

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

ANA PAULA PEIXOTO BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS
FIBRA DE VIDRO/POLIÉSTER**

Joinville, 2015

ANA PAULA PEIXOTO BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS
FIBRA DE VIDRO/POLIÉSTER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Dr. Eng. Gabriel Benedet Dutra

Joinville, 2015

ANA PAULA PEIXOTO BITTENCOURT

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE OBTENÇÃO DE COMPÓSITOS
FIBRA DE VIDRO/POLIÉSTER**

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

Joinville (SC), 30 de Junho de 2015.

Banca Examinadora:

Prof. Gabriel Benedet Dutra, Dr Ing.
Orientador

Prof. Hazim A. Al-Qureshi, Ph.D

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a meus pais, Jorge Bittencourt Júnior e Leila Regina Peixoto pelos valores que me ensinaram e nos quais me basearei durante a minha carreira.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força para superar as adversidades.

Aos meus pais, Jorge Bittencourt Júnior e Leila Regina Peixoto, e meus irmãos, Bruno Peixoto Bittencourt e Sheila Peixoto de Souza, por terem me apoiado em todos os momentos ao longo da minha jornada acadêmica.

À minha avó paterna Olga Severino de Bittencourt (in memoriam) que sempre ressaltou a importância dos estudos e incentivou seus filhos e netos a estudarem.

Aos meus professores do Colégio de Aplicação da Univali, da Universidade Federal de Santa Catarina, da California State University e da Illinois Institute of Technology, que compartilharam conhecimento comigo. Em especial, quero agradecer aos Profs: Hazim A. Al-Qureshi, membro da banca, a quem tive a honra de ser aluna desde os primeiros períodos da faculdade e quero agradecer pela colaboração neste e outros trabalhos; Thiago Pontin, membro da banca, que além de ótimo professor, me ajudou com diversos assuntos acadêmicos; e claro, faço um agradecimento especial a meu professor e orientador Gabriel Benedet Dutra, sempre solícito e disposto a ajudar, cuja dedicação foi fundamental para a realização deste trabalho.

À Vanessa Vargas, técnica do laboratório de química do CEM, que foi muito querida comigo enquanto utilizei o laboratório para realizar os experimentos.

Aos meus amigos da UFSC, que são muitos, e em especial ao Bruno Backes – melhor colega de classe que tive ao longo destes anos e que espero ser amiga por muito tempo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, que fomentou meu intercâmbio acadêmico aos Estados Unidos.

Aos meus amigos de intercâmbio, que compartilharam comigo os muitos momentos de alegria e saudades durante um ano. Em especial, à Vivian Lima, Vanderlei Rocha, Amanda Dusse e Eglantina Batista – minha melhor *roomate*!

Às minhas amigas de infância, Sarah Marques e Kênnia Gomes, que estão ao meu lado por mais de uma década.

RESUMO

A qualidade e o custo do compósito são fortemente influenciados pelo processo de fabricação, desta forma para produzir um material com as propriedades desejadas ao mínimo possível de recursos é necessário avaliar qual método é o mais adequado. Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de qualificar e quantificar a influência dos processos de laminação manual, laminação a vácuo e infusão nas propriedades físico-mecânicas do compósito fibra de vidro/poliéster. A metodologia adotada consiste de uma pesquisa na literatura a respeito dos métodos abordados, seguida da confecção de corpos de prova com a mesma configuração de laminação, da realização de ensaios com base nas normas ASTM e da análise dos resultados auxiliada por ferramentas estatísticas. A propriedade de tração foi investigada por meio de ensaio, baseado na norma da ASTM D3039, e por análise teórica. Tanto experimental quanto teoricamente, a infusão foi o método com melhores resultados de resistência à tração, seguida da laminação a vácuo e laminação manual. Em termos de resistência ao impacto, houve uma considerável oscilação dos valores obtidos e não é possível afirmar qual é o melhor método. No ensaio de absorção de água, os corpos de provas de laminação manual absorveram mais água do que os demais e os corpos de provas de infusão apresentaram a menor absorção de água. O cálculo de densidade superficial demonstrou que o laminado mais leve é o de infusão e o que tem maior densidade superficial é o feito por laminação manual. Conclui-se que dos três métodos, a infusão é o que resulta num laminado com melhores propriedades físico-mecânicas, a laminação a vácuo produz laminados com propriedades intermediárias e a laminação manual gera laminados com propriedades inferiores.

Palavras-Chave: Compósitos, Embarcações, Laminação, Materiais, Naval.

ABSTRACT

The quality and cost of composites are strongly influenced by the laminating technique, thus to produce a material with the desired properties to a minimum of resources it is necessary to evaluate which technique is the most suitable. Given the above, this work aims to qualify and quantify the influence of hand lay-up, vacuum bagging and infusion on physical and mechanical properties of the composite fiberglass / polyester. The methodology consists of a literature review about the techniques discussed, followed by the production of test specimens with the same laminate configuration, the performance of tests based on ASTM standards and the analyses of the results aided by statistical tools. The tensile strength was investigated by testing, based on ASTM D3039, and theoretical analysis. In both experimentally and theoretically, the infusion had the best tensile strength results, followed by vacuum bagging and hand lay-up. In terms of impact strength, there was considerable fluctuation of values and it is not possible to say which method is the best one. In the water absorption test, the hand lay-up specimens absorbed more water than others, and the infusion specimens had the lowest water absorption. The surface density calculation showed that the lighter specimens were made by infusion and the hand lay-up specimens had the higher surface density. In conclusion, among the three methods, the infusion is the one that results in a laminate with better physical and mechanical properties, vacuum bagging produces laminates with intermediate properties and hand lay-up makes laminates with inferior properties.

Keywords: Boats, Composite, Lamination, Materials, Naval.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – METODOLOGIA GERAL.....	25
FIGURA 2 – CONFECÇÃO DA PLACA PLANA POR LAMINAÇÃO MANUAL.....	27
FIGURA 3 – CONFECÇÃO DA PLACA PLANA POR LAMINAÇÃO A VÁCUO.	28
FIGURA 4 – CONFECÇÃO DA PLACA PLANA POR INFUSÃO.	29
FIGURA 5 – CORTE E ACABAMENTO DOS CORPOS DE PROVA.	30
FIGURA 6 – GEOMETRIA DOS CPS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.	32
FIGURA 7 – FOTOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.	33
FIGURA 8 – GEOMETRIA DOS CPS PARA ENSAIO DE IMPACTO.....	34
FIGURA 9 – FOTOS DO ENSAIO DE IMPACTO.	35
FIGURA 10 – DIMENSÕES DOS CPS PARA ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.	36
FIGURA 11 – FOTOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.	37
FIGURA 12 – MEDIÇÃO E PESAGEM PARA CÁLCULO DA DENSIDADE DAS AMOSTRAS.	38
FIGURA 13 – PLACA FEITA POR LAMINAÇÃO MANUAL.....	39
FIGURA 14 – PLACA FEITA POR LAMINAÇÃO A VÁCUO.	40
FIGURA 15 – PLACA FEITA POR INFUSÃO.	40
FIGURA 16 – CPS DE LM APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO.	41
FIGURA 17 – CPS DE LV APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO.	42
FIGURA 18 – CPS DE I APÓS O ENSAIO DE TRAÇÃO.	42
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	43
FIGURA 20 – CAMADAS DO LAMINADO.	43
FIGURA 21 – REPRESENTAÇÃO DOS EIXOS DA FIBRA E DO LAMINADO.	46
FIGURA 22 – COMPARAÇÃO DE VALORES EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS.....	48
FIGURA 23 – CPS DE IMPACTO APÓS O ENSAIO.	50
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO: FALHA <i>PARTIAL BREAK</i>	51
FIGURA 25 – AUMENTO DE MASSA X TEMPO DE IMERSÃO.	53
FIGURA 26 – GRÁFICO COMPARATIVO DA DENSIDADE SUPERFICIAL.	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MASSAS DE REFORÇOS E MATRIZ DAS PLACAS.	44
TABELA 2 – FRAÇÃO MÁSSICA DE FIBRA E RESINA POR CAMADA.	45
TABELA 3 – VOLUMES ESPECÍFICOS DE FIBRA E RESINA POR CAMADA.	45
TABELA 4 – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE CADA CAMADA.	47
TABELA 5 – ESPESURAS ESTIMADAS E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS.	47
TABELA 6 – TEOR DE FIBRAS DE CADA PLACA.	49
TABELA 7 – RESISTÊNCIA AO IMPACTO E O TIPO DE FALHA DOS CPS DE IMPACTO.	51

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
CPs	Corpos de prova
EA	Ensaio de absorção de água
EI	Ensaio de impacto
ET	Ensaio de tração
FS	Fator de segurança
I	Infusão
LM	Laminação manual
LV	Laminação a vácuo
PRFV	Plástico reforçado de fibra de vidro

LISTA DE SÍMBOLOS

m_m	Massa da manta
m_t	Massa do tecido
m_r	Massa da resina
M_f	Fração mássica de fibra
M_r	Fração mássica de resina
m_{m+r}	Massa da manta mais a massa da resina
m_{t+r}	Massa do tecido mais a massa da resina
v_f	Volume específico da fibra
v_m	Volume específico da matriz
ρ_f	Densidade da fibra
ρ_r	Densidade da resina
$(\sigma_x)_m$	Resistência à tração da camada de manta na direção do ensaio
β	Fator de eficiência do alinhamento das fibras
σ_f	Resistência à tração de fibra de vidro tipo E
σ_r	Resistência à tração da matriz de poliéster
$(\sigma_l)_t$	Resistência à tração da camada de tecido no eixo axial às fibras
$(\sigma_x)_t$	Resistência à tração da camada de tecido na direção do ensaio
θ	Ângulo de orientação da fibra
σ_c	Resistência à tração do compósito
t_m	Espessura de cada camada de manta
t_t	Espessura de cada camada de tecido
ρ_A	Densidade superficial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. <i>Objetivo Geral</i>	16
1.1.2. <i>Objetivos Específicos</i>	16
2. LAMINAÇÃO MANUAL	17
2.1. PROCESSO	17
2.2. EQUIPAMENTOS	18
2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS	19
2.4. APLICAÇÕES	19
3. LAMINAÇÃO A VÁCUO	20
3.1. PROCESSO	20
3.2. EQUIPAMENTOS	21
3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS	21
3.4. APLICAÇÕES	22
4. INFUSÃO	23
4.1. PROCESSO	23
4.2. EQUIPAMENTOS	23
4.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS	24
4.4. APLICAÇÕES	24
5. METODOLOGIA	25
5.1. MATERIAIS	25
5.2. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	26
5.2.1. <i>Laminação manual</i>	26
5.2.2. <i>Laminação a vácuo</i>	27
5.2.3. <i>Infusão</i>	28
5.2.4. <i>Corte e Acabamento dos Corpos de Prova</i>	29
5.3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	31
5.3.1. <i>Ensaio de tração</i>	31
5.3.2. <i>Ensaio de impacto</i>	33
5.3.3. <i>Ensaio de absorção de água</i>	35
5.3.4. <i>Densidade Superficial</i>	38
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
6.1. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
6.2. ENSAIO DE TRAÇÃO	41
6.2.1. <i>Análise teórica</i>	43
6.2.2. <i>Discussão dos resultados</i>	48
6.3. ENSAIO DE IMPACTO	50
6.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA	52
6.5. CÁLCULO DA DENSIDADE SUPERFICIAL	54
7. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	57

APÊNDICE A - ETIQUETA DOS CORPOS DE PROVA.....	59
APÊNDICE B – DIMENSÕES DOS CPS DE TRAÇÃO.....	60
APÊNDICE C – DIMENSÕES E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS CPS.	61
APÊNDICE D – RESULTADOS DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT PARA O ENSAIO DE TRAÇÃO.....	62
APÊNDICE E – VALORES ENCONTRADOS NO ENSAIO DE IMPACTO.....	63
APÊNDICE F – RESULTADOS DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT PARA O ENSAIO DE IMPACTO: FALHA <i>PARTIAL BREAK</i>.	64
APÊNDICE G – MASSA DOS CPS DO EA ANTES E APÓS A IMERSÃO.....	65
APÊNDICE H – AUMENTO NA MASSA DOS CPS, %.....	66
APÊNDICE I – DIMENSÕES, MASSA E DENSIDADE SUPERFICIAL DAS AMOSTRAS.....	67
APÊNDICE J – RESULTADOS DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT DA DENSIDADE SUPERFICIAL.....	68

1. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, a competitividade acirrada no mercado náutico exige que cada vez mais os estaleiros inovem em seus projetos, lançando produtos *high tech* com o menor custo possível (NICOLAIS; MEO; MILELLA, 2011). Neste contexto, a seleção do material deve ser feita criteriosamente, para que as propriedades físico-mecânicas necessárias sejam obtidas de forma econômica. Na indústria náutica, dentre os materiais amplamente empregados estão os compósitos.

O material compósito pertence a uma categoria de materiais estruturais de engenharia e é constituído de dois ou mais componentes que juntos lhe conferem propriedades singulares. Quando sua configuração se dá por uma matriz e um reforço, é chamado de material compósito reforçado com fibra. Neste caso, a fibra é o reforço e confere resistência e rigidez enquanto que a matriz é responsável pela distribuição de cargas e pela resistência do material ao ambiente (MAZUMDAR, 2002).

Devido ao leque de materiais que podem ser utilizados na sua constituição, fabricam-se materiais compósitos com grande diversidade de propriedades, possibilitando sua aplicação em diversas áreas de engenharia (IVANOV; CHESHKOV; NATOVA, 2001). Na indústria náutica, os compósitos mais populares são constituídos pelas resinas termofixas, tais como a resina de poliéster, reforçadas com fibra de vidro – compósito denominado Plástico Reforçado de Fibra de Vidro (PRFV) (MAZUMDAR, 2002). Os PRFV aliam baixa densidade com excelentes propriedades mecânicas, tolerância à deterioração, resistência à corrosão e resistência à fadiga (SHENOI; WELLICOME, 1993). Nicolais, Meo e Milella (2011) explica que os PRFV são comumente empregados no setor náutico porque tornam a embarcação mais leve, possibilitando deslocamento mais rápido e conseqüentemente possibilitam menor consumo de combustível.

Uma vez que a qualidade e o custo do compósito são fortemente influenciados pelo processo de fabricação (MARINUCCI, 2011), cabe ao engenheiro avaliar qual método de fabricação é o mais adequado, produzindo material com as propriedades desejadas com o mínimo possível de recursos – tempo, dinheiro, espaço, qualificação de mão-de-obra (MAZUMDAR, 2002). Recentemente, Najafi, Eslami-farsani e Khalili (2012) avaliaram a influência do método de fabricação na resistência à compressão de compósitos-sanduíche. Para o estudo, foram utilizadas fibras de vidro e de aramida como reforço, resina de poliéster como matriz e madeira balsa como núcleo e adotados os métodos de laminação manual e

infusão. Como conclusão, constataram que o processo de fabricação claramente influencia na propriedade final de resistência à compressão do compósito. Apesar do impacto que o método de fabricação tem nas propriedades finais dos compósitos, a literatura ainda carece de estudo sistemático de sua influência nas propriedades físico-mecânicas dos PRFV.

Diante do exposto, este trabalho fará um estudo comparativo dos processos de laminação manual, laminação a vácuo e infusão quanto às propriedades de tração, impacto, absorção de água e densidade superficial obtidas na fabricação de um compósito fibra de vidro/poliéster.

