

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

ANSELMO THIESEN JUNIOR

**ESTUDO COMPARATIVO DE LAMINADOS EM PLÁSTICO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO OBTIDOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS SPRAY-UP E HAND  
LAY-UP**

Joinville, 2016

ANSELMO THIESEN JUNIOR

**ESTUDO COMPARATIVO DE LAMINADOS EM PLÁSTICO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO OBTIDOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS SPRAY-UP E HAND  
LAY-UP**

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 Joinville.

Orientador: Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto.

Joinville, 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária de UFSC.

Thiesen, Anselmo Junior  
ESTUDO COMPARATIVO DE LAMINADOS EM PLÁSTICO REFORÇADO  
COM FIBRA DE VIDRO OBTIDOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS SPRAY-UP E  
HAND LAY-UP / Anselmo Junior Thiesen ; orientador, Ricardo  
Aurélio Quinhões Pinto - Joinville, SC, 2016.  
68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.  
Graduação em Engenharia Naval.

Inclui referências

1. Engenharia Naval. 2. Compósitos. 3. Spray-up. 4. Hand  
lay-up. 5. Propriedades. I. Pinto, Ricardo Aurélio  
Quinhões. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso

ESTUDO COMPARATIVO DE LAMINADOS EM PLÁSTICO REFORÇADO COM  
FIBRA DE VIDRO OBTIDOS ATRAVÉS DOS PROCESSOS SPRAY-UP E HAND LAY-  
UP

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro naval. Campus Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Joinville, 02 de dezembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

---

Ricardo Aurélio Quinhões Pinto - Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina - Professor Doutor do Departamento de Engenharias da  
Mobilidade

---

Gabriel Benedet Dutra - Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina - Professor Doutor do Departamento de Engenharias da  
Mobilidade

---

Thiago Pontin Tancredi – Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina - Professor Doutor e Coordenador do Departamento de  
Engenharias da Mobilidade

## **AGRADECIMENTOS**

### ***Aos meus pais***

*Por terem me dado todo o suporte para chegar até aqui, sem vocês a realização desse sonho não seria possível. Muito obrigado por tudo, amo muito vocês.*

### ***A minha namorada***

*Carine por estar ao meu lado todo esse tempo me apoiando, me incentivando e acreditando em mim nos momentos de dificuldade. Te amo.*

### ***Aos meus familiares***

*Que acompanharam todo esse período e que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui. Muito obrigado!*

### ***Aos meus amigos***

*Que foram companheiros nessa caminhada e torceram por mim. Em especial João pela parceria todo esse tempo e se esforçar para me ajudar sempre que precisei. Muito obrigado!*

### ***A Brunswick***

*Pelo apoio prestado na elaboração das amostras deste trabalho.*

### ***Ao Antonio Carlos***

*Pela disponibilidade e apoio prestado na realização dos ensaios deste trabalho.*

### ***A Whirlpool***

*Pelo apoio prestado na realização dos ensaios deste trabalho.*

### ***Ao meu orientador***

*Ricardo, pela disponibilidade, ajuda e suporte.*

### ***Aos mestres***

*Pelos ensinamentos durante todos esses anos de universidade e por me fazer ver o mundo de uma perspectiva diferente.*

***A minha banca de TCC: Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, Gabriel Benedet Dutra e Thiago Pontin Tancredi,***  
*pelas contribuições dadas para o aperfeiçoamento deste estudo.*

## RESUMO

A escolha correta do método de laminação é fator primordial para um bom desempenho de um compósito, tanto em aspectos econômicos quanto em suas características físicas e mecânicas. Hoje em dia, o método de laminação *spray-up* é altamente utilizado devido a sua grande produtividade, porém acredita-se que os laminados obtidos através desse método de laminação possuem características mecânicas inferiores quando comparados à laminação convencional (*hand lay-up*). Tendo isso em mente, esse estudo foi feito com o objetivo de comparar amostras similares obtidas através desses dois processos de laminação, e comparar suas propriedades, a fim de verificar se há ou não superioridade de um método em relação ao outro. A metodologia adotada baseia-se em uma pesquisa bibliográfica a respeito dos materiais e processos utilizados, a realização das laminações, a confecção de corpos de prova, a realização de ensaios de tração estática e combustão controlada e a análise e comparação dos resultados obtidos. Os testes de tração estática foram realizados com base na norma ASTM D3039. Foram ensaiados um total de 14 corpos de prova, sendo 7 de laminação *spray-up* e 7 de laminação *hand lay-up*. Através dos ensaios de tração pode-se determinar a tensão máxima admitida pelos materiais. Os resultados obtidos foram então estatisticamente tratados utilizando uma distribuição Student, atribuindo um nível de confiança de 95%. Verificou-se então, que não se pode afirmar que um processo proporciona valores de tensão máxima admissível superior ao outro. Os testes de combustão controlada foram realizados com base na norma ASTM D2584. Através destes ensaios pode-se quantificar a fração de reforço e matriz presente nos laminados, bem como o volume de vazios presente nos mesmos. Através dos resultados obtidos verificou-se que os dois processos possuem características semelhantes em sua configuração estrutural em relação à fração volumétrica de reforço. Portanto, analisando os resultados obtidos nos dois ensaios, não há evidências suficientes para afirmar que um processo possui características superiores a outro em relação a tensão máxima suportada, fração volumétrica de reforço e fração volumétrica de vazios.

**Palavras-chave:** Compósitos. *Spray-up*. *Hand lay-up*. Propriedades.

## ABSTRACT

The correct choice of the method of lamination is primary factor for a good performance of a composite, in both economics and in mechanical and physical characteristics. Nowadays, the method of spray lamination is highly used due to its great productivity, but it is believed that the laminates obtained through this method of lamination have lower mechanical characteristics when compared to conventional lamination (hand lay-up). With that in mind, this study was done in order to compare similar samples obtained through these two laminating processes, and compare their properties, in order to check whether or not the superiority of one method compared to another. The adopted methodology is based on a bibliographical research concerning materials and processes used, the realization of the laminations, making specimens, testing of static traction and controlled combustion and the analysis and comparison of the results obtained. Static tensile tests were performed based on ASTM D3039. Were tested a total of 14 specimens, being 7 of spray-up lamination and 7 of hand lay-up lamination. Through the traction tests it's possible to determine the maximum tension permitted by materials. The results obtained were statistically treated using a Student distribution, assigning a confidence level of 95%. After that, it was verified that we can't affirm that one process give better results of maximum tension permitted over the other one. The controlled combustion tests were done based on ASTM D2584. Through these tests it's possible to quantify the fraction of reinforcement and matrix present in laminates, as well as the volume of voids in the same. Through the results obtained it was found that the two processes have similar characteristics in their structural configuration related to volume of reinforcement fraction. Therefore, analyzing the results obtained in the two tests, there is insufficient evidence to assert that a process has superior features to another analyzing maximum tension supported, volume of reinforcement fraction and volume of empties fraction.

**Keywords:** Composites. Spray-up. Hand lay-up. Properties.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tecido em Fibra de Vidro.....	25
Figura 2 – Manta (esquerda) e Rooving (direita) de fibra de vidro.....	25
Figura 3– Processo da Laminação Manual (Hand Lay-up).....	27
Figura 4– Revólver de laminação spray-up.....	28
Figura 5– Metodologia geral. ....	31
Figura 6– Materiais utilizados: (A) manta de fibra de vidro, (B) fio rooving, (C) laminadora, (D) rolo de aço.....	33
Figura 7– Materiais utilizados: (A) rolo de lã, (B) resina de poliéster, (C) catalisador, (D) mesa de vidro onde a laminação foi realizada. ....	33
Figura 8- Materiais utilizados: (A) serra circular, (B) moto-esmeril, (C) lixa, escalímetro, disco de corte e material de proteção individual, (D) paquímetro digital. ....	34
Figura 9– Laminação Spray-up: (A) aplicação spray-up, (B) compactação. ....	36
Figura 10– Laminação manual. ....	37
Figura 11– Geometria do corpo de prova para ensaio de tração. ....	39
Figura 12– Geometria do corpo de prova para ensaio de combustão.....	39
Figura 13 – Confeção dos corpos de prova: (A) desbaste com moto-esmeril, (B) acabamento com lixa. ....	39
Figura 14– Corpos de prova: (A) tração, (B) combustão. ....	40
Figura 15– Ensaio de tração: (A) máquina de tração, (B) corpo de prova durante ensaio, (C) corpos de prova spray-up, (D) corpos de prova hand lay-up.....	42
Figura 16 - Equipamentos para ensaio de Combustão: Balança (A), Forno Mufla (B). ....	43
Figura 17 - Equipamentos para ensaio de Combustão: (A) Dessecador com cadinhos, (B) pinça. ....	43
Figura 18 - Amostras no Forno Após Combustão.....	45
Figura 19 - Pesagem de um CP após Combustão.....	45
Figura 20 - CPs Hand Lay-up após ensaio de tração.....	50
Figura 21 - CPs Spray-up após ensaio de tração. ....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Força [N] x deslocamento [mm] do CP HL-T1. ....	48
Gráfico 2– Tensão [MPa] x deslocamento [mm] do CP HL-T1. ....	49
Gráfico 3 – Tensão Máxima [Mpa]. ....	52
Gráfico 4 - Fração Volumétrica de Reforço ( $V_r$ ). ....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Área média dos CPs.....	47
Tabela 2 – Tensões máximas admissíveis dos CPs. ....	49
Tabela 3 – Dados estatísticos.....	51
Tabela 4 – Tensão Máxima [Mpa]. ....	51
Tabela 5 - Massas dos CPs. ....	53
Tabela 6 - Fração Volumétrica de Reforço. ....	54
Tabela 7 - Densidade aparente ( $\rho_a$ ). ....	55
Tabela 8 - Densidade Teórica. ....	56
Tabela 9 - Fração Volumétrica de Vazios ( $V_v$ ).....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACOBAR	Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos
ABMACO	Associação Brasileira de Materiais Compósitos
SU	Spray-up
HL	Hand Lay-up
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
IC	Intervalo de Confiança
NPG	Neopentil Glicol

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_r$	Fração Volumétrica de Reforço
$v_r$	Volume de Reforço
$v_c$	Volume do Compósito
$V_m$	Fração Volumétrica da Matriz
$v_m$	Volume da Matriz Polimérica
$m_r$	Massa do Reforço
$\rho_r$	Densidade do Reforço
$m_m$	Massa da Matriz Polimérica
$\rho_m$	Densidade da Matriz Polimérica
$\rho_c$	Densidade Teórica
$\rho_a$	Densidade Aparente
$v_a$	Volume Aparente
$v_v$	Volume de Vazios
$M_m$	Fração Mássica de Matriz Polimérica
$M_r$	Fração Mássica de Reforço
$V_v$	Fração Volumétrica de Vazios
$\sigma$	Tensão
$P$	Carga Aplicada
$A_m$	Área Média de Seção Transversal
$x_m$	Média Aritmética
$n$	Número de amostras
$t$	Parâmetro de Student
$s$	Desvio padrão de Amostragem

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	15
1.1. Objetivos	18
1.1.1. Objetivo Geral	18
1.1.2. Objetivos Específicos	18
<b>2. COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA NÁUTICA</b>	19
<b>3. MATÉRIA PRIMA E PROCESSOS</b>	20
3.1 Matriz Polimérica	20
3.1.1 Matriz Termorrígida	21
3.1.2 Resina Poliéster	21
3.2 Reforço Estrutural	22
3.2.1 Fibra de Vidro	22
3.2.2 Tecidos	23
3.2.3 Mantas	24
3.2.4 Roving	24
3.3 Processos	25
3.3.1 Hand Lay-up	26
3.3.2 Spray-up	27
<b>4. REGRA DAS MISTURAS</b>	29
<b>5. METODOLOGIA</b>	31
5.1 Materiais	32
5.2 Processos de Laminação	34
5.2.1 Processo Spray-up	35
5.2.2 Processo Hand Lay-up	37
5.3 Confeção dos Corpos de Prova	37
5.4 Realização dos Ensaios	40
5.4.1 Ensaio de Tração	40
5.4.2 Ensaio de Combustão Controlada	42
5.4.3 Densidade Aparente e Fração Volumétrica de Vazios	46
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	47
6.1 Teste de Tração	47
6.2 Teste de Combustão	53
6.3 Densidade Aparente e Fração Volumétrica de Vazios	55

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE A – NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA</b> .....	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE B – DIMENSÕES DOS CPS DE TRAÇÃO</b> .....	<b>62</b>
	<b>APÊNDICE C – ESFORÇOS MÁXIMOS ADMISSÍVEIS</b> .....	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE D – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DE COMBUSTÃO</b> .....	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA E TENSÃO POR DEFORMAÇÃO DOS CPS HAND LAY-UP</b> .....	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA E TENSÃO POR DEFORMAÇÃO DOS CPS SPRAY-UP</b> .....	<b>67</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A alta competitividade de mercado nos dias de hoje, faz com que cada vez mais se desenvolvam materiais e técnicas de manufatura, de modo a obter um produto final com maior qualidade pelo menor preço possível. Nesse contexto, os materiais compósitos se destacam na indústria náutica por proporcionar boas propriedades mecânicas e de processamento, aliadas a baixo custo, quando comparadas a outros tipos de materiais.

Os compósitos são produzidos quando dois ou mais materiais (ou fases) são utilizados para resultar em uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas de outra maneira e apresentam propriedades superiores às dos seus componentes, isto é, atuam com sinergia. A maioria dos compósitos reforçados com fibras apresenta maior limite de resistência mecânica, resistência à fadiga, módulo de Young e resistência específica, quando comparados aos seus componentes individualmente, ao incorporar fibras mecanicamente resistentes, mais frágeis em uma matriz com menor massa específica e mais dúctil (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Segundo Kaw (2006) os compósitos mais comuns são os de matriz polimérica, que consistem em um polímero (epóxi, poliéster, poliuretano) reforçado por uma fibra de pequena espessura (carbono, aramida, vidro), onde a fibra de vidro se mostra a mais popular por possuir baixo custo, alta resistência e princípios simples de manufatura. Quando se obtêm a configuração de matriz polimérica com reforço em fibra de vidro dá-se o nome de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV).

O uso de PRFV no setor náutico tem crescido de maneira significativa desde o começo da década de 1950. Paralelamente ao crescimento no número e dimensão das aplicações do PRFV, vieram os avanços tecnológicos nos materiais (SHENOI; WELLCOME, 2008). Sheno e Wellicome (2008) explicam que o PRFV é amplamente aplicado na indústria náutica por proporcionar alta resistência a tensões, fadiga, fratura, corrosão, baixo peso e baixo custo de manufatura.

