tração e volume específico da fibra e da resina. Estes valores foram baseados em um estudo anterior de (BITTENCOURT, 2015), sendo a resistência à tração da fibra de vidro do tipo E de 900 MPa e sua densidade de 2,55g/cm<sup>3</sup>, enquanto para a matriz de poliéster a resistência à tração é de 52 MPa e sua densidade é de 1,12g/cm<sup>3</sup>.

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (8)$$

Conhecendo os valores da fração mássica de fibra obtidas no ensaio de combustão, e assumindo volume de vazios nulo, estima-se os volumes específicos de fibra e matriz, através das fórmulas encontradas em (AL-QURESHI, 2010):

$$V_f = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_r/\rho_m} \quad (9)$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (10)$$

Obtidos os dados do volume específico, calcula-se a resistência à tração de cada camada. Para isto, utilizou-se a regra das misturas modificada, proposta por (CASARIL et al., 2007):

$$(\sigma_x)_m = \lambda\sigma_m V_m + \beta\sigma_f V_f \quad (11)$$

Onde  $\beta$  é o fator de eficiência do alinhamento das fibras e  $\lambda$  é o fator de adesão entre as fibras e a matriz. Para mantas pode ser considerado  $\beta = 0,37$  - e para laminação manual  $\lambda = 0,85$ .

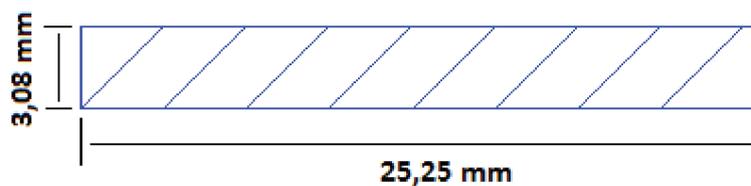
Depois de obtida a resistência à tração teórica do compósito, resta encontrar o valor da carga de ruptura. A carga ou força de ruptura do compósito pode ser estimada através da manipulação da Equação 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (12)$$

$$F = \sigma \cdot A \quad (13)$$

Como o valor da força de ruptura foi utilizado para calibração da célula de carga da máquina universal de tração, deseja-se encontrar a maior força de ruptura possível entre os corpos de prova. Observando a Equação 13, a maior força de ruptura será para o grupo com maior área de seção transversal. Desta forma, o grupo escolhido foi o E4, com a maior área de seção transversal média. A Figura 18 ilustra as medidas da seção transversal média dos corpos de prova do grupo E4.

Figura 18 – Seção transversal



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

E a Tabela 7 apresenta os valores obtidos.

Tabela 7 – Resultados da análise micromecânica

|                |         |                               |
|----------------|---------|-------------------------------|
| $V_f$          | 0,21    | (volume específico da fibra)  |
| $V_m$          | 0,79    | (volume específico da matriz) |
| $(\sigma_x)_m$ | 105 MPa | (Tensão de ruptura)           |
| F              | 8113 N  | (Força de ruptura)            |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Através da regra das misturas também é possível estimar o módulo de elasticidade do compósito, assim, pode-se comparar o módulo estimado com o módulo obtido no ensaio de vibrações. Para o cálculo do módulo de elasticidade pela regra das misturas, é necessário adotar valores do módulo de elasticidade da fibra de vidro e da resina de poliéster separadamente, da mesma forma como foi feito para os limites de ruptura no cálculo anterior. Os valores adotados foram baseados em (NETO; PARDINI, 2006) sendo de 3 GPa para a resina de poliéster e 70 GPa para a fibra de vidro. Assim tem-se que:

$$E_c = \beta E_f V_f + E_m V_m \quad (14)$$

Sendo  $\beta$  o fator de aleatoriedade das fibras, adotado segundo (CASARIL et al., 2007) como 0,37 para fibras picadas e mantas. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade do compósito ( $E_c$ ) pela regra das misturas.

Tabela 8 – Módulo de elasticidade

|       |          |                                       |
|-------|----------|---------------------------------------|
| $V_f$ | 0,21     | (fração volumétrica da fibra)         |
| $V_m$ | 0,79     | (fração volumétrica da matriz)        |
| $E_f$ | 70 GPa   | (Módulo de elasticidade da fibra )    |
| $E_m$ | 3 GPa    | (Módulo de elasticidade da matriz)    |
| $E_c$ | 7,85 GPa | (Módulo de elasticidade do compósito) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Uma outra propriedade elástica de uma lâmina de MPRF (material plástico reforçado com fibras) é o módulo de cisalhamento ( $G$ ), o qual relaciona as tensões de cisalhamento, no plano da lâmina, com as deformações angulares neste mesmo plano (NETO; PARDINI, 2006). A relação para estimar o módulo de cisalhamento foi baseada em (NETO; PARDINI, 2006) e é dada pela equação:

$$G = \frac{(G_F \cdot G_M)}{(V_F \cdot G_M + V_M \cdot G_F)} \quad (15)$$

Onde  $G_F$  e  $G_M$  são os módulos de cisalhamento da fibra e da matriz polimérica, respectivamente, e  $V_F$  e  $V_M$  são as frações volumétricas da fibra e da matriz. Os valores adotados

para  $G_F$  e  $G_M$  foram baseados em (GONÇALVES et al., 2009), sendo  $G_F = 7,7$  GPa e  $G_M = 1,4$  GPa. A Tabela 9 apresenta o valor obtido para o módulo de cisalhamento.