Os três métodos apresentados são utilizados no setor náutico. A técnica de laminação manual, embora tenha sido substituída na fabricação de cascos por métodos mais avançados em estaleiros competitivos, ainda pode ser uma boa opção para algumas aplicações (NASSEH, 2008). Além disso, é interessante estudá-la por ser o método básico de fabricação de compósitos. Os métodos de laminação a vácuo e infusão têm a vantagem de emitir menos poluentes – fator importante quando se utiliza resina de Poliéster, pois gera menor impacto ambiental e proporciona melhores condições de trabalho aos laminadores. A técnica de laminação a vácuo é a mais barata dentre os processos que trabalham a baixa pressão (AIREX BALTEK, 2011). Quanto ao método de infusão, Lombard (2011) fala que este gera um compósito com maior resistência e qualidade do que o método de laminação manual.

Com relação ao material utilizado nesta pesquisa, serão adotadas a resina de poliéster como matriz e a fibra de vidro como reforço. Esta classe de resina apresenta desempenho mecânico médio e é a mais utilizada na construção de barco, devido ao menor custo e facilidade no processamento. Quanto à fibra de vidro, esta é uma opção de baixo custo e popular de reforço para cascos de embarcações e apresenta baixa depreciação ao longo do tempo (NASSEH, 2008).

Para investigar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos, serão feitos corpos de prova (CPs), utilizando o mesmo lote de materiais, para os três métodos de fabricação. Depois de confeccionados, os corpos de prova serão ensaiados com base nas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). E, por último, será feita uma comparação com base estatística utilizando a distribuição t de *student*.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Qualificar e quantificar a influência dos processos de laminação manual, laminação a vácuo e infusão nas propriedades físico-mecânicas de um compósito fibra de vidro/poliéster.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Obter corpos de prova de PRFV, com a mesma configuração de laminação, utilizando as metodologias de laminação manual, laminação a vácuo e infusão.
- Comparar os corpos de provas obtidos através de diferentes metodologias em termos das propriedades físicas de: absorção de água e densidade superficial.
- Comparar os corpos de provas obtidos através de diferentes metodologias em termos das propriedades mecânicas de: resistência à tração e resistência ao impacto.

2. LAMINAÇÃO MANUAL

2.1. PROCESSO

O processo de laminação manual inicia com a deposição de um agente desmoldante sobre o molde. Além de facilitar a separação da peça na etapa de desmoldagem, este produto evita a aderência da peça no molde, contribuindo para um melhor acabamento da superfície do laminado. Os tipos principais são ceras e filmes (ABMACO, 2008) e segundo Abmaco (2009) a sua aplicação deve ser feita sobre molde limpo e seco.

A seguir, opcionalmente, pode ser feita a aplicação do *gelcoat* (ABMACO, 2009). Marinucci (2011) explica que este material é, na verdade, uma resina com características especiais. A depender da composição, pode conferir ao laminado proteção contra intempéries, raios ultravioleta e ação da água. Também pode proporcionar acabamento liso, colorido e brilhante na superfície da peça.

De acordo com Abmaco (2009, p. 30) “O ponto exato para se iniciar a laminação sobre o *gelcoat* acontece quando este, ao ser tocado pelos dedos, apresenta adesividade (*tacky*), mas sem tingir os dedos”. Se houver laminação prematura, pode ocorrer um defeito chamado de *print-thru*, que é a retratação das fibras de reforço no *gelcoat*.

Sobre o *gelcoat*, Marinucci (2011) sugere a aplicação de uma camada de resina e, sobre esta, uma camada de manta de baixa gramatura. Este procedimento gera uma boa umectação da manta e acomoda melhor o reforço no molde, facilitando a operação de roletagem para retirada do ar aprisionado na manta.

A seguir, são colocadas sucessivas camadas de reforço devidamente impregnadas pela matriz (MARINUCCI, 2011). Carvalho (1992) comenta que tanto os reforços – mantas e tecidos – quanto a resina são colocados manualmente sobre o molde, com rolos de pintor ou pincéis. Após a adição do iniciador, a resina permanece líquida durante algum tempo antes da etapa de vitrificação. As fibras de vidro são assentadas no molde e as bolhas de ar são removidas com roletes compactadores, enquanto a resina ainda está neste estado.

Para Abmaco (2009, p. 31): “Laminação de até 4 ou 5 camadas subsequentes podem ser ininterruptas. Acima deste número, deve-se aguardar a redução da exotermia antes de retomar, sob o risco de provocar empenamentos, distorções e contrações acentuadas no produto moldado”.

Abmaco (2009) também afirma que a desmoldagem deve ser feita após a resina entrar em estágio avançado de cura. Após este procedimento, é feita a rebarbagem da peça e a limpeza do molde. E, antes de utilizar o molde novamente, deve haver uma inspeção criteriosa para detectar possível ocorrência de trincas e defeitos.

2.2. EQUIPAMENTOS

O processo de laminação manual requer pouco investimento em equipamentos. (MARINUCCI, 2011). São equipamentos e materiais normalmente utilizados neste processo:

- Equipamentos de proteção individual (EPI's) (MARINUCCI, 2011);
- Exaustão na área de laminação (MARINUCCI, 2011);
- Tesouras e facas especiais para corte de mantas e tecidos (ABMACO, 2008);
- Revólver de aplicação de *gelcoat* (ABMACO, 2009)¹;
- Pincéis de cerdas duras e trinchas para aplicação da resina. Devem resistir ao ataque do estireno presente em resinas poliméricas e dos solventes usados na limpeza. (ABMACO, 2008 e 2009);
- Roletes para compactação do reforço e remoção de bolhas de ar (ABMACO, 2008);
- Dosadores de reagentes: bombas dosadoras, balança para pesagem ou frascos graduados (ABMACO, 2008 e 2009);
- Bandejas para armazenamento dos resíduos de resinas (ABMACO, 2008);
- Cunhas para auxílio de desmoldagem (ABMACO, 2009);
- Equipamento pneumático, espátula e estilete para rebarbagem (ABMACO, 2009);
- Lixadeiras para acabamento (ABMACO, 2009);
- Solventes para limpeza dos pincéis, roletes e outros equipamentos (ABMACO, 2009).

¹ Opcional

2.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

As vantagens deste processo são o baixo investimento em ferramentas, a não limitação dimensional (ABMACO, 2008), a simplicidade e custo dos moldes, o vasto leque de formas (ABMACO, 2008) e a possibilidade de laminação no campo de trabalho (MARINUCCI, 2011).

Quanto às desvantagens, é um processo pouco reprodutível (ABMACO, 2008), poluidor e insalubre (NASSEH, 2011), cuja qualidade do compósito depende da habilidade do laminador (MARINUCCI, 2011). Além disso, apresenta acabamento rugoso no lado interno (ABMACO, 2009) e seu teor de fibras fica entre 20 e 30% (NASSEH, 2011).

2.4. APLICAÇÕES

Na área naval, este método é empregado na fabricação de barcos de passeio monocasco e multicasco (ABMACO, 2008). Abmaco (2009) comenta que este método é utilizado para confecção de protótipos, gabaritos de controle, modelos e moldes.

3. LAMINAÇÃO A VÁCUO

3.1. PROCESSO

As etapas iniciais deste processo são similares as da laminação manual, a diferença dos métodos consiste na posterior compactação do laminado que ocorre na laminação a vácuo (NASSEH, 2011).

Tal como na laminação manual, inicialmente deve-se aplicar o desmoldante na superfície do molde. Em seguida, aplica-se o *gelcoat* (WEST SYSTEM, 2010). Após sua gelatinização, inicia-se a impregnação da resina e colocação dos reforços (NASSEH, 2011).

Depois de colocar todas as camadas de reforços e as compactar manualmente, posiciona-se o *peel ply* sobre o laminado (NASSEH, 2011). *Peel ply* é um tecido liso e macio que não adere à resina e tem a função de separar o laminado dos demais materiais que serão posicionados a seguir (WEST SYSTEM, 2010).

As próximas camadas são de filme perfurado e material absorvente, nesta sequência. A utilização do filme perfurado é opcional e sua função é permitir a passagem da resina em excesso para o filme absorvente (NASSEH, 2011).

A seguir, deve-se colocar a bolsa de vácuo e selar todo o seu perímetro com fita selante (NASSEH, 2011). Nasseh (2011, p. 420) recomenda: “Sempre deixe pelo menos 20% da área da bolsa de vácuo em excesso para que ela possa acomodar as diferenças de geometria e espessura da peça”.

Então, a bomba de vácuo é conectada à bolsa de vácuo e acionada (WEST SYSTEM, 2010). De acordo com Nasseh (2011, p. 420): “Se for necessário mantenha a pressão baixa por um bom espaço de tempo até que todo o perímetro da peça esteja ajustado e somente após ter certeza que tudo está completamente em ordem acione toda a pressão de vácuo”.

Todo este processo deve ocorrer enquanto a resina está no estado líquido, então é fundamental que haja um controle do tempo gasto na operação (NASSEH, 2011).

Após a cura do laminado, West system (2010) fala para remover a bolsa de vácuo, o material absorvente, o filme perfurado e o *peel ply*. Então, fazer a desmoldagem da peça.

3.2. EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos utilizados devem suportar a temperatura à que o sistema vai ser submetido, além de ter resistência química ao ataque de vapores que pode ocorrer e resistência a perfurações e danos no manuseio (NASSEH, 2011).

Além dos equipamentos comuns ao processo de laminação manual, neste processo também são utilizados:

- Filmes perfurados (NASSEH, 2011);
- *Peel ply*²: deve permitir a passagem de resina e permitir a remoção do produto mesmo nas condições de colagens mais rígidas. (NASSEH, 2011);
- Materiais absorventes: devem ter estabilidade dimensional para não se partirem dentro do molde (NASSEH, 2011);
- Fita selante (*tacky tape*): deve ter boa adesividade entre a bolsa e o molde e ser de fácil remoção do molde (NASSEH, 2011);
- Bolsa de vácuo: pode ser descartável ou do tipo permanente, que pode ser usada por um número determinado de laminações. É preferível que seja transparente para permitir a inspeção do processo de cura do laminado (WEST SYSTEM, 2010);
- Linha de vácuo: constituída por mangueiras, válvulas e marcador de pressão (NASSEH, 2011);
- Bomba de vácuo: As especificações dependem do tamanho e formato do molde e da velocidade de retirada do ar (WEST SYSTEM, 2010). Nasseh (2011) recomenda que a bomba possua um filtro para reter partículas sólidas e vapor de resina.

3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Em comparação com o processo de laminação manual, a peça produzida por este processo apresenta menos espaços vazios, menor espessura (WEST SYSTEM, 2010), menor densidade e menor consumo de resina (NASSEH, 2011). Por possuir até 65% de teor de fibra, também é mais resistente. Outra vantagem é a vasta gama de combinação de materiais, em decorrência da maior aderência entre as camadas (WEST SYSTEM, 2010);

² Algumas vezes, o *peel ply* é substituído por tecido de nylon.

Como desvantagens, West system (2010) cita as limitações no tamanho e formato da peça devido à capacidade da bomba de vácuo e Nasseh (2011) fala que o tempo de laminação é limitado pela cura da resina, além do custo adicional pela utilização de produtos descartáveis e da bomba de vácuo.

3.4. APLICAÇÕES

Dentre as aplicações no setor naval, esta técnica é utilizada na fabricação de anteparas, divisórias, pisos de embarcações na faixa de 30 a 80 pés (9,15 a 24,4 metros) e mobiliário interno de embarcações de recreio (NASSEH, 2011).

Em outros setores, esta técnica é aplicada em pás de turbina de vento, instrumentos musicais, componentes de carros de corrida e em diversas outras peças.

4. INFUSÃO

4.1. PROCESSO

Este processo é semelhante ao da laminação a vácuo, a principal diferença está no fato de que todo o material é colocado seco na bolsa de vácuo (ABMACO, 2009).

Antes de iniciar o processo, deve-se conhecer a quantidade de resina que será utilizada e o posicionamento das mangueiras. Para tanto, existem *softwares* específicos para o processo de infusão (ABMACO, 2009).

Como de costume, são aplicados o desmoldante e o *gelcoat*. Então, podem ser laminadas duas camadas de manta de forma manual para assegurar que não ocorra o *print-through* e para permitir a fácil moldagem da fibra seca (PLASTICS, 2014).

Após a cura das mantas, a bolsa de vácuo é posicionada e fixada com uma fita no perímetro exterior do molde para ser fechada em etapa posterior (PLASTICS, 2014).

A seguir, os reforços são posicionados secos e fixados com adesivo adequado (PLASTICS, 2014).

Então, o *peel ply* é posicionado sobre os reforços (ABMACO, 2008).

São colocadas mangueiras espirais, para sucção do ar, e mangueiras de alimentação de acordo com o posicionamento previsto em projeto (ABMACO, 2008).

Todos estes materiais e acessórios são cobertos com o filme da bolsa de vácuo, vedando a periferia com fita selante (ABMACO, 2008).

Na sequência, o vácuo é aplicado e qualquer vazamento encontrado deve ser reparado. Quando a bolsa estiver contraída, a resina pode ser colocada nas mangueiras de alimentação (PLASTICS, 2014).

Após a cura total da peça, o vácuo pode ser desligado e os acessórios removidos. (ABMACO, 2009).

Por último, Hoa (2009) cita a desmoldagem da peça.

4.2. EQUIPAMENTOS

Os equipamentos são semelhantes aos utilizados na laminação a vácuo. Adicionalmente são necessárias (ABMACO, 2008):

- Mangueiras de alimentação: devem suportar a pressão atmosférica com vácuo interno sem se fecharem. É útil que sejam transparentes.
- Mangueiras de fluxo: são cortadas em espiral, tanto para o ar ser retirado quando para que ocorra a alimentação da resina.

4.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS

Dentre as vantagens deste método, estão a possível repetição do processo com precisão e o alto teor de fibra, que pode chegar a 70% e resulta num laminado leve e resistente (NASSEH, 2011). A área de trabalho é mantida limpa (ABMACO, 2009) e ocorre baixa emissão de estireno (ABMACO, 2008).

Como desvantagens, tem-se que cada peça diferente a ser fabricada exige um estudo detalhado e existem muitos casos em que um erro no processo ocasiona a perda total da peça. Além disso, todos os materiais auxiliares, como vedantes e mangueiras, são perdidos (ABMACO, 2008). Os materiais devem ter a permeabilidade conhecida e a bomba de vácuo deve atingir um diferencial de pressão de pelo menos 0,9 atm (ABMACO, 2009).

4.4. APLICAÇÕES

O processo de infusão é utilizado em peças que exigem alto grau de qualidade (ABMACO, 2009). No setor naval, Nasseh (2011) diz que esse processo pode ser empregado na laminação de cascos, conveses, pisos, anteparas e qualquer peça individual de um barco.

5. METODOLOGIA

Inicialmente foi feita a fundamentação teórica, pesquisando na literatura os processos, equipamentos, vantagens, desvantagens e aplicações dos seguintes métodos de obtenção de compósitos: laminação manual, laminação a vácuo e infusão. A seguir, foram confeccionados corpos de prova através dos três métodos mencionados e realizados os ensaios de tração, impacto e absorção de água e o cálculo da densidade superficial. Após o término dos ensaios, foram analisados os resultados obtidos.

A metodologia geral está ilustrada na figura 1.