Matérias primas diferentes requerem diferentes técnicas de manufatura, condições de processamento e ferramentas para fabricação. Cada processo de manufatura possui suas vantagens e desvantagens em relação a custo, características físicas e mecânicas e



processamento. É um grande desafio para os engenheiros selecionar o processo e matéria prima corretos, em razão de haverem tantas opções no mercado. O critério de seleção varia de acordo com a taxa de produção, custo, resistência, dimensões e formatos (MAZUMDAR, 2002).

Cavatorta e Paolino (2008) realizaram um estudo comparativo sobre a resposta de amostras de laminação manual e laminação a vácuo sobre repetidos ensaios de absorção de impacto. Para os ensaios foram utilizadas amostras de laminação manual e laminação a vácuo com uma base polimérica de resina de poliéster e fibra de vidro como reforço. Concluíram então, que o processo de laminação influencia no comportamento mecânico do laminado. As características do laminado dependem fortemente de como se dá o processo de fabricação, deste modo, o que se encontra na literatura em relação às propriedades mecânicas de laminados em PRFV, é mostrado em função de tipo de reforço e matriz separadamente, e não da união de ambos como um produto final.

Diante do exibido, este trabalho fará um estudo comparativo das propriedades de tração de corpos de prova obtidos através de processos de laminação manual e laminação spray up de um compósito de fibra de vidro com resina de poliéster. Posteriormente será feita uma avaliação da fração reforço/resina presente nos mesmos através de um processo de combustão controlada de modo a auxiliar na análise dos resultados obtidos.

Ambos os métodos são amplamente usados na indústria náutica atualmente. Mazundar (2002) diz que o processo de laminação manual é muito usado por sua simplicidade e por necessitar um pequeno capital de investimento. Pode ser aplicado tanto em formatos simples como complexos. Suas desvantagens são uma laminação trabalhosa, alta emissão de estireno e alto volume de resina no laminado. O processo *spray-up* é similar ao anterior com a diferença de aplicar a fibra e a resina sobre o molde através de uma pistola. A grande vantagem deste processo é sua produtividade, porém, sua principal desvantagem é a alta quantidade de resina fazendo com que o laminado fique mais pesado.

Para a realização deste estudo, serão confeccionados corpos de prova dos dois processos de laminação citados anteriormente, de um mesmo lote, utilizando a mesma matriz polimérica e com o intuito de obter a mesma gramatura de reforço por metro quadrado em ambas as laminações. Porém, devido as diferenças nos processos de laminação, pode-se obter frações de reforço/matriz diferentes em cada processo, o que será verificado através de um ensaio de combustão controlada de corpos de prova obtidos dos laminados em questão. A matriz polimérica utilizada será uma resina de poliéster isoftálica com as mesmas características em ambas as laminações. Não será utilizado *gel coat* nas laminações devido a

estas não necessitem de tal acabamento para a realização dos testes, desta forma evita-se também que este influencie nos resultados obtidos. Não será utilizado tecido nas laminações, com o objetivo de obter de maneira mais clara as diferenças entre os processos, visto que o tecido responde pela grande maioria dos reforços estruturais e que a observação da diferença da fração reforço/matriz ficará mais evidenciada. Os ensaios de tração serão realizados no laboratório do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Joinville, e os ensaios de combustão controlada serão realizados no laboratório da Whirlpool Latin America S.A., ambos com base nas normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Posteriormente será feita uma análise técnica e estatística sobre os resultados.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Quantificar a influência dos processos de laminação manual e *spray-up* nas características físico-mecânicas de um laminado em PRFV.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Obter amostras de laminação similares dos processos *spray-up* e laminação manual (*hand lay-up*);
- Quantificar as tensões máximas axiais suportadas por amostras fabricadas pelos processos *spray-up* e *hand lay-up* ;
- Quantificar a fração reforço/matriz presentes nas amostras fabricadas pelos processos *spray-up* e *hand lay-up*.

## 2. COMPÓSITOS NA INDÚSTRIA NÁUTICA

Os materiais compósitos são utilizados em uma grande variedade de aplicações na indústria náutica, como por exemplo, na fabricação de lanchas, jet-skis, iates, ferry boats, veleiros entre outros. Segundo a Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos (ACOBAR), na década de 1960 surgiram no Brasil as primeiras operações industriais especializadas no setor náutico, trabalhando inicialmente a partir de encomendas e, posteriormente, formando os primeiros estoques de produtos acabados. A partir da década de 1980, com o aumento da visibilidade do setor náutico no cenário brasileiro, houve um crescimento no número de estaleiros e o mercado pôde observar o surgimento de novas operações industriais e novas marcas focadas na demanda crescente das regiões Sul e Nordeste do Brasil.

De acordo com a revista *Indústria Náutica Brasileira* (2012, p. 38), no mercado atual, as regiões Sudeste e Sul concentram mais de 85% dos estaleiros nacionais, com destaque para os estados de São Paulo (35% do total de estaleiros), Santa Catarina (21% do total) e Rio de Janeiro (14%). Em matéria exibida na revista *Composites & Plásticos de Engenharia* (2010, p. 56), de acordo com Jorge Nasseh hoje em dia quase que a totalidade das embarcações de recreio produzidas em todo o mundo, variando de 12 a 150 pés, são construídas em material compósito e, a fibra de vidro e a resina poliéster são os produtos mais utilizados entre os fabricantes.

Ainda de acordo com a revista *Composites & Plásticos de Engenharia* (2010, p. 56), dentro da estrutura de materiais utilizados na indústria náutica, 95% dos barcos são produzidos com resinas à base de poliéster com reforço de fibra de vidro, e a maior parte destas resinas é de base ortoftálica. O reforço tradicional dos barcos em plástico reforçado ainda é a fibra de vidro nas versões convencionais de mantas e tecidos. Barcos entre 14 e 25 pés são, na maior parte das vezes, construídos pelo processo de spray-up com a utilização de resina poliéster (*Composites & Plásticos de Engenharia, 2010*).

### 3. MATÉRIA PRIMA E PROCESSOS

Um compósito é um material estrutural que consiste de dois ou mais constituintes que são combinados em um nível macroscópico e insolúvel. Um constituinte é chamado reforço e o outro no qual o reforço está inserido é denominado matriz (KAW, 2006).

#### 3.1 MATRIZ POLIMÉRICA

Os compósitos mais comuns são os de matriz polimérica, que consistem em um polímero (epóxi, poliéster, uretano) reforçado por fibra de pequeno diâmetro (vidro, aramida carbono) (KAW, 2006). As matrizes poliméricas possuem baixa resistência mecânica, mas combinadas com fibras que possuem alta resistência resultam em materiais de ótimo desempenho. A matriz envolve a fibra e então as protege contra ataques químicos e do ambiente externo. Para que as fibras suportem o máximo de carga, a matriz deve possuir módulo de elasticidade menor que o reforço (MAZUMDAR, 2002).

Mesmo servindo como proteção às fibras no material compósito, as matrizes poliméricas também são passíveis de deterioração. A degradação de polímeros ocorre pela ruptura de ligações por fenômenos físicos e químicos, tais como exposição a solventes, energia térmica, reações químicas e radiação. A ruptura de ligações covalentes e de Van der Waals gera mudança na estrutura molecular causando alterações nas propriedades do material. As principais formas de degradação de polímeros são o inchaço e a dissolução. O inchaço acontece entre moléculas de soluto e as moléculas poliméricas. As moléculas de líquido se difundem dentro da estrutura do polímero, ocupando posições entre as cadeias, isto força as macromoléculas a se separarem expandindo ou inchando as mesmas. Posteriormente a separação entre cadeias resulta na redução das ligações intermoleculares e o material se torna borrachoso e frágil. O inchaço pode ser considerado um processo de dissolução parcial no qual há solubilidade limitada do polímero no solvente (VAN VLACK, 1994). A absorção de água através do material polimérico, faz com que essa chegue à fibra, alterando suas características mecânicas e reduzindo a rigidez estrutural do material compósito.

As razões pelas quais os compósitos de matriz polimérica são os mais comuns incluem seu baixo custo, alta resistência, e princípios simples de manufatura (KAW, 2006). A matriz determina a temperatura de operação do compósito assim como parâmetros de manufatura do mesmo (MAZUMDAR, 2002).

### 3.1.1 Matriz Termorrígida

Materiais termorrígidos são formados por uma reação química onde resina e catalisador são misturados resultando em um material rígido de reação química irreversível (*Composite Engineering Materials*, 2010). Durante o processo de cura, são formadas ligações moleculares tridimensionais, chamadas de ligações cruzadas. Devido a essas ligações cruzadas, as moléculas não podem ser derretidas e remoldadas. Quanto maior o número de ligações cruzadas, mais rígido e mais termicamente estável será o material (MAZUMDAR, 2002). Em alguns termorrígidos, tal como resinas fenólicas, substâncias voláteis são produzidas como fruto do processo. Outras resinas termorrígidas como poliéster e epóxi curam por mecanismos que não produzem nenhum volátil como fruto do processo (*Composite Engineering Materials*, 2010). As resinas mais comuns utilizadas em compósitos termorrígidos são a epóxi, poliéster, éster-vinílica e fenólica (MAZUMDAR, 2002).

### 3.1.2 Resina Poliéster

Resinas de poliéster são de baixo custo e oferecem excelente resistência à corrosão (MAZUMDAR, 2002). É o tipo de resina mais amplamente utilizado, particularmente na indústria náutica (*Composite Engineering Materials*, 2010). 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 cadeias longas lineares, formando um éster e água. Se a reação se processar com um biálcool e um biácido o produto resultante contará com diversos grupos éster, dando origem a um poliéster. Os ácidos saturados mais utilizados na síntese de resinas de poliéster são o ácido ortoftálico e seu isômero, ácido isoftálico (LEVY; PARDINI, 2012).

Resina de poliéster isoftálica está se tornando o material preferido na indústria náutica, onde uma resistência à água superior é desejável (*Composite Engineering Materials*, 2010). Esse tipo de matriz polimérica tem um limite superior de temperatura de operação de

cerca de 70°C. Oferece melhor resistência química comparada à ortoftálica em certas aplicações, por um custo levemente superior (CHEREMISINOFF, 1995). Pode-se ainda utilizar o Neo Pentil Glicol (NPG) em substituição ao glicol, de modo a melhorar a resistência à hidrólise do poliéster (ABMACO, [s. d.]).

## 3.2 REFORÇO ESTRUTURAL

Os polímeros apresentam propriedades mecânicas muito baixas para servirem sozinhos de material de base à maioria das estruturas de engenharia. Entretanto, eles têm a capacidade de tomar formas complexas ou de se moldar com extrema facilidade. Assim, os polímeros se beneficiam com a adição de fibras de alta resistência, que conferem ao compósito propriedades mecânicas interessantes quando comparadas com outros materiais de engenharia, como o aço e o alumínio (ABMACO, [s. d.]).

Os reforços dos compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas. As fibras, entretanto, não tem utilidade estrutural se não forem aglutinadas por uma matriz. O tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica é a de vidro, devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração, e grande inércia química (LEVY e PARDINI, 2012).

### 3.2.1 Fibra de Vidro

Variando os componentes minerais do vidro, diferentes tipos de fibras com composição química específica podem ser produzidas. Cada tipo tem associado propriedades e custos peculiares (ABMACO, [s. d.]). O tipo de fibra de vidro mais utilizado na indústria, o qual será utilizado neste estudo, é o Vidro E (E-glass, electrical glass). O Vidro E apresenta baixo teor de álcalis e é mais resistente que o vidro tipo-A (o vidro alcalino utilizado em janelas e garrafas). Este vidro tem boas propriedades dielétricas e sua grande popularidade nos materiais compósitos decorre do seu custo baixo aliado às excelentes propriedades mecânicas que proporciona (ABMACO, [s. d.]).

As dimensões das fibras são frequentemente caracterizadas pela razão de aspecto ( $l/d$ , onde  $l$  é o comprimento da fibra e  $d$  é o diâmetro). Normalmente as fibras têm diâmetros que variam de 10 $\mu$ m (10x10<sup>-4</sup>cm) a 150 $\mu$ m (150x10<sup>-4</sup>cm). A resistência mecânica de um

compósito aumenta quando a razão de aspecto é elevada (ASKELAND; PHULÉ, 2008). Laminados de compósito podem ser produzidos em uma ou várias lâminas. Além dos tipos de fibra e resina e do teor de fibras, cada lâmina é caracterizada pela orientação das fibras em relação a um eixo de referência do laminado. A orientação das fibras numa determinada lâmina pode ser aleatória (lâmina isotrópica no plano da lâmina) ou pode ser direcionada em um ângulo definido em relação a um eixo de referência do laminado (ABMACO, [s. d.]).

### 3.2.2 Tecidos

Os tecidos têm duas direções principais: urdume e trama. O urdume refere-se à direção do comprimento do tecido, e a trama por sua vez tem direção transversal ao urdume. Com exceção dos essencialmente triaxiais, os tecidos consistem de um conjunto de cabos interlaçados a ângulos retos em uma determinada sequência, padrão ou tela (LEVY e PARDINI, 2012). Uma das características exclusivas de compósitos reforçados com fibras é a de que suas propriedades podem ser adaptadas para satisfazer diferentes tipos de carregamentos. Fibras longas e contínuas podem ser dispostas em várias direções dentro da matriz em arranjos ortogonais ( $0^\circ/90^\circ$ ), a resistência mecânica elevada é obtida em duas direções perpendiculares. Arranjos mais complexos ( $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ ) fornecem reforço em múltiplas direções (ASKELAND; PHULÉ, 2008). Os tecidos podem ser separados em dois grupos, os tecidos costurados (fabrics) e os tecidos tramados (woven roving).

Os tecidos tramados são fabricados em teares, entrelaçando os fios de urdume com os fios de trama. Hoje, costuma-se incluir alguns fios têxteis para garantir mais estabilidade ao tecido e minimizar a distorção da malha. O número de fios por comprimento considerado nos dois sentidos da trama e do urdume e a respectiva densidade linear desses fios definem, junto com o sizing (mistura de emulsões e soluções aquosas, cujo propósito é proteger os filamentos de vidro de uma abrasão mútua, formar cabos coesos, reduzir os coeficientes de atritos, minimizar a geração de eletricidade estática e proporcionar uma interface química adequada para cada tipo de matriz polimérica para a qual cada produto é destinado), o tecido tecnicamente (ABMACO, [s. d.]). Os tecidos costurados se concentram em costurar as camadas individuais com orientação predefinida. Esse processo se baseia na inserção de filamentos de fibras individuais através da espessura das camadas de reforço distintas, criando um vínculo entre elas (LEVY; PARDINI, 2012). Eles vêm apresentando um crescimento muito grande em aplicações mais técnicas, nas quais a orientação das fibras deve ser bem



definida em cada lâmina do laminado. A principal vantagem é proporcionar reforços em camadas de fibras com direções diferentes em cada camada. A gramatura e a direção das fibras em cada camada, junto com o sizing, definem tecnicamente um tecido costurado (ABMACO, [s. d.]).

