

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

PEDRO CÉSAR LEME GRANADO SCIARINI

ESTUDO DE CONFECÇÃO DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE  
CISALHAMENTO EM JUNTA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Joinville

2019

PEDRO CÉSAR LEME GRANADO SCIARINI

ESTUDO DE CONFECÇÃO DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE  
CISALHAMENTO EM JUNTA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luís Fernando Peres Galil

Joinville

2019

PEDRO CÉSAR LEME GRANADO SCIARINI

ESTUDO DE CONFECÇÃO DE CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE  
CISALHAMENTO EM JUNTA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de Novembro de 2019.

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: Dr. Luís Fernando Peres Calil  
Presidente  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Ricardo Aurélio Pinto  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Gabriel Benedet Dutra  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus professores, pais e universidade.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer meu pai César Augusto de Oliveira Sciarini e minha mãe Maria Luiza Leme Granado Sciarini por sempre acreditarem em mim e apoiarem meus sonhos.

Agradeço a Azimut Yachts pelo fornecimento de grande parte dos materiais e informações fornecidas neste trabalho bem como a visita técnica que me proporcionaram para conhecer o estaleiro e em especial sobre as uniões entre metais e compósito que realizam.

Ao professor Tiago Vieira Cunha por ter colaborado no início do estudo e levantamento bibliográfico, e ao professor Luis Fernando Peres Calil por ter me acompanhado durante todo o desenvolvimento.

Agradeço também a Luciana Reginato Dias por todo apoio institucional e emocional durante minha formação.

Aos professores Gabriel Benedet Dutra e Ricardo Aurélio Pinto por autorizarem a utilização dos laboratórios e equipamentos durante os finais de semana.

Agradeço o Matheus Santana Carvalho e a Ana Letícia Tavares por me auxiliarem na formatação com o  $\text{\LaTeX}$ .

E por último agradeço a minha força de vontade e dedicação e por ter tido a capacidade de vencer um distúrbio mental e chegar ao fim da minha graduação.

União é o ato ou efeito de se unir duas ou mais partes distintas. Uma união pode acontecer de diversas formas, como a ligação ou combinação de esforços e pensamentos para um bem comum. (AMBICIOSO, 2016).

## RESUMO

Na indústria naval o uso de embarcações híbridas auxilia na redução de peso bem como aumento do desempenho das embarcações. Com isto em mente e sabendo que o estudo de ligação entre materiais dissimilares é escasso, foi realizada uma pesquisa sobre tipos de uniões já existentes e normas referentes aos materiais utilizados neste trabalho de forma a auxiliarem na modelagem de corpos de prova. Após tal pesquisa, a modelagem geométrica dos corpos de prova foi eleita e com esta, três métodos diferentes de união foram propostos para verificar se os corpos de prova projetados são adequados para o ensaio de cisalhamento utilizado como método de obtenção de dados de resistência. Para o tratamento dos dados foi sugerido utilizar uma análise de variância com três tratamentos e cinco repetições. Após realizar o ensaio de cisalhamento, alguns dos corpos de prova possuíram falha inadequada – não por cisalhamento da união, mas por ruptura da lâmina de compósito. Isto fez com que a análise de dados se restringisse a dois processos de união e, por consequência, foi utilizado um Teste  $t$  de *Student* para a análise. Ao fim da análise comprova-se que os corpos de prova projetados foram inadequados para atenderem ao estudo deste trabalho e, portanto, sugestões de como viabilizar a análise da união entre materiais dissimilares foram propostas.

**Palavras-chave:** Metais. Compósitos. União. Dissimilares.

## ABSTRACT

In the marine industry the use of hybrid vessels aids in weight reduction as well as increased performance of vessels. With this in mind and knowing that the study of bonding between dissimilar materials is scarce, a brief survey of already used and existing types of joints as well as existing rules about the materials used in this paper as ways for helping the development of a specimen. After the research, the geometric design of the specimen was chosen and with it, three different methods of joint were proposed to verify if the designed specimen is adequate to be used in a shear strength test as ways of raising mechanical data. This paper will propose three methods, either under development or already used for joining metals and composites and evaluate them for their tensile strength. To treat the data it has been suggested using an analysis of variance with three treatments and five repetitions. After the shear test, some of the specimens had inadequate failure – not by shear at the bond, but rupture failure at the composite blade. That made it so the suggested data analysis was restricted to two processes of bonding and, as consequence, it was used a Student's *t* test for the analysis. At the end of the analysis it was proved that the designed specimens were inadequate to serve this paper's study and, therefore, suggestions of how to make the analysis between dissimilar material's union viable were proposed.

**Keywords:** Metals. Composites. Joint. Dissimilars.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Design de embarcação híbridas. Em cinza o metal e em branco o compósito. . . . .	21
Figura 2 – União <i>Scarf</i> sugerida por Zhang (2018) . . . . .	23
Figura 3 – Interferências nas peças metálicas sugeridas por Nguyen (2016) para união entre metais e compósitos . . . . .	24
Figura 4 – Furos sugeridos por CAO (2018) . . . . .	24
Figura 5 – Rebitagem sugerida por CAO (2018) . . . . .	25
Figura 6 – Descarte das extremidades para chapa Adesivado . . . . .	28
Figura 7 – Caracterização da união das lâminas . . . . .	32
Figura 8 – Balança utilizada para medição da massa de fibra . . . . .	33
Figura 9 – Final do processo de laminação manual . . . . .	34
Figura 10 – Template com dimensões gerais para auxílio do corte a jato d'água . . . . .	35
Figura 11 – Template com posições e dimensões do posicionamento dos furos para auxílio do corte a jato d'água . . . . .	36
Figura 12 – Três pares de luvas utilizados para evitar contaminação . . . . .	36
Figura 13 – Marcações e posições originais dos corpos de prova . . . . .	38
Figura 14 – Máquina universal de ensaio mecânicos utilizada . . . . .	39
Figura 15 – Corpos de prova MD pós teste . . . . .	45
Figura 16 – Corpos de prova MA pós teste . . . . .	46
Figura 17 – Corpos de prova MF pós teste . . . . .	47
Figura 18 – Falta de adesivagem na região dos furos ao final da laminação. . . . .	56
Figura 19 – Massa dos corpos de prova . . . . .	65
Figura 20 – Comprimento do Metal dos corpos de prova . . . . .	65
Figura 21 – Comprimento do compósito dos corpos de prova . . . . .	66
Figura 22 – Espessura do metal dos corpos de prova . . . . .	66
Figura 23 – Espessura da união dos corpos de prova . . . . .	67
Figura 24 – Espessura no início do compósito dos corpos de prova . . . . .	67
Figura 25 – Espessura no meio do compósito dos corpos de prova . . . . .	68
Figura 26 – Espessura no fim do compósito dos corpos de prova . . . . .	68