Figura 1 – Metodologia geral.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.1. MATERIAIS

Todos os corpos de prova foram confeccionados com reforço de fibra de vidro – tecido biaxial ± 45 de 800g/m^2 e manta de 450g/m^2 – e resina de poliéster isoftálica com NPG da marca Sama.

O *gelcoat* não foi utilizado para facilitar os processos de laminação sem, contudo, prejudicar a comparação dos resultados. Além disso, um bom acabamento nas amostras não se faz necessário para a realização dos ensaios.

Como agente desmoldante, foi usada a cera TecGlaze® N.

Os itens e equipamentos utilizados na confecção dos corpos de prova foram: tesoura; pincéis; rolete; espátula; palito de madeira; dosador de reagentes; calculadora; balança; recipientes plásticos; tecido de nylon; tela de polipropileno; plástico-bolha; fita selante; massa para calafetar; bolsa de vácuo; mangueiras de fluxo; bomba de vácuo; mangueiras de alimentação; serra tico-tico; moto esmeril; arco de serra manual; lixas para ferro 60 e 100.

5.2. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram fabricados no Laboratório de Fabricação de Modelos da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville.

Inicialmente, foram laminadas três placas planas com dimensões aproximadas de comprimento x largura de 630 x 360 mm sobre uma placa de vidro – que serviu de molde – posicionada sobre a mesa do laboratório. Foi feita uma placa por cada um dos seguintes métodos: laminação manual, laminação a vácuo e infusão.

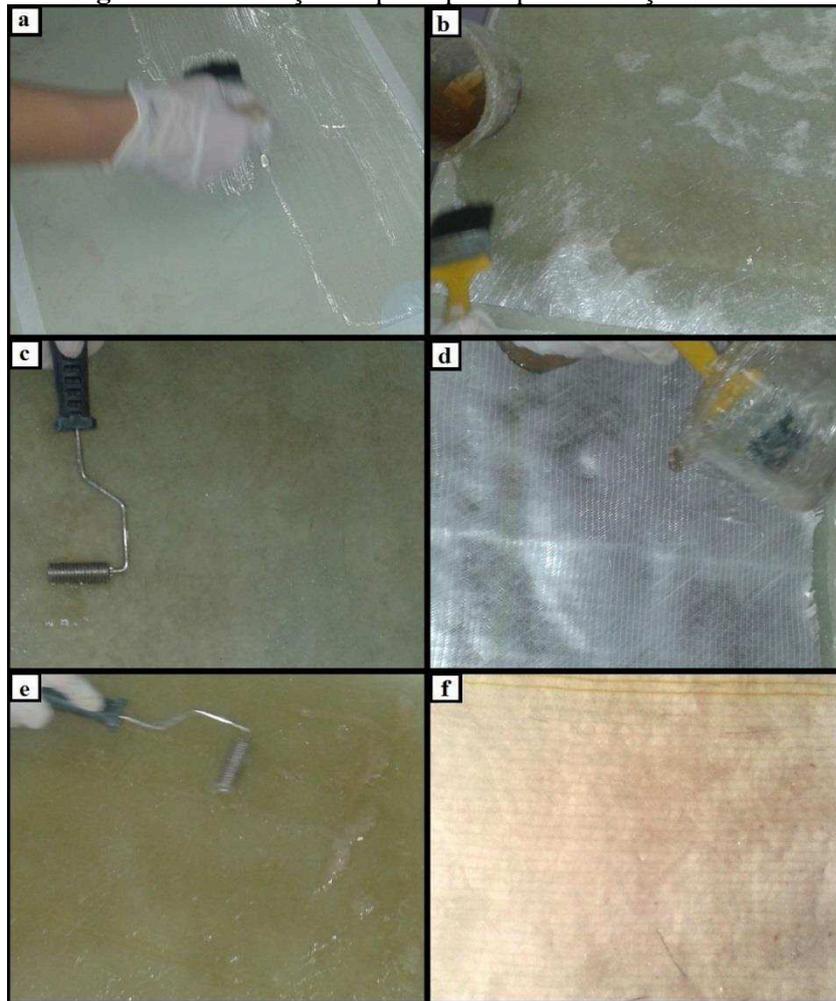
O procedimento utilizado na laminação das placas planas está descrito a seguir.

5.2.1. Laminação manual

Primeiramente limpou-se a mesa que serviu de molde para a placa, secando-a bem. Então, foi passado o agente desmoldante e, em seguida, uma camada de resina com auxílio do pincel. Por cima, colocou-se uma camada de manta e, utilizando o pincel, impregnou-se a manta com resina. Sobre este material, foi posicionada uma camada de tecido e, utilizando pincel e rolo compactador, impregnou-se mais resina sobre este. Esta última etapa foi repetida com mais uma camada de manta e resina. Por fim, esperou-se ocorrer a cura completa da resina para realizar a desmoldagem da peça.

As seguintes etapas estão ilustradas na figura 2: (a) aplicação da resina sobre o molde, (b) impregnação da resina sobre a manta, (c) compactação da resina sobre a manta, (d) colocação da resina sobre o tecido, (e) compactação da última camada do laminado e (f) placa laminada pronta.

Figura 2 – Confeção da placa plana por laminação manual.



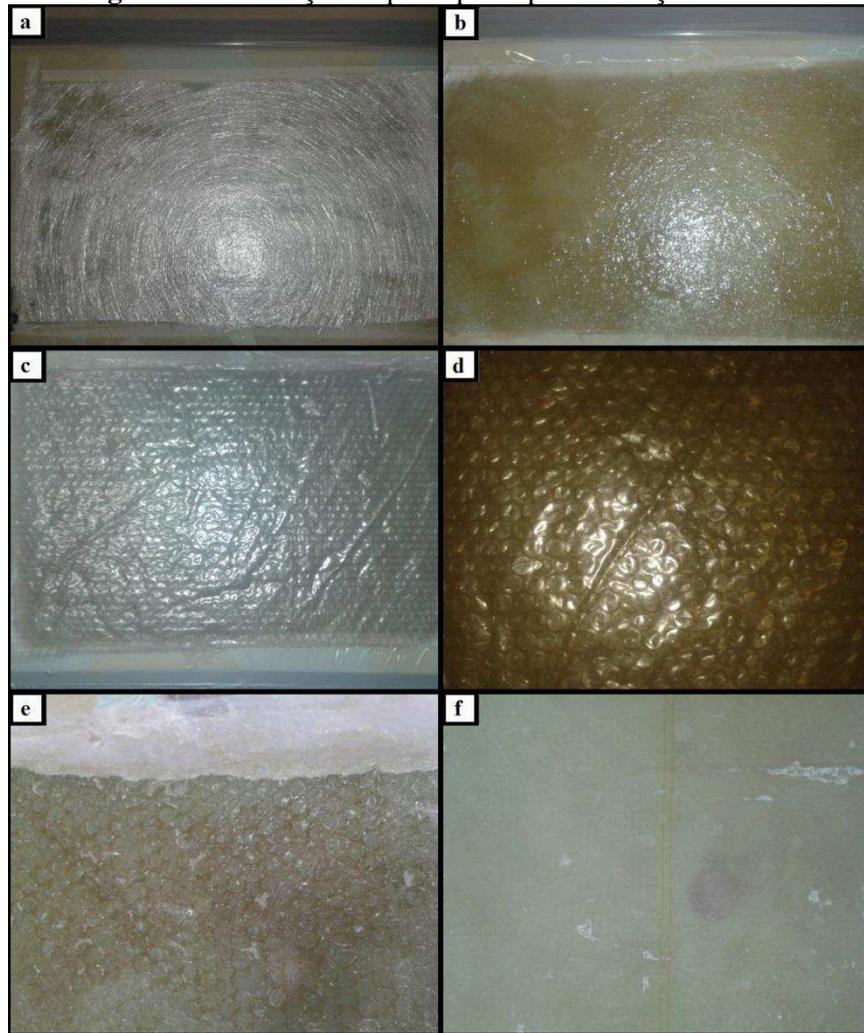
Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.2. Laminação a vácuo

As etapas iniciais, desde colocar o desmoldante até impregnar a resina sobre os reforços, foram iguais as da laminação manual. Entretanto, sobre o laminado foram colocados: o tecido de nylon, o plástico-bolha, a tela de polipropileno e a bolsa de vácuo – nesta ordem – e selou-se todo o perímetro da bolsa com fita adesiva. A bomba de vácuo foi conectada à bolsa de vácuo e ligada. Após 30 minutos, a bomba foi desligada e a peça permaneceu no molde até ocorrer a cura total. Então, os acessórios foram removidos e a peça foi desmoldada.

A figura 3 ilustra: (a) o posicionamento da manta, (b) a resina compactada sobre a última camada de manta, (c) a bolsa de vácuo fechada, (d) a bomba de vácuo ligada, (e) a remoção do tecido de nylon e (f) placa laminada pronta.

Figura 3 – Confeção da placa plana por laminação a vácuo.



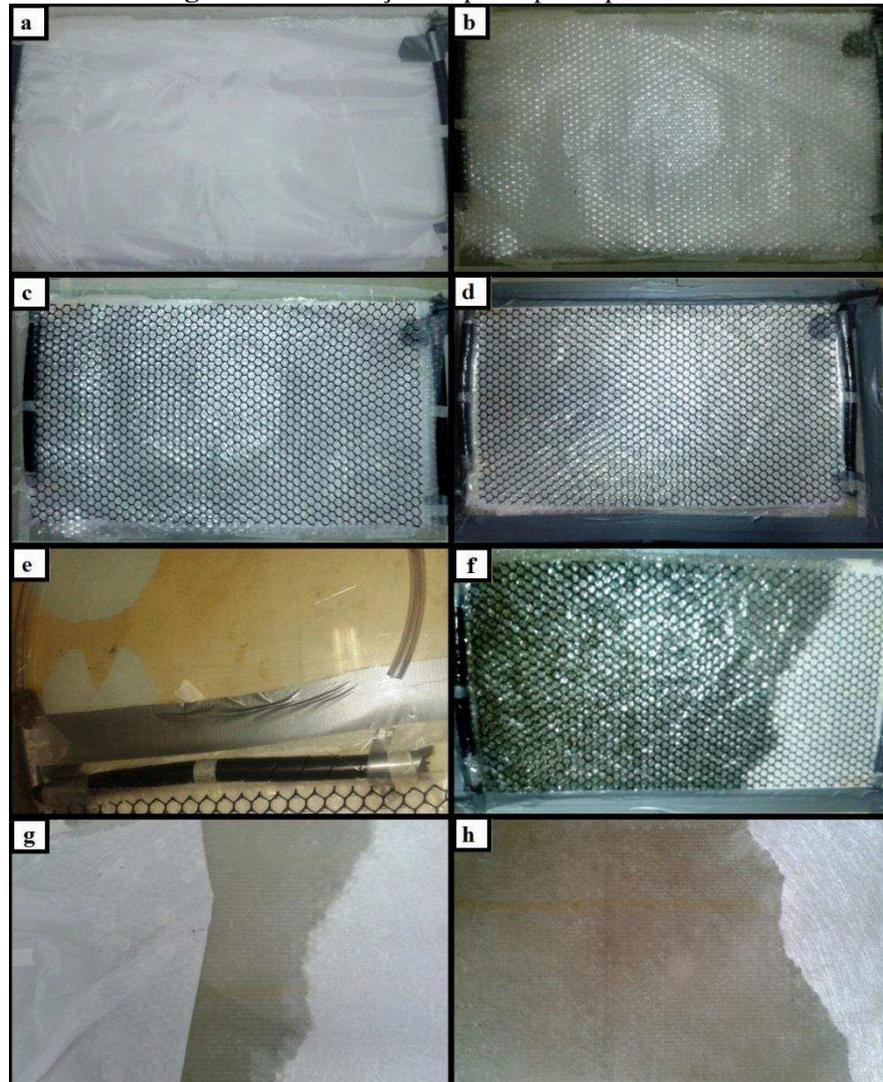
Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.3. Infusão

O processo de limpar o molde e passar a cera foi idêntico aos anteriores. A seguir, foram posicionados os reforços secos – na ordem: manta, tecido e manta – e sobre estes, colocou-se o tecido de nylon. Então, foi colocada uma mangueira espiral para sucção do ar, no lado esquerdo, e uma mangueira espiral e uma mangueira para alimentação da resina, no lado direito. Estes itens foram cobertos com a bolsa de vácuo e vedados na periferia com fita selante. A bomba de vácuo foi ligada e, ao verificar a existência de vazamentos, colocou-se massa para calafetar nos locais necessários. Quando a bolsa estava contraída, colocou-se resina nas mangueiras de alimentação. A bomba ficou ligada por 30 minutos e a peça foi desmoldada somente após a cura total da peça.

Algumas etapas, mostradas na figura 4, são: (a) posicionamentos do tecido de nylon, (b) posicionamento do plástico bolha, (c) posicionamento da tela de polipropileno, (d) bolsa de vácuo selada, (e) mangueira de alimentação da resina, (f) bomba de vácuo ligada, (g) remoção do tecido de nylon e (h) placa laminada pronta.

Figura 4 – Confecção da placa plana por infusão.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2.4. Corte e Acabamento dos Corpos de Prova

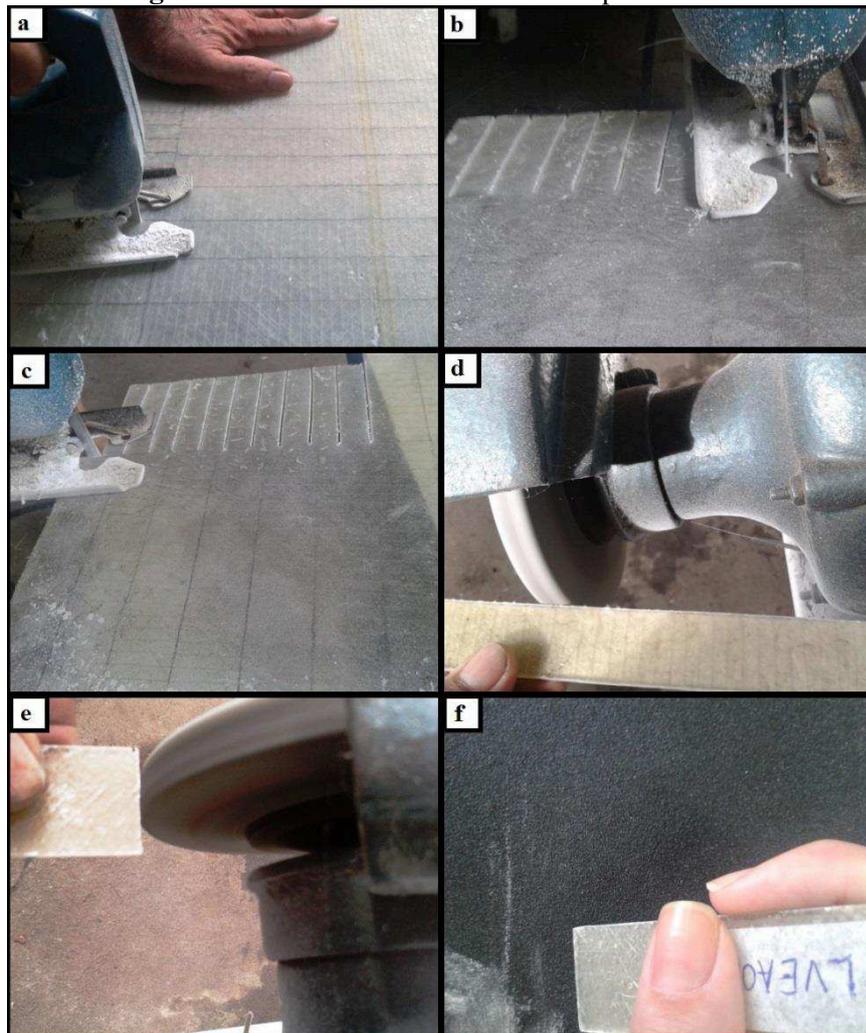
Para obter os corpos de prova, as placas foram cortadas com uma serra tico-tico da marca Bosch nas dimensões necessárias para cada ensaio.