### 3.2.3 Mantas

Nas fábricas de fibra de vidro, as fibras são picotadas e unidas quimicamente com ligantes solúveis posteriormente no estireno das resinas. Estão disponíveis em gramaturas 300 ou 450 (gramas por m<sup>2</sup>) (ABMACO, 2009). Há dois tipos de mantas, as mantas de fibras picadas (chopped strand mat) e as mantas de filamentos contínuos (continuous filament mat). As mantas de fibras picadas são produzidas a partir de várias bobinas de fios de fibra, que são picotados e distribuídos sobre uma esteira. O comprimento padrão de corte é de 2" (5cm). Os ligantes são então pulverizados na superfície superior da manta e distribuídos pela sua espessura por meio de água e vibradores. A manta vai então para uma estufa para secagem e, na etapa posterior, amolecer e eventualmente curar o ligante. Rolos compactadores aplicam pressão para promover o contato do ligante com as fibras e então a manta é enrolada (ABMACO, [s. d.]). Segundo ABMACO ainda, as mantas de filamentos contínuos se diferem das mantas de fibras picadas em alguns pontos essenciais. São construídas por fios contínuos. Seus ligantes à base de resina poliéster em pó são curados e, portanto, insolúveis no estireno. Apresentam espessura e porosidade maiores do que as mantas de fibras picadas.

### 3.2.4 Roving

Fio contínuo de roving é fornecido em bobinas para ser picotado no momento da aplicação com resinas (ABMACO, 2009). Os rovings de corte de fibra de vidro são comercializados em bobinas cilíndricas, com altura padrão de 10" (25cm) e com peso usualmente na faixa de 20 a 25kg. Os requerimentos técnicos variam para cada aplicação, mas, de maneira geral, esses rovings devem apresentar facilidade de corte, baixa geração de penugens e de eletricidade estática, boa dispersão (não ter tendência a aglomeração quando picados) e boa compatibilidade (ou molhabilidade) com a matriz polimérica considerada (ABMACO, [s. d.]). A figura 1 exemplifica um tecido em fibra de vidro e a figura 2 demonstra um rolo de manta e um de fio rooving, ambos em fibra de vidro.

Figura 1 - Tecido em Fibra de Vidro.



Fonte: Disponível em [www.borplas.com.br/tecido-fibra-de-vidro](http://www.borplas.com.br/tecido-fibra-de-vidro). Acesso em out. 2016.

Figura 2 – Manta (esquerda) e Rooving (direita) de fibra de vidro.



Fonte: Autor (2016).

### 3.3 PROCESSOS

Os processos de laminação denominados hand lay-up (laminação manual) e spray-up (laminação à pistola ou por aspersão) são sistemas simples de moldagem de peças em compósitos. Com baixo investimento inicial, foram desenvolvidos nos primórdios da indústria comumente denominada de plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV) ou, simplesmente, fiberglass. Foram inicialmente desenvolvidos nos anos 40 para aplicação militar e no pós-guerra houve significativo avanço com o advento de novos tipos de resinas e reforços (ABMACO, 2009).

### 3.3.1 Hand Lay-up

A técnica de laminação manual é a mais antiga e a mais simples forma de se obter produtos moldados com resinas e fibras de reforço. O processo não requer investimento em equipamentos (ABMACO, 2009). De acordo com Al-Qureshi (2010) neste método primeiramente é aplicado um desmoldante como, por exemplo, álcool polivinílico ou minerais. Posteriormente pode-se fazer a primeira camada usando roovings, tecidos ou mantas, aplicando-as manualmente sobre a superfície do molde. Os plásticos termoestáveis são então aplicados com o auxílio de pincéis e posteriormente utilizam-se rolos com o intuito de remover o ar da camada de reforço e assegurar impregnação e umidade às fibras. Outras camadas são aplicadas da mesma maneira até obter-se a espessura desejada.

O processo hand lay-up é extensivamente utilizado na produção de protótipos, gabaritos de controle, modelos e moldes. Também é muito aplicado em revestimentos e reparos. As peças obtidas apresentam uma face lisa e de excelente acabamento superficial, normalmente com gelcoat ou pintada posteriormente. O lado interno tem acabamento rugoso, embora existam variantes do processo que, após a junção sobreposta de duas peças, ficam com perfeito acabamento nas duas faces (ABMACO, 2009). A maior vantagem do processo Hand Lay-up em relação aos outros processos de laminação é o baixo investimento inicial. Uma desvantagem em relação a outros processos mais complexos, como laminação a vácuo por exemplo, é menor fração de reforço/matriz e, conseqüentemente, um laminado mais pesado. A figura 3 demonstra um processo de laminação manual, onde uma pessoa está aplicando a resina sobre a manta de fibra de vidro utilizando uma trincha e simultaneamente outra pessoa está realizando o processo de roletagem para retirada de bolhas.

Figura 3– Processo da Laminação Manual (Hand Lay-up).



Fonte: Disponível em: [www.ancel.com.br/fabricacao.php?id=fabricacao](http://www.ancel.com.br/fabricacao.php?id=fabricacao). Acesso em out. 2016.

### 3.3.2 Spray-up

O processo é a versão mecanizada da laminação hand lay-up, pois transfere simultaneamente e por bombeamento para a superfície do molde a resina, o catalisador e as fibras de reforço na forma de rooving picado, o qual vem diretamente de uma bobina passando por um picador pneumático acoplado diretamente no revólver (ABMACO, 2009).

O revólver é a combinação de um cortador com uma pistola de pintura. Posteriormente ao processo de aplicação do conjunto resina, catalisador, fibras passa-se um rolo manualmente para remover as bolhas de ar, além de abaixar as fibras e fazer com que o sistema se torne mais denso e seja assegurado um íntimo contato com a superfície do molde. Assim como no processo hand lay-up, a cura pode se dar a temperatura ambiente se a peça for muito grande, mas a cura de pequenas peças pode ser acelerada com adição de calor.

De acordo com ABMACO (2009) algumas vantagens do processo spray-up em relação ao hand lay-up são a sua boa produtividade e ferramentas e moldes de baixo custo. Algumas limitações do processo spray-up são a impossibilidade de acabamento liso nas duas faces do laminado, a limitação no teor volumétrico de reforço de fibras fazendo com que não seja adequado para peças de elevada solicitação estrutural e a dependência da habilidade do

operador quanto a espessura constante do laminado. A figura 4 demonstra um revólver de laminação spray-up.

Figura 4– Revólver de laminação spray-up.



Fonte: Autor (2016).

#### 4. REGRA DAS MISTURAS

A micromecânica é importante para obter as propriedades elásticas dos compósitos pois permite calculá-las com base nas propriedades elásticas obtidas de seus constituintes, sendo necessário conhecer as frações volumétricas dos mesmos. Para poder utilizar equações menos complexas, é preciso fazer simplificações, como considerar a matriz homogênea, com comportamento mecânico linear elástico (NETO e PARDINI, 2006).

De acordo com a regra das misturas, cada fase constituinte do compósito contribui para as propriedades efetivas do compósito, sendo essa contribuição dependente apenas da fração volumétrica dos constituintes (CUPERTINO, 2009). Pode-se então definir a fração volumétrica de reforço presente no compósito ( $V_r$ ) através da Equação 1.

$$V_r = \frac{v_r}{v_c} \quad 1$$

Onde  $v_r$  é o volume de reforço e  $v_c$  o volume do compósito. Analogamente, pode-se definir a fração volumétrica da matriz polimérica ( $V_m$ ) através da Equação 2.

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad 2$$

Onde  $v_m$  é o volume de matriz polimérica. Pode-se definir  $v_r$ ,  $v_m$  e  $v_c$  através das Equações 3, 4 e 5.

$$v_r = \frac{m_r}{\rho_r} \quad 3$$

$$v_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad 4$$

$$v_c = v_r + v_m \quad 5$$

Obtém-se então o volume teórico do compósito. Este porém não leva em conta o volume de vazios ( $v_v$ ) que são as bolhas geradas durante os processos de laminação. Agora pode-se calcular aproximadamente a densidade teórica ( $\rho_c$ ) do compósito através da Equação 6, para compará-la com a densidade aparente ( $\rho_a$ ) medida.

$$\rho_c = \rho_m * V_m + \rho_r * V_r \quad 6$$

A densidade aparente, Equação 7, é utilizada para quantificar o volume aparente.

$$\rho_a = \frac{m_c}{V_a} \quad 7$$

Substituindo  $v_a$  pela soma dos volumes chega-se a Equação 8.

$$\rho_a = \frac{m_c}{V_r + V_m + V_v} \quad 8$$

Utilizando as equações 3 e 4 e fazendo algumas manipulações matemáticas, chega-se a Equação 9.

$$\rho_a = \frac{1}{\left[ \left( \frac{m_r}{\rho_r * m_c} \right) + \left( \frac{m_m}{\rho_m * m_c} \right) + \left( \frac{v_v}{m_c} \right) \right]} \quad 9$$

As frações mássicas são calculadas de acordo com as Equações 10 e 11.

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad 10$$

$$M_r = \frac{m_r}{m_c} \quad 11$$

Utilizando as equações 9, 10 e 11 pode-se chegar a Equação 12 para a fração volumétrica de vazios ( $V_v$ ).

$$V_v = 1 - \rho_a * \left[ \left( \frac{M_m}{\rho_m} \right) + \left( \frac{M_r}{\rho_r} \right) \right] \quad 12$$

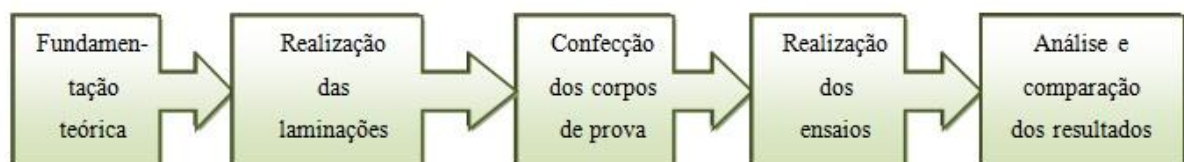
## 5. METODOLOGIA

Este é um estudo de caráter experimental, o qual se define, de acordo com Kauark, Manhães e Medeiros (2010), como sendo aquela pesquisa em que se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. Neste caso, a variável em questão é o processo pelo qual o laminado de material compósito será obtido. Serão estudados então, os efeitos que esses processos causam nas características físico-mecânicas do produto final.

Inicialmente foi feita uma fundamentação teórica, a fim de obter informações a respeito das características dos materiais utilizados, bem como as características dos processos de laminação manual (hand lay-up) e laminação spray-up, observando ainda, as vantagens e desvantagens de cada processo. Em seguida foram realizadas laminações dos dois processos em estudo, as quais foram desenvolvidas por um mesmo profissional treinado e experiente na função. Os laminados obtidos foram utilizados para confecção dos corpos de prova, os quais foram, posteriormente, submetidos a ensaios de tração e combustão controlada. Finalizados os ensaios, os resultados obtidos foram analisados e comparados.

A metodologia geral está ilustrada na figura 5:

Figura 5– Metodologia geral.



Fonte: Autor (2016).



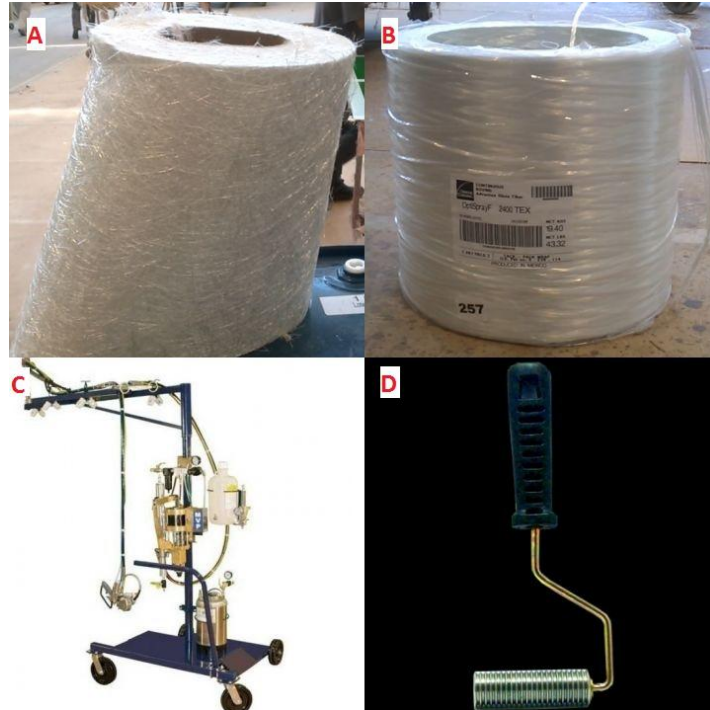
## 5.1 MATERIAIS

A laminação hand lay-up foi realizada utilizando como reforço mantas de fibra de vidro de 900g/cm<sup>2</sup> produzidas pela empresa Jushi USA. A manta possui fibra de vidro do tipo E6 e nomenclatura EMC900-304.8-P04 de densidade de 2,5g/cm<sup>3</sup>. Foram também utilizados rolos de aço e lã durante o processo. Na laminação spray-up, o reforço utilizado foi um roving de 2400TEX produzido pela empresa Owens Corning, denominado OptiSpray F 2400. A laminadora utilizada foi o modelo Patriot Systems produzido pela Magnum Venus Products. Foram também utilizados rolos para a compactação e retirada de bolhas.

Em ambos os processos, foi utilizado como matriz uma resina de poliéster isoftálica de especificação Polylite 10228-30 produzida pela Reichhold. Essa resina possui gel time entre 30 e 35 minutos, densidade de 1,10g/cm<sup>3</sup> e temperatura de exotermia entre 140°C e 180°C. Foi adicionado 1,25% de catalisador em ambos os processos. As laminações foram realizadas sobre uma mesa com superfície de vidro polido de medidas 92cm x 125cm. Para a preparação da superfície da mesa foram utilizados água e sabão, preparador de molde Chem-Trend, selador Chemlease 12-ONU 1866 e desmoldante Chemlease 75-ONU 1866. Também foram utilizados fita crepe e papel kraft para preparação da mesa, espátula de borracha para auxílio no processo de desmoldagem e tesoura para cortar os excessos de fibra de vidro presentes no processo spray-up.