Figura 27 – Largura do meio dos corpos de prova . . . . .	69
Figura 28 – Comprimento da união dos corpos de prova . . . . .	69
Figura 29 – Template para fabricação dos blocos de madeira . . . . .	70
Figura 30 – Modelo 3D renderizado do corpo de prova com as madeiras . . . . .	70
Figura 31 – Gráfico comparativo entre CPs MD . . . . .	71
Figura 32 – Gráfico comparativo entre CPs MA . . . . .	71
Figura 33 – Gráfico comparativo entre CPs MF . . . . .	72
Figura 34 – Dimensão e geometria padrão sugerida pela norma de ensaio de tração para materiais metálicos . . . . .	73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dimensões e referências. . . . .	31
Quadro 2 – Delineamento de um experimento com $k$ tratamentos e $n$ repetições	40
Quadro 3 – Modelo de ANOVA de um fator com com $k$ tratamentos e $n$ repetições	41
Quadro 4 – Análise de falhas dos corpos de prova MD . . . . .	45
Quadro 5 – Análise de falhas dos corpos de prova MA . . . . .	46
Quadro 6 – Análise de falhas dos corpos de prova MF . . . . .	47
Quadro 7 – Estimativa das cargas para ruptura. . . . .	53
Quadro 8 – Composição do Componente A . . . . .	74
Quadro 9 – Composição do Componente B . . . . .	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Recomendações de geometria para corpos de prova no ensaio de tração. . . . .	26
Tabela 2 – Caracterização dos corpos de prova laminados manualmente. . . .	43
Tabela 3 – Tensões nos corpos de prova na falha. . . . .	44
Tabela 4 – Tensões na união dos corpos de prova que falharam por cisalhamento, número de corpos, estimadores das médias e das variâncias. . . . .	48
Tabela 5 – Cargas que resultaram na falha de corpos de prova (CPs) por cisalhamento na união e por ruptura na lâmina de compósito. . . . .	49

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### REFERENTE À CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

$\tau$	Tensão de cisalhamento média
$\sigma$	Tensão de escoamento
$E$	Módulo de Young
$G$	Módulo de cisalhamento
$HSLA$	High-Strength Low-Alloy – Alta resistência e baixa liga
$ILSS$	Interlaminar Shear Strength – Tensão de cisalhamento inter-laminar
$V_a$	Velocidade de avanço

### REFERENTE À CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

$CP$	Corpo de prova
$MD$	Corpo de prova laminado manualmente com colagem direta
$MF$	Corpo de prova laminado manualmente com metal furado
$MA$	Corpo de prova laminada manualmente com união adesivada
$CT$	Comprimento total do corpo de prova
$CM$	Comprimento da lâmina do metal do corpo de prova
$CC$	Comprimento da lâmina do compósito do corpo de prova
$CS$	Comprimento da sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito
$L$	Largura no meio do corpo de prova
$EM$	Espessura no centro da lâmina de metal do corpo de prova

$ES$	Espessura no centro da sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito do corpo de prova
$ECI$	Espessura no início da lâmina de compósito do corpo de prova
$ECM$	Espessura no meio da lâmina de compósito do corpo de prova
$ECF$	Espessura no fim da lâmina de compósito do corpo de prova
$EA$	Espessura do adesivo
$t$	Espessura das chapas

#### REFERENTE À ANÁLISE ESTATÍSTICA

$ANOVA$	Analysis of variance – Análise da Variância
$gl$	Grau de liberdade
$k$	Número de tratamentos
$n$	Número de repetições em cada tratamento
$x_{ij}$	Valor observado de cada ensaio
$\bar{x}_j$	Estimador da média com base na amostra de cada tratamento
$\bar{\bar{x}}$	Estimador da média com base em todos os dados observados
$s^2$	Estimador da variância
$SQ_E$	Soma quadrática da interação entre tratamentos
$SQ_D$	Soma quadrática dentro de cada tratamento
$SQ_T$	Soma quadrática total
$QM$	Quadrado médio
$\alpha$	Nível de significância
$DMS$	Diferença mínima significativa

## OUTRAS ABREVIATURAS

*FPSO* Floating Production Storage and Offloading - Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>17</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISCALHAMENTO EM JUNTA DE MATERIAIS DISSIMILARES</b>	<b>18</b>
2.1	MATERIAIS DISSIMILARES NA INDÚSTRIA NAVAL	18
2.2	PROCESSO DE UNIÃO DAS PEÇAS EM COMPÓSITO E EM AÇO	22
2.3	CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA	25
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISCALHAMENTO</b>	<b>29</b>
3.1	PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	29
3.2	FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	32
3.3	AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
3.4	MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
4.1	RESULTADO DA AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	43
4.2	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	48
4.3	DISCUSSÃO SOBRE O PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISCALHAMENTO	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>58</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE C</b>	<b>65</b>



<b>APÊNDICE D</b> . . . . .	<b>70</b>
<b>APÊNDICE E</b> . . . . .	<b>71</b>
<b>ANEXO A</b> . . . . .	<b>73</b>
<b>ANEXO B</b> . . . . .	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de estruturas multi-materiais tem crescido em aplicações industriais devido ao elevado desempenho, redução de peso e custo, sendo caracterizada por sua alta heterogeneidade interfacial. A utilização de materiais de diferentes naturezas tem ocasionado o surgimento de estruturas híbridas, resultando em dificuldades para sua montagem.

Um dos grandes desafios na Engenharia Naval e Oceânica é a união entre materiais dissimilares para a criação de embarcações que se beneficiarão das qualidades dos materiais metálicos e compósitos.

Algumas das técnicas de união utilizadas para estruturas de grande porte são por fixação mecânica, colagem, soldagem (para juntas de materiais similares), métodos híbridos (colagem com adesivo combinada com ancoramento mecânico ou soldagem), rebiteamento de polímeros e moldagem de plásticos sobre partes metálicas perfuradas, juntas de transição, entre outros.

Com o intuito de generalizar a aplicação destas técnicas, reduzir os custos e consequências ao meio ambiente, novas tecnologias de união estão sendo desenvolvidas (AMANCIO-FILHO, 2011).

Para avaliar essas técnicas de união faz-se necessário testes de cisalhamento; no entanto, não foram identificadas normas específicas para este tipo de ensaio para materiais dissimilares.

Este trabalho, então, objetiva estudar a confecção de corpo de prova para ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos a fim de avaliar juntas de materiais dissimilares.

Para tanto, foram definidos três métodos de união: o primeiro tipo de união, nomeada aqui Colagem Direta, será apenas da laminação direta em cima do metal, avaliando assim se a própria resina tem uma boa aderência ao metal ou não. No segundo método, designado Adesivado, propõe-se utilizar um adesivo já utilizado por estaleiro para colagem do compósito curado e a chapa metálica, viabilizando a comparação da laminação direta e utilização do adesivo. Na terceira união, eleita Metal Furado, serão feitos furos na chapa metálica, os quais serão penetrados pela resina na

hora da laminação, fornecendo ancoragem mecânica à união.

Os materiais eleitos como mais eficientes para este estudo incluem aço SAE 1020, resina éster vinílica, PLEXUS MA832 e manta de fibra de vidro com 450 g/m<sup>2</sup>. A decisão de escolha detalhada dos materiais é listada nos capítulos posteriores.

Os ensaios para levantamento de dados foram testes de cisalhamento padronizado de forma a respeitar, dentro do possível, as normas<sup>1</sup> ASTM D1002-10 (Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading), ASTM D3039/D3039M-14 (Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials) e ASTM E8/E8M-15a (Standard test methods for tension testing of metallic materials).

## 1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da ligação entre metais e compósitos, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a confecção de corpo de prova para ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos a fim de avaliar juntas de materiais dissimilares.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Fazer estudo de normas para fundamentar a caracterização do corpo de prova com união de materiais dissimilares.
- Produzir três diferentes tipos corpos de prova, sendo eles laminados manualmente e possuindo alteração entre o método de união.
- Fazer as avaliações dimensionais e de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova produzidos.
- Verificar se o corpo de prova projetado atende a necessidade do ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos.

---

<sup>1</sup> Normas ASTM (2015a), ASTM (2015b) e ASTM (2015c), respectivamente.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO EM JUNTA DE MATERIAIS DISSIMILARES

Neste capítulo são apresentados conceitos relativos aos materiais utilizados na indústria naval, bem como considerações sobre o processo de união de peças em compósito e em aço e como podem ser caracterizados os corpos de prova para ensaio de cisalhamento em junta de materiais dissimilares.