A princípio, a partir de cada placa foram cortados: 10 CPs para o ensaio de tração, 10 CPs para o ensaio de impacto e 7 CPs para o ensaio de absorção de água e cálculo da densidade. O restante das placas foi guardado para eventual necessidade de cortar novos CPs.

Para melhorar o acabamento, lixou-se as extremidades de cada corpo de prova (CP).

A figura 5 ilustra o corte dos corpos de prova com a serra tico-tico (a,b,c) e o acabamento feito com moto-esmeril (d,e) e lixa (f).

Figura 5 – Corte e Acabamento dos Corpos de Prova.



Fonte: Elaborado pela autora.

Cada corpo de prova recebeu uma etiqueta, com um símbolo para o método de laminação, seguido do símbolo para o tipo de ensaio. Onde: LM (laminação manual), LV (laminação a vácuo), I (infusão), ET (ensaio de tração), EI (ensaio de impacto), EA (ensaio de absorção de água).

Então, foram escolhidos 6 CPs de cada tipo de ensaio e método de laminação, com base nas dimensões e qualidade superficial, para serem utilizados nos ensaios. A exceção se aplica ao EA que prevê apenas 3 CPs por condição. Os demais foram guardados ou utilizados para ajustar os equipamentos antes de iniciar o ensaio propriamente dito. Na etiqueta de cada um dos 6 CPs selecionados, foi adicionada uma numeração referente à ordem de ensaio. Por exemplo: LMET1 significa que será o 1º corpo de prova obtido por laminação manual a ser utilizado no teste de tração.

O apêndice A apresenta todas as etiquetas, detalhando suas informações quanto ao método e ao tipo e ordem de ensaio.

5.3. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizados os ensaios de tração, impacto e absorção de água, baseando-se nas normas ASTM D3039, ASTM D256 e ASTM D570. Além disso, com base na equação que relaciona massa e área, calculou-se a densidade superficial das amostras.

A metodologia está descrita a seguir.

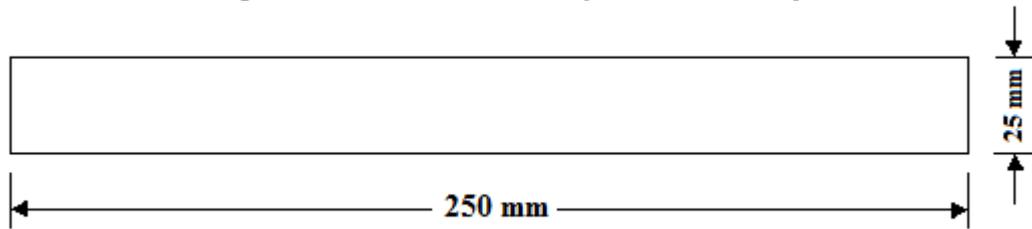
5.3.1. Ensaio de tração

O ensaio foi conduzido com base na norma ASTM (1995) – norma para o ensaio padrão das propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica. Este ensaio foi realizado no dia 07 de abril de 2015 no laboratório CAMEGI da Universidade da Região de Joinville. Utilizou-se a máquina universal de ensaios da marca EMIC e obteve-se como retorno a resistência à tração.

Foram ensaiados 18 corpos de prova – seis de cada método – de seção retangular, com dimensões aproximadas de: 25mm de largura x 250mm de comprimento x espessura do laminado.

Antes de iniciar o teste, foram medidas a largura e a espessura de cada corpo de prova em três pontos – aproximadamente nas extremidades e no meio – utilizando um paquímetro de precisão 0,05mm. As medidas são apresentadas no apêndice B e a geometria dos corpos de prova é mostrada na figura 6.

Figura 6 – Geometria dos CPs para ensaio de tração.



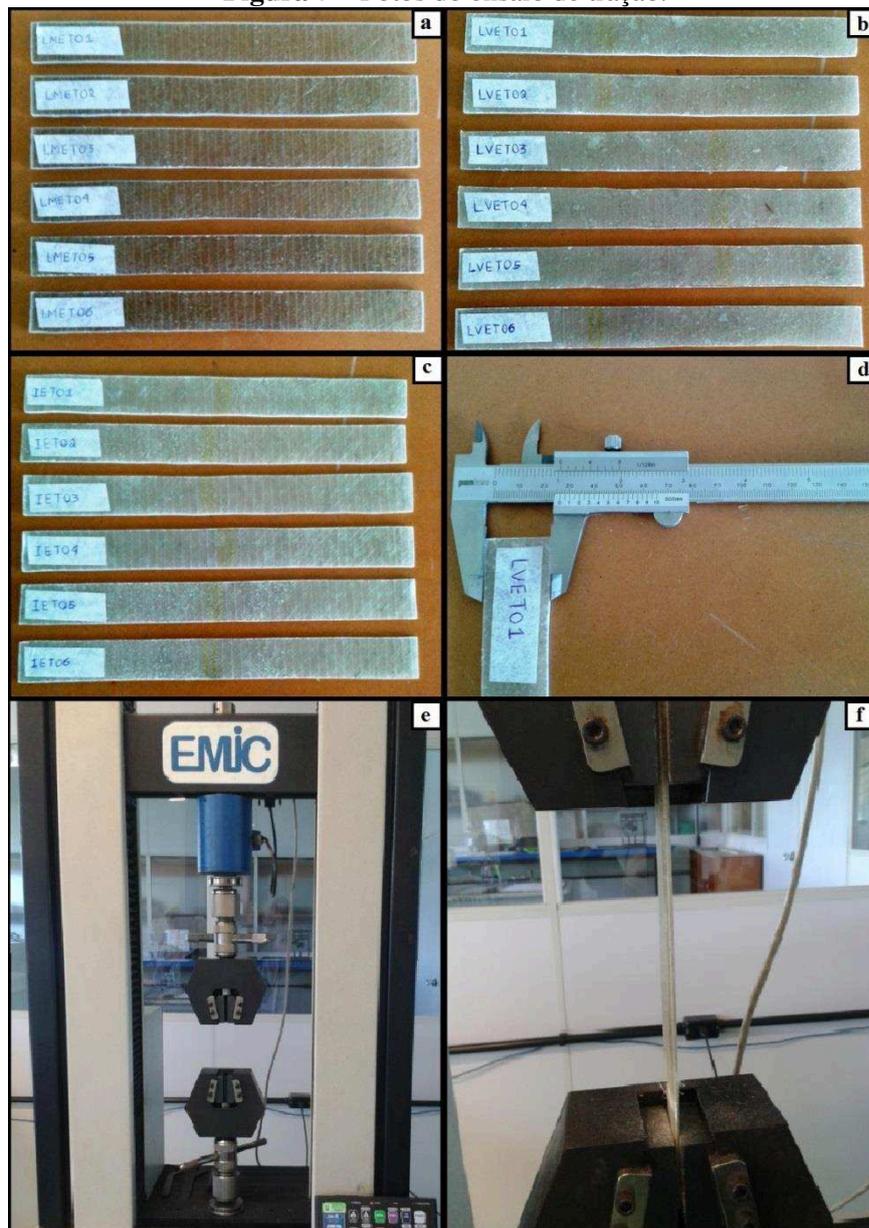
Fonte: Elaborado pela autora.

O uso de abas não é obrigatório, pois, por se tratar de laminados multidirecionais, o ensaio com corpos de provas sem abas produz resultados satisfatórios. Para evitar o escorregamento das garras do equipamento, lixou-se as faces dos CPs que entram em contato com as garras do equipamento, com lixa para ferro número 60.

Primeiramente, o equipamento de testes foi ajustado utilizando-se cinco corpos de prova e, então, começou a ser feito o ensaio propriamente dito. Para cada um dos dezoito corpos de prova, foi realizado o seguinte procedimento: fixou-se as extremidades do corpo de prova nas garras de fixação do equipamento e o equipamento foi ligado e mantido à velocidade de 3 mm/min até que ocorresse a ruptura do material. Como resposta, para cada corpo de prova, foi obtida a força máxima.

A figura 7 mostra: (a,b,c) os corpos de prova, (d) o uso do paquímetro e (e,f) a máquina universal utilizados no ensaio de tração.

Figura 7 – Fotos do ensaio de tração.



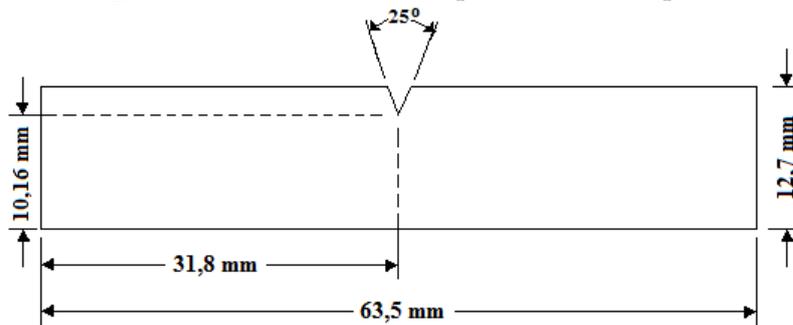
Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.2. Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi baseado na norma ASTM (2004) – ensaio padrão para determinar a resistência ao impacto de plásticos com pêndulo Izod. Foi realizado no dia 22 de maio de 2015, utilizando equipamento da marca EMIC e pêndulo de 10,8J no laboratório CAMEGI da Universidade da Região de Joinville. Como retorno, obteve-se a resistência ao impacto dos materiais.

Foram ensaiados seis corpos de prova de cada método de laminação, com dimensões aproximadas de: 12,7mm de largura x 63,5mm de comprimento x espessura do laminado. Em cada corpo de prova foi feito um entalhe, utilizando um arco de serra manual. A figura 8 esboça a geometria dos corpos de prova.

Figura 8 – Geometria dos CPs para ensaio de impacto.



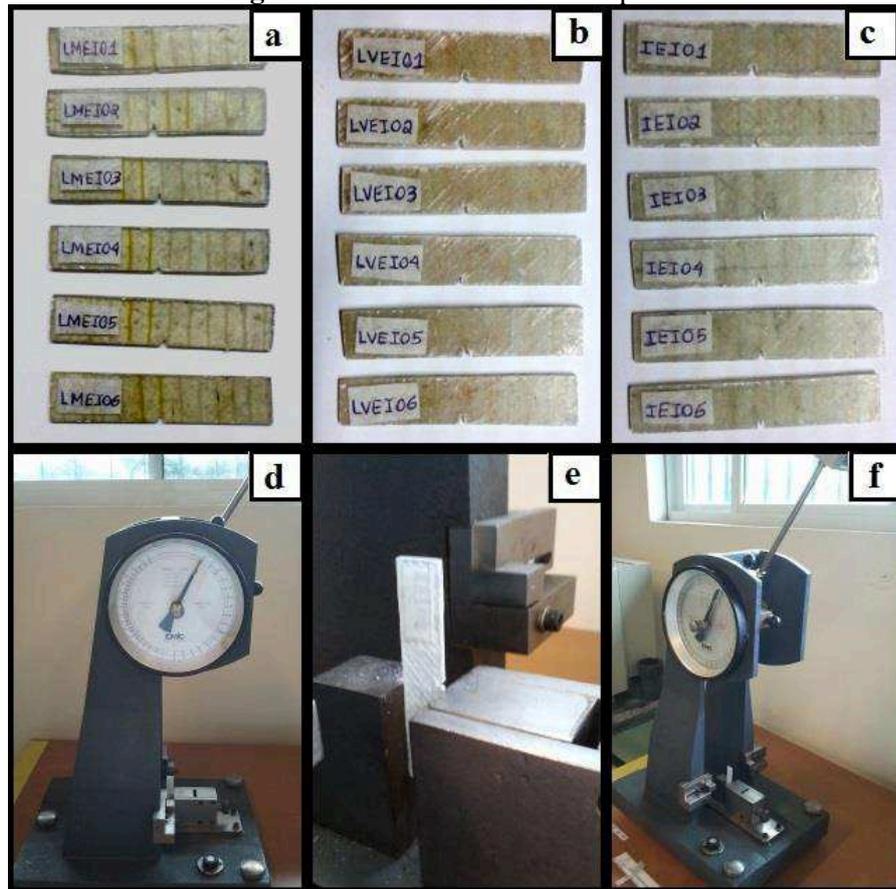
Fonte: Elaborado pela autora.

Antes de iniciar o ensaio com corpos de prova, foi feito o seguinte procedimento para identificar o fator de correção devido à energia perdida por atrito e inércia: sem o corpo de prova, foi liberado o pêndulo da sua posição normal de partida e anotada a posição que o ponteiro atingiu após o balanço. Este valor é o fator de correção que será posteriormente subtraído do valor medido no ensaio.

Após este procedimento inicial, começou-se o ensaio com os corpos de prova. Primeiramente, o CP foi posicionado no equipamento de forma a ficar rígido, mas não muito apertado. Então, lançou-se o pêndulo, que deve quebrá-lo em apenas um lançamento. O valor do excesso de energia restante no pêndulo após a quebra do CP foi anotado, assim como o tipo de falha que ocorreu com o CP. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras.

A figura 9 apresenta: (a,b,c) os corpos de prova, (d) o equipamento utilizado no ensaio, (e) o posicionamento do CP e (f) o momento anterior ao lançamento do pêndulo.

Figura 9 – Fotos do ensaio de impacto.



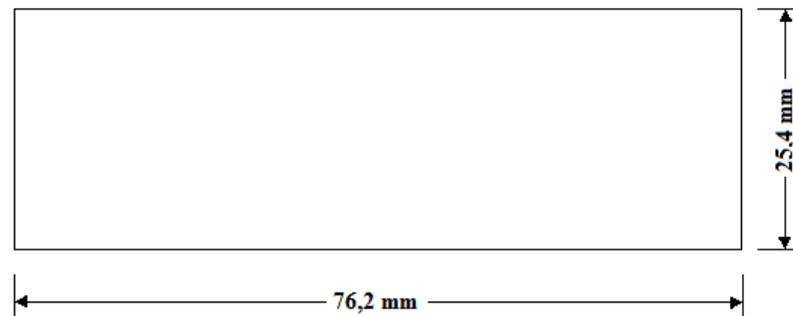
Fonte: Elaborado pela autora.

5.3.3. Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi conduzido com base na norma ASTM (1998) – ensaio padrão para absorção de água de plásticos. Foi realizado nos meses de maio e junho de 2015 no Laboratório de Química da Universidade Federal de Santa Catarina, tendo como equipamentos principais uma balança analítica com precisão de 0,0001g da marca Katashi e uma estufa da marca Fanem. O objetivo deste ensaio é determinar a taxa relativa de absorção de água dos materiais quando imersos.

O ensaio foi feito utilizando-se três corpos de prova feitos por cada método de laminação, com geometria em forma de barra e dimensões aproximadas de: 76,2mm de comprimento x 25,4mm de largura x espessura da placa, conforme ilustrado na figura 10. Para um acabamento melhor, lixou-se as bordas com lixas para ferro 60 e 100.