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizado uma esmerilhadeira modelo Bosch GSW 8-115, com disco de corte de aço inox da marca Norton modelo Classic AR 102, para o pré corte das amostras. As mesmas foram cortadas com dimensões superiores às necessárias de modo a obter uma margem para realização de acabamento. Para o acabamento das amostras foi utilizado um moto esmeril modelo Somar Qualiforte de ½ cv de potência com duas gramaturas diferentes para desbaste e acabamento. Posteriormente foram utilizadas lixas da marca 3M modelo P240 para acabamento final. Foi utilizado um escalímetro de faixa de 0 a 300 mm da marca Cis para aferição do comprimento das amostras e um paquímetro digital da marca Mitutoyo modelo ABS Digimatic Caliper CD-8” ASX-B para aferição de largura e espessura das amostras. Utilizou-se também um marcador permanente da marca Lyke para marcação das geometrias. Como equipamento de proteção individual foi utilizado um guarda-pó, um óculos de proteção, protetor auricular e máscara de proteção 3M modelo 8822. As figuras 6, 7 e 8 demonstram os principais materiais que foram utilizados durante os processos de laminação bem como na confecção dos corpos de prova.

Figura 6– Materiais utilizados: (A) manta de fibra de vidro, (B) fio rooving, (C) laminadora, (D) rolo de aço.



Fonte: Autor (2016).

Figura 7– Materiais utilizados: (A) rolo de lã, (B) resina de poliéster, (C) catalisador, (D) mesa de vidro onde a laminação foi realizada.



Fonte: Autor (2016).

Figura 8- Materiais utilizados: (A) serra circular, (B) moto-esmeril, (C) lixa, escalímetro, disco de corte e material de proteção individual, (D) paquímetro digital.



Fonte: Autor (2016).

## 5.2 PROCESSOS DE LAMINAÇÃO

Ambos os processos de laminação foram realizados no estaleiro Brunswick Boat Group - Brasil, situado no complexo empresarial Perini Business Park na Rua Dona Francisca número 8300, zona industrial norte, Joinville, no dia 19 de janeiro de 2016.

Obtiveram-se como resultado dos processos de laminação duas placas de compósito em PRFV de dimensões 920x600mm. Foi confeccionada uma placa de amostra pelo método hand lay-up e uma placa de amostra pelo processo spray-up, os quais são descritos em mais detalhes a seguir.

### 5.2.1 Processo Spray-up

Inicialmente foi feita a preparação da superfície da mesa na qual a laminação seria realizada. Primeiramente realizou-se uma limpeza com água e sabão neutro e em seguida com um preparador de molde da marca Chem-Trend, com o intuito de remover todos os contaminantes da superfície do molde. Posteriormente foi aplicado o selador Chemlease 12-ONU 1866, garantindo que qualquer micro porosidade na superfície do molde seja fechada, permitindo que as camadas subsequentes dos agentes desmoldantes atuem com eficiência e possibilitando um bom acabamento superficial. Em seguida foi aplicado o desmoldante Chemlease 75-ONU 1866 com o intuito de facilitar a remoção do laminado após o processo de cura. Posteriormente foi feita uma separação do molde em duas partes iguais, as quais cada uma receberia um processo de laminação. A separação foi feita utilizando fita crepe e papel Kraft, de modo a um processo não contaminar a superfície do molde do processo adjacente. A temperatura ambiente aferida no local onde o processo foi realizado foi de 27,9 °C e a umidade relativa do ar aferida foi de 50%.

Antes de começar o processo de laminação em si, foi retirada uma amostra de dez segundos do revólver de modo a descobrir a quantidade de resina e fibra dispersa pelo equipamento neste intervalo de tempo. Esta amostra foi então pesada em uma balança eletrônica modelo Toledo 3400. Foram obtidos os valores de 250g de fibra de vidro picada e 907g de resina poliéster. Deste modo, cronometrando o tempo de aplicação do processo, foi possível estimar a quantidade de reforço e matriz presente no laminado. Dadas as perdas de matéria prima geradas no processo de laminação Spray-up, a fração de reforço/matriz foi verificada posteriormente através de ensaios de combustão controlada.

O processo de laminação se inicia com a aplicação da matriz polimérica e do reforço simultaneamente através do revólver. O operador precisa manter uma distância e velocidade de avanço constante em relação ao molde de modo a obter um laminado com espessura homogênea. Posteriormente são utilizados rolos de compactação de modo a retirar bolhas e prover uma melhor união entre reforço e matriz. É feita então uma inspeção utilizando um medidor de espessura. O processo é então repetido para obter a espessura de laminado desejada. Foram feitas duas camadas no processo aqui detalhado.

Foi cronometrado um tempo de laminação de 22 segundos, podendo assim estimar a quantidade de reforço e matriz presente no laminado. Deve-se, porém, levar em consideração que o processo de laminação spray-up possui grandes perdas de matéria prima por dispersão.

Segundo Cintia Madureira Orth em sua tese de mestrado “Resíduos Sólidos Gerados no Processo Produtivo” (2010), um estudo relativo a 316 amostras mostrou que a laminação de um teto de veículo por método spray-up gera uma perda de matéria prima de cerca de 9%, devido essa ser uma geometria extremamente simples. Outras geometrias mais complexas podem gerar perdas de até 30%. Visto que a geometria do laminado realizado para este estudo é também extremamente simples, será adotado 9% como percentual de perda de matéria prima. Deste modo, o laminado possui cerca de 500,5g de fibra de vidro e 1815,8g de resina poliéster. Esta fração estimada porém, será verificada através do ensaio de combustão controlada.

O material laminado foi deixado então a temperatura ambiente por um período de 24 horas para que ocorresse o processo de cura. Após esse período o mesmo foi desmoldado com o auxílio de espátulas de borracha. Os excessos de fibra de vidro que ficaram nas extremidades da chapa laminada foram retiradas com o auxílio de uma tesoura.

O processo de laminação Spray-up possui uma grande dependência da habilidade do profissional que está realizando a laminação, e é muito difícil obter uma espessura controlada. Tendo em vista estas oscilações ao longo do processo, a variação de espessura do laminado também será verificada posteriormente de modo a quantificá-las. As laminações foram realizadas com o intuito de obter a mesma quantidade de reforço em ambos os processos, porém, as frações reforço/matriz poderiam ser diferentes devido às características de cada processo. As características do laminado dependem fortemente do operador, deste modo, após os ensaios posteriores será verificado se as características desejadas puderam ser obtidas. A figura 9 demonstra o processo de laminação spray-up para confecção das chapas de laminado.

Figura 9– Laminação Spray-up: (A) aplicação spray-up, (B) compactação.



Fonte: Autor (2016).

### 5.2.2 Processo Hand Lay-up

Inicialmente realizou-se a preparação do molde, a qual já foi descrita no item anterior, bem como as condições de temperatura e umidade. A primeira etapa foi cortar a manta de modo a obter a geometria do molde. Posteriormente, aplicou-se uma camada fina de resina diretamente sobre o molde. Em seguida, posicionou-se a manta sobre o molde e então, aplicou-se resina sobre a manta espalhando-a com o auxílio de rolos de lã. A aplicação da resina foi feita até a manta ficar transparente, o que indica que toda a fibra de vidro foi impregnada com matriz polimérica. Simultaneamente à aplicação de resina realizou-se o processo de compactação do laminado com o auxílio de rolos, este também tem por objetivo a retirada de bolhas do laminado.

Após realizado o processo, a amostra foi deixada para cura e então desmoldada, do mesmo modo conforme descrito no processo anterior. A figura 10 demonstra o processo de laminação manual para confecção das chapas de laminado.

Figura 10– Laminação manual.



Fonte: Autor (2016).

### 5.3 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

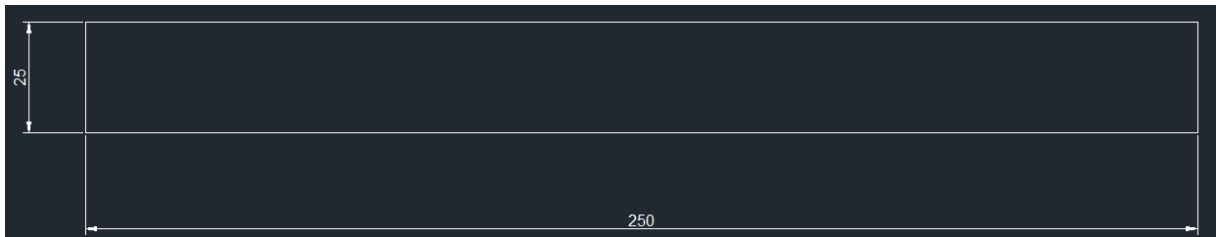
Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões de acordo com as normas em questão. Para o teste de combustão controlada utilizou-se a norma ASTM D 2584 (2011) a

qual especifica corpos de prova de dimensões 25 x 25 x espessura (em milímetros). Para o teste de tração utilizou-se a norma ASTM D 3039 a qual define dimensões 250 x 25 x espessura (em milímetros). Foram confeccionados 6 corpos de prova de cada processo para o ensaio de combustão controlada, de modo que 3 corpos de prova de pior qualidade (aqueles que exibiram maiores variações quanto as dimensões) de cada processo fossem descartados, totalizando assim 6 corpos de prova ensaiados. Para os ensaios de tração foram confeccionados 7 corpos de prova de cada processo, os quais todos foram ensaiados, totalizando 14 ensaios.

Primeiramente cortou-se as abas externas das chapas laminadas em 10 centímetros, de modo a excluir a parte afetada pelo processo de desmoldagem. Para esta atividade utilizou-se uma esmirilhadeira modelo Bosch GSW 8-115, com disco de corte de aço inox da marca Norton modelo Classic AR 102. Posteriormente, utilizando o software Auto-CAD, desenhou-se a geometria dos corpos de prova. Os desenhos foram então impressos de modo a servir de gabarito para a marcação das geometrias nas chapas. Utilizando um marcador permanente fez-se então a marcação nas chapas, em locais aleatórios e distribuídos. Utilizando a mesma serra circular utilizada para cortar as abas, fez-se o corte dos corpos de prova. A ferramenta porém, não é a adequada para a realização desta tarefa, devido a sua falta de precisão. O ideal para a confecção dos corpos de prova seria o corte através de jato d'água ou laser, porém não foi possível a utilização deste tipo de ferramenta para a realização dos cortes. O método adotado então foi cortar os corpos de prova com dimensões superiores às necessárias e realizar etapas de acabamento progressivas de modo a obter as dimensões desejadas. Deste modo, cortou-se as amostras com dimensões aproximadamente 3 a 5 milímetros superiores às requeridas. Posteriormente, utilizando um moto esmeril modelo Somar Qualiforte de ½ cv de potência, realizou-se um desbaste inicial, com o rebolo de desbaste, e então um acabamento para chegar próximo das dimensões necessárias, utilizando o rebolo de acabamento. Ao longo do processo, realizou-se sucessivas medições utilizando paquímetro digital com precisão de 0,01mm. Em seguida, o acabamento final foi realizado utilizando uma lixa, até obter dimensões dentro dos intervalos requeridos pela norma. Após prontas, as amostras foram etiquetadas para correta identificação. Para ensaio de combustão, elas receberam uma etiqueta cada enquanto as amostras para ensaio de tração receberam duas etiquetas cada, uma em cada extremidade. As amostras de tração foram identificadas com a letra “T”, e enumeradas de 1 a 7. As amostras de combustão foram identificadas com a letra “C”, e enumeradas de 1 a 6. As amostras de laminação Spray-up foram identificadas com as letras “SU” e as amostras de laminação Hand Lay-up foram identificadas com as letras “HL”. Deste modo, a amostra 4 de

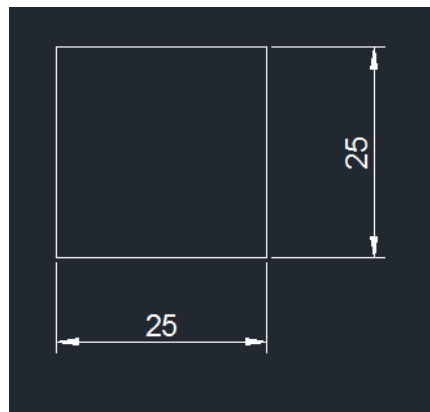
Spray-up para ensaio de tração recebeu a nomenclatura “SU-T4”. A nomenclatura completa dos corpos de prova esta disposta no Apêndice A. As figuras 11 e 12 demonstram a geometria dos corpos de prova para ensaio de tração e combustão respectivamente. A figura 13 demonstra parte do processo de confecção dos corpos de prova e a figura 14 mostra alguns CP’s prontos.

Figura 11– Geometria do corpo de prova para ensaio de tração.



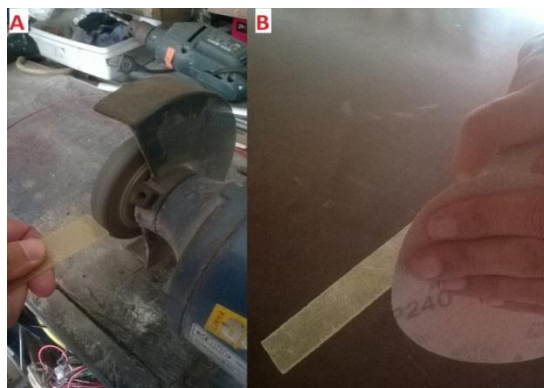
Fonte: Autor (2016).

Figura 12– Geometria do corpo de prova para ensaio de combustão.



Fonte: Autor (2016).

Figura 13 – Confecção dos corpos de prova: (A) desbaste com moto-esmeril, (B) acabamento com lixa.





Fonte: Autor (2016).

Figura 14– Corpos de prova: (A) tração, (B) combustão.



Fonte: Autor (2016).

## 5.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Foram realizados os ensaios de tração e combustão controlada com base nas normas ASTM D 3039 e ASTM D 2584. Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de materiais do IFSC campus Joinville localizado na rua Pavão 1377, bairro Costa e Silva, no dia 03 de novembro de 2016. Os ensaios de combustão controlada foram realizados no laboratório da empresa Whirpool Latin America, localizado na rua Dona Francisca 7200, distrito industrial, Joinville, entre os dias 16 e 18 de novembro de 2016.

### 5.4.1 Ensaio de Tração

O ensaio foi conduzido com base na norma ASTM D3039 (1995) – norma para o ensaio padrão das propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica. O ensaio foi realizado no dia 03 de novembro de 2016 no laboratório de materiais do IFSC de Joinville. Para a realização do mesmo, utilizou-se uma máquina EMIC modelo DL10000,

com capacidade máxima de carga de 100kN, e como resultado obteve-se as relações de carga com deslocamento até a ruptura do material.

Foram ensaiados 14 corpos de prova, sendo sete de cada método. Somente 5 ensaios são exigidos pela norma, porém decidiu-se por ensaiar todos os corpos de prova existentes.