Tabela 9 – Módulo de cisalhamento

|       |          |                                       |
|-------|----------|---------------------------------------|
| $V_f$ | 0,21     | (fração volumétrica da fibra)         |
| $V_m$ | 0,79     | (fração volumétrica da matriz)        |
| $G_f$ | 7,7 GPa  | (Módulo de cisalhamento da fibra )    |
| $G_m$ | 1,4 GPa  | (Módulo de cisalhamento da matriz)    |
| $G$   | 1,69 GPa | (Módulo de cisalhamento do compósito) |

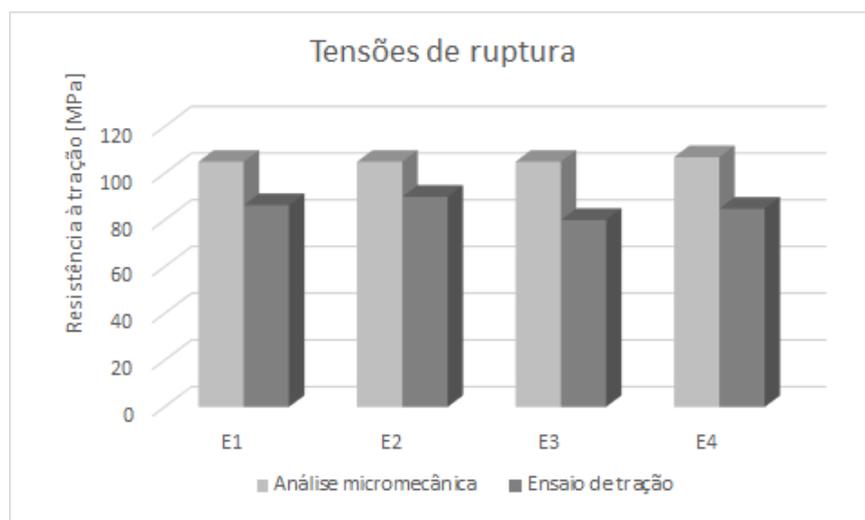
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A análise micromecânica é muito vantajosa para uma estimativa preliminar da tensão de ruptura e módulo de elasticidade de um material compósito, por ser um método simples e de fácil implementação computacional. Mas é importante ressaltar que esta é uma mera aproximação, e foi utilizada como uma ferramenta de auxílio nos experimentos realizados.

#### 5.4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Se comparados aos valores da análise micromecânica, as médias dos resultados do ensaio de tração foram menores. A Figura 19 apresenta os resultados de resistência à tração para cada grupo, e também os valores esperados para os mesmos pela análise micromecânica.

Figura 19 – Comparação dos valores de resistência à tração



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Estes valores menores para o ensaio de tração, como discutido anteriormente, podem estar relacionados às concentrações de tensões na extremidade dos corpos de prova. Outra

questão é que a análise micromecânica, por ser uma estimativa teórica, assume que o material é livre de tensões internas e térmicas, além de a matriz polimérica ser considerada homogênea e isotrópica, apresentando comportamento linear elástico quando solicitada mecanicamente. Porém, na prática, é difícil dizer que essas hipóteses realmente representam o comportamento mecânico do compósito, e o que geralmente ocorre, é a falha antes do estimado pelas leis da mecânica. Vale ressaltar que, mesmo com estas hipóteses levantadas, os valores obtidos no ensaio de tração foram próximos do valor calculado pela análise micromecânica. E que possivelmente, devido a estes pontos, os resultados ficaram um pouco abaixo do esperado.

Quanto aos módulos de elasticidade, o que se obteve no ensaio de vibrações foram alguns valores maiores que o estimado pela análise micromecânica. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no experimento de vibrações.

Tabela 10 – Medidas e frequências obtidas

| Grupo | L [mm] | t [mm] | b [mm] | Massa [g] | $f_f$ [Hz] | $f_t$ [Hz] |
|-------|--------|--------|--------|-----------|------------|------------|
| E1    | 149,7  | 25,20  | 2,46   | 13,12     | 285        | 997        |
| E2    | 147,5  | 24,53  | 2,46   | 11,19     | 305        | 1079       |
| E3    | 149,9  | 24,77  | 2,68   | 13,44     | 311        | 1137       |
| E4    | 169,0  | 24,73  | 3,17   | 17,30     | 258        | 1041       |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Assim, utilizando a Equação (1) e a Equação (3), foi possível calcular os resultados obtidos para os módulos, que são apresentados na Tabela 11.