Figura 10 – Dimensões dos CPs para ensaio de absorção de água.

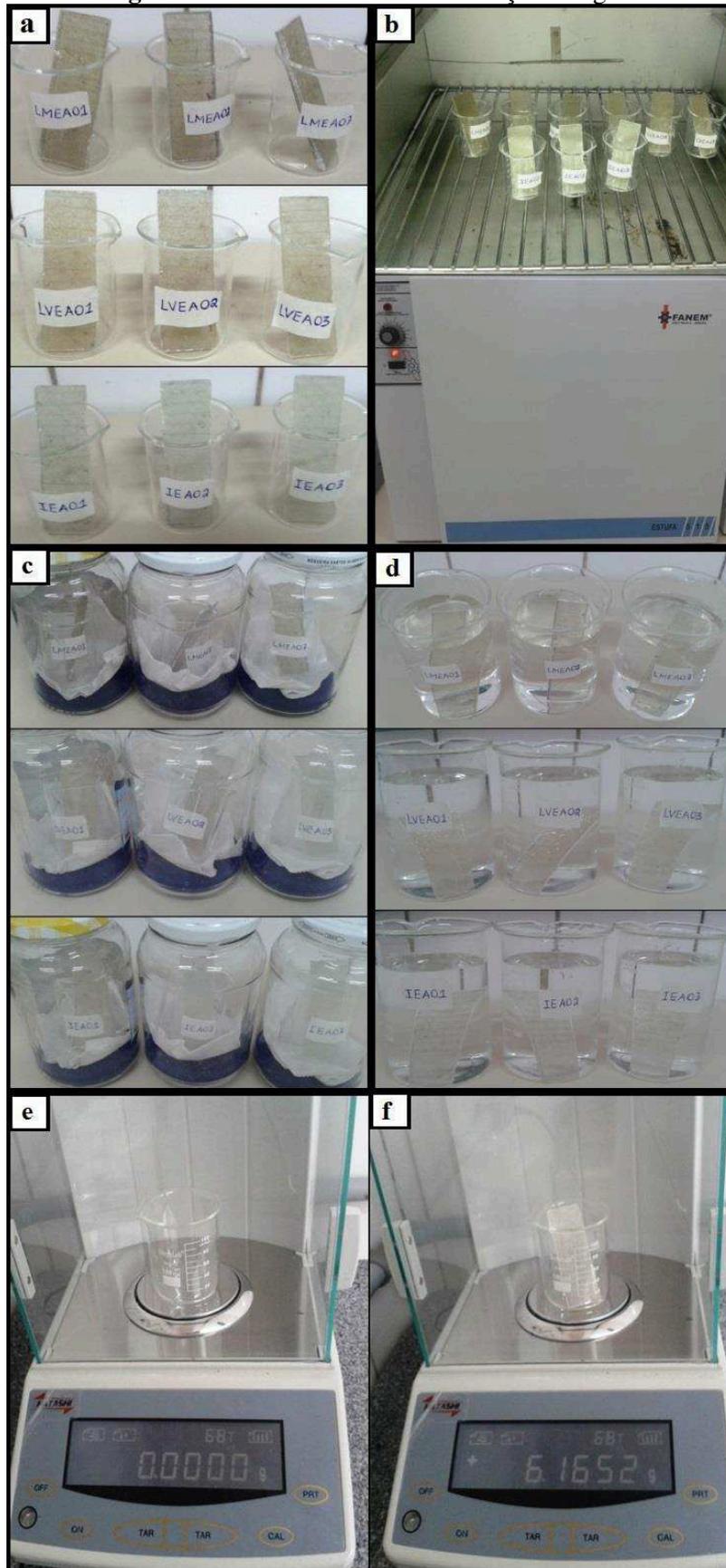


Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente os corpos de prova foram secados no forno à 50°C por 24 horas e resfriados num recipiente com sílica, que serviu como dessecador. Um beaker foi posicionado na balança e esta foi zerada utilizando a função “tar”. Então, os CPs foram retirados do dessecador e pesados individualmente dentro do beaker. A seguir, foram colocados num recipiente que continha água destilada e mantidos inteiramente submersos. Após 24h, foram removidos da água, enxutos com papel toalha e imediatamente pesados na balança. Então, foram recolocados na água e mantidos no recipiente por mais oito dias. Passado esse tempo, foram enxutos, pesados e recolocados no recipiente com água. Esse procedimento foi repetido mais duas vezes, com intervalo de duas semanas entre eles.

A figura 11 mostra: (a) os CPs nos beakers, (b) os CPs na estufa, (c) os CPs no dessecador, (d) os CPs submersos em água destilada, (e) a balança com o beaker utilizado para a função “tar” e (f) a pesagem do CP.

Figura 11 – Fotos do ensaio de absorção de água.



Fonte: Elaborado pela autora.

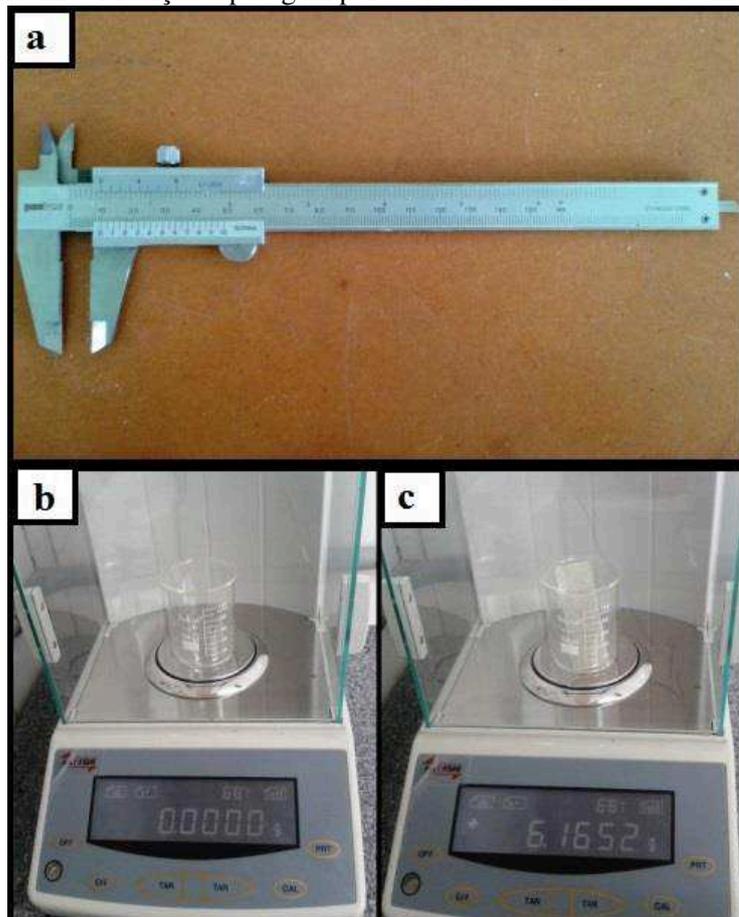
5.3.4. Densidade Superficial

A densidade superficial das amostras foi calculada com base na fórmula $\rho_A = m/A$, onde: ρ_A é a densidade superficial, m é a massa e A é o área da amostra. Para tanto, utilizou-se 18 amostras com as dimensões dos CPs do ensaio de absorção de água, sendo seis de cada método de laminação.

A área de cada amostra foi calculada pela multiplicação das dimensões de comprimento e largura, ambas medidas com um paquímetro de precisão 0,05mm. A massa foi medida com uma balança de precisão 0,0001g da marca Katashi.

A figura 12 ilustra: (a) o paquímetro utilizado para medir as dimensões, (b) o beaker usado nas pesagens com a função “tar” e (f) a pesagem das amostras.

Figura 12 – Medição e pesagem para cálculo da densidade das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões serão subdivididos em cinco tópicos, dos quais um aborda a confecção das amostras e quatro referem-se aos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Para analisar os resultados, será usada a distribuição t de *student* nos tópicos dos ensaios de tração e impacto e do cálculo de densidade. Para cada grupo de amostras será calculada a média, o desvio padrão e os intervalos de confiança com nível de confiança de 95%. Para o ensaio de tração, também será feita uma análise teórica, identificando a resistência à tração de cada camada e do compósito inteiro, com auxílio da regra da mistura modificada e da matriz de transformação. Para verificar a absorção de água, será traçado o gráfico “aumento de massa x tempo de imersão”, com os valores médios de cada grupo de amostras.

6.1. CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente foram feitas placas planas utilizando os três métodos discutidos neste trabalho.

O método de laminação manual ocorreu dentro da normalidade. Vale a pena lembrar que de acordo com Marinucci (2011) a qualidade do compósito depende da habilidade do laminador e, tal como comenta Abmaco (2009), o acabamento do lado em contato com a atmosfera ficou rugoso. O resultado é mostrado na figura 13.

Figura 13 – Placa feita por laminação manual.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os métodos de laminação a vácuo e infusão, contudo, apresentaram algumas dificuldades devido aos acessórios que estavam disponíveis no laboratório. A fita utilizada para selar a bolsa de vácuo é mais barata do que a *tacky tape*, mas não é a mais adequada. O tecido de nylon utilizado em substituição ao *peel ply* também é mais barato, porém tem qualidade inferior e foi de difícil remoção após a desmoldagem da placa.

Além disso, o método de infusão teve um agravante: a resina iniciou o processo de vitrificação antes de percorrer toda a extensão dos reforços, em virtude do selamento inadequado da bolsa de vácuo. Como foi comentado por Abmaco (2008), em muitos casos um erro no processo gera a perda total da peça. Entretanto, neste caso foi possível utilizar a região impregnada por resina para confeccionar os corpos de prova.

As figuras 14 e 15 mostram, respectivamente, as placas feitas por LV e por I.

Figura 14 – Placa feita por laminação a vácuo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Placa feita por infusão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez que as placas estavam prontas, foram cortados os corpos de prova com base nas dimensões especificadas pelas normas. Entretanto, com os equipamentos disponíveis não foi possível alcançar a precisão prevista pela ASTM.

Nos itens seguintes, serão apresentados os resultados de cada ensaio.

6.2. ENSAIO DE TRAÇÃO

Neste ensaio foi obtida a força máxima que cada amostra resistiu. Ao dividir a força obtida pela área média – calculada pela multiplicação das dimensões médias de espessura e largura – obteve-se a resistência à tração.

As dimensões de espessura e largura de cada CP foram medidas em três pontos (um em cada extremidade e um no meio) e estão apresentadas no apêndice B. As dimensões médias e os valores de força e tensão máximas constam no apêndice C.

As imagens 16, 17 e 18 mostram os CPs após o ensaio.

Figura 16 – CPs de LM após o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 – CPs de LV após o ensaio de tração.



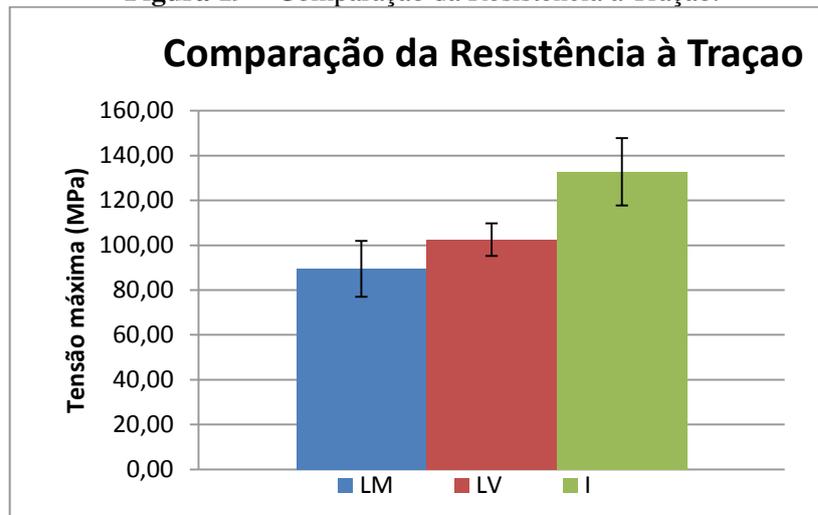
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – CPs de I após o ensaio de tração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para obter os valores de média, desvio padrão, intervalo de confiança e erro foi utilizada a distribuição t de *student* com nível de confiança 95%, conforme consta no apêndice D. Para melhor visualização, a figura 19 contém um gráfico com as médias e intervalos de confiança dos grupos ensaiados.

Figura 19 – Comparação da Resistência à Tração.

Fonte: Elaborado pela autora.

Observando os resultados, nota-se que a resistência à tração média de LV e I foram, respectivamente, 14,6% e 48,4% maiores do que a de LM. Com relação ao método de LV, I teve resistência média 29,5% maior. Quanto aos intervalos de confiança, foi identificado um erro de 14% para LM, 7% para LV e 11% para I. Logo, o método de infusão apresentou resistência à tração significativamente superior aos outros métodos e a laminação a vácuo teve resultados levemente melhores do que a laminação manual.

A seguir, será feita uma análise teórica da resistência à tração e posteriormente, uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos.

6.2.1. Análise teórica

Para analisar o laminado, serão consideradas quatro camadas: duas de manta e duas de tecido, uma a +45° e outra a -45°, conforme a figura 20. Será assumido que as camadas de manta têm mesma resistência e as camadas de tecido possuem mesma resistência na direção da fibra.

Figura 20 – Camadas do laminado.

manta
tecido +45
tecido -45
manta

Fonte: Elaborado pela autora.

Inicialmente, será identificada a resistência à tração de cada camada e, posteriormente, do compósito inteiro. Para tanto, é preciso saber os valores de resistência à tração e densidade da fibra e da resina e os volumes específicos de fibra e resina de cada camada dos laminados. Segundo Fiorello (2002 apud Barracuda, 2000), a resistência à tração de fibra de vidro tipo E é 900MPa e sua densidade é de 2,55g/cm³. Davallo, Wilkinson e Ziarati (2004) encontraram um valor de 52MPa para resistência à tração da matriz de poliéster e Ara Química S/a. (s. d.) cita um valor de 1,12g/cm³ para a densidade da resina de poliéster.

Para calcular o volume específico de cada camada, foram medidas as massas de manta e tecido antes de iniciar a laminação e a massa da placa pronta. Cada camada de manta (ou tecido) tem a massa total de manta (ou tecido) dividida por dois e cada camada de resina possui a massa total desta dividida por quatro. Para encontrar a massa da resina, calcula-se a diferença entre a massa da placa e dos reforços. Como a placa de infusão não foi preenchida completamente por resina, deve-se considerar apenas a massa de reforços correspondente à parte preenchida, calculada em 75% do total. A tabela 1 apresenta as massas totais e por camada dos reforços, da resina e de cada placa.

Tabela 1 – Massas de reforços e matriz das placas.

	LM	LV	I
	Massa total (g)		
Manta	224	170	164 ³
Tecido	177	177	140 ⁴
Resina	766	526	220
Placa	1167	873	524 ⁵
	Massa por camada (g)		
Manta (m_m)	112	85	82
Tecido (m_t)	88,5	88,5	70
Resina(m_r)	191,5	131,5	55

Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez determinadas as massas de manta, tecido e resina de cada camada, calcula-se a fração mássica de fibra (M_f) e de resina (M_r) de cada camada, dividindo a massa do reforço ou resina pela massa total (reforço + resina) da camada. Estes valores são apresentados na tabela 2.