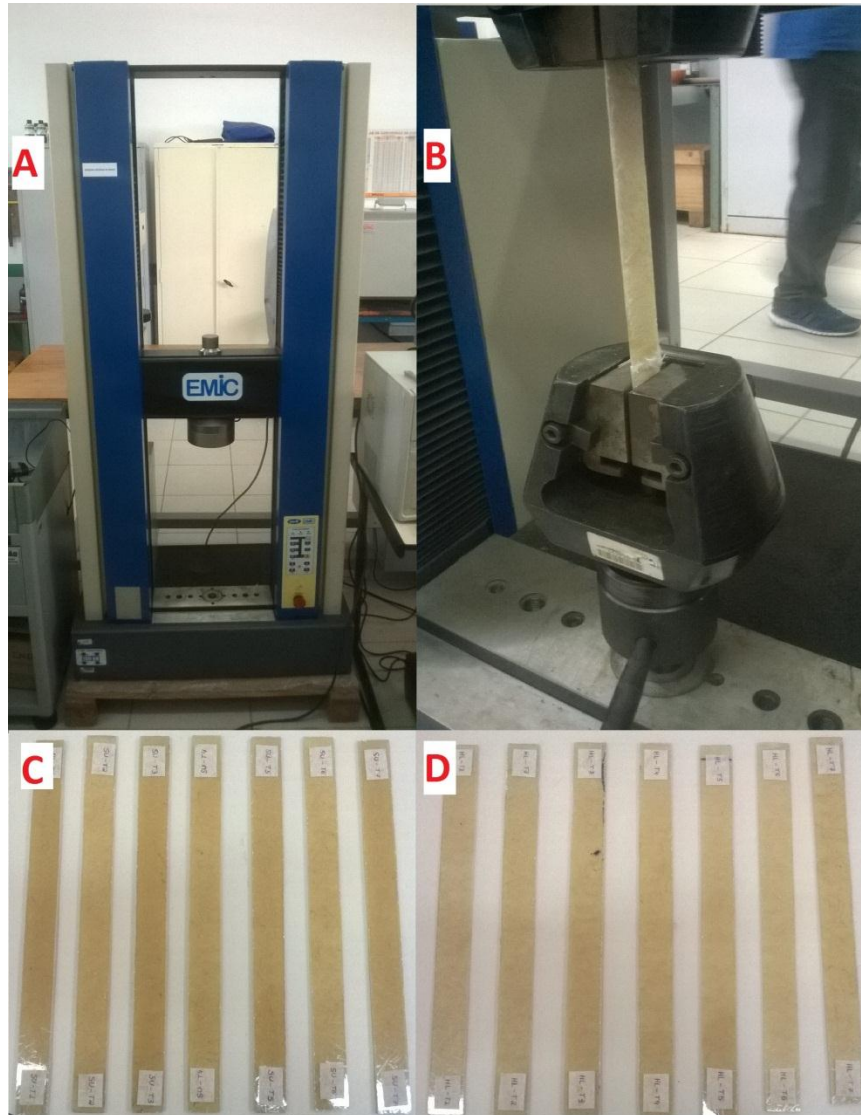
Antes de iniciar os testes, foram mensuradas as larguras e espessuras de cada corpo de prova a ser ensaiado, bem como realizada a identificação dos CPs. Para a largura, a norma exige uma tolerância de 1% para mais ou para menos, dessa forma, as amostras devem possuir largura entre 24,75mm e 25,25mm. A norma exige a aferição de três pontos ao longo da amostra, para medir tanto largura quanto espessura. Para a realização desta tarefa utilizou-se um paquímetro digital de precisão 0,01mm e foram aferidos quatro pontos ao longo de cada amostra. A tabela com as medidas das amostras são apresentadas no Apêndice B.

O material a ser testado nesse estudo possui uma configuração onde as fibras de reforço estão dispostas de maneira randômica ao longo do laminado, desta forma, segundo a norma, não há a necessidade da utilização de abas nos CPs. Com o objetivo de aumentar a aderência na superfície de contato com as pinças da máquina de tração, as extremidades dos CPs foram lixadas superficialmente utilizando lixas 3M P240.

Inicialmente, realizou-se a configuração da máquina para o material utilizado, atribuindo a velocidade de teste a ser realizado, a qual segundo a norma é de 2mm por minuto, e os parâmetros disponíveis nos resultados, que neste caso são a carga suportada (em unidades de kgf) e o deslocamento (em unidades de mm). Utilizou-se uma amostra para a calibração da máquina, para posteriormente começar os ensaios.

Para cada amostra a ser ensaiada realizou-se o seguinte procedimento: iniciou-se um novo teste no software de modo a zerar os dados anteriores, criou-se uma nova pasta com o nome da amostra a ser ensaiada para armazenar os dados obtidos, posicionou-se a máquina no ponto de deslocamento mínimo, fixou-se a amostra nas pinças, iniciou-se o procedimento de teste até a ruptura da amostra, retirou-se a amostra da máquina, salvou-se os dados obtidos. A tabela com os esforços máximos admissíveis estão dispostos no Apêndice C. A figura 15 demonstra a máquina utilizada para a realização dos ensaios, um corpo de prova durante a realização do ensaio de tração e os CP's após terem sido identificados conforme descrito anteriormente.

Figura 15– Ensaio de tração: (A) máquina de tração, (B) corpo de prova durante ensaio, (C) corpos de prova spray-up, (D) corpos de prova hand lay-up.



Fonte: Autor (2016).

#### 5.4.2 Ensaio de Combustão Controlada

O ensaio foi baseado na norma ASTM D 2584 (2011), norma essa para o ensaio padrão para perda de ignição de resinas curadas. O ensaio foi realizado na empresa Whirlpool Latin América entre os dias 16 e 18 de novembro de 2016. Os principais equipamentos utilizados foram um forno EDG FI-2, com capacidade de temperatura de até 1300°C, uma

balança de precisão com precisão de 0,1mg da marca Sartorius modelo TE214S, um dessecador, cadinhos para servirem de recipientes para as amostras e uma pinça para manuseio dos cadinhos, além do material de proteção individual. Este ensaio tem por objetivo determinar a massa de fibra de vidro presente nos laminados, a qual é definida pelos resíduos gerados a partir da combustão de amostras, já que na temperatura a qual as amostras são submetidas, somente a resina evapora, sobrando somente as fibras como resíduo. As figuras 16 e 17 mostram os principais equipamentos utilizados durante o ensaio de combustão.

Figura 16 - Equipamentos para ensaio de Combustão: Balança (A), Forno Mufla (B).



Fonte: Autor (2016).

Figura 17 - Equipamentos para ensaio de Combustão: (A) Dessecador com cadinhos, (B) pinça.



Fonte: Autor (2016).

A norma exige que 3 corpos de prova sejam submetidos aos testes, deste modo, os ensaios foram realizados em um total de 6 amostras, sendo 3 do processo spray-up e 3 do processo hand lay-up. Foram confeccionados 6 corpos de prova de cada processo, totalizando 12 corpos de prova. Inicialmente, o intuito era de ensaiar todos os corpos de prova, de modo a obter mais dados, porém, devido a limitação de tempo e de recursos de laboratório, optou-se por ensaiar somente o número mínimo de amostras previsto na norma. Os corpos de prova possuem dimensões de 25 mm x 25mm x espessura do laminado aproximadamente. As tabela completa com as dimensões dos corpos de prova esta disposta no Apêndice D.

Primeiramente colocou-se os cadinhos no forno mufla por 30 minutos a uma temperatura de 500°C, com o intuito de retirar a umidade dos recipientes. A temperatura e o tempo de forno foram definidos pela experiência do operador. Após esse período, com o auxílio de uma pinça e luvas de couro para proteção, os cadinhos foram levados a um dessecador para resfriamento. Após resfriados os cadinhos, utilizou-se os mesmos para a pesagem das amostras.

De acordo com a norma, é necessário queimar os corpos de prova a uma temperatura mínima de 565 °C. Nesta temperatura, o tempo necessário no forno é de 6 horas. Segundo Inácio (2016), realizando o processo de combustão a uma temperatura de 900 °C, um período de 2 horas é tempo suficiente para que todo o material polimérico sofra combustão no interior do forno, e ainda, o material polimérico leva cerca de 5 minutos para entrar em combustão e eliminar os gases da combustão através da porta do forno. Deste modo, visto a limitação de tempo de laboratório, optou-se por realizar o processo de combustão por um período de 3 horas a uma temperatura de 800 °C. A temperatura bem como o período de combustão foram indicados pelo profissional que realizou o ensaio, o qual possui anos de experiência realizando ensaios de combustão controlada.

Para colocar os cadinhos dentro do forno há um curto período de tempo, visto a alta temperatura do mesmo. Tendo isso em mente, optou-se, portanto, em colocar os cadinhos dentro do forno um a um em um intervalo de 10 minutos entre cada operação, deste modo, há tempo suficiente para a combustão e exaustão dos gases entre cada operação, não havendo assim o risco de combustão dos CPs quando aberta a porta do forno. Colocados então todos os cadinhos conforme o intervalo estipulado, programou-se o período de 3 horas a partir do último cadinho inserido no forno. Após o período de 3 horas, programou-se o forno para atingir a temperatura de 200 °C, o que levou em torno de 4 horas. Após atingida a temperatura, os cadinhos foram armazenados no dessecador, onde permaneceram até o dia

posterior de modo a atingir a temperatura ambiente (em torno de 18 horas). Já em temperatura ambiente, os cadinhos foram então retirados do dessecador e pesados na balança de precisão, os valores obtidos foram então armazenados. Deste modo, obteve-se então a massa das fibras presentes nas amostras, a partir das quais, conhecidas as massas iniciais e as dimensões das amostras, bem como as propriedades dos materiais, é possível determinar as frações mássicas e volumétricas das amostras. A figura 18 demonstra as amostras dentro do forno após o processo de combustão e a figura 19 mostra a pesagem do resíduo da combustão de um CP.

Figura 18 - Amostras no Forno Após Combustão.



Fonte: Autor (2016).

Figura 19 - Pesagem de um CP após Combustão



Fonte: Autor (2016).

#### 5.4.3 Densidade Aparente e Fração Volumétrica de Vazios

Para encontrar a densidade aparente ( $\rho_a$ ) dos corpos de prova, é preciso conhecer as medidas dos CPs, bem como as massas dos mesmos. Para isso utilizaremos os mesmos dados de massa das amostras obtidos no ensaio de combustão.

Para a determinação das dimensões das amostras foi utilizado um paquímetro digital Mitutoyo com precisão de 0,01 mm. Foram aferidas três posições de largura, três posições de comprimento e quatro posições de espessura. Utilizou-se então a média das aferições. Utilizando as medidas foi possível então determinar o volume do CP. Conhecidos o volume e a massa de cada corpo de prova foi possível então determinar a densidade aparente.

De acordo com Neto e Pardini (2006), com a micromecânica podemos calcular a densidade teórica ( $\rho_c$ ) dos CPs submetidos ao ensaio de combustão. Através dos procedimentos previamente realizados no ensaio de combustão, obtivemos os valores de massa de fibra e matriz, dessa forma, pode-se então, utilizando a micromecânica, calcular o teor de vazios das amostras.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos serão apresentados através de três tópicos: teste de tração, teste de combustão e densidade aparente e fração volumétrica de vazios. As discussões serão dispostas no sentido de analisar os resultados obtidos bem como realizar uma comparação entre os dois processos em análise.

### 6.1 TESTE DE TRAÇÃO

Inicialmente foram obtidas as medidas de largura e espessura através do comprimento do corpo de prova, sendo realizadas um total de quatro aferições em cada CP. Desta forma foi possível obter a área de seção transversal em cada ponto da amostra em análise. Através dessas áreas obtidas é possível calcular uma área de seção transversal média de cada CP, conforme descreve a norma ASTM D 3039. As dimensões completas podem ser observadas no Apêndice B, a tabela 1 dispõe as áreas médias obtidas para cada CP:

Tabela 1– Área média dos CPs

CP (spray-up)	Área média [mm <sup>2</sup> ]	CP (hand lay- up)	Área média [mm <sup>2</sup> ]
SU-T1	77,36	HL-T1	41,39
SU-T2	61,07	HL-T2	44,23
SU-T3	75,54	HL-T3	52,83
SU-T4	66,21	HL-T4	51,02
SU-T5	72,03	HL-T5	50,31
SU-T6	63,32	HL-T6	40,15
SU-T7	79,66	HL-T7	51,42

Fonte: Autor (2016).

Durante o ensaio, uma carga é aplicada sobre o CP aumentando constantemente sua intensidade, até que ocorra a ruptura do material. Obtém-se então, como resultado do ensaio,

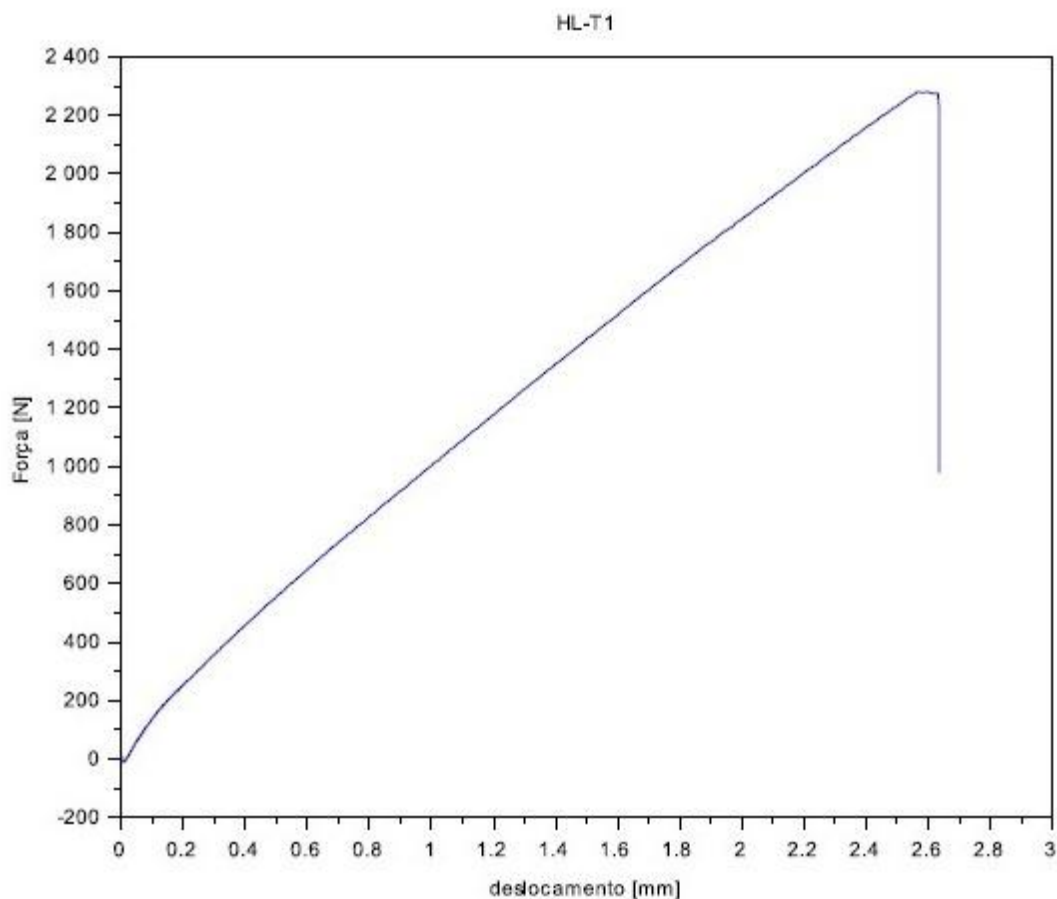


uma planilha da força aplicada em função da deformação do CP. Através da Equação 13 é possível então determinar a relação entre tensão e deformação para cada ensaio.