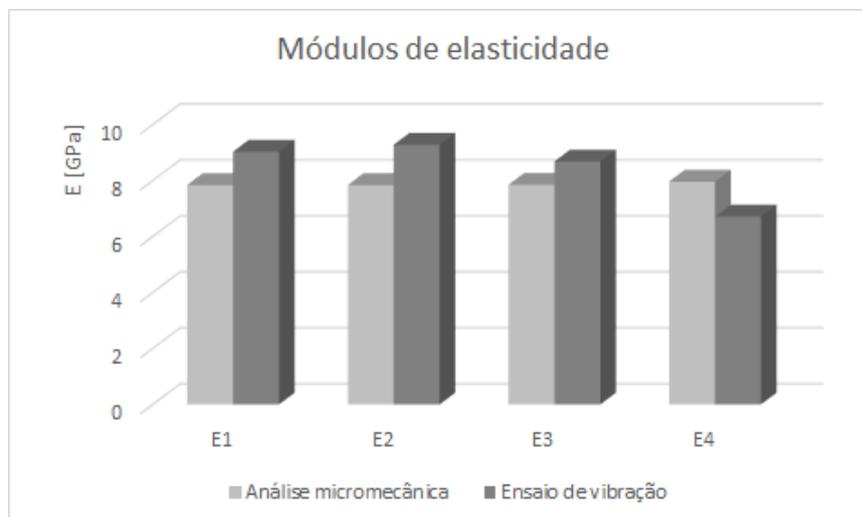
Tabela 11 – Módulos E e G

| Grupo | E [GPa] | G [GPa] |
|-------|---------|---------|
| E1    | 9,03    | 3,49    |
| E2    | 9,28    | 3,59    |
| E3    | 8,68    | 3,56    |
| E4    | 6,71    | 2,68    |

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A Figura 20 apresenta os resultados do ensaio de vibrações e também o da análise micromecânica, onde é possível observar as variações dos módulos de elasticidade (E).

Figura 20 – Comparação dos módulos de elasticidade (E)

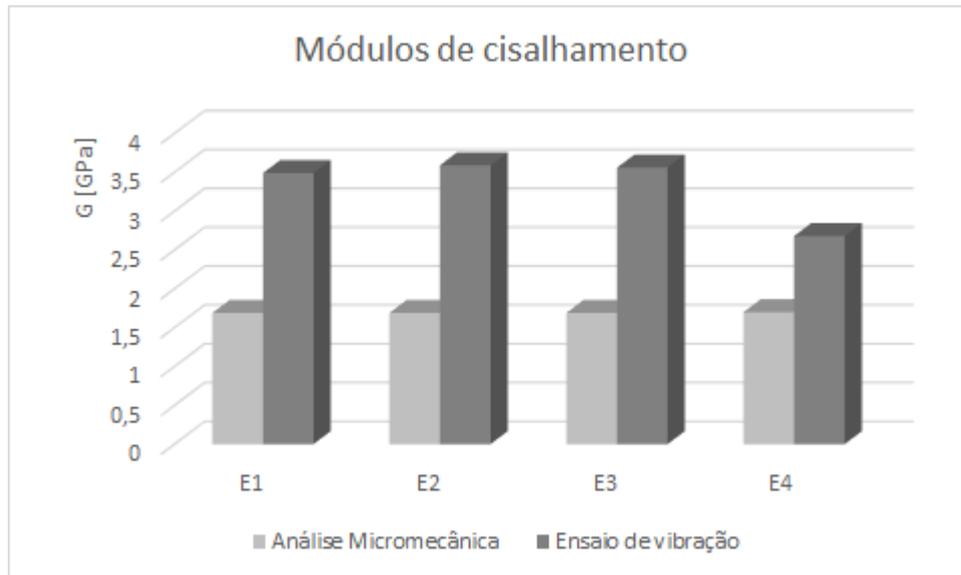


Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Pela Figura 20, observa-se que os três grupos, E1, E2 e E3 ficaram acima da análise micromecânica para os valores dos módulos de elasticidade, e apenas o grupo E4 resultou um valor menor que o estimado pela análise micromecânica. Ao contrário do que foi discutido anteriormente na comparação da resistência à tração, desta vez observou-se um tendência de os valores obtidos em experimento serem maiores que os obtidos pelas leis da micromecânica. Isto pode estar relacionado às incertezas do ensaio de vibração, sendo que a coleta das frequências de flexão podem ser influenciadas por ruídos do ambiente, uma vez que foi utilizado um microfone para medir estas frequências. Outra questão é que no cálculo dos módulos pela micromecânica, o fator  $\beta$  é uma mera aproximação de como as fibras estão organizadas no compósito, podendo muitas vezes estar abaixo ou acima do valor ideal.

O comportamento dos módulos de cisalhamento com a pós-cura, foi semelhante ao que ocorreu com os módulos de elasticidade, porém, para o módulo de cisalhamento, todos os valores obtidos no ensaio de vibrações ficaram acima do valor obtido pela análise micromecânica. A Figura 21 apresenta os resultados do ensaio de vibrações e também o da análise micromecânica, onde é possível observar as variações dos módulos de cisalhamento (G).