³ Manta total: 219g; manta sem impregnação: 55g

⁴ Tecido total: 187g; tecido sem impregnação: 47g

⁵ Placa total: 626g; reforços sem impregnação: 102g

Tabela 2 – Fração mássica de fibra e resina por camada.

	LM	LV	I
Camadas de manta			
m_{m+r}	303,5	216,5	137
M_f	0,37	0,39	0,60
M_r	0,63	0,61	0,40
Camadas de tecido			
m_{t+r}	280	220	125
M_f	0,32	0,40	0,56
M_r	0,68	0,60	0,44

Fonte: Elaborado pela autora.

Sabendo os valores de fração mássica e densidade da fibra e da resina, e assumindo volume de vazios nulo, é possível calcular os volumes específicos de fibra e matriz de cada camada, manipulando as fórmulas encontradas em Al-Qureshi (2010):

$$v_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_r}{\rho_r}} \quad (\text{I})$$

$$v_m = 1 - v_f \quad (\text{II})$$

Considerando $\rho_f = 2,55\text{g/cm}^3$ e $\rho_r = 1,12\text{g/cm}^3$, foram calculados os valores de volume específico apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Volumes específicos de fibra e resina por camada.

	LM	LV	I
Camadas de manta			
v_f	0,20	0,22	0,40
v_m	0,80	0,78	0,60
Camadas de tecido			
v_f	0,17	0,23	0,36
v_m	0,83	0,77	0,64

Fonte: Elaborado pela autora.

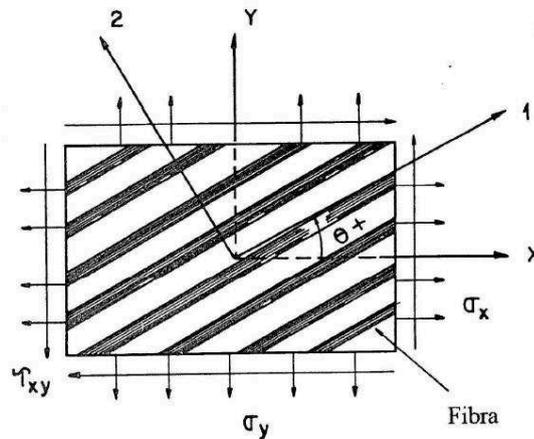
Com estas informações, é possível calcular a resistência à tração de cada camada. Para calcular a tensão das camadas de manta, vai ser utilizada a “lei das misturas modificada”, encontrada em Casaril et al. (2007), considerando a fase partícula nula, dada pela equação:

$$(\sigma_x)_m = \beta \cdot \sigma_f \cdot v_f + \lambda \cdot \sigma_r \cdot v_m \quad (\text{III}),$$

onde β é o fator de eficiência do alinhamento das fibras – para mantas pode ser utilizado $\beta = 0,37$ – e λ é o fator de adesão entre as fibras e a matriz – considerado $\lambda = 0,85$ para laminação manual e $\lambda = 1$ para processos que utilizam a bomba de vácuo.

Quanto às camadas de tecido, como estão à $\pm 45^\circ$, será inicialmente calculada a tensão no eixo axial às fibras (σ_1) e, posteriormente, encontrada a tensão na direção em que é realizado o ensaio de tração (σ_x). Os eixos “1” e “x” estão representados na figura 21.

Figura 21 – Representação dos eixos da fibra e do laminado.



Fonte: Al-Qureshi (2010).

Para calcular a tensão na direção 1, Al-Qureshi (2010) propõe a lei das misturas, sem o fator β , dada por:

$$(\sigma_1)_t = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_r \cdot v_m \quad (\text{IV})$$

E para encontrar a tensão na direção x, de acordo com Al-Qureshi (2010), deve-se multiplicar a inversa da matriz de transformação $[T]^{-1}$ por σ_1 , como mostrado na equação (V):

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{V})$$

Como o eixo de interesse é o “x”, tem-se:

$$(\sigma_x)_t = [\cos^2 \theta]^{-1} \cdot \sigma_1 \quad (\text{VI})$$

$$(\sigma_x)_t = \cos^2(-\theta) \cdot \sigma_1 \quad (\text{VII})$$

Considerando $\beta = 0,37$, $\lambda = 0,85$ para LM e $\lambda = 1$ para LV e I, $\theta = 45^\circ$, $\sigma_f = 900\text{MPa}$ e $\sigma_r = 52\text{MPa}$, os cálculos de resistência à tração de cada camada são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Resistência à tração de cada camada.

Equações		
$(\sigma_x)_m = \beta \cdot \sigma_f \cdot v_f + \sigma_r \cdot v_m$		
$(\sigma_1)_t = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_r \cdot v_m$		
$(\sigma_x)_t = \cos^2(-\theta) \cdot \sigma_1$		
Laminação Manual		
$(\sigma_x)_m =$	$0,37 \cdot 900 \cdot 0,2 + 52 \cdot 0,8 =$	103,22 MPa
$(\sigma_1)_t =$	$900 \cdot 0,17 + 52 \cdot 0,83 =$	195,08 MPa
$(\sigma_x)_t =$	$0,5 \cdot 195,08 =$	97,54 MPa
Laminação a Vácuo		
$(\sigma_x)_m =$	$0,37 \cdot 900 \cdot 0,19 + 52 \cdot 0,81 =$	114,14 MPa
$(\sigma_1)_t =$	$900 \cdot 0,2 + 52 \cdot 0,8 =$	245,47 MPa
$(\sigma_x)_t =$	$0,5 \cdot 217,75 =$	122,74 MPa
Infusão		
$(\sigma_x)_m =$	$0,37 \cdot 900 \cdot 0,28 + 52 \cdot 0,72 =$	163,19 MPa
$(\sigma_1)_t =$	$900 \cdot 0,25 + 52 \cdot 0,75 =$	356,06 MPa
$(\sigma_x)_t =$	$0,5 \cdot 260,45 =$	178,03 MPa

Fonte: Elaborado pela autora.

A resistência à tração do compósito (σ_c) considera a espessura e a resistência na direção x de cada camada, conforme a equação:

$$\sigma_c = \frac{2(\sigma_x)_m t_m + 2(\sigma_x)_t t_t}{2(t_m + t_t)} \quad (\text{VII})$$

Os valores de espessura das camadas foram estimados com base na espessura total média calculada e por observação visual e estão dispostos na tabela 5, assim como as resistências à tração teóricas calculadas.

Tabela 5 – Espessuras estimadas e resistência à tração dos compósitos.

LM	$t_m =$	1,3	mm
	$t_t =$	0,65	mm
	$\sigma_c =$	101,34	MPa
LV	$t_m =$	0,9	mm
	$t_t =$	0,5	mm
	$\sigma_c =$	118,44	MPa
I	$t_m =$	0,6	mm
	$t_t =$	0,5	mm
	$\sigma_c =$	170,61	MPa

Fonte: Elaborado pela autora.

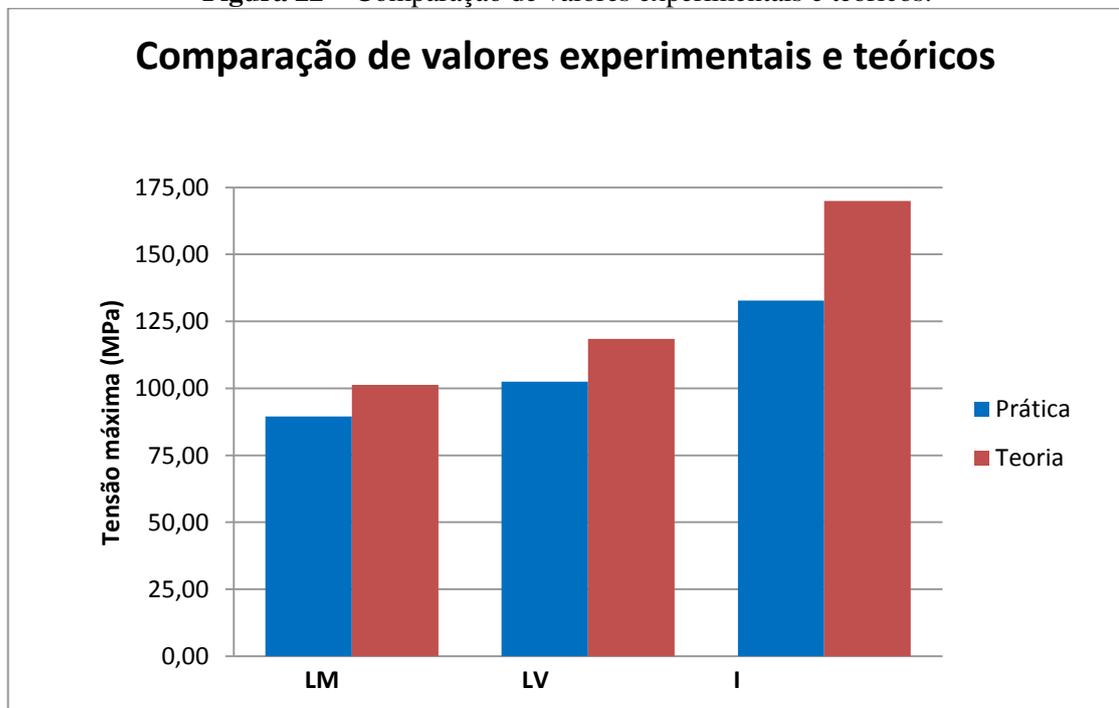
Este método de cálculo para resistência à tração tem as vantagens de ser simples, poder ser aplicado a todos os tipos de materiais laminados e híbridos, substituir a análise macromecânica – que é complexa, e dispensar programação computacional cara e demorada. Porém, é preciso ter ciência de que por ser simples, o resultado é aproximado; os cálculos são muito sensíveis aos valores de entrada e, portanto, é importante que os valores sejam acurados; deve-se atentar ao fato de se utilizar fração volumétrica na lei das misturas – e não fração mássica; e o cálculo pode ser feito manualmente ou facilmente programado.

Também é importante notar a importância de se utilizar um fator de segurança, usualmente de 30%, uma vez que na prática não é possível reproduzir a teoria e estes cálculos são simples e aproximados.

6.2.2 Discussão dos resultados

Após verificar os valores práticos e teóricos, foi plotado um gráfico comparativo dos resultados, mostrado na figura 22.

Figura 22 – Comparação de valores experimentais e teóricos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença entre os valores experimentais e teóricos foi de 13,2% para LM, 15,5% para LV e 28% para I. A maior discrepância foi entre os valores de infusão, que pode ser justificada em parte por ter sido estimado que a parte impregnada da placa foi de 75%. Outras explicações para as diferenças entre os valores teóricos e práticos é que os cálculos consideram a placa como um todo, sendo que na prática as propriedades não são homogêneas ao longo de toda a placa e apenas uma parte foi testada. Além de os cálculos serem simples e retornarem resultados aproximados, realçando a necessidade de se utilizar o FS. Contudo, apesar destas ressalvas, o gráfico reforça que tanto experimental quanto teoricamente a I é o método com melhores resultados de resistência à tração, seguida de LV e LM. Isto pode ser explicado com base na tabela 6, que mostra o teor de fibras – calculado pela divisão da massa de reforços pela massa total.

Tabela 6 – Teor de fibras de cada placa.

LM	LV	I
0,34	0,40	0,58

Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme valores da tabela 6, o método de I possui a maior relação fibra: resina, seguido de LV e LM. A fibra é o constituinte com as melhores propriedades mecânicas e, portanto, quanto maior o teor de fibra, melhores serão as propriedades do laminado, até certa relação de fibra:resina. Nasseh (2011) fala que o teor de fibra por LM fica em torno de 20 a 30% e por I pode chegar a 70%. Para o método de LV, West System (2010) comenta que o teor de fibra pode ser de até a 65%. Em vista disto, o teor de fibra nos métodos que utilizaram a bomba de vácuo pode ter sido afetado pelas limitações encontradas – como a fita selante utilizada, que tem qualidade inferior à adequada e pode ter ocasionado vazamento de ar, diminuindo a eficiência da bomba de vácuo.

Outro fator que justifica as melhores propriedades dos processos que utilizam a bomba de vácuo é a menor quantidade de espaços vazios no laminado (WEST SYSTEM, 2010).

Portanto, os resultados teóricos e experimentais da resistência à tração dos laminados estão condizentes com a literatura.

6.3. ENSAIO DE IMPACTO

Com este ensaio é possível comparar a resistência ao impacto dos laminados confeccionados por cada método.

Como explicado na metodologia, inicialmente foi medido um fator de correção associado à energia perdida por atrito e inércia, cujo valor encontrado foi de 0,44J. Então, este fator foi subtraído dos valores de energia encontrados para cada CP, obtendo-se a energia de cada amostra. Dividindo-se o valor da energia da amostra pela sua espessura, encontra-se a resistência ao impacto em J/m. E, dividindo este valor por 1000, tem-se a resistência dada por KJ/m – de forma a facilitar a comparação dos resultados. Estes valores podem ser conferidos no apêndice E.

A norma classifica o tipo de falha em quatro categorias:

- *Complete break* (C): o CP se separa em dois ou mais pedaços;
- *Hinge Break* (H): quando uma parte é mantida na vertical e a outra não consegue se suportar acima da linha horizontal.
- *Partial Break* (P): não se encaixa na *hinge break*, mas fraturou no mínimo 90% da distância entre o entalhe e o lado oposto.
- *Non-Break* (NB): fraturou menos de 90% da distância entre o entalhe e o lado oposto.

Conforme mostrado na figura 23, os CPs tiveram tipos de falha diferentes.

Figura 23 – CPs de impacto após o ensaio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para analisar os resultados, inicialmente é preciso definir o tipo de falha de cada CP. A tabela 7 mostra a resistência ao impacto e o tipo de falha de cada CP.

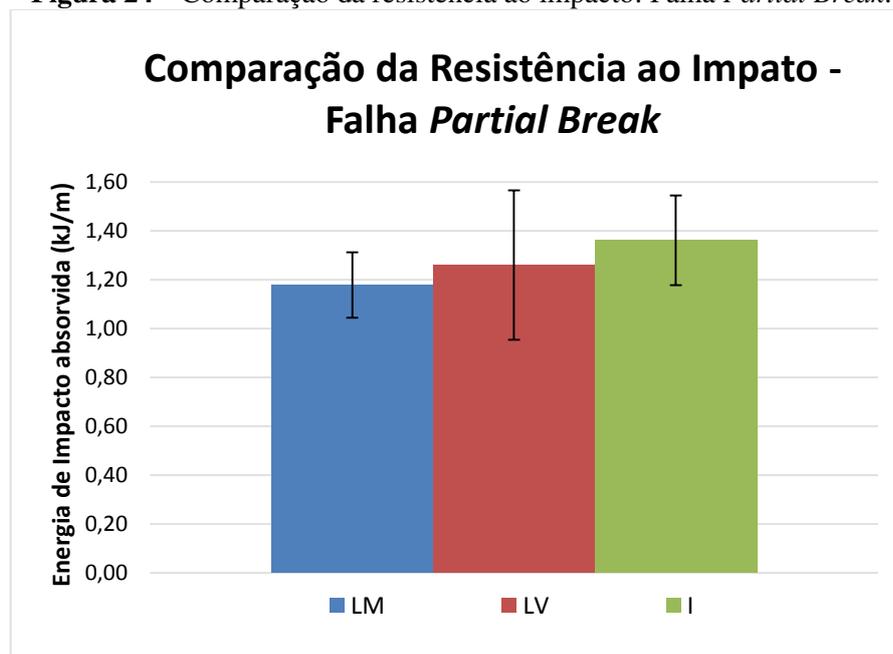
Tabela 7 – Resistência ao impacto e o tipo de falha dos CPs de impacto.