### 2.1 MATERIAIS DISSIMILARES NA INDÚSTRIA NAVAL

[...] um material composto é formado pela união de dois materiais de naturezas diferentes, resultando em um material de performance superior àquela de seus componentes tomados separadamente. O material resultante é um arranjo de fibras, contínuas ou não, de um material resistente (reforço) que são impregnados em uma matriz de resistência mecânica inferior as fibras. (PEREIRA, 2005, p. 1)

Segundo Gerr (2000) a matriz mais comum para fabricação de compósitos laminados a fibra de vidro (como reforço) é a resina orto-poliéster. Este poliéster líquido é misturado com um iniciador e um acelerador o que causa uma reação chamada polimerização, o que é conhecido na indústria naval como processo de cura. Este processo faz com que as moléculas do plástico se liguem em uma cadeia rígida e contínua, que idealmente se estende do início até o final do compósito. Apesar de muito utilizada na indústria, Gerr (2000) também indica que este tipo de resina é muito frágil, e tende a trincar quando sobre alta carga sem muita deformação. Este tipo de resina tende a se alongar 2% de seu comprimento antes de falhar e o autor cita que sua resistência típica é de 65 MPa.

A próxima resina de acordo com Gerr (2000) a ter características razoavelmente melhores que a orto-poliéster é a resina isoftálica-poliéster. Este tipo de resina possui uma deformação pouco melhor que a orto e possui uma resistência a ataques químicos muitos melhores. A resina isoftálica alonga-se 2,5% antes do início das trincas e possui resistência a tração similar a resina orto-poliéster.

Seguindo a lista de resinas de ordem de mais fraca para mais resistente, a próxima listada por Gerr (2000) é a resina éster-vinílica. O autor cita que para utilizar e usufruir das características de fibras de maior qualidade, uma resina de alta deformação

e alta resistência como a resina éster-vinílica deve ser utilizada. A resina éster-vinílica tem capacidade de deformar em média 5% de seu comprimento antes do início das trincas e sua resistência a tração típica é em média de 82 MPa. O autor ainda cita que ao utilizar este tipo de resina, a resistência inter-laminar do compósito e entre o compósito e o núcleo utilizado é maior que as outras resinas listadas anteriormente pois a aderência da resina éster-vinílica é maior. A resina éster-vinílica também possui resistência química ainda maior que as resinas poliéster. Uma grande vantagem deste tipo de resina é de ser compatível com a utilização de resinas poliéster, e devido a esta característica Gerr (2000) menciona que estaleiros não tem problemas ao se adaptar a troca da resina poliéster para a resina éster-vinílica.

A resina de maior qualidade listada por Gerr (2000) é a resina epóxi. Sua resistência é de cerca de 86 MPa e em média sua trincas e falhas começam a aparecer acima de 5% de deformação. Sua resistência química é superior a já alta resistência da resina-éster vinílica. Devido a sua capacidade de ocupar todos espaços vazios e e sua alta deformação, a propriedade de adesividade da resina epóxi é superior a da resina éster-vinílica. Quando bem produzido, Gerr (2000) menciona que este tipo de resina é capaz de produzir laminados com resistência a flexão próxima de 586 MPa, comparando-se ao aço inox, mas tendo apenas um quinto da massa do aço e a capacidade de sofrer pouca corrosão. A resina epóxi é utilizada apenas para embarcações de alta performance como embarcações militares ou de competição, isto se dá pois o preço de produção de um laminado utilizando resina epóxi é muito alto quando comparado a qualquer das outras resinas e devido ao fato da resina epóxi não ser compatível com os outros tipos de resina isto faz com que a fabricação seja ainda mais custosa.

Outro material importante na produção de compósitos é a fibra. Além de existirem vários materiais utilizados para a fabricação da fibra em si, existem também vários tipos de configurações comerciais como por exemplo tecidos, mantas e *roving*. Na configuração *roving* fibras individuais são enroladas, este tipo de arranjo pode ser utilizado tanto na fabricação das outras formas comerciais quanto por si só. A manta é fabricada utilizando fios de 12 a 50 mm, estes são distribuídos aleatoriamente sobre uma superfície plana e para que sua forma seja mantida um adesivo temporário é utilizado. Assim como o nome sugere, o tecido é fabricado utilizando fios longos e por

este motivo Gerr (2000) menciona que esta configuração possui maior resistência que as outras.

O material da fibra também é variado e deve ser escolhido de acordo com a aplicação. Gerr (2000) apresenta que a fibra mais comumente utilizada por embarcações é a fibra de vidro pois a resistência, peso e custo que fornece são ótimas para a maioria das aplicações. No entanto, quando se trata de embarcações mais sofisticadas como as de performance e militares, a fibra utilizada é a de carbono visto que está é mais leve e resistente que a fibra de vidro. Outros tipos de fibra como Kevlar e Spectra também são opções mencionadas por Gerr (2000).

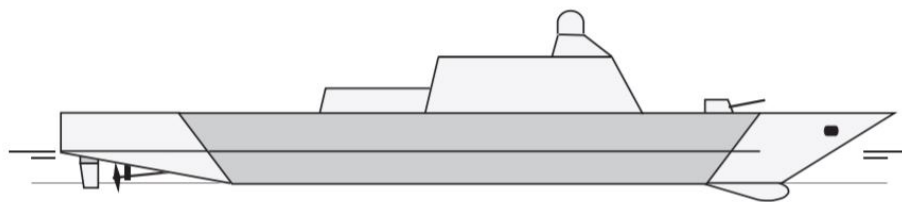
Para a fabricação de compósitos três principais métodos são utilizados, sendo eles: manual, vácuo e infusão. O método manual consiste na utilização de rolos e pincéis para a aplicação da resina ao tecido ou manta de fibra. Para o vácuo o processo manual ainda é realizado, mas a peça é introduzida a um ambiente com pressão absoluta negativa auxiliando assim na remoção de bolhas e excesso de resina. No processo de infusão, a resina é puxada para dentro do sistema de vácuo devido ao diferencial de pressão e assim os espaços em vazios são preenchidos pela resina de forma a produzir um laminado robusto de alta qualidade e baixíssima quantidade de imperfeições (FRANCO, 2008).

Quanto aos materiais metálicos, Soethe (2015) destaca que são muito empregados no setor naval em função das propriedades de tenacidade, resistência ao desgaste, resistência ao impacto e rigidez mecânica. A mesma autora também comenta que a utilização dos aços na indústria naval é superior a 90% do total dos materiais usados em aplicações marítimas. Recentemente, com a demanda de aços mais resistentes, mais dúcteis e com melhores características de soldabilidade, aços categorizados como de alta resistência e baixa liga (HSLA – *High-Strength Low-Alloy*) estão sendo desenvolvidos e melhorados. De acordo com Aung (2007), aços HSLA possuem as características combinadas de aços estruturais simples de carbono e aços de alta resistência.

Na indústria naval além dos pisos, o compósito já está sendo usado em corrimãos, calhas para passagem de instalações elétricas, tubos de esgoto e água potável, tubulações em geral e guarda-corpos (barra de proteção na borda de navios) das plataformas (DUTRA, 2015). Além disto, Boyd (2004) indica que redução no peso

do casco ou superestrutura do navio aumenta a quantidade de carga que o navio poderá transportar com a mesma velocidade e potência requerida, fazendo com que o lucro obtido por viagem aumente. Com isto em mente, a ideia de produzir superestruturas, popas e proas feitas de compósitos não é nova, no entanto sua aplicação é vista apenas em algumas embarcações. Vladimir (2014) menciona como por exemplo, embarcações de patrulha militar americanas seguindo o design da Figura 1.