Figura 21 – Comparação dos módulos de cisalhamento (G)



Fonte: Elaborado pelo autor(2017).

A Figura 21 mostra que todos os módulos de cisalhamento obtidos experimentalmente foram maiores que o calculado pela análise micromecânica. Assim como nos módulos de elasticidade, a coleta das frequências do modo torcional pode ter sido afetada por ruídos do ambiente, influenciando no aumento dos módulos de cisalhamento.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizado um estudo da pós-cura em compósitos convencionais de resina de poliéster com fibra de vidro, que é o tipo mais utilizado nas aplicações náuticas. Os corpos de prova foram avaliados em três caracterizações mecânicas distintas, além de um ensaio de combustão, buscando identificar se a pós-cura aprimorou o comportamento mecânico dos mesmos, e portanto, apresentar se para estes compósitos convencionais a pós-cura pode ou não ser uma técnica viável.

Como almejado, todas as placas fabricadas pelo processo de laminação manual resultaram em corpos de prova satisfatórios, com uma distribuição geométrica uniforme, satisfazendo os requisitos para a realização de todos os ensaios mecânicos.

Através dos ciclos térmicos adotados para a pós-cura e da metodologia de ensaio utilizada, não pode-se dizer que a pós-cura melhorou a resistência à tração dos laminados, a Dureza Barcol, os módulos de elasticidade e de cisalhamento. Além disso, também não foi possível constatar que a pós-cura aumentou a fração mássica de fibra dos corpos de prova.

A pós-cura acelerou a volatilização do estireno, mas não necessariamente aumentou o número de ligações cruzadas no sistema. Esta volatilização do estireno pode ainda ter proporcionado algumas regiões de acúmulo de gases dentro do laminado, de forma a aumentar a espessura do mesmo. Pelos ensaios realizados não foi possível verificar se houve um aumento da resistência interlaminar (vidro e resina), algo já relatado na literatura.

Segundo (NASSEH, 2017), a pós-cura não é um processo de simples aplicabilidade, tratando-se de uma técnica complexa onde existem muitas variáveis a serem controladas. Nasseh (2017) ainda cita que um processo ideal de pós-cura deve ser realizado à uma taxa de  $1^{\circ} \text{C}/\text{minuto}$ , o que implica em uma alta capacidade de controlar a temperatura, exigindo um forno mais sofisticado, o que torna o processo de pós-cura um tanto oneroso. Além disso, a pós-cura, segundo (NASSEH, 2017), depende muito da temperatura de transição vítrea da resina ( $T_g$ ), sendo que o ideal é não passar de  $15^{\circ} \text{C}$  acima da  $T_g$  do material, pois temperaturas muito altas possivelmente ocasionam uma quebra de ligações na cadeia principal das moléculas do polímero, causando um início de degradação em virtude da temperatura, resultando em perdas de propriedades mecânicas.

Neste contexto, conclui-se que a pós-cura pode não ser uma técnica viável para a utilização em projetos de componentes náuticos de baixo custo, ou seja, aqueles que são fabricados com mantas de fibra de vidro e resina de poliéster. Ademais, esta técnica deve ser muito bem controlada, além de necessitar de ferramentas mais sofisticadas para sua aplicação, tornando-a muitas vezes restrita à projetos de peças de alta performance, onde geralmente custos elevados são aceitáveis, uma vez que o objetivo principal é o desempenho mecânico.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a pós-cura para uma temperatura de 15° C acima da temperatura de transição vítrea da resina, variando apenas o tempo de pós-cura, e refazer todas as caracterizações mecânicas;
- Controlar os ciclos de aquecimento e resfriamento da peça;
- Confeccionar corpos de prova apenas com mantas e outros com tecidos orientados e mantas, realizar a pós-cura e verificar se houve mudanças para aqueles corpos de prova com tecidos orientados em relação àqueles apenas com mantas.

## REFERÊNCIAS

- AL-QURESHI, H. A. *Materiais Compósitos: análise e fabricação*. 1. ed. Florianópolis: UFSC/CEM, 2010.
- ASTM. Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. *ASTM Standards*, 1994.
- ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. *ASTM Standards*, 1995.
- ASTM. Standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. *ASTM Standards*, 2001.
- BAGIS, Y.; RUEGEBERG, F. The effect of post-cure heating on residual, unreacted monomer in a commercial resin composite. *Elsevier*, p. 4, nov. 1999.
- BITTENCOURT, A. P. P. *Estudo comparativo de processos de obtenção de compósitos fibra de vidro/políéster*. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.
- CAIN, J. J. et al. Post-curing effects on marine VARTM FRP composite material properties for test and implementation. *Engineering Materials and Technology*, v. 128, p. 7, ago. 2006.
- CASARIL, A. et al. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, p. 408–419, 2007.
- CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N. *Fiberglass reinforced plastics*. Mill Road, Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1995. v. 1.
- FERRACANE, J.; CONDON, J. Post-cure heat treatments for composites: properties and fractography. *Dent Mater*, p. 6, set. 1992.
- FIORENTIN, T. A. *Estudo de geração de ruído em reatores de núcleo de ar*. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- GALVÃO, L. F. B. *A influência do processo de cura nas propriedades do compósito estrutural carbono/epóxi fabricado via VARTM: processamento e caracterização*. 2012. 95 p. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo, 2012.
- GOMES, M. N. *Tratamento térmico pré e pós-cura de diferentes compósitos: análise térmica, resistência à flexão e grau de conversão*. Dissertação (mathesis) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- GONÇALVES, V. O. et al. Resistência ao cisalhamento interlaminar em compósitos de fibra de carbono e de vidro com resina epóxi. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 1, n. 1, p. 5, abr. 2009.
- GREENE, E. *Marine Composites*. Annapolis, Maryland 21403: Eric Greene Associates, Inc., 1999.
- INACIO, E. dos A. *Estudo de fibras de laminados usados na indústria náutica*. Dissertação (techreport) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