Laminação Manual			Laminação a Vácuo			Laminação por Infusão		
CP	Energia (kJ/m)	Tipo de Falha	CP	Energia (kJ/m)	Tipo de Falha	CP	Energia (kJ/m)	Tipo de Falha
LMEI01	1,32	PB	LVEI01	1,58	PB	IEI01	1,45	PB
LMEI02	1,06	PB	LVEI02	0,85	PB	IEI02	1,06	PB
LMEI03	0,65	NB	LVEI03	0,48	NB	IEI03	1,46	PB
LMEI04	1,16	PB	LVEI04	1,03	PB	IEI04	1,11	PB
LMEI05	1,03	PB	LVEI05	1,55	PB	IEI05	1,62	PB
LMEI06	1,33	PB	LVEI06	1,28	PB	IEI06	1,46	PB

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados dos CPs que tiveram a falha *non-break* serão descartados. Os demais tiveram falha do tipo *partial break* e seus resultados serão utilizados para calcular a média, o desvio padrão e os intervalos de confiança das resistências ao impacto de acordo com o método de laminação. Os valores obtidos se encontram no apêndice F e a figura 24 mostra o gráfico comparativo da resistência ao impacto para a falha do tipo *partial break*.

Figura 24 – Comparação da resistência ao impacto: Falha *Partial Break*.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como discutido anteriormente, quanto maior o teor de fibra e menor a quantidade de vazios, melhores propriedades mecânicas o laminado terá. Desta forma, é esperado que o método de I apresente resistência ao impacto melhor do que os demais e que o método de LV seja melhor do que o de LM. Analisando o gráfico, percebe-se que em termos de resistências médias o método de I apresentou melhores resultados, seguido de LV e LM, respectivamente. A diferença entre I e LM foi de 15,6%, entre I e LV foi de 8,1% e entre LV e LM foi de 6,9%.

No entanto, uma considerável oscilação dos valores obtidos gerou intervalos de confiança amplos, demonstrando que não é possível afirmar estatisticamente que algum dos métodos seja sempre melhor do que os demais. Fatores que podem ter influenciado na imprecisão dos resultados são: a não uniformidade dos ângulos de entalhe feitos utilizando arco de serra manual, enquanto que a norma estabelece que sejam de $45 \pm 1^\circ$; a espessura dos laminados de LV e I é menor do que a prevista por norma, entre 3 e 12,7mm; e o reduzido número de CPs de mesma condição, embora o número esteja acima do mínimo estabelecido pela ASTM.

6.4. ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

Este ensaio determina a taxa relativa de absorção de água pelo material quando imerso. Para tanto, foi adotado o procedimento de imersão de longo prazo, totalizando 821 horas de ensaio.

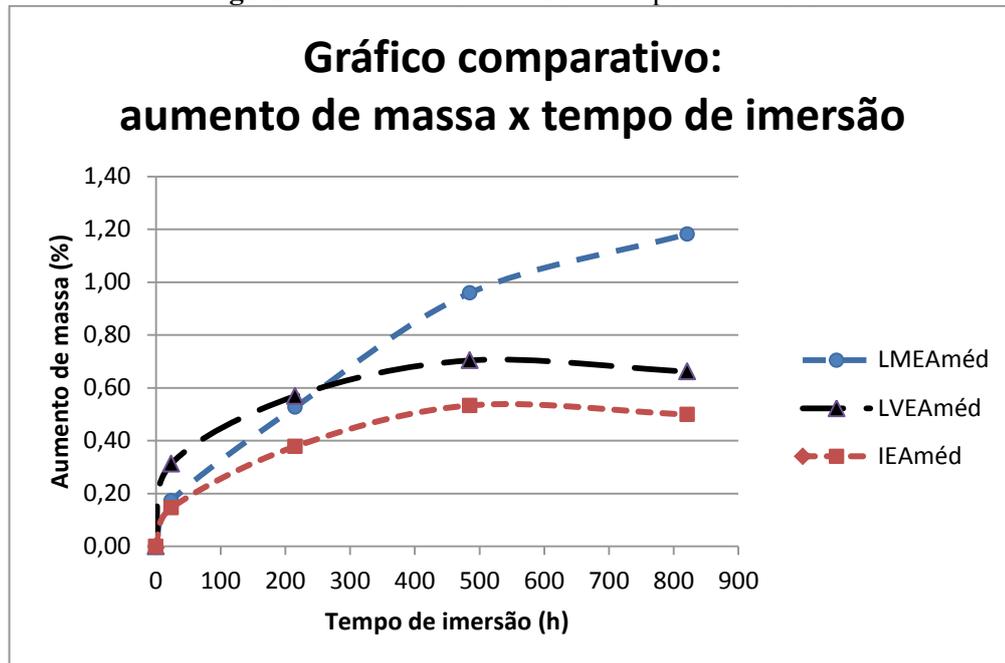
Foram realizadas medições da massa dos CPs imediatamente antes e após 24, 215, 485 e 821 horas da imersão destes em água destilada. Após a imersão das amostras, para diminuir erros que possam ser gerados no processo de medição, foram feitas duas medições por condição e calculada a média. Os valores podem ser encontrados no apêndice G.

Com isto, foi calculada a porcentagem de aumento na massa de cada CP da seguinte forma: Aumento da massa, % = $\left(\frac{\text{massa após imersão} - \text{massa inicial}}{\text{massa inicial}} \right) \times 100$.

As porcentagens de aumento na massa de cada CP estão mostradas no apêndice H, bem como as médias dos valores encontrados para cada método.

Com base nos valores médios de cada método, foi traçado o gráfico comparativo do “aumento de massa x tempo de imersão”, mostrado na figura 25.

Figura 25 – Aumento de massa x tempo de imersão.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como pode ser observado no gráfico, nas primeiras 24 horas os três métodos apresentaram absorção de água acentuada. Neste período, LV foi quem mais absorveu água, tendo aumentado 0,31% de massa, e LM e I absorveram quantidades parecidas, 0,17 e 0,15% respectivamente.

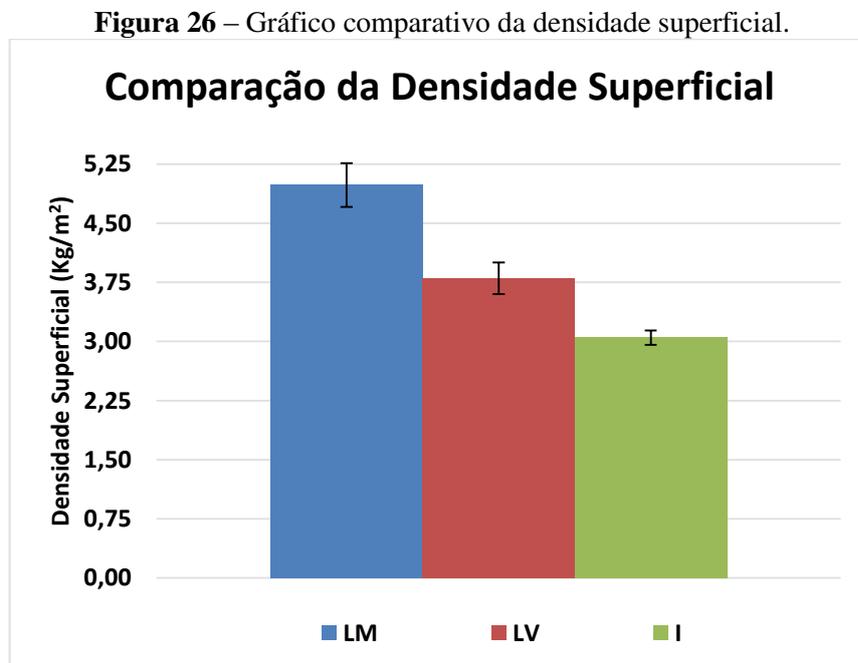
Após uma semana da primeira medição, LM havia absorvido 0,53% enquanto LV tinha absorvido 0,57% de massa. A partir deste momento, os CPs de LM passaram a absorver mais água do que os demais, estando em processo acentuado de absorção até a última medição. Isto pode ser explicado pela maior porosidade por não utilizarem a bomba de vácuo, uma vez que as partículas de água ficam retidas mais facilmente nos poros. Outro motivo pode ser o teor de fibra, pois segundo Vieira et al. (2009) “O aumento do teor de fibra de vidro no reforço diminui a absorção de água nos compósitos”. Isto explicaria também a menor absorção dos CPs de I e a absorção intermediária dos CPs de LV.

Por fim, é possível inferir que existe uma tendência dos CPs de LV e I estabilizarem a absorção a partir da terceira semana de imersão, enquanto que os CPs de LM continuam a absorver água consideravelmente.

6.5. CÁLCULO DA DENSIDADE SUPERFICIAL

Através deste cálculo será possível comparar a massa de cada laminado por metro quadrado. Diferentemente dos itens anteriores, que tiveram como base as normas da ASTM, este é um cálculo simples que se baseia na fórmula $\rho_A = \frac{m}{A}$, onde: ρ_A é a densidade superficial, m é a massa e A é a área da amostra.

As dimensões, massas e densidades superficiais das amostras podem ser encontradas no apêndice I. Os valores de média, desvio padrão, intervalo de confiança e erro calculados pela distribuição t de *student* com nível de confiança 95% são apresentados no apêndice J.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados demonstram que, em média, a placa laminada por I é 24% mais leve do que a placa feita por LV e 39% mais leve do que a placa feita por LM. Com relação à LM, a placa feita por LV é 20% mais leve. Os intervalos de confiança tiveram erros pequenos em relação à média: 5,5% para LM, 5,3% para LV e 3% para I – demonstrando uniformidade nos resultados. Portanto, estatisticamente é possível afirmar que a placa de I é a mais leve de todas e a laminada por LM é a mais pesada, com LV apresentando densidade superficial intermediária. Estes resultados estão de acordo com o esperado e os processos que utilizam bomba de vácuo, apresentam menor massa porque parte da resina em excesso fica retida no material absorvente.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho fez um estudo comparativo dos processos de laminação manual, laminação a vácuo e infusão quanto às propriedades de tração, impacto, absorção de água e densidade superficial obtidas na fabricação de um compósito fibra de vidro/poliéster.

Para tanto, foi laminada uma placa por cada método, utilizando resina de poliéster isoftálica com NPG e reforço de fibra de vidro, na configuração de duas camadas de manta intercaladas por uma de tecido biaxial. A laminação manual ocorreu dentro da normalidade, porém os métodos de laminação a vácuo e infusão apresentaram algumas dificuldades devido aos acessórios que estavam disponíveis no laboratório. Mas, apesar dos contratemplos, foi possível concretizar o objetivo específico de obter corpos de prova de PRFV por cada método.

A propriedade de tração foi investigada experimentalmente por meio de ensaio, baseado na norma da ASTM D3039, e teoricamente por meio de cálculos. Inicialmente, a análise teórica identificou a resistência à tração de cada camada, através da lei das misturas modificada para as camadas de manta e da lei das misturas mais a matriz de transformação para as camadas de tecido. Posteriormente, foi calculada a resistência do compósito inteiro. Identificou-se que o método de infusão possui o maior teor de fibra (0,58), seguido de laminação a vácuo (0,40) e laminação manual (0,34). Como a fibra é o constituinte com as melhores propriedades mecânicas, quanto maior é o seu teor, melhores serão as propriedades do laminado. Como esperado, tanto experimental quanto teoricamente, a infusão foi o método com melhores resultados de resistência à tração, seguida da laminação a vácuo e laminação manual. Portanto, os resultados deste teste estão condizentes com a literatura.

Em termos de resistências médias ao impacto, o método de infusão apresentou melhores resultados, seguido de laminação a vácuo e laminação manual, respectivamente. No entanto, uma considerável oscilação dos valores obtidos gerou intervalos de confiança amplos, demonstrando que não é possível afirmar estatisticamente que algum método é melhor do que os demais. Os fatores que podem ter influenciado na imprecisão dos resultados são a não uniformidade dos ângulos de entalhe dos CPs e a espessura dos laminados feitos por laminação a vácuo e infusão serem menor do que a prevista por norma.

Com relação ao ensaio de absorção de água, os CPs de laminação manual absorveram mais água do que os demais. Isto pode ser explicado pela maior porosidade por não utilizarem a bomba de vácuo, uma vez que as partículas de água ficam retidas mais

facilmente nos poros. Os CPs que apresentaram menor absorção de água foram os de infusão, estando condizente com a expectativa, pois o aumento do teor de fibra de vidro no reforço diminui a absorção de água nos compósitos.

O cálculo de densidade superficial demonstrou que a o laminado feito por infusão é 20% mais leve do que o feito por laminação a vácuo e 40% mais leve do que o feito por laminação manual. Com relação aos CPs de laminação manual, os feitos por laminação a vácuo são 24% mais leves. Como os processos que utilizam bomba de vácuo retêm a resina em excesso no material absorvente, é coerente que os CPs de laminação manual tenham apresentado maior densidade superficial que os demais.

Portanto, conclui-se que dos três métodos, a infusão é o que resulta num laminado com melhores propriedades físico-mecânicas. A laminação a vácuo produz laminados com propriedades intermediárias e a laminação manual gera laminados com propriedades inferiores.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se:

- Confeccionar corpos de prova, com precisão dimensional prevista por norma, e realizar um novo ensaio de impacto;
- Avaliar as diferentes metodologias adotadas em termos de tempo de fabricação, equipamentos e custos atrelados, montado uma planilha de custo-benefício.

REFERÊNCIAS

ABMACO. **Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências.** [S.l.], 2008.

ABMACO. **Compósitos 2: Tecnologia de Processos.** [s.l.], 2009.

AIREX BALTEK. **AIREX Processing Guidelines.** Disponível em: <<http://www.3accorematerials.com/downloads.html>>. Acesso em: 02 out. 2014.

AL-QURESHI, Hazim Ali. **Materiais compostos: análises e fabricação.** 1. ed. Florianópolis: UFSC/CEM, 2010. 469 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 256:** Standard Test Method for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics. West Conshohocken: Astm International, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039:** Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken: Astm International, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 570:** Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. West Conshohocken: Astm International, 1998.

ARA QUÍMICA S/A. **Resina poliéster insaturado, isoftálica, flexível.** AraÇariguama [s.d].

CARVALHO, A.. **Fiberglass x Corrosão: Especificação, Instalação e Manutenção de Equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos.** São Paulo: Asplar, 1992.

CASARIL, Alexandre et al. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, Caxias do Sul, v. 12, n. 2, p.408-419, 2007.

DAVALLO, M.; WILKINSON, A. N.; ZIARATI, P.. **Mechanical Properties of Polyester Resin Formed by Resin Transfer Moulding (RTM).** In: IRANIAN CHEMICAL ENGINEERING CONGRESS, 9., 2004, Tehran: Iran University Of Science And Technology (iust), 2004. p. 4056 - 4063.

HOA, Suong. **Principles of the manufacturing of composite materials.** Lancaster: Destech Publications, Inc., 2009.

IVANOV, Yatchko; CHESHKOV, Valerii; NATOVA, Margarita. **Polymer Composite Materials: Interface Phenomena & Processes.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.

LOMBARD, Z.. **Vacuum infusion process testing and development.** Pretoria: Technology Innovation Agency, 2011.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia.** São Paulo: Artliber, 2011.