Figura 1 – Design de embarcação híbridas. Em cinza o metal e em branco o compósito.



Fonte: Vladimir (2014, p. 4).

Segundo Weitzenböck (2010) compósitos na indústria *offshore* são aplicados para diversas tarefas. A primeira listada é a de reparos em navios conhecidos como unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência (FPSO – Floating Production Storage and Offloading). O autor comenta que como navios mercantes podem atracar em portos, a utilização de soldagem para reparos é utilizada, mas em navios como os FPSO que muitas vezes não podem parar de atuar em sua tarefa a atividade de reparo com soldagem provoca um grande risco de incêndio e por isso os reparos necessários são realizados com compósitos. Tais reparos incluem:

- Reparo de painéis que perderam espessura devido a corrosão.
- Recuperar a estanqueidade de tanques danificados devido a fadiga, corrosão ou outras causas.
- Aliviar pontos de tensão e completar espaços vazios em reforçadores, borboletas e outros elementos estruturais.
- Aumentar a vida ou atender alterações de projetos em elementos estruturais sem aumento significativo de sua massa.

Outra aplicação que Weitzenböck (2010) referencia é a de reparo utilizando retalhos de compósito em tubulações metálicas aplicando fibra de vidro envolvendo toda a circunferência da região danificada. Vendedores deste tipo de retalho para reparo

reportam que já realizaram mais de 100.000 reparos em 60 países diferentes e que tais reparos possuem capacidade de tolerar pressões de até 350 bar.

Outras aplicações na indústria que Weitzenböck (2010) lista são:

- Tanques de pressão.
- Turbinas marinhas de vento.
- Turbinas de maré.
- Barras de compósito para reforçar estruturas de concreto.
- Risers.

Tendo em mente que compósitos e metais são muito utilizados na indústria, é necessário o estudo da união entre eles pois esta facilitaria a fabricação de peças metálicas de geometrias mais complexas, passando a serem fabricadas por compósitos e então sendo unidas à estrutura metálica do produto final.

## 2.2 PROCESSO DE UNIÃO DAS PEÇAS EM COMPÓSITO E EM AÇO

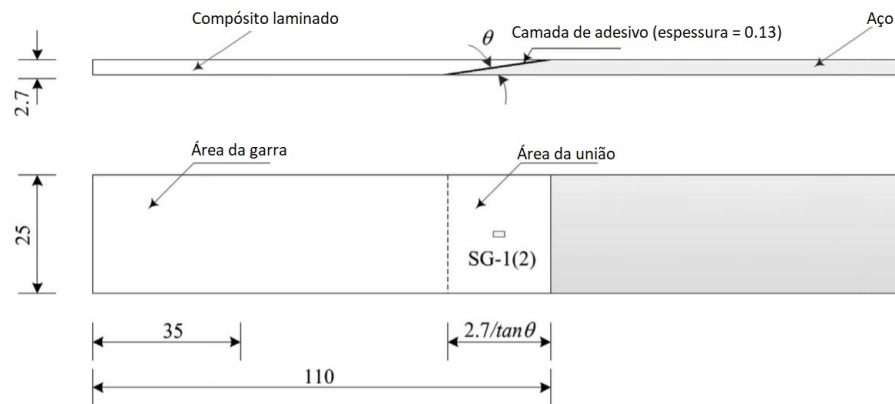
Para a união entre os materiais citados nos parágrafos anteriores, tipicamente um terceiro componente crítico pode ser necessário, o adesivo. Adesivo é a substância capaz de manter reunidas por adesão superficial peças diferentes (QUINI, 1998).

No trabalho de Zhang (2018) o adesivo utilizado foi um filme de adesivo epóxi categorizado como SY-14M com espessura nominal de 0,13 mm. Apesar do autor não citar exatamente por qual motivo adotou este tipo de adesivo, ele lista as características do adesivo como tendo 3,75 GPa de módulo de elasticidade e tensão de ruptura média de 65 MPa. Neste artigo o autor uniu os corpos com uma geometria chamada *Scarf* localizada na Figura 2.

O autor não cita nenhuma norma que seguiu ao dimensionar os corpos de prova, e tendo em mente que a fabricação de tal seria complexa para os tipos de adesivagem estudadas neste trabalho, esta configuração não foi utilizada. O autor decide fazer um ângulo entre os dois materiais para que a área de união aumente e o ângulo utilizado é listado como 2° a 5° graus. O autor não lista como tais ângulos foram fabricados. A fibra utilizada no trabalho de Zhang (2018) foi tecido de fibra de carbono impregnado com resina epóxi curada em um processo de autoclave e o aço utilizado foi o ASTM A36. O teste realizado foi ensaio de tração com a velocidade de avanço de 1,25 mm/min com uma célula de carga de 100 kN em uma máquina Instron. O



Figura 2 – União *Scarf* sugerida por Zhang (2018)



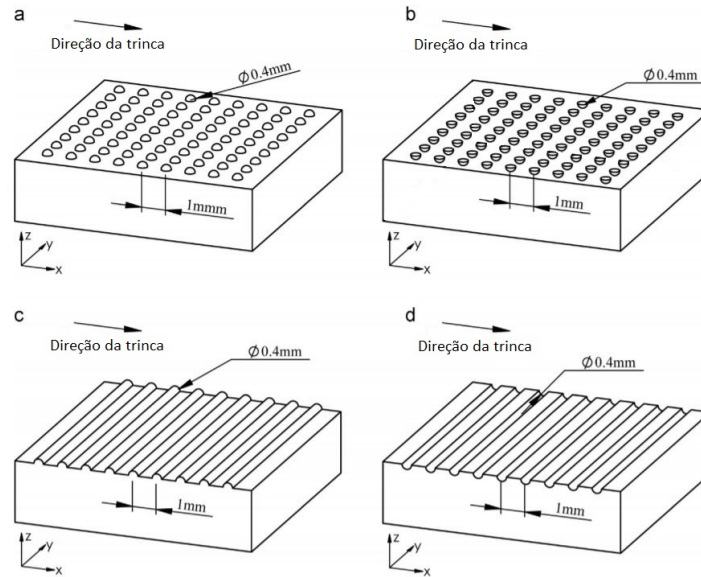
Fonte: Zhang (2018, p. 286, tradução nossa).

resultado obtido pelo autor mostra que este tipo de corpo de prova resistiu entre 45 MPa e 65 MPa.

Outro tipo de configuração complexa descartada para a confecção dos corpos de prova deste trabalho foi a proposta por Nguyen (2016), na qual o autor imprime peças de titânio, criando interferências nestas. O autor utilizou a própria resina epóxi como adesivo. As configurações sugeridas por Nguyen (2016) estão na Figura 3. O autor utilizou na fabricação dos corpos de prova um tecido de fibra de carbono impregnado a resina epóxi curado em processo de autoclave a 120 °C e 620 kPa por uma hora. O teste realizado foi o ensaio de resistência inter-laminar, onde Nguyen (2016) durante o processo de cura inseriu 55 mm de politetrafluoretileno para criação da pré-trinca necessária durante o ensaio de separação das lâminas. Para o teste realizado, Nguyen (2016) verificou que os corpos de prova apresentaram resistência a fratura média de 1,28 kJ/m<sup>2</sup> a 1,40 kJ/m<sup>2</sup>, sendo o mais fraco o corpo com cortes semiesféricos e o corpo de maior resistência e de cortes chanfrados retangulares.