$$\sigma = \frac{P}{A_m} \quad 133$$

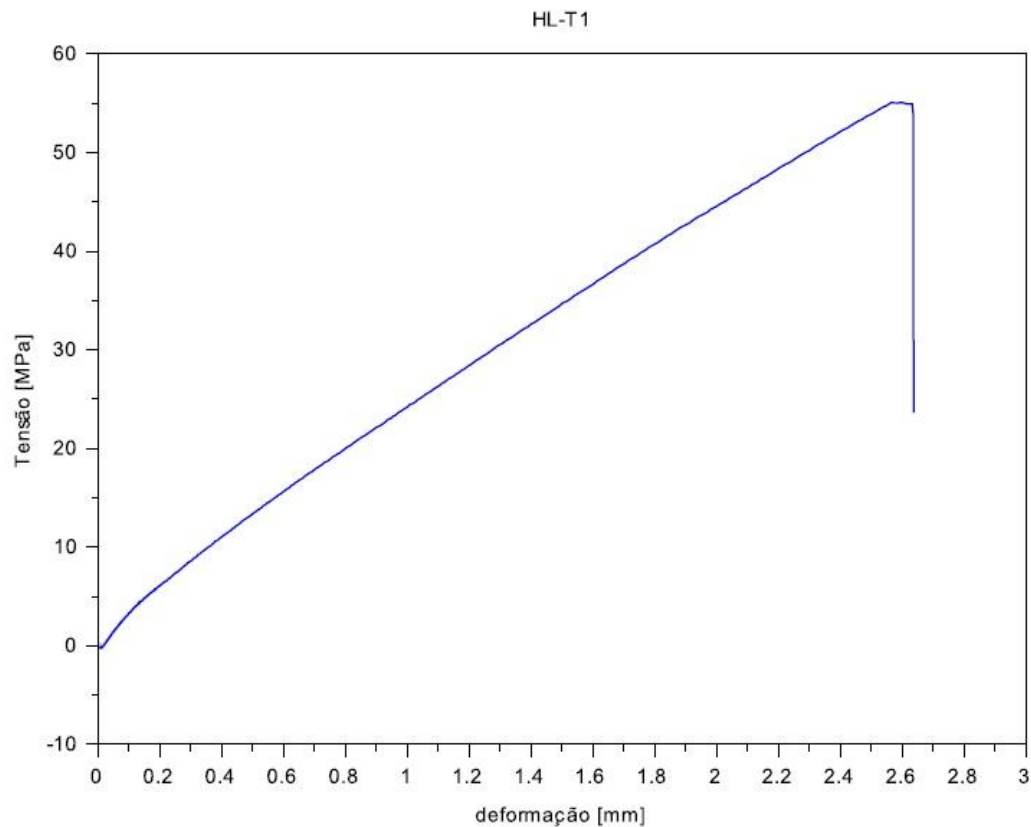
Onde  $\sigma$  é a tensão,  $P$  é a carga aplicada e  $A_m$  é a área média do CP. Utilizando os dados obtidos dos ensaios e a equação 13, foi possível então através do software Scilab obter os gráficos de carga por deformação e tensão por deformação, como exemplificado nos gráficos 1 e 2. A relação completa dos gráficos está disponível nos Apêndices E e F.

Gráfico 1– Força [N] x deslocamento [mm] do CP HL-T1.



Fonte: Autor (2016).

Gráfico 2– Tensão [MPa] x deslocamento [mm] do CP HL-T1.



Fonte: Autor (2016).

Analisando os dados obtidos, é possível extrair as informações de carga máxima e tensão máxima admissível em cada corpo de prova, que são os valores máximos observados antes da ruptura, os quais estão dispostos na tabela 2:

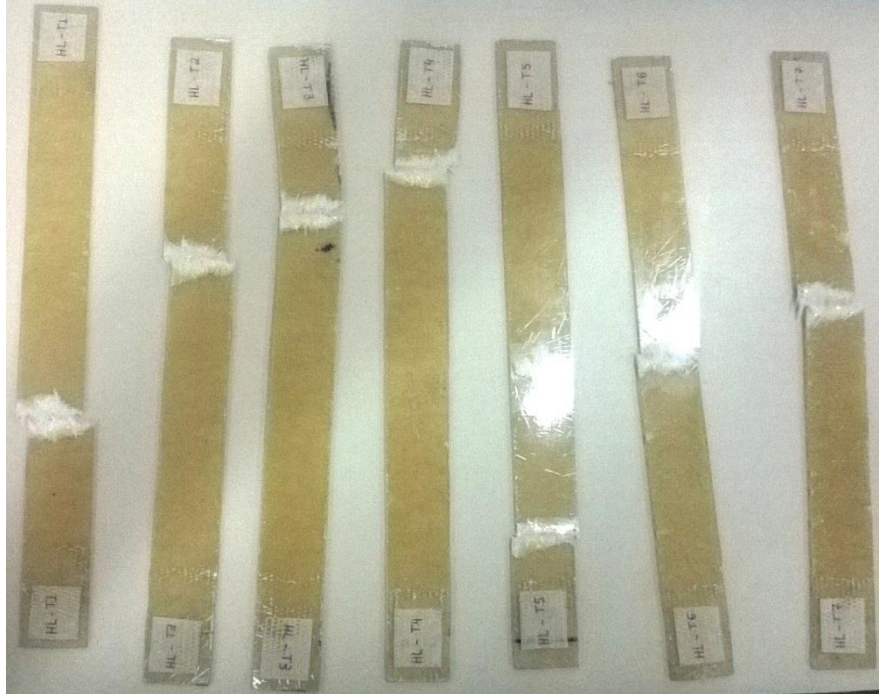
Tabela 2 – Tensões máximas admissíveis dos CPs.

CP	TENSÃO MÁXIMA [Mpa]	CP	TENSÃO MÁXIMA [Mpa]
SU-T1	68,49	HL-T1	55,10
SU-T2	67,87	HL-T2	79,77
SU-T3	93,49	HL-T3	72,62
SU-T4	71,79	HL-T4	70,17
SU-T5	74,06	HL-T5	64,90
SU-T6	69,92	HL-T6	78,56
SU-T7	82,66	HL-T7	77,27

Fonte: Autor (2016).

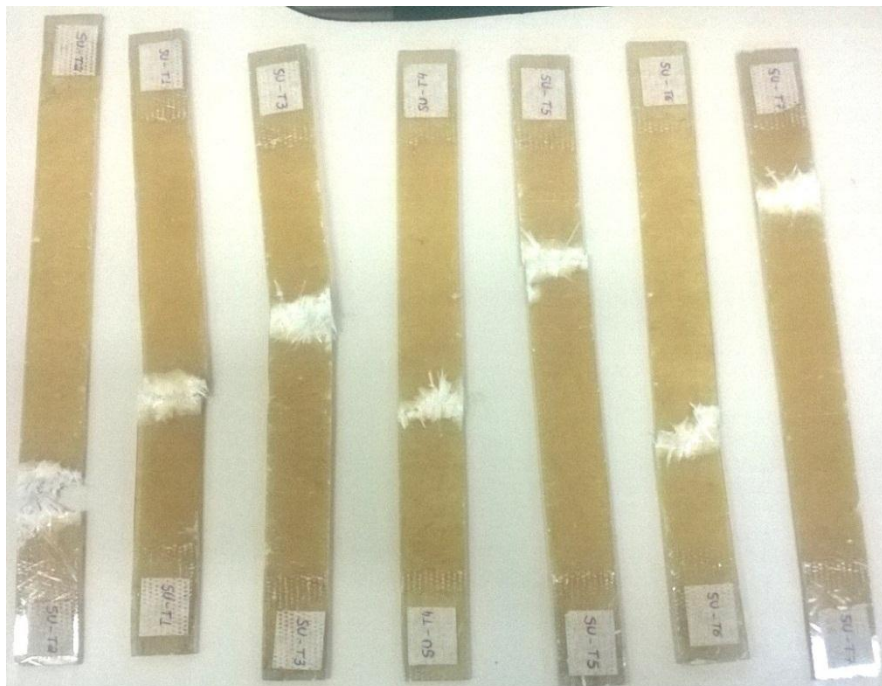
As figuras 20 e 21 mostram os CPs após a realização do ensaio:

Figura 20 - CPs Hand Lay-up após ensaio de tração.



Fonte: Autor (2016).

Figura 21 - CPs Spray-up após ensaio de tração.



Fonte: Autor (2016).

Para tratar estatisticamente os dados obtidos dos ensaios utilizou-se uma distribuição student. De acordo com Barbetta, Reis e Bornia (2009), só se pode utilizar um intervalo de confiança padrão, baseado na distribuição normal, quando conhecemos o desvio padrão da população, o que não é comum na prática. Quando se tem uma amostragem, utiliza-se então a distribuição t de student, que tem forma parecida com a normal padrão, mas é um pouco mais dispersa, onde a dispersão varia de acordo com o tamanho da amostra. O intervalo de confiança (IC) é dado então pela Equação 14.

$$IC = x_m \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad 143$$

Onde “ $x_m$ ” é a média, “ $n$ ” é o número de amostras, “ $s$ ” é o desvio padrão de amostragem e “ $t$ ” é o parâmetro obtido através da tabela de student baseado no nível de confiança desejado e em “ $n$ ”. Foi adotado um nível de confiança de 95% para analisar os dados obtidos. A tabela 3 exhibe os dados utilizados para calcular o IC:

Tabela 3 – Dados estatísticos.

nº de CPs "n"	7
Graus de liberdade "n-1"	6
Nível de confiança	95%
coeficiente "t" (tabela)	2,447

Fonte: Autor (2016).

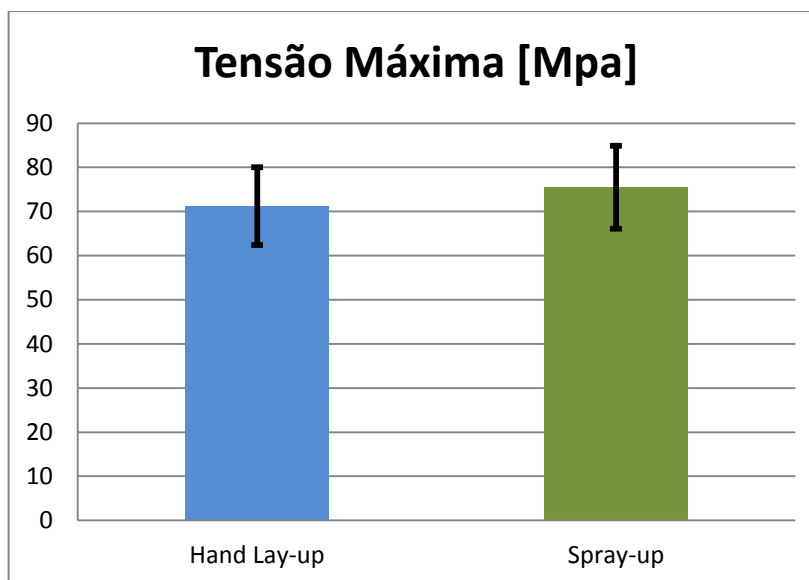
Deste modo chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 4 – Tensão Máxima [Mpa].

Tensão Máxima [Mpa]			
Hand Lay-up		Spray-up	
Média " $x_m$ "	71,20	Média " $x_m$ "	75,47
desvio padrão da amostragem "s"	8,82	desvio padrão da amostragem "s"	9,39
Limite superior	79,35	Limite superior	84,16
Limite inferior	63,04	Limite inferior	66,78
Variância " $s^2$ "	77,76	Variância " $s^2$ "	88,21

Fonte: Autor (2016).

Gráfico 3 – Tensão Máxima [Mpa].



Fonte: Autor (2016).

Observou-se que o processo de laminação spray-up apresentou uma média de tensão máxima 6% superior ao processo de laminação manual. Entretanto, dados os intervalos de confiança calculados, observa-se que os limites se sobrepõem. Deste modo, não é possível dizer que um método possui resultados superiores ao outro.

A variância é definida como a média aritmética dos desvios quadráticos, onde o desvio é a diferença entre o valor observado e a média da população (BARBETTA, 2009). Foi observado que a variância dos resultados obtidos das CPs spray-up foi 13,43% superior à observada nos CPs hand lay-up. Desta forma, pode-se inferir que o processo de laminação manual resulta em um laminado mais homogêneo, de forma que os valores de tensão máxima suportada ao longo do laminado são menos dispersos quando comparados ao processo spray-up. Observou-se também, através dos gráficos gerados, que o material exibe um comportamento aproximadamente linear durante todo o processo. Isso nos indica que o material tem características frágeis, com um comportamento predominantemente elástico. Para uma análise mais precisa a respeito dos resultados aqui obtidos, é necessário que se conheça as frações de reforço e matriz polimérica presentes no laminado, desta forma, esta será realizada após a apresentação dos resultados do ensaio de combustão controlada.

A determinação do módulo de elasticidade das amostras não pôde ser realizada. Para que isso fosse possível seria necessário a utilização de um extensômetro durante a realização dos ensaios de tração, equipamento este que não estava disponível no laboratório onde os

testes foram realizados. A máquina de tração mede o deslocamento das garras, desta forma não seria possível a determinação da deformação específica (alongamento/comprimento original) visto que não estão englobados variações como a deformação da máquina e escorregamentos do corpo de prova. Se utilizados esses dados, haveria muito erro associado, de modo que produziria resultados de baixa confiabilidade.

## 6.2 TESTE DE COMBUSTÃO

No teste de combustão controlada são medidas as massas dos corpos de prova antes e depois do processo de combustão. Após realizado o processo de combustão, o resíduo gerado a partir do mesmo é o reforço do laminado, neste caso a fibra de vidro. Desta maneira, mensuradas as massas iniciais e de reforço do laminado, é possível calcular a massa de matriz polimérica presente no mesmo, tornando possível o cálculo das frações mássicas e volumétricas. As massas dos corpos de prova obtidas através das pesagens estão dispostas na tabela 5:

Tabela 5 - Massas dos CPs.