JÚNIOR, J. H. S. A. et al. Comportamento mecânico e térmico de compósitos de fibra de vidro sob diferentes temperaturas de cura. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, v. 13, p. 9, Dezembro 2011.

KUMAR, D. S. et al. Effect of post-curing on thermal and mechanical behavior of gfrp composites. *IOPscience*, 2015.

MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos*. 1. ed. Av. Diógenes Ribeiro de Lima, 3294 São Paulo: Artliber, 2011. v. 1.

NASSEH, J. *Métodos avançados de construção em composites*. 1. ed. Rio de Janeiro: Jorge Nasseh, 2007.

NASSEH, J. *Manual de Construção de Barcos*. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

NASSEH, J. Utilização de materiais compósitos na indústria náutica. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 2017.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos Estruturais*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006. v. 1.

PEREIRA, J. C. *Curso de projeto estrutural com materiais compostos*. Florianópolis, 2003.

VENTURA, A. M. F. M. *História dos compósitos*. 2012. Disponível em: <<https://compositosmetalicos.wordpress.com/2012/06/22/hello-world/>>.

WENDT, S. jr. The effect of heat used as a secondary cure upon the physmal properties of three composite resins. 1. diametral tensile strength, compressive strength, and marginal dimensional stability. *Quint Int*, v. 20, p. 259–263, 1987.

WORZAKOWSKA, M. Kinetics of the curing reaction of unsaturated polyester resins catalyzed with new initiators and a promoter. *Wiley Periodicals*, n. 10.1002, p. 6, jul. 2006.

## APÊNDICE A – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA

Figura 22 – Medidas E1

|   | <b>Comprimento</b> | <b>Largura</b> | <b>Espessura</b> |         |  |
|---|--------------------|----------------|------------------|---------|--|
| 1 | 250,00             | 26,05          | 2,05             | Ponto 1 |  |
|   | 250,00             | 25,50          | 2,10             | Ponto 2 |  |
|   | 250,00             | 26,00          | 2,45             | Ponto 3 |  |
|   | 250,00             | 25,45          | 2,25             | Ponto 4 |  |
|   | 250,00             | 25,20          | 2,30             | Ponto 5 |  |
|   | 250,00             | 25,64          | 2,23             | Média   |  |
| 2 | 250,00             | 25,20          | 2,20             | Ponto 1 |  |
|   | 250,00             | 25,35          | 2,35             | Ponto 2 |  |
|   | 250,00             | 26,20          | 2,45             | Ponto 3 |  |
|   | 250,00             | 25,60          | 2,65             | Ponto 4 |  |
|   | 250,00             | 25,75          | 2,40             | Ponto 5 |  |
|   | 250,00             | 25,62          | 2,41             | Média   |  |
| 3 | 250,00             | 25,30          | 2,25             | Ponto 1 |  |
|   | 250,00             | 24,75          | 2,35             | Ponto 2 |  |
|   | 250,00             | 25,20          | 2,70             | Ponto 3 |  |
|   | 250,00             | 24,80          | 2,70             | Ponto 4 |  |
|   | 250,00             | 25,25          | 2,60             | Ponto 5 |  |
|   | 250,00             | 25,06          | 2,52             | Média   |  |
| 4 | 250,00             | 25,25          | 2,35             | Ponto 1 |  |
|   | 250,00             | 25,05          | 2,20             | Ponto 2 |  |
|   | 250,00             | 25,10          | 2,55             | Ponto 3 |  |
|   | 250,00             | 24,90          | 2,55             | Ponto 4 |  |
|   | 250,00             | 24,85          | 2,50             | Ponto 5 |  |
|   | 250,00             | 25,03          | 2,43             | Média   |  |
| 5 | 250,00             | 25,65          | 2,25             | Ponto 1 |  |
|   | 250,00             | 26,15          | 2,50             | Ponto 2 |  |
|   | 250,00             | 26,60          | 2,60             | Ponto 3 |  |
|   | 250,00             | 26,85          | 2,65             | Ponto 4 |  |
|   | 250,00             | 26,40          | 2,60             | Ponto 5 |  |
|   | 250,00             | 26,33          | 2,52             | Média   |  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Medidas E2