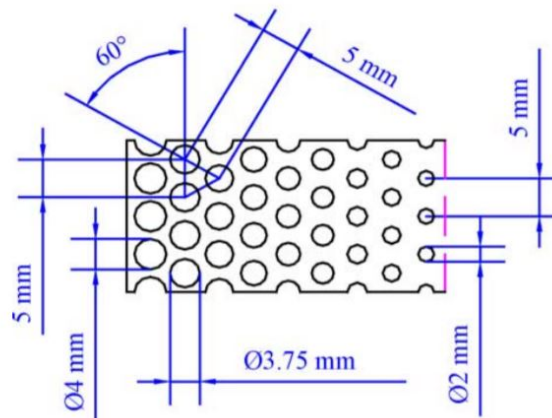
CAO (2018), por sua vez, estudou o comportamento de flambagem em peças de compósito e aço. Para fazer a união dos materiais foram produzidos dois distintos corpos de prova, sendo que o primeiro utilizou componentes mecânicos como parafusos para realizar a união e o segundo foi laminado pelo método de infusão diretamente em uma chapa metálica furada, conforme ilustrado na Figura 4. Os furos seguem um passo de 0,25 mm, sendo que a extremidade metálica inicia com 5 mm de diâmetro e

Figura 3 – Interferências nas peças metálicas sugeridas por Nguyen (2016) para união entre metais e compósitos



Fonte: Nguyen (2016, p. 83, tradução nossa).

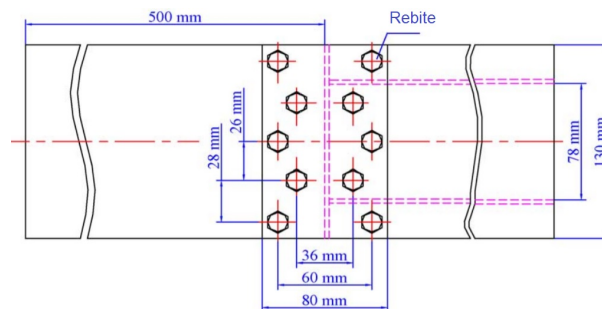
Figura 4 – Furos sugeridos por CAO (2018)



Fonte: CAO (2018, p. 6).

segue em direção ao centro da peça até atingir 2 mm de diâmetro totalizando 40 mm de furos. Os furos são distribuídos homogeneamente de forma que o centro de cada furo produz um triângulo equilátero com 5 mm de aresta. A largura total do corpo de prova desenvolvido por CAO (2018) tem 130 mm e o comprimento total é de um metro. Para comparação o autor também desenvolveu corpos de prova com as mesmas

Figura 5 – Rebitagem sugerida por CAO (2018)



Fonte: CAO (2018, p. 2, tradução nossa).

dimensões mas fez o uso de rebites AN4-6A como ancoradores mecânicos para desta forma comparar os resultados. O dimensionamento dos corpos rebitados é apresentado na Figura 5. Os resultados obtidos por CAO (2018) mostram que os corpos de prova furados tiveram uma carga média de falha de 30,9 kN com FACING BENDING STRESS de 252 MPa, enquanto os corpos de provas rebitados possuíram respectivamente 28,9 kN e 236 MPa, estimando assim que o ancoramento mecânico proporcionado pelos furos foi mais resistente que o uso dos rebites na condição de ensaio realizado.

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Como este estudo é novo, a norma para padronização dos corpos de provas é inexistente. Sendo assim, para a produção destes, pode-se analisar normas de testes correlatos.

Três normas são destacadamente interessantes para este trabalho, sendo elas:

- ASTM D3039/D3039M-14: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials (ASTM, 2015b), para ensaio de corpos de prova em compósitos;
- ASTM E8/E8M-15a: Standard test methods for tension testing of metallic materials (ASTM, 2015c), para ensaio de corpos de prova em metais; e
- ASTM D1002-10: Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (ASTM, 2015a), para ensaio de corpos de prova adesivados.

A primeira norma listada acima é utilizada para os testes de tração de materiais

compósitos. Nesta, ASTM (2015b) faz sugestões de como realizar o teste, calcular os resultados e reportá-los de forma a padronizar o ensaio de tração. Para validar os resultados, a norma solicita que sejam fabricados pelo menos cinco repetições de cada variação a ser testada. A geometria dos corpos de prova varia de acordo com a orientação das fibras e a Tabela 1 apresenta como os corpos devem ser dimensionados respeitando tais orientações. Também é recomendado que a velocidade padrão de 2 mm/min seja utilizada durante o ensaio de tração. A respeito dos resultados é solicitado que o tipo de garra seja alterada caso um grande número dos corpos de prova falhem na região das abas que são sujeitas a pré-tensões.

De forma geral, ASTM (2015b) menciona os corpos sejam produzidos respeitando a norma mas que um teste prévio seja realizado para verificar se o corpo de provas final atende ao requerimento de estudo, e caso o corpo não atenda as necessidades do estudo, é sugerido fazer alterações.

Tabela 1 – Recomendações de geometria para corpos de prova no ensaio de tração.

Orientação da fibra	Unidirecional 0°	Unidirecional 90°	Balanceda e simétrica	Randômica e descontínua
Largura [mm]	15	25	25	25
Comprimento total [mm]	250	175	250	250
Espessura [mm]	1,0	2,0	2,5	2,5
Comprimento da aba [mm]	56	25	lixa de esmeril	lixa de esmeril
Espessura da aba [mm]	1,5	1,5	—	—
Ângulo de chanfro da aba [°]	7 ou 90	90	—	—

Fonte: ASTM (2015b, p. 6, tradução nossa)

A segunda norma utilizada como referência foi a norma para testes de tração em materiais metálicos, nomeada E8/E8M-15a. Nesta, ASTM (2015c) propõe a padronização dos seguintes itens:

- Tipos de máquinas que podem ser utilizadas para o ensaio;

- Tipos de garras utilizadas durante o ensaio;
- Geometria dos corpos variando de acordo com o tipo de corpo de prova (circular, tubo, barra retangular, fio, chapa, placa, etc.);
- Posicionamento do corpo na máquina de ensaio;
- Métodos de corte aceitáveis para produção dos corpos de prova;
- Equipamento e método para obtenção de medidas dos corpos;
- Velocidade do teste;
- Tratamento de dados para obtenção da tensão normal, medida da deformação de fraturas;
- Como e quando substituir corpos de prova que tiveram falha inapropriada; e
- Como reportar os dados obtidos.

Quanto a padronização de geometria, os corpos de prova do tipo chapa foram utilizados como referência inicial na modelagem do corpo de prova para este trabalho. A geometria dos corpos de prova padrão do tipo chapa e placa e são apresentados no Anexo A.

A terceira e última norma eleita relevante para este estudo foi a D1002-10 utilizada para estimativa da tensão de cisalhamento de adesivo entre chapas metálicas para união sobreposta por meio de uma carga de tensão no ensaio de cisalhamento. A norma ASTM (2015a) padroniza parâmetros similares aos que as outras duas normas – citam, por exemplo, geometria; velocidade do teste; e também como estimar os valores calculados.

Duas características distintas a respeito desta norma são que também é padronizado o comprimento da união e que as extremidades da chapa de onde os corpos de prova são cortados deverem ser eliminadas conforme a Figura 6.