Massas das Amostras Spray-up [g]			
CP	Massa do CP	Massa de matriz	Massa de fibra
SU-C2	2,309	1,492	0,817
SU-C3	2,3032	1,4479	0,8553
SU-C4	2,37	1,4231	0,9469
Média	2,3274	1,4543	0,8731
Massas das Amostras Hand Lay-up [g]			
CP	Massa do CP	Massa de matriz	Massa de fibra
HL-C1	1,6548	1,0608	0,594
HL-C4	1,3732	0,9132	0,46
HL-C5	1,5041	0,9549	0,5492
Média	1,5107	0,9763	0,5344

Fonte: Autor (2016).

Utilizando os valores da tabela anterior e conhecendo os valores de densidade da matriz polimérica e da fibra de vidro, utilizando as equações do capítulo 4 é possível obter os valores de volume de fibras e matriz, bem como a fração volumétrica, os quais estão dispostos na tabela 6.

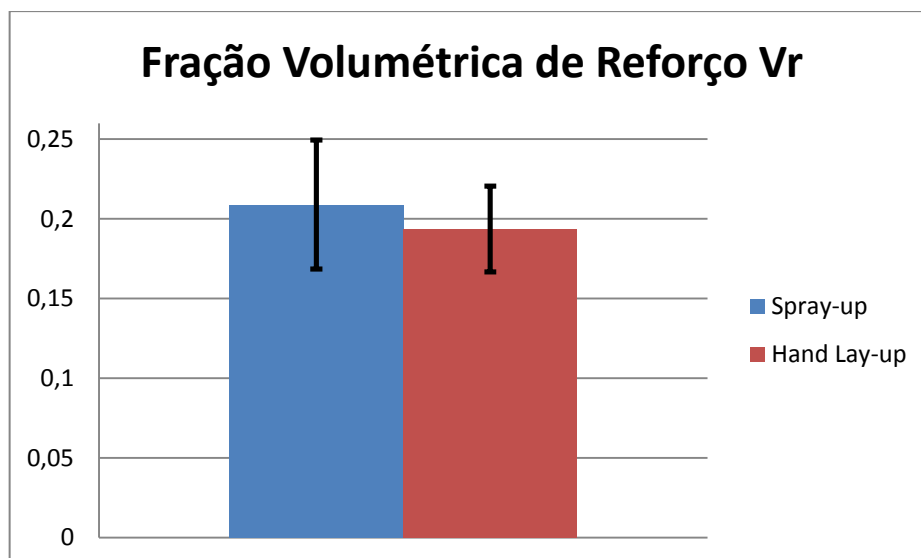
Tabela 6 - Fração Volumétrica de Reforço.

Spray-up			
CP	V <sub>m</sub> [mm <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub> [mm <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub>
SU-C2	1356,4	326,8	0,1942
SU-C3	1316,3	342,1	0,2063
SU-C4	1293,7	378,8	0,2265
Hand Lay-up			
CP	V <sub>m</sub> [mm <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub> [mm <sup>3</sup> ]	V <sub>r</sub>
HL-C1	964,4	237,6	0,1977
HL-C4	830,2	184,0	0,1814
HL-C5	868,1	219,7	0,2020

Fonte: Autor (2016).

A fração volumétrica de reforço média obtida dos CPs spray-up foi de 20,9% e a do hand lay-up 19,37%, analogamente, a fração volumétrica média de matriz foi de 79,1% no spray-up e 80,63% no hand lay-up. Segundo Jorge Nasseh (2007) é possível alcançar teores de fibra em torno de 25% no processo spray-up e 40% no processo hand lay-up. Aplicando um nível de confiança de 95% em uma distribuição Student chegou-se a configuração exibida no gráfico 4:

Gráfico 4 - Fração Volumétrica de Reforço (V<sub>r</sub>).



Fonte: Autor (2016).

Observando os limites superior e inferior, percebe-se que eles se sobrepõem. Desta forma pode-se concluir que as amostras são similares em relação à fração volumétrica de reforço. Analisando o quesito variância ( $s^2$ ) obteve-se os valores de  $2,66 * 10^{-4}$  para o processo spray-up e  $1,17 * 10^{-4}$  para o processo hand lay-up, o que confirma os resultados obtidos nos ensaios de tração onde obteve-se maior variação do laminado no processo spray-up.

### 6.3 DENSIDADE APARENTE E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE VAZIOS

Para o cálculo da densidade aparente utilizou-se medidas de largura, comprimento e espessura média, os quais foram aferidos em três pontos, três pontos e quatro pontos respectivamente. A partir disso calculou-se o volume médio e utilizando a massa total do CP calculou-se a densidade aparente. As equações necessárias para a realização dos cálculos dos resultados aqui apresentados se encontram no capítulo 4, os resultados obtidos estão dispostos na tabela 7:

Tabela 7 - Densidade aparente ( $\rho_a$ ).

Spray-up						
CP	Largura média [mm]	Comprimento médio [mm]	Espessura média [mm]	Volume médio [cm <sup>3</sup> ]	Massa total	Densidade Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]
SU-C2	25,01	25,1	2,8	1,758	2,309	1,314
SU-C3	25,12	25,13	2,62	1,654	2,3032	1,393
SU-C4	25,27	24,6	2,76	1,716	2,37	1,381
Hand Lay-up						
CP	Largura média [mm]	Comprimento médio [mm]	Espessura média [mm]	Volume médio [cm <sup>3</sup> ]	Massa total	Densidade Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]
HL-C1	25,3	24,82	1,9	1,193	1,6548	1,387
HL-C4	25,27	25,21	1,67	1,064	1,3732	1,291
HL-C5	25,06	25,06	1,84	1,156	1,5041	1,302

Fonte: Autor (2016).



A partir dos dados de massa obtidos e conhecendo a densidade de cada componente do laminado pode-se chegar ao volume de matriz e reforço. O volume do CP é então a soma dos volumes de matriz e reforço. A partir disso é possível chegar as frações volumétricas e posteriormente à densidade teórica, a qual não leva em consideração a fração volumétrica de vazios presente no laminado, os resultados obtidos se encontram na tabela 8:

Tabela 8 - Densidade Teórica.

Densidade Teórica $\rho_c$ [g/cm <sup>3</sup> ]			
SU-C2	1,3718	HL-C1	1,3767
SU-C3	1,3888	HL-C4	1,3540
SU-C4	1,4171	HL-C5	1,3827

Fonte: Autor (2016).

Chegou-se então aos valores médios de densidade aparente de 1,363g/cm<sup>3</sup> no spray-up e 1,327g/cm<sup>3</sup> para o hand lay-up, uma diferença de 2,7%. Em densidade teórica obteve-se as médias de 1,393g/cm<sup>3</sup> para o spray-up e 1,371g/cm<sup>3</sup> para o hand lay-up, uma diferença de 1,6%. Comparando densidade aparente e teórica verificou-se uma diferença de 2,2% no processo spray-up e 3,3% no processo hand lay-up. Essa diferença se deve provavelmente ao volume de vazios, não considerado na densidade teórica.

Posteriormente, calculou-se a fração volumétrica de vazios, a qual os resultados estão dispostos na tabela 9:

Tabela 9 - Fração Volumétrica de Vazios (Vv).

Fração Volumétrica de vazios (Vv)			
SU-C2	0,0868	HL-C1	0,0481
SU-C3	0,0556	HL-C4	0,0857
SU-C4	0,0861	HL-C5	0,1027

Fonte: Autor (2016).

Obteve-se uma média de 7,62% no processo spray-up e de 7,88% no processo hand lay-up. Buscando na literatura observa-se que há uma grande variação quanto aos valores usuais de Vv para os processos em análise. De toda forma, esses valores variam de 3% a 10% na laminação manual e 5% a 12% na laminação spray-up. Pode-se dizer então, que os valores aqui obtidos encontram-se dentro do esperado quando comparados à literatura.

Deste modo, pode-se observar que os laminados obtiveram características semelhantes em todos os aspectos aqui analisados.

## 7 CONCLUSÕES

Foram confeccionados laminados a partir de dois tipos de processo de laminação diferentes, os quais foram posteriormente submetidos a testes de tração estática e combustão controlada. Inicialmente acreditava-se que os laminados obtidos através do processo de laminação spray-up demonstrariam menores valores de tensão máxima admissível e fração volumétrica de reforço, porém verificou-se que estes acabaram demonstrando resultados muito similares aos obtidos através do processo de laminação hand lay-up. Havia uma preocupação inicial em obter laminados com uma quantidade similar de reforço, porém, esperava-se que os laminados spray-up tivessem uma fração maior de matriz polimérica, o que não pôde ser comprovado. Como o profissional que realiza a laminação manual não é o mesmo que realiza a laminação spray-up, acredita-se que na laminação manual pode ter ocorrido um excesso de aplicação de resina, visto que obteve-se percentuais médios de fração volumétrica de resina de 79,1% no processo spray-up e 80,63% no hand lay-up, comparados aos mínimos possíveis, de acordo com Jorge Nasseh (2007), de 75% para spray-up e 60% para hand lay-up.

Analisando os valores de tensão máxima admissível obtidos através dos ensaios, verificou-se com o auxílio de uma análise estatística de 95% de confiança, que as amostras são similares neste quesito.

Realizados os ensaios de combustão controlada, pôde-se verificar que as amostras demonstraram similaridade nos quesitos fração volumétrica de reforço, densidade teórica, densidade aparente e fração volumétrica de vazios. Verificou-se ainda, que a similaridade na configuração do laminado desejada inicialmente foi alcançada.

Os laminados obtidos para a realização dos ensaios aqui realizados foram desenvolvidos sem a utilização de tecido. Seria de grande valia a realização de um estudo com a utilização de tal material de modo a observar se os resultados aqui obtidos se repetiriam.

De toda forma, viu-se que apesar de os processos de laminação serem muito dependentes do operador que o está realizando, é possível controlá-los de modo a obter a configuração de laminado desejada.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

As sugestões de continuidade dos estudos aqui realizados são:

- Realizar um estudo comparativo de tensão máxima admissível entre laminados obtidos através dos processos spray-up e hand lay-up utilizando tecido de fibra de vidro como material estrutural.
- Realizar um estudo comparativo de teor de reforço através de ensaio de combustão controlada entre laminados obtidos através dos processos spray-up e hand lay-up utilizando tecido de fibra de vidro como material estrutural.
- Realizar um estudo comparativo de absorção d'água entre laminados obtidos através dos processos spray-up e hand lay-up utilizando tecido de fibra de vidro como material estrutural.
- Realizar um estudo comparativo de absorção de impacto entre laminados obtidos através dos processos spray-up e hand lay-up utilizando tecido de fibra de vidro como material estrutural.

## REFERÊNCIAS

- AL-QURESHI, Hazim A. **Materiais Compostos: Análises e Fabricação**. [s.l.:s.d.], 2010.
- Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO). **Compósitos 1: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e tendências**. [s.l.:s.d.].
- Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO). **Compósitos 2: Tecnologia e Processos**. [s.l.:s.d.], 2009.
- Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos (ACOBAR). **Indústria Náutica Brasileira – Fatos e Números 2012**. [s.l.:s.n.], 2012.
- ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- BARBETTA, Pedro A.; REIS, Marcelo M.; BORNIA, Antonio C. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- CAVATORTA, Maria P.; PAOLINO, Davide S. **Composite Materials Research Progress**. New York: Nova Science Publishers, 2008.
- CUPERTINO, L. F.; **Modelagem do Módulo de Young em Nanocompósitos Através de Inteligência Computacional**. 2009. 79f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: Ltc, 2008.
- INACIO, E. A.; **Estudo de Fibras de Laminados Usados na Indústria Náutica**. 2016. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Naval). Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- KAUARK, F.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da Pesquisa: Um guia Prático**. Bahia: Via Litterarum, 2010.
- KAW, Autar K. **Mechanics of Composite Materials**. 2. Ed. Florida: Crc Press Llc, 2006.
- LEVY, Flamínio N.; PARDINI, Luiz C. **Compósitos Estruturais**. São Paulo: Blucher, 2012.
- 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.
- NASSEH, Jorge. **Composites & Plásticos de Engenharia**. Disponível em: < [http://www.tecnologiademateriais.com.br/consultas\\_tm/pdf/pr65/54-56.pdf](http://www.tecnologiademateriais.com.br/consultas_tm/pdf/pr65/54-56.pdf) >. Acesso em: 20 nov. 2015.

NASSEH, Jorge. **Barcos: Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro: 2007.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C.. **Compósitos Estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2006.

SP SYSTEMS. **Composite Engineering Materials**, 2010. Disponível em:  
< <https://www.bolton.ac.uk/CODATE/Downloads.aspx> >. Acesso em: 22 nov. 2015.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

## APÊNDICE A – NOMENCLATURA DOS CORPOS DE PROVA

<b>Nomenclatura dos Corpos de Prova</b>					
<b>Tração</b>					
CP	método de laminação	nº do CP	CP	método de laminação	nº do CP
SU-T1	spray-up	1	HL-T1	hand lay-up	1
SU-T2	spray-up	2	HL-T2	hand lay-up	2
SU-T3	spray-up	3	HL-T3	hand lay-up	3
SU-T4	spray-up	4	HL-T4	hand lay-up	4
SU-T5	spray-up	5	HL-T5	hand lay-up	5
SU-T6	spray-up	6	HL-T6	hand lay-up	6
SU-T7	spray-up	7	HL-T7	hand lay-up	7
<b>Combustão</b>					
CP	método de laminação	nº do CP	CP	método de laminação	nº do CP
SU-C1	spray-up	1	HL-C1	hand lay-up	1
SU-C2	spray-up	2	HL-C2	hand lay-up	2
SU-C3	spray-up	3	HL-C3	hand lay-up	3
SU-C4	spray-up	4	HL-C4	hand lay-up	4
SU-C5	spray-up	5	HL-C5	hand lay-up	5
SU-C6	spray-up	6	HL-C6	hand lay-up	6

### APÊNDICE B – DIMENSÕES DOS CPS DE TRAÇÃO.

Dimensões dos Corpos de Prova – Ensaio de Tração								
CP	Espessura (mm)				Largura (mm)			
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
SU-T1	2,94	3,13	3,19	3,1	24,99	25,24	24,92	24,93
SU-T2	2,6	2,4	2,36	2,36	25,22	25,18	25,02	25,1
SU-T3	3,02	3,13	2,95	2,97	24,86	25,04	25,15	25,09
SU-T4	2,92	2,39	2,68	2,59	24,99	24,98	25,16	24,99
SU-T5	2,93	2,86	2,9	2,8	25,12	24,98	25,09	25,11
SU-T6	2,68	2,5	2,54	2,46	24,92	24,92	24,88	24,8
SU-T7	3,18	3,23	3,14	3,17	25,01	25,05	25,18	24,96
HL-T1	1,66	1,63	1,56	1,77	24,93	25,02	24,98	25,1
HL-T2	1,66	1,86	1,79	1,76	24,8	25,04	25,09	25,15
HL-T3	2,08	2,2	2,08	2,06	25,16	25,13	25,1	25
HL-T4	1,99	2,11	2,06	1,96	25,15	25,23	24,98	25,12
HL-T5	2,13	2,07	2,05	1,77	25,23	25,24	24,94	24,88
HL-T6	1,51	1,67	1,59	1,63	25,02	24,87	25,22	25,22
HL-T7	1,91	2,14	2,04	2,11	25,23	24,97	25,02	25,12