MAZUMDAR, Sanjay K.. **Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering**. Florida: Crc Press Llc, 2002.

NAJAFI, M; ESLAMI-FARSANI, R.; KHALILI, S. M. R.. **Comparison of compressive Properties Between Vacuum Infusion and Hand Lay-Up Method Toward Balsa Core Sandwich Composites**. Journal Of Mechanical Research And Application. Tehran, p. 33-40. 2012.

NASSEH, Jorge. **Manual de construção de barcos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

NICOLAIS, Luigi; MEO, Michele; MILELLA, Eva. **Composite materials: a vision for the future**. London: Springer-verlag, 2011.

PLASTICS, Reinforced. **An introduction to resin infusion**. 2014. Disponível em: <www.reinforcedplastics.com>. Acesso em: 14 set. 2014.

SHENOI, R. A.; WELLICOME, J. F.. **Composite materials in marine structures: fundamental aspects**. New York: Cambridge University Press, 1993.

VIEIRA, Cristiane Aurelia Borges et al. Interferência da lavagem de fibras sobre o desempenho do sizing nas propriedades mecânicas em compósitos híbridos vidro/sisal. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, [s.l], v. 10, n. 4, p.222-234, jul. 2009.

WEST SYSTEM. **Vacuum Bagging Techniques**. 7 ed. Bay City: Gougeon Brothers, 2010.

APÊNDICE A - Etiqueta dos corpos de prova.

Etiqueta dos Corpos de Prova					
Ensaio de tração			Ensaio de impacto		
CP	Método	Ordem de ensaio	CP	Método	Ordem de ensaio
LMET01	Laminação manual	1	LMEI01	Laminação manual	1
LMET02	Laminação manual	2	LMEI02	Laminação manual	2
LMET03	Laminação manual	3	LMEI03	Laminação manual	3
LMET04	Laminação manual	4	LMEI04	Laminação manual	4
LMET05	Laminação manual	5	LMEI05	Laminação manual	5
LMET06	Laminação manual	6	LMEI06	Laminação manual	6
LVET01	Laminação a vácuo	1	LVEI01	Laminação a vácuo	1
LVET02	Laminação a vácuo	2	LVEI02	Laminação a vácuo	2
LVET03	Laminação a vácuo	3	LVEI03	Laminação a vácuo	3
LVET04	Laminação a vácuo	4	LVEI04	Laminação a vácuo	4
LVET05	Laminação a vácuo	5	LVEI05	Laminação a vácuo	5
LVET06	Laminação a vácuo	6	LVEI06	Laminação a vácuo	6
IET01	Infusão	1	IEI01	Infusão	1
IET02	Infusão	2	IEI02	Infusão	2
IET03	Infusão	3	IEI03	Infusão	3
IET04	Infusão	4	IEI04	Infusão	4
IET05	Infusão	5	IEI05	Infusão	5
IET06	Infusão	6	IEI06	Infusão	6
Ensaio de absorção de água					
CP	Método	Ordem de ensaio			
LMEA01	Laminação manual	1			
LMEA02	Laminação manual	2			
LMEA03	Laminação manual	3			
LVEA01	Laminação a vácuo	1			
LVEA02	Laminação a vácuo	2			
LVEA03	Laminação a vácuo	3			
IEA01	Infusão	1			
IEA02	Infusão	2			
IEA03	Infusão	3			

APÊNDICE B – Dimensões dos CPs de tração.

Corpos de Prova - Ensaio de Tração						
CP	Espessura (mm)			Largura (mm)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
LM01	3,00	3,90	4,30	26,40	26,80	26,45
LM02	3,20	4,20	4,30	26,00	25,50	25,50
LM03	3,15	3,85	4,45	25,35	25,75	26,20
LM04	3,00	3,75	4,50	25,70	25,00	25,15
LM05	4,50	4,10	3,70	25,65	25,15	24,85
LM06	3,45	4,00	4,40	25,10	25,60	25,55
LV01	2,60	2,95	2,70	26,00	25,60	26,00
LV02	3,00	3,40	2,70	25,85	25,50	26,55
LV03	2,45	3,30	3,05	26,60	25,90	24,20
LV04	2,45	3,30	3,05	25,30	26,10	26,10
LV05	2,60	2,95	2,45	26,50	26,35	25,90
LV06	2,40	2,70	2,80	25,20	25,00	25,60
I01	2,05	1,95	2,20	25,90	26,10	25,65
I02	2,65	2,30	2,35	25,90	26,30	26,00
I03	2,70	1,95	2,20	26,10	25,65	26,45
I04	2,30	1,95	2,20	26,55	26,80	26,20
I05	1,95	2,35	2,35	25,65	26,00	26,65
I06	2,20	1,85	2,10	26,20	25,60	26,00

APÊNDICE C – Dimensões e resistência à tração dos CPs.

CP	Espessura Média (mm)	Largura Média (mm)	Área Média (mm²)	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (Mpa)
LM01	3,73	26,55	99,12	9663,90	97,50
LM02	3,90	25,67	100,10	9789,30	97,80
LM03	3,82	25,77	98,34	7794,50	79,26
LM04	3,75	25,28	94,81	9496,80	100,16
LM05	4,10	25,22	103,39	9427,20	91,18
LM06	3,95	25,42	100,40	7115,70	70,88
LV01	2,75	25,87	71,13	6990,30	98,27
LV02	3,03	25,97	78,77	8396,80	106,60
LV03	2,93	25,57	75,00	7227,10	96,37
LV04	2,93	25,83	75,78	7185,30	94,82
LV05	2,67	26,25	70,00	7519,50	107,42
LV06	2,63	25,27	66,54	7432,50	111,71
I01	2,07	25,88	53,49	8174,00	152,81
I02	2,43	26,07	63,43	7603,00	119,87
I03	2,28	26,07	59,52	7853,70	131,95
I04	2,15	26,52	57,01	8174,00	143,38
I05	2,22	26,10	57,86	6607,40	114,21
I06	2,05	25,93	53,16	7143,50	134,37

APÊNDICE D – Resultados da distribuição t de student para o ensaio de tração.

Distribuição t student - Tensão Máxima	
Número de dados	6
Grau de liberdade	5
Nível de confiança	95%
Nível de significância	5%
Coefficiente t (tabela)	2,571
Laminação Manual	
Média	89,46 MPa
Desvio padrão	11,84 MPa
Limite superior	101,89 MPa
Limite inferior	77,04 MPa
Erro	12,43 MPa
Laminação a Vácuo	
Média	102,53 MPa
Desvio padrão	6,93 MPa
Limite superior	109,81 MPa
Limite inferior	95,26 MPa
Erro	7,28 MPa
Laminação por Infusão	
Média	132,76 MPa
Desvio padrão	14,34 MPa
Limite superior	147,81 MPa
Limite inferior	117,71 MPa
Erro	15,05 MPa

APÊNDICE E – Valores encontrados no ensaio de impacto.

CP	Fator de correção	Energia medida (J)	Energia amostra (J)	Espessura (m)	Energia (kJ/m)
LMEI01	0,44	5,44	5,00	0,00380	1,32
LMEI02	0,44	4,40	3,96	0,00375	1,06
LMEI03	0,44	2,88	2,44	0,00375	0,65
LMEI04	0,44	4,56	4,12	0,00355	1,16
LMEI05	0,44	4,40	3,96	0,00385	1,03
LMEI06	0,44	4,96	4,52	0,00340	1,33
LVEI01	0,44	4,48	4,04	0,00255	1,58
LVEI02	0,44	2,32	1,88	0,00220	0,85
LVEI03	0,44	1,52	1,08	0,00225	0,48
LVEI04	0,44	2,80	2,36	0,00230	1,03
LVEI05	0,44	4,56	4,12	0,00265	1,55
LVEI06	0,44	3,44	3,00	0,00235	1,28
IEI01	0,44	3,20	2,76	0,00190	1,45
IEI02	0,44	2,24	1,80	0,00170	1,06
IEI03	0,44	3,36	2,92	0,00200	1,46
IEI04	0,44	2,72	2,28	0,00205	1,11
IEI05	0,44	3,52	3,08	0,00190	1,62
IEI06	0,44	3,44	3,00	0,00205	1,46

**APÊNDICE F – Resultados da distribuição t de student para o ensaio de impacto: falha
*Partial Break.***

Falha: <i>Partial Break</i>	
Nível de confiança	95%
Nível de significância	5%
Laminação Manual	
Número de dados	5
Grau de liberdade	4
Distribuição t (tabela)	2,132
Média	1,18 KJ/m
Desvio Padrão	0,141 KJ/m
Limite superior	1,312 KJ/m
Limite inferior	1,044 KJ/m
Laminação a Vácuo	
Número de dados	5
Grau de liberdade	4
Distribuição t (tabela)	2,132
Média	1,26 KJ/m
Desvio Padrão	0,321 KJ/m
Limite superior	1,565 KJ/m
Limite inferior	0,953 KJ/m
Laminação por Infusão	
Número de dados	6
Grau de liberdade	5
Distribuição t (tabela)	2,015
Média	1,36 KJ/m
Desvio Padrão	0,223 KJ/m
Limite superior	1,545 KJ/m
Limite inferior	1,178 KJ/m

APÊNDICE G – Massa dos CPs do EA antes e após a imersão.

CP	Massa(g) 0h	Massa (g) 24h	Massa (g) 24h	Massa (g) 24h média	Massa (g) 215h	Massa (g) 215h	Massa (g) 215h média
LM01	10,4355	10,4517	10,4505	10,4511	10,4887	10,4877	10,4882
LM02	9,6975	9,7162	9,7163	9,7163	9,7507	9,7500	9,7504
LM03	9,5293	9,5494	9,5428	9,5461	9,5808	9,5789	9,5799
LV01	6,6666	6,6907	6,6916	6,6912	6,7024	6,7014	6,7019
LV02	7,7708	7,7974	7,7967	7,7971	7,8199	7,8171	7,8185
LV03	6,6871	6,7042	6,7012	6,7027	6,7254	6,7241	6,7248
I01	6,1652	6,1727	6,1725	6,1726	6,1889	6,1876	6,1882
I02	5,6942	5,7076	5,7050	5,7063	5,7177	5,7166	5,7172
I03	5,8394	5,8455	5,8455	5,8455	5,8607	5,8597	5,8602
	CP	Massa (g) 485h	Massa (g) 485h	Massa (g) 485h média	Massa (g) 821h	Massa (g) 821h	Massa (g) 821h média
	LM01	10,5307	10,5302	10,5305	10,5582	10,5565	10,5574
	LM02	9,7958	9,7936	9,7947	9,8137	9,8118	9,8128
	LM03	9,6227	9,6200	9,6214	9,6446	9,6409	9,6428
	LV01	6,7134	6,712	6,7127	6,7078	6,7033	6,7056
	LV02	7,829	7,8276	7,8283	7,8269	7,8246	7,8258
	LV03	6,7334	6,7318	6,7326	6,7347	6,7323	6,7335
	I01	6,1932	6,1929	6,1931	6,1966	6,1954	6,1960
	I02	5,7303	5,7301	5,7302	5,7256	5,7247	5,7252
	I03	5,8694	5,8696	5,8695	5,8684	5,8634	5,8659

APÊNDICE H – Aumento na massa dos CPs, %.

CP	Raíz quadrada do tempo (h)			
	4,90	14,66	22,02	28,65
	Aumento da massa, %			
LMEA01	0,15	0,51	0,91	1,17
LMEA02	0,19	0,54	1,00	1,19
LMEA03	0,18	0,53	0,97	1,19
LMEA média	0,17	0,53	0,96	1,18
LVEA01	0,37	0,53	0,69	0,58
LVEA02	0,34	0,61	0,74	0,71
LVEA03	0,23	0,56	0,68	0,69
LVEA média	0,31	0,57	0,70	0,66
IEA01	0,12	0,37	0,45	0,50
IEA02	0,21	0,40	0,63	0,54
IEA03	0,10	0,36	0,52	0,45
IEA média	0,15	0,38	0,53	0,50

APÊNDICE I – Dimensões, massa e densidade superficial das amostras.

CP	Largura (mm)			Largura Média (mm)	Comprimento (mm)			Comprimento Médio (mm)	Área (mm ²)	Massa (g)	Densidade Superficial (kg/m ²)
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3				
LMEA01	26,40	26,25	26,60	26,42	75,55	76,00	75,20	75,58	1996,66	10,4355	5,23
LMEA02	24,20	24,75	25,40	24,78	76,20	76,00	75,80	76,00	1883,53	9,6975	5,15
LMEA03	24,75	24,25	23,60	24,20	75,50	75,60	75,65	75,58	1829,12	9,5293	5,21
LMEA04	25,25	25,80	25,65	25,57	76,15	76,20	76,20	76,18	1947,75	8,8952	4,57
LMEA05	26,60	26,45	26,65	26,57	76,25	76,50	76,40	76,38	2029,25	10,0679	4,96
LMEA06	25,90	25,40	25,50	25,60	76,50	76,30	76,25	76,35	1954,56	9,3754	4,80
LVEA01	24,10	24,30	24,20	24,20	74,75	74,65	74,50	74,63	1806,13	6,6666	3,69
LVEA02	26,35	26,35	26,30	26,33	76,50	76,55	76,80	76,62	2017,57	7,7708	3,85
LVEA03	24,90	24,95	24,85	24,90	75,95	76,00	75,90	75,95	1891,16	6,6871	3,54
LVEA04	26,40	26,35	26,20	26,32	76,60	76,60	76,50	76,57	2014,98	8,2755	4,11
LVEA05	25,30	25,05	25,20	25,18	76,60	76,50	76,50	76,53	1927,36	7,2571	3,77
LVEA06	26,10	26,90	26,70	26,57	76,35	76,70	76,00	76,35	2028,37	7,8107	3,85
IEA01	25,40	25,60	25,85	25,62	76,60	76,20	76,00	76,27	1953,70	6,1652	3,16
IEA02	25,20	24,35	24,50	24,68	76,25	76,10	76,15	76,17	1880,05	5,6942	3,03
IEA03	24,80	24,40	24,25	24,48	75,70	75,85	75,70	75,75	1854,61	5,8394	3,15
IEA04	25,70	24,90	25,00	25,20	76,65	76,60	76,90	76,72	1933,26	5,6898	2,94
IEA05	25,50	26,35	26,00	25,95	76,40	76,90	76,50	76,60	1987,77	6,0311	3,03
IEA06	25,60	25,60	25,45	25,55	76,40	76,60	76,25	76,42	1952,45	5,8303	2,99

APÊNDICE J – Resultados da distribuição t de student da densidade superficial.

Distribuição t student - Tensão Máxima	
Número de dados	6
Grau de liberdade	5
Nível de confiança	95%
Nível de significância	5%
Coeficiente t (tabela)	2,571
Laminação Manual	
Média	4,98 Kg/m ²
Desvio padrão	0,26 Kg/m ²
Limite superior	5,26 Kg/m ²
Limite inferior	4,71 Kg/m ²
Erro	0,28 Kg/m ²
Laminação a Vácuo	
Média	3,80 Kg/m ²
Desvio padrão	0,19 Kg/m ²
Limite superior	4,00 Kg/m ²
Limite inferior	3,60 Kg/m ²
Erro	0,20 Kg/m ²
Laminação por Infusão	
Média	3,05 Kg/m ²
Desvio padrão	0,09 Kg/m ²
Limite superior	3,14 Kg/m ²
Limite inferior	2,96 Kg/m ²
Erro	0,09 Kg/m ²