A norma reporta que o comprimento da sobreposição para a maioria dos metais de 1,62 mm de espessura seja de 12,7 mm. Para casos onde o metal utilizado seja diferente do proposto pela norma, a mesma sugere a Equação 1 para dimensionar a sobreposição entre metais de forma apropriada.

$$CS = \frac{t \cdot \sigma_{metal}}{\tau_{50\%}} \quad (1)$$

Onde:

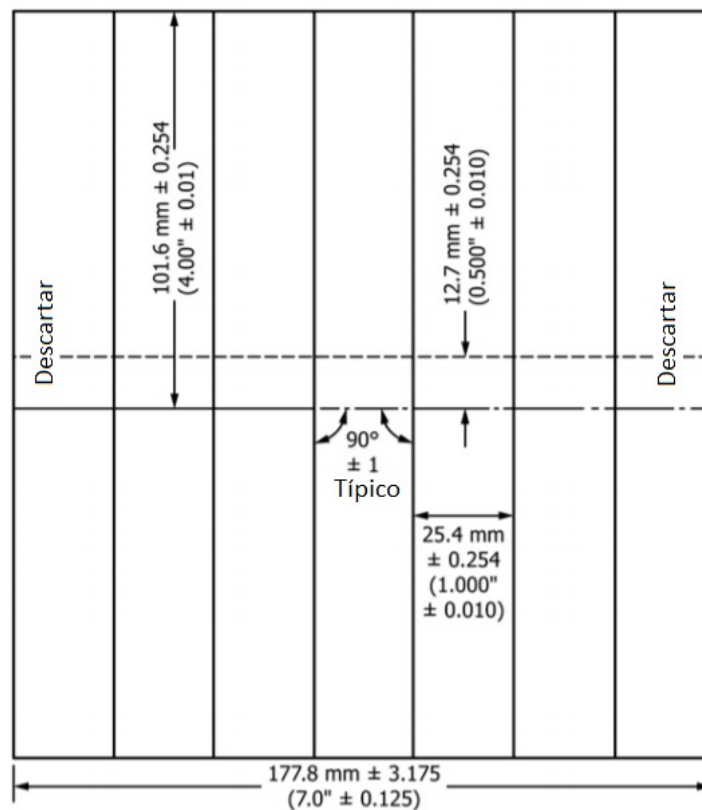
- $CS$  – Comprimento da sobreposição (união) das lâminas de metálicas;

- $t$  – Espessura das lâminas metálicas;
- $\sigma_{metal}$  – Tensão de escoamento do metal utilizado; e
- $\tau_{50\%}$  – 50% da tensão de cisalhamento média estimada do adesivo;

A mesma norma ainda recomenda que no mínimo 30 corpos de prova representando ao menos quatro diferentes tipos de juntas devem ser utilizados para o levantamento de dados; mas, caso uma análise estatística seja utilizada, o número de corpos de prova pode ser reduzido.

Para o ensaio, ainda é requerido o uso de aba de alinhamento para compensar a excentricidade que a sobreposição causa, e a velocidade de ensaio proposta é de 1.3 mm/min até a falha.

Figura 6 – Descarte das extremidades para chapa Adesivado



Fonte: ASTM (2015a, p. 3, tradução nossa)

### **3 PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO**

Neste capítulo apresenta-se a elaboração dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento, primeiramente faz-se a caracterização dos corpos de prova, para então fabricá-los. Posteriormente são avaliadas as dimensões e a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova. Por fim, apresenta-se um método de análise dos resultados.

#### **3.1 PROPOSTA DE CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA**

No início decidiu-se respeitar as normas dos corpos de acordo com seus respectivos materiais, sendo assim metade do corpo composto de metal seguiu a padronização do corpo de provas metálico (ASTM E8/E8M-15a) e a outra metade feita de compósito seguiu a norma referente ao corpo de provas compósitos (ASTM D3039/D3039M-14).

No entanto isso produziu um corpo de provas assimétrico, o que iria causar problemas durante o teste, visto que a assimetria faria com que a carga aplicada não fosse simétrica, fazendo assim com que o ponto de estudo fosse deslocado do centro do corpo de provas.

Para corrigir o problema da assimetria, a lâmina metálica foi igualada a lâmina de compósito, fazendo com que a simetria dos corpos fosse respeitada.

A ASTM D1002-10, por sua vez, foi utilizada de modo a respeitar a união entre materiais por meio de adesivagem. Esta indica que as extremidades da chapa a serem cortadas para obtenção dos corpos de prova onde o adesivo é aplicado devem ser eliminadas conforme a Figura 6.

A matriz plástica escolhida para a manufatura dos corpos de prova é a resina éster vinílica visto que as propriedades de limite de resistência a tração e módulo de elasticidade são muito similares a da resina epóxi, que é considerada a melhor resina para laminação devido a sua baixa densidade e propriedades superiores as poliésteres (GERR, 2000). No entanto, visto que o preço da resina epóxi é de até dez vezes maior que o da éster vinílica, a primeira foi inviabilizada. De acordo com Cray Valley (2004) as aplicações da resina utilizada neste trabalho incluem: construção naval, partes

industriais com resistência química alta, tubos, tanques, pisos e contêineres.

Para finalizar os itens necessários na fabricação do compósito, é necessário escolher o tipo de reforço que será utilizado. Uma vez que o preço da fibra de carbono é de dez a 20 vezes mais cara que a de vidro (PEREIRA, 2005), a última será a selecionada para a confecção dos corpos de prova. A forma comercial adotada foi da manta de fibra, pois esta possui excelente grau de trabalhabilidade, e por serem muito próximas de um material considerado quase isotrópico (TINÔ, 2014). Já a gramatura escolhida foi de 450 g/m<sup>2</sup> pois uma camada desta irá produzir uma chapa de 1,2 mm (GERR, 2000) o que é compatível com a espessura sugerida pelas normas e também do aço determinado.

O adesivo escolhido para o tipo Adesivado será o PLEXUS MA 832. Este foi escolhido pois, ao realizar uma entrevista informativa com a Azimut Yachts, é o adesivo hoje utilizado no mercado para a união entre metais e compósitos. De acordo com ITW PANA (2018) este adesivo é constituído por dois componentes que devem ser misturados em volume dez do Componente A para um do Componente B ou massa 8,86 para um das respectivas substâncias citadas pelo fabricante. Uma ficha técnica do adesivo foi fornecida e nesta se encontravam os quadros de composição de cada componente que foram traduzidos e estão nos Quadros 8 e 9 localizados no Anexo B.

O aço adotado para o experimento será o aço-carbono 1020 pois sua obtenção é fácil e quando comparado a outros seu preço é menor, além de ser comumente utilizado na indústria geral devido a sua boa forjabilidade e soldabilidade (LONGO, 2017).

No que se refere ao dimensionamento dos furos, foi levado em consideração o trabalho existente de CAO (2018). Os furos seguiram dentro do possível o trabalho; no entanto, como o corpo de prova produzido para os testes de flambagem eram maiores, não foi possível seguir exatamente o padrão de furos proposto pelo autor, e então os furos feitos neste trabalho respeitaram o passo de redução do diâmetro dos furos ao longo do comprimento e também a posição e espaçamento dos furos; no entanto, o intervalo de furos foi reduzido. Os furos sugeridos por CAO (2018) são apresentados na Figura 4 e os furos realizados neste trabalho estão na Figura 11.

Os corpos de prova foram todos dimensionados de forma padronizada e adaptando-se de normas existentes visto que não existe uma norma para este tipo de



projeto. As dimensões dos corpos bem como as referências de onde foram adaptadas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dimensões e referências.