Dimensões dos Corpos de Prova – ensaio de Tração					
CP	Área (mm <sup>2</sup> )				Área média
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	
SU-T1	73,47	79,19	79,49	77,28	77,36
SU-T2	65,57	60,43	59,05	59,24	61,07
SU-T3	75,08	78,38	74,19	74,52	75,54
SU-T4	72,97	59,70	67,43	64,72	66,21
SU-T5	73,60	71,44	72,76	70,31	72,03
SU-T6	66,79	62,30	63,20	61,01	63,32
SU-T7	79,53	80,91	79,07	79,12	79,66
HL-T1	41,38	40,78	38,97	44,43	41,39
HL-T2	41,17	46,57	44,91	44,26	44,23
HL-T3	52,33	55,29	52,21	51,50	52,83
HL-T4	50,05	53,32	51,46	49,24	51,02
HL-T5	53,74	52,33	51,13	44,04	50,31
HL-T6	37,78	41,53	40,18	41,11	40,15
HL-T7	48,19	53,44	51,04	53,00	51,42

### APÊNDICE C – ESFORÇOS MÁXIMOS ADMISSÍVEIS

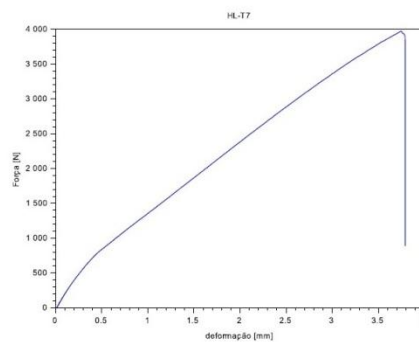
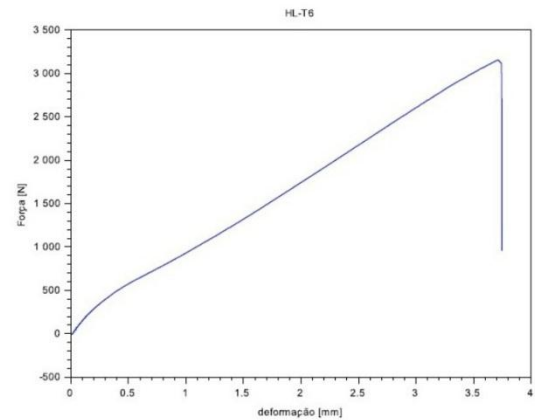
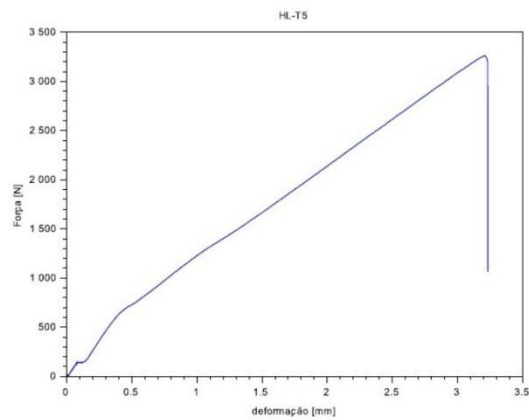
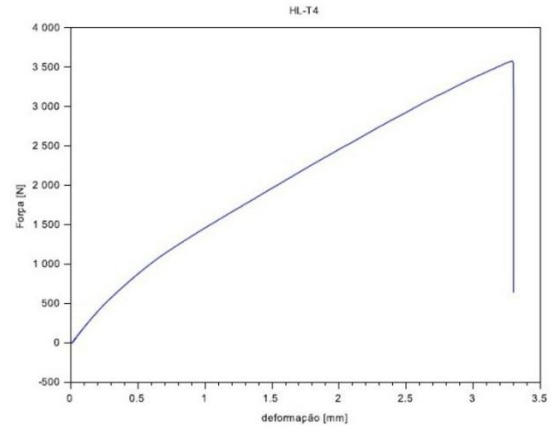
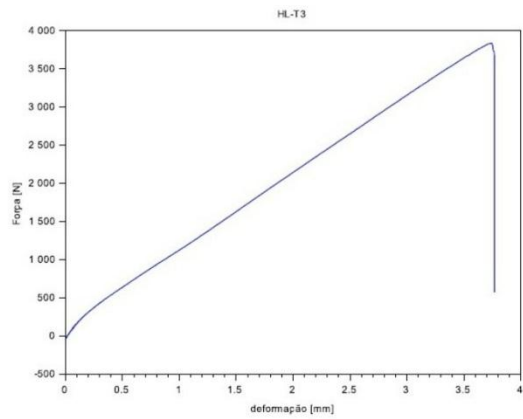
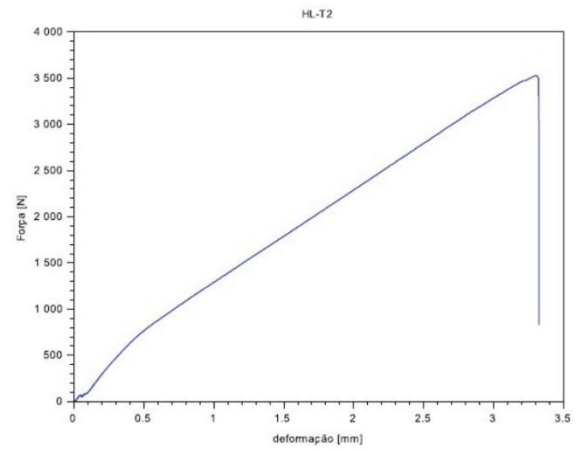
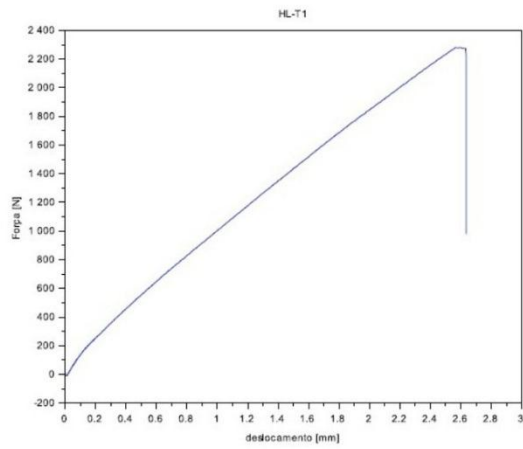
<b>ESFORÇOS MÁXIMOS ADMISSÍVEIS</b>				
<b>SPRAY-UP</b>				
<b>CP</b>	<b>CARGA MÁXIMA [N]</b>	<b>DEFORMAÇÃO [mm]</b>	<b>ÁREA MÉDIA [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>TENSÃO MÁXIMA [Mpa]</b>
SU-T1	5298,5	4,3713	77,36	68,49
SU-T2	4145,2	4,2364	61,07	67,87
SU-T3	7062,4	4,9755	75,54	93,49
SU-T4	4752,7	3,7705	66,21	71,79
SU-T5	5334,2	4,0012	72,03	74,06
SU-T6	4427,8	3,5741	63,32	69,92
SU-T7	6584,9	4,2503	79,66	82,66
<b>HAND LAY-UP</b>				
<b>CP</b>	<b>CARGA MÁXIMA [N]</b>	<b>DEFORMAÇÃO [mm]</b>	<b>ÁREA MÉDIA [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>TENSÃO MÁXIMA [Mpa]</b>
HL-T1	2280,5	2,5977	41,39	55,10
HL-T2	3528	3,3068	44,23	79,77
HL-T3	3836,6	3,7466	52,83	72,62
HL-T4	3579,9	3,2899	51,02	70,17
HL-T5	3264,8	3,2088	50,31	64,90
HL-T6	3154,4	3,7143	40,15	78,56
HL-T7	3973	3,7503	51,42	77,27

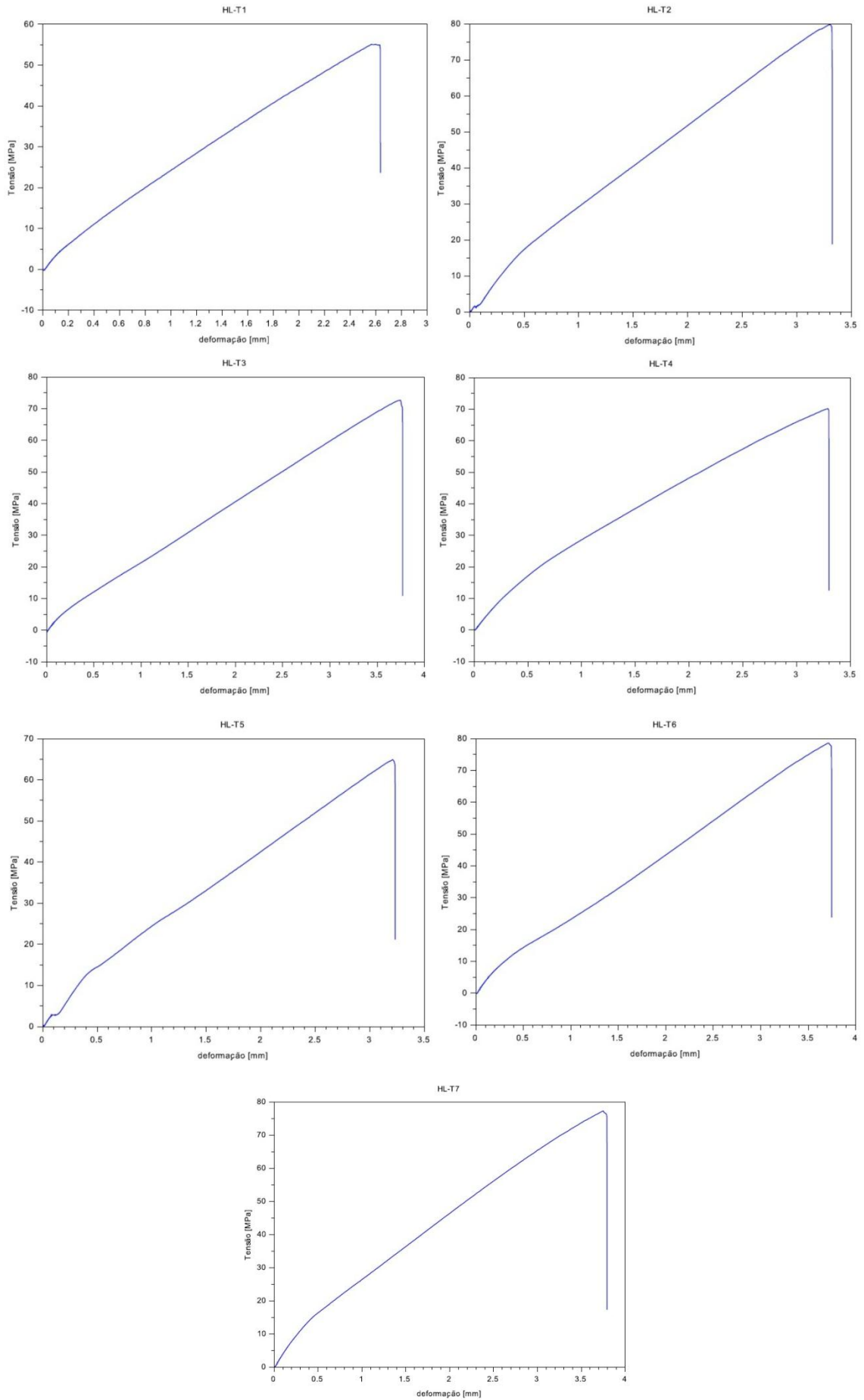


**APÊNDICE D – DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA DE COMBUSTÃO**

Dimensões dos Corpos de Prova de Combustão								
Spray-up								
CP	Largura 1	Largura 2	Largura 3	Larg. Média	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. Médio
SU-C1	24,91	25,18	25,03	25,04	25,03	24,96	24,99	24,99
SU-C2	25,12	24,9	25,02	25,01	24,97	25,22	25,1	25,10
SU-C3	24,96	25,26	25,13	25,12	25,09	25,18	25,11	25,13
SU-C4	25,28	25,29	25,25	25,27	24,7	24,5	24,61	24,60
SU-C5	25,22	25,09	25,13	25,15	25,05	25,11	25,08	25,08
SU-C6	24,95	25,23	25,1	25,09	24,86	25,25	25,04	25,05
CP	Esp. 1	Esp. 2	Esp. 3	Esp. 4	Esp. Média			
SU-C1	2,22	2,19	2,47	2,35	2,31			
SU-C2	2,73	2,76	2,91	2,8	2,80			
SU-C3	2,44	2,6	2,76	2,67	2,62			
SU-C4	2,66	2,68	2,84	2,87	2,76			
SU-C5	2,86	2,95	3,07	3,02	2,98			
SU-C6	2,3	2,32	2,23	2,22	2,27			
Hand Lay-up								
CP	Largura 1	Largura 2	Largura 3	Larg. Média	Comp. 1	Comp. 2	Comp. 3	Comp. Médio
HL-C1	25,29	25,31	25,3	25,30	24,84	24,81	24,8	24,82
HL-C2	25,12	25,01	25,06	25,06	25	24,91	24,97	24,96
HL-C3	25,12	25,2	25,14	25,15	25,18	25,16	25,16	25,17
HL-C4	25,24	25,3	25,28	25,27	25,24	25,18	25,2	25,21
HL-C5	25,03	25,1	25,06	25,06	25	25,12	25,05	25,06
HL-C6	24,76	24,82	24,8	24,79	24,96	24,72	24,86	24,85
CP	Esp. 1	Esp. 2	Esp. 3	Esp. 4	Esp. Média			
HL-C1	1,82	1,85	2,06	1,88	1,90			
HL-C2	1,7	1,68	1,73	1,73	1,71			
HL-C3	1,8	2,11	2,2	2,17	2,07			
HL-C4	1,59	1,64	1,71	1,72	1,67			
HL-C5	1,75	1,9	1,91	1,79	1,84			
HL-C6	1,74	1,82	1,8	1,79	1,79			

## APÊNDICE E – GRÁFICOS DE FORÇA E TENSÃO POR DEFORMAÇÃO DOS CPS HAND LAY-UP





## APÊNDICE F – GRÁFICOS DE FORÇA E TENSÃO POR DEFORMAÇÃO DOS CPS SPRAY-UP