| <b>E2 - pós curadas a 50°C</b> |                    |                |                  |         |  |
|--------------------------------|--------------------|----------------|------------------|---------|--|
|                                | <b>Comprimento</b> | <b>Largura</b> | <b>Espessura</b> |         |  |
| 1                              | 250,00             | 25,55          | 2,25             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 26,00          | 2,25             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 26,05          | 2,45             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 26,30          | 2,40             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 26,10          | 2,60             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 26,00          | 2,39             | Média   |  |
| 2                              | 250,00             | 24,65          | 2,30             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,00          | 2,30             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,05          | 2,60             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 24,75          | 2,40             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 24,10          | 2,65             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 24,71          | 2,45             | Média   |  |
| 3                              | 250,00             | 24,90          | 2,50             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,75          | 2,55             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,25          | 2,40             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,05          | 2,65             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 24,65          | 2,55             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 25,12          | 2,53             | Média   |  |
| 4                              | 250,00             | 24,45          | 2,45             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,20          | 2,70             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,60          | 2,50             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,50          | 2,55             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 25,30          | 2,65             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 25,21          | 2,57             | Média   |  |
| 5                              | 250,00             | 24,70          | 2,65             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,20          | 2,80             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,00          | 2,50             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,55          | 2,50             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 25,65          | 2,55             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 25,22          | 2,60             | Média   |  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Medidas E3

| <b>E3 - pós curadas a 75°C</b> |                    |                |                  |         |  |
|--------------------------------|--------------------|----------------|------------------|---------|--|
|                                | <b>Comprimento</b> | <b>Largura</b> | <b>Espessura</b> |         |  |
| 1                              | 250,00             | 24,40          | 2,75             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,15          | 2,90             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 24,70          | 2,65             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 24,90          | 2,50             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 24,55          | 2,35             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 24,74          | 2,63             | Média   |  |
| 2                              | 250,00             | 24,55          | 2,85             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,20          | 2,90             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 24,65          | 2,75             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,20          | 2,85             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 24,60          | 2,60             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 24,84          | 2,79             | Média   |  |
| 3                              | 250,00             | 25,25          | 2,90             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,50          | 2,85             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,80          | 2,80             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,70          | 2,65             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 25,75          | 2,75             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 25,60          | 2,79             | Média   |  |
| 4                              | 250,00             | 25,30          | 2,90             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 25,25          | 2,90             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 25,45          | 3,00             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,35          | 2,80             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 24,90          | 2,75             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 25,25          | 2,87             | Média   |  |
| 5                              | 250,00             | 24,30          | 2,75             | Ponto 1 |  |
|                                | 250,00             | 24,40          | 2,85             | Ponto 2 |  |
|                                | 250,00             | 24,80          | 2,95             | Ponto 3 |  |
|                                | 250,00             | 25,50          | 2,90             | Ponto 4 |  |
|                                | 250,00             | 25,20          | 2,70             | Ponto 5 |  |
|                                | 250,00             | 24,84          | 2,83             | Média   |  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Medidas E4

| <b>E4 - pós curadas a 100°C</b> |                    |                |                  |         |  |
|---------------------------------|--------------------|----------------|------------------|---------|--|
|                                 | <b>Comprimento</b> | <b>Largura</b> | <b>Espessura</b> |         |  |
| 1                               | 250,00             | 25,15          | 2,85             | Ponto 1 |  |
|                                 | 250,00             | 25,6           | 3,00             | Ponto 2 |  |
|                                 | 250,00             | 25,85          | 3,10             | Ponto 3 |  |
|                                 | 250,00             | 25,5           | 3,00             | Ponto 4 |  |
|                                 | 250,00             | 25,45          | 2,90             | Ponto 5 |  |
|                                 | 250,00             | 25,51          | 2,97             | Média   |  |
| 2                               | 250,00             | 25,60          | 3,00             | Ponto 1 |  |
|                                 | 250,00             | 26,30          | 3,30             | Ponto 2 |  |
|                                 | 250,00             | 26,20          | 3,30             | Ponto 3 |  |
|                                 | 250,00             | 25,45          | 3,20             | Ponto 4 |  |
|                                 | 250,00             | 25,75          | 3,05             | Ponto 5 |  |
|                                 | 250,00             | 25,86          | 3,17             | Média   |  |
| 3                               | 250,00             | 24,90          | 2,85             | Ponto 1 |  |
|                                 | 250,00             | 25,35          | 3,40             | Ponto 2 |  |
|                                 | 250,00             | 25,15          | 3,20             | Ponto 3 |  |
|                                 | 250,00             | 25,60          | 3,15             | Ponto 4 |  |
|                                 | 250,00             | 25,25          | 2,95             | Ponto 5 |  |
|                                 | 250,00             | 25,25          | 3,11             | Média   |  |
| 4                               | 250,00             | 24,00          | 2,95             | Ponto 1 |  |
|                                 | 250,00             | 24,40          | 3,20             | Ponto 2 |  |
|                                 | 250,00             | 24,70          | 3,10             | Ponto 3 |  |
|                                 | 250,00             | 24,70          | 3,15             | Ponto 4 |  |
|                                 | 250,00             | 24,30          | 2,95             | Ponto 5 |  |
|                                 | 250,00             | 24,42          | 3,07             | Média   |  |
| 5                               | 250,00             | 23,55          | 3,10             | Ponto 1 |  |
|                                 | 250,00             | 23,90          | 3,15             | Ponto 2 |  |
|                                 | 250,00             | 23,90          | 3,20             | Ponto 3 |  |
|                                 | 250,00             | 23,80          | 3,15             | Ponto 4 |  |
|                                 | 250,00             | 23,90          | 2,90             | Ponto 5 |  |
|                                 | 250,00             | 23,81          | 3,10             | Média   |  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE B – ENSAIO DE COMBUSTÃO