Dimensão	Norma	Medida [mm]
CM	Adotado valor igual a CC	110,0
CC	Adaptado de D3039/D3039M – 14 (ASTM, 2015b)	110,0
EM	Adotado valor igual a ECI/ECM/ECF	1,2
ECI / ECM / ECF	Adaptado de D3039/D3039M – 14 (ASTM, 2015b)	1,2
L	Adaptado de D3039/D3039M – 14 (ASTM, 2015b)	15,0
CS	Adaptado de D1002 - 10 (ASTM, 2015a)	20,0
Furos	Adaptado de CAO (2018)	∅ 2,0 a 2,75, com passo de 0,25
EA	PLEXUS MA 832 (ITW PANA, 2015)	1,0

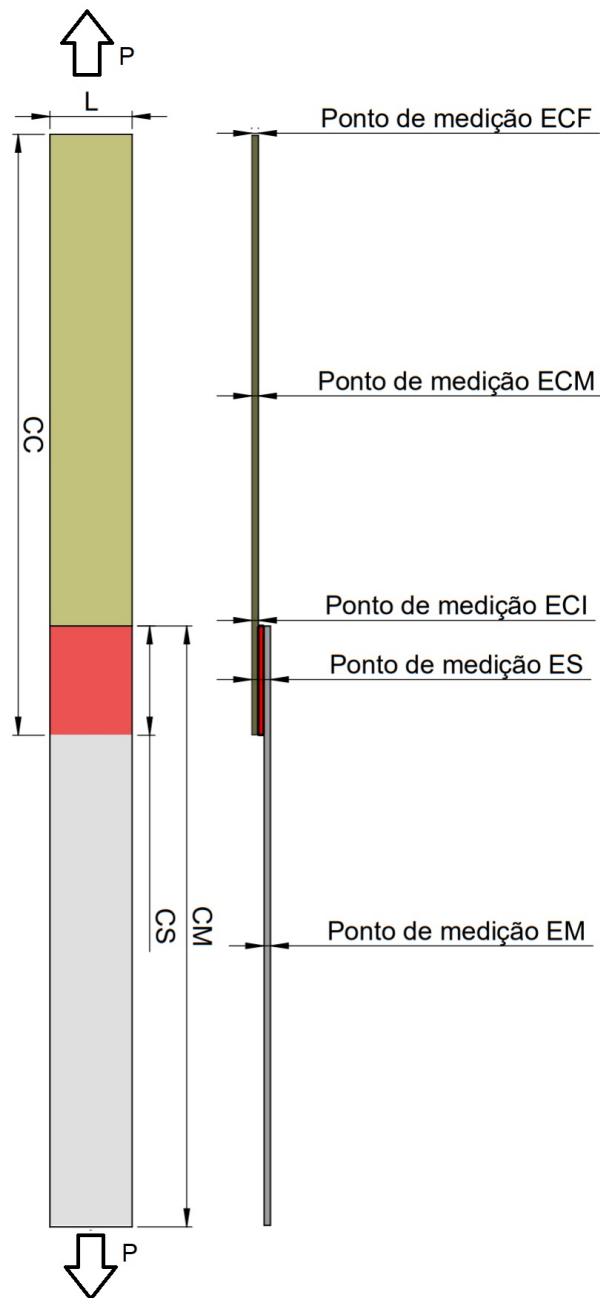
Fonte: Autoria nossa.

Sendo:

- CM – Comprimento da lâmina de metal;
- CC – Comprimento da lâmina de compósito;
- EM – Espessura da lâmina de metal;
- EA – Espessura do adesivo;
- ECI – Espessura no início da lâmina de compósito;
- ECM – Espessura no meio da lâmina de compósito;
- ECF – Espessura no fim da lâmina de compósito;
- L – Largura do corpo de prova; e
- CS – Comprimento da sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito.

A Figura 7 ilustra as dimensões da união modelada. Para melhor visualização, os templates do final do projeto dos corpos de prova são apresentados nas Figuras 10 e 11.

Figura 7 – Caracterização da união das lâminas



Fonte: Autoria nossa.

### 3.2 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para a laminação serão utilizadas no total três chapas metálicas. Duas destas chapas são aplicadas diretamente ao processo de laminação e a chapa restante é utilizada na adesivagem após a completa cura do compósito. Uma das chapas utilizada no processo de laminação é também furada previamente ao processo de fabricação

do laminado para que a resina possa penetrar o metal de forma a criar pontos de ancoragem mecânica os quais tendem a melhorar a fixação dos dois materiais.

O processo de laminação manual utilizado na manufatura da chapa Colagem Direta ocorrerá em 15 etapas listadas no Apêndice A. Primeiramente a superfície limpa que será utilizada para o processo deve ser tratada com cera desmoldante para auxiliar na remoção da peça após sua cura. Com a superfície pronta, uma camada de manta de fibra de vidro é posicionada usando o template como referência para que o seu tamanho e posicionamento estejam de acordo com o planejado. Resina, iniciador e acelerador são misturados a uma quantidade adequada para a laminação.

Neste trabalho foi utilizada uma relação de 70% de resina para 30% de matriz e dessa forma a quantidade calculada de resina para laminar 19g de fibra apresentada na Figura 8, foi de aproximadamente 43,7g.

Figura 8 – Balança utilizada para medição da massa de fibra



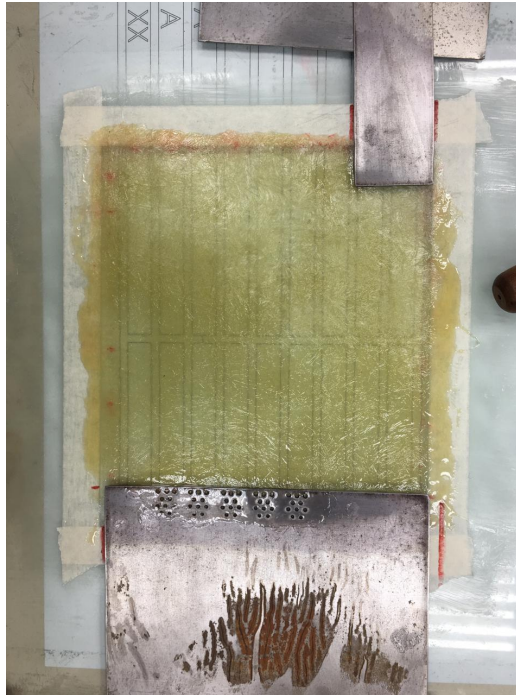
Fonte: Autoria nossa.

Como as quantidades adotadas de iniciador e acelerador são respectivamente 1% e 0,5%, a quantidade de resina a ser misturada foi aproximada para 50g fazendo com que fosse necessário 1ml de iniciador e 0,25ml de acelerador. Ao final do processo o recipiente utilizado para a mistura dos componentes foi pesado novamente para medir a quantidade de resina que sobrou neste, indicando 5g. Isto significa que a quantidade utilizada na laminação foi de aproximadamente 45g.

Para a próxima etapa as chapas metálicas são então posicionadas adequadamente, garantindo a sobreposição necessária para a união. O processo

da última etapa pode ser vista na Figura 9. Depois de garantir que a resina tenha sido distribuída homogeneamente e de que a maioria se não todas as bolhas tenham sido removidas a peça é então deixada de lado para que o processo de cura possa ser realizado corretamente sem interrupções.