Figura 26 – Ensaio de combustão

| Massa dos corpos de prova        |         |              |         |
|----------------------------------|---------|--------------|---------|
| 50°C                             |         | Sem pós-cura |         |
| CP1                              | 1,8819  | CP1          | 2,0131  |
| CP2                              | 2,0662  | CP2          | 2,0378  |
| CP3                              | 2,0878  | CP3          | 1,861   |
| Antes da queima                  |         |              |         |
| CP1                              | 78,332  | CP1          | 89,6853 |
| CP2                              | 83,219  | CP2          | 96,8803 |
| CP3                              | 80,3312 | CP3          | 88,2894 |
| Depois da queima                 |         |              |         |
| CP1                              | 77,1835 | CP1          | 88,4506 |
| CP2                              | 81,97   | CP2          | 95,6072 |
| CP3                              | 79,0447 | CP3          | 87,1409 |
| Massa de resina                  |         |              |         |
| CP1                              | 1,1485  | CP1          | 1,2347  |
| CP2                              | 1,249   | CP2          | 1,2731  |
| CP3                              | 1,2865  | CP3          | 1,1485  |
| Massa de fibra                   |         |              |         |
| CP1                              | 0,7334  | CP1          | 0,7784  |
| CP2                              | 0,8172  | CP2          | 0,7647  |
| CP3                              | 0,8013  | CP3          | 0,7125  |
| Percentual de fibra nas amostras |         |              |         |
| CP1                              | 0,39    | CP1          | 0,39    |
| CP2                              | 0,40    | CP2          | 0,38    |
| CP3                              | 0,38    | CP3          | 0,38    |
| Média                            | 0,39    | Média        | 0,38    |
| Desvio                           | 0,005   | Desvio       | 0,005   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Ensaio de combustão

| Tara dos cadinhos                   |         |        |         |
|-------------------------------------|---------|--------|---------|
| 75°C                                |         | 100°C  |         |
| CP1                                 | 76,4415 | CP1    | 87,6675 |
| CP2                                 | 81,1418 | CP2    | 94,8412 |
| CP3                                 | 78,2378 | CP3    | 86,4252 |
| Massa corpos de prova + cadinhos    |         |        |         |
| CP1                                 | 78,5349 | CP1    | 89,7129 |
| CP2                                 | 83,0709 | CP2    | 96,819  |
| CP3                                 | 80,2293 | CP3    | 88,6399 |
| Massa das amostras antes da queima  |         |        |         |
| CP1                                 | 2,0934  | CP1    | 2,0454  |
| CP2                                 | 1,9291  | CP2    | 1,9778  |
| CP3                                 | 1,9915  | CP3    | 2,2147  |
| Depois da queima junto aos cadinhos |         |        |         |
| CP1                                 | 77,2259 | CP1    | 88,358  |
| CP2                                 | 81,8901 | CP2    | 95,4933 |
| CP3                                 | 78,9918 | CP3    | 87,1767 |
| Massa de fibra                      |         |        |         |
| CP1                                 | 0,7844  | CP1    | 0,6905  |
| CP2                                 | 0,7483  | CP2    | 0,6521  |
| CP3                                 | 0,754   | CP3    | 0,7515  |
| Massa de resina                     |         |        |         |
| CP1                                 | 1,309   | CP1    | 1,3549  |
| CP2                                 | 1,1808  | CP2    | 1,3257  |
| CP3                                 | 1,2375  | CP3    | 1,4632  |
| Percentual de fibra nas amostras    |         |        |         |
| CP1                                 | 0,37    | CP1    | 0,34    |
| CP2                                 | 0,39    | CP2    | 0,33    |
| CP3                                 | 0,38    | CP3    | 0,34    |
| Média                               | 0,38    |        | 0,34    |
| Desvio                              | 0,006   | Desvio | 0,004   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE C – ENSAIO DE DUREZA BARCOL

Figura 28 – Dureza Barcol

| ENSAIO DE DUREZA BARCOL |               |                    |               |                    |               |                    |               |
|-------------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|
| E1 - SEM PÓS CURA       |               | E2 - PÓS CURA 50°C |               | E3 - PÓS CURA 75°C |               | E4- PÓS CURA 100°C |               |
| Pontos                  | Dureza Barcol | Pontos             | Dureza Barcol | Pontos             | Dureza Barcol | Pontos             | Dureza Barcol |
| 1                       | 51            | 1                  | 45            | 1                  | 52            | 1                  | 49            |
| 2                       | 48            | 2                  | 53            | 2                  | 57            | 2                  | 60            |
| 3                       | 53            | 3                  | 50            | 3                  | 46            | 3                  | 56            |
| 4                       | 55            | 4                  | 47            | 4                  | 43            | 4                  | 57            |
| 5                       | 61            | 5                  | 49            | 5                  | 42            | 5                  | 55            |
| 6                       | 62            | 6                  | 49            | 6                  | 53            | 6                  | 50            |
| 7                       | 50            | 7                  | 44            | 7                  | 41            | 7                  | 49            |
| 8                       | 46            | 8                  | 42            | 8                  | 52            | 8                  | 53            |
| 9                       | 55            | 9                  | 55            | 9                  | 43            | 9                  | 50            |
| 10                      | 53            | 10                 | 53            | 10                 | 49            | 10                 | 58            |
| 11                      | 49            | 11                 | 48            | 11                 | 47            | 11                 | 54            |
| 12                      | 51            | 12                 | 51            | 12                 | 44            | 12                 | 54            |
| Média                   | 52,83         | Média              | 48,83         | Média              | 47,42         | Média              | 53,75         |
| D. padrão               | 4,86          | D. padrão          | 3,90          | D. padrão          | 5,14          | D. padrão          | 3,67          |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## APÊNDICE D – ENSAIO DE TRAÇÃO

Figura 29 – Tensões de ruptura

| E1 - SEM PÓS-CURA |              |               |                        |           |              |                |
|-------------------|--------------|---------------|------------------------|-----------|--------------|----------------|
| C.P.              | LARGURA [mm] | ESPESSURA[mm] | ÁREA[mm <sup>2</sup> ] | FORÇA [N] | TENSÃO [Mpa] | Local da falha |
| CP1               | 25,64        | 2,23          | 57,18                  | 6458      | 112,95       |                |
| CP2               | 25,62        | 2,41          | 61,74                  | 5292      | 85,71        |                |
| CP3               | 25,06        | 2,52          | 63,15                  | 5458      | 86,43        |                |
| CP4               | 25,03        | 2,43          | 60,82                  | 4873      | 80,12        |                |
| CP5               | 26,33        | 2,52          | 66,35                  | 5919      | 89,21        |                |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Tensões de ruptura

| E2 - 50°C |              |               |                        |           |              |                |
|-----------|--------------|---------------|------------------------|-----------|--------------|----------------|
| C.P.      | LARGURA [mm] | ESPESSURA[mm] | ÁREA[mm <sup>2</sup> ] | FORÇA [N] | TENSÃO [Mpa] | Local da falha |
| CP1       | 26,00        | 2,39          | 62,14                  | 3388      | 54,52        |                |
| CP2       | 24,71        | 2,45          | 60,54                  | 5448      | 89,99        |                |
| CP3       | 25,12        | 2,53          | 63,55                  | 6312      | 99,32        |                |
| CP4       | 25,21        | 2,57          | 64,79                  | 5623      | 86,79        |                |
| CP5       | 25,22        | 2,60          | 65,57                  | 6478      | 98,79        |                |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Tensões de ruptura

| E3 - 75°C |              |               |                        |           |              |                |
|-----------|--------------|---------------|------------------------|-----------|--------------|----------------|
| C.P.      | LARGURA [mm] | ESPESSURA[mm] | ÁREA[mm <sup>2</sup> ] | FORÇA [N] | TENSÃO [Mpa] | Local da falha |
| CP1       | 24,74        | 2,63          | 65,07                  | 4035      | 62,01        |                |
| CP2       | 24,84        | 2,79          | 69,30                  | 5549      | 80,07        |                |
| CP3       | 25,60        | 2,79          | 71,42                  | 5808      | 81,32        |                |
| CP4       | 25,25        | 2,87          | 72,47                  | 5425      | 74,86        |                |
| CP5       | 24,84        | 2,83          | 70,30                  | 7124      | 101,34       |                |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Tensões de ruptura

| E4 - 100°C |              |               |                        |           |              |                |
|------------|--------------|---------------|------------------------|-----------|--------------|----------------|
| C.P.       | LARGURA [mm] | ESPESSURA[mm] | ÁREA[mm <sup>2</sup> ] | FORÇA [N] | TENSÃO [Mpa] | Local da falha |
| CP1        | 25,51        | 2,97          | 75,76                  | 6432      | 84,89        |                |
| CP2        | 25,86        | 3,17          | 81,98                  | 6965      | 84,96        |                |
| CP3        | 25,25        | 3,11          | 78,53                  | 6604      | 84,10        |                |
| CP4        | 24,42        | 3,07          | 74,97                  | 5886      | 78,51        |                |
| CP5        | 23,81        | 3,10          | 73,81                  | 6835      | 92,60        |                |

Fonte: Elaborado pelo autor.