Figura 9 – Final do processo de laminação manual



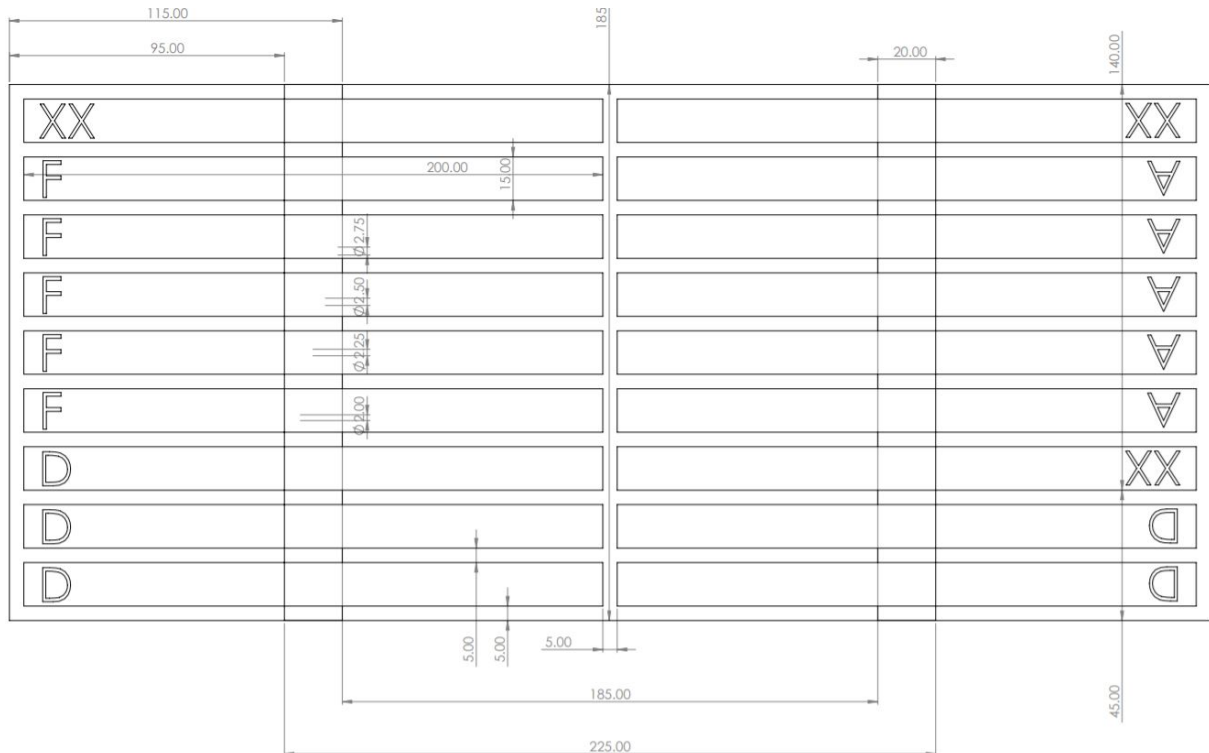
Fonte: Autoria nossa.

Com a chapa produzida, foi realizada a adesivagem da chapa metálica restante. Para tal, o metal é limpo com o primer fornecido pela empresa Azimut Yatchs, em seguida é feita a mistura homogênea dos componentes nas proporções de peso 1 para 8,86. Com a mistura pronta, o fabricante recomenda que a camada de adesivo idealmente deva ter entre 0,3 mm e 12 mm, para este trabalho não foi possível padronizar a espessura da camada de adesivo; no entanto, o filme aplicado possui por volta de 1 mm. Quando aplicado ao compósito o adesivo decompõe a resina para auxiliar na fixação, fazendo com que a manipulação e retrabalho sejam extremamente difíceis. Após 48 horas o adesivo ainda não estava completamente curado, então as chapas foram deixadas de lado para aguardar a cura completa antes do corte. Após 5 dias do início do processo de adesivagem, notou-se que as chapas estavam prontas para o corte.

O corte dos corpos de prova foi feito por meio de jato d'água. Os templates

fornecidos para o corte foram produzidos utilizando a ferramenta SolidWorks e podem ser visualizados nas Figuras 10 e 11. Os corpos marcados com as letras “XX” devem ser eliminados de forma a respeitar ao estabelecido na norma ASTM (2015a).

Figura 10 – Template com dimensões gerais para auxílio do corte a jato d’água



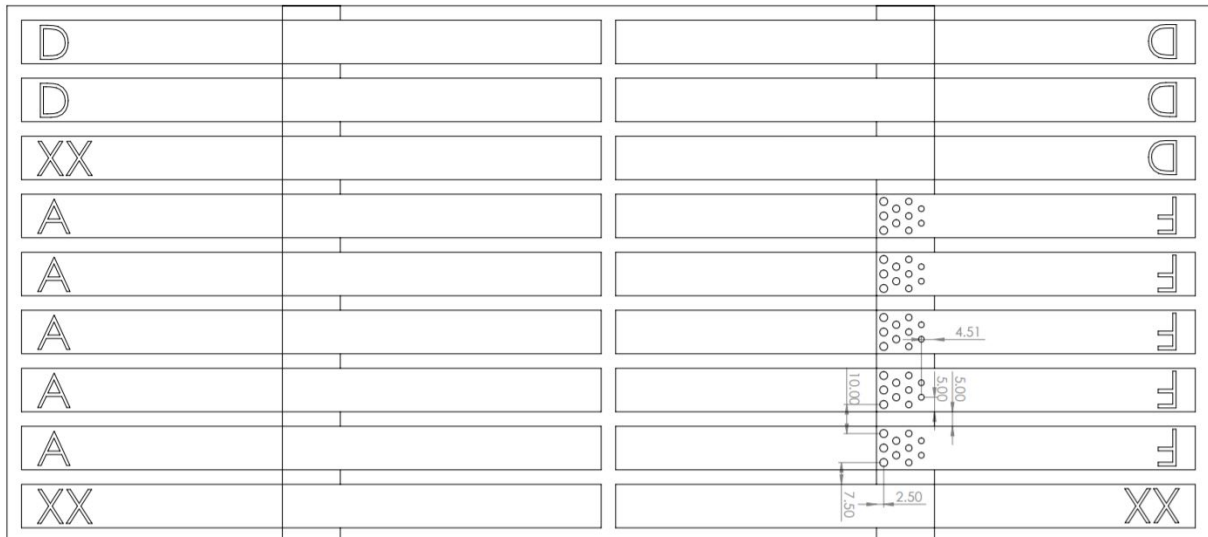
Fonte: Autoria nossa.

O principal fator a ser analisado neste estudo será a adesão entre o compósito e o metal, seja por meio do adesivo, da resina atuando como adesivo ou pela ancoragem mecânica de resina criada no metal furado.

Assim como a maioria de trabalhos experimentais, é necessário identificar e controlar os ruídos que podem afetar os resultados obtidos – que, neste trabalho, a maior parte dos ruídos identificados se encontra no processo de laminação. A seguir são apresentados os ruídos identificados e como foram mitigados.

- **Contaminação entre componentes utilizados no processo de laminação:** Três pares diferentes de luva foram usados de forma que não houvesse contaminação entre componentes. A Figura 12 mostra os três pares identificados com R para resina, F para fibra e D para desmoldante.
- **Proporção entre quantidade de resina, acelerador e catalisador:** Todos corpos de prova da laminação manual foram produzidos com a mesma

Figura 11 – Template com posições e dimensões do posicionamento dos furos para auxílio do corte a jato d'água



Fonte: Autoria nossa.

Figura 12 – Três pares de luvas utilizados para evitar contaminação



Fonte: Autoria nossa.

mistura de resina.

- **Umidade do ar:** A leitura da umidade do ar foi realizada com uma estação

de mesa que foi testada em diferentes dias para garantir que esta estava funcionando apropriadamente. Para garantir que o laboratório estivesse o menos úmido possível, foi utilizado o ar condicionado na função desumidificar por 3 horas anteriores ao início do processo de laminação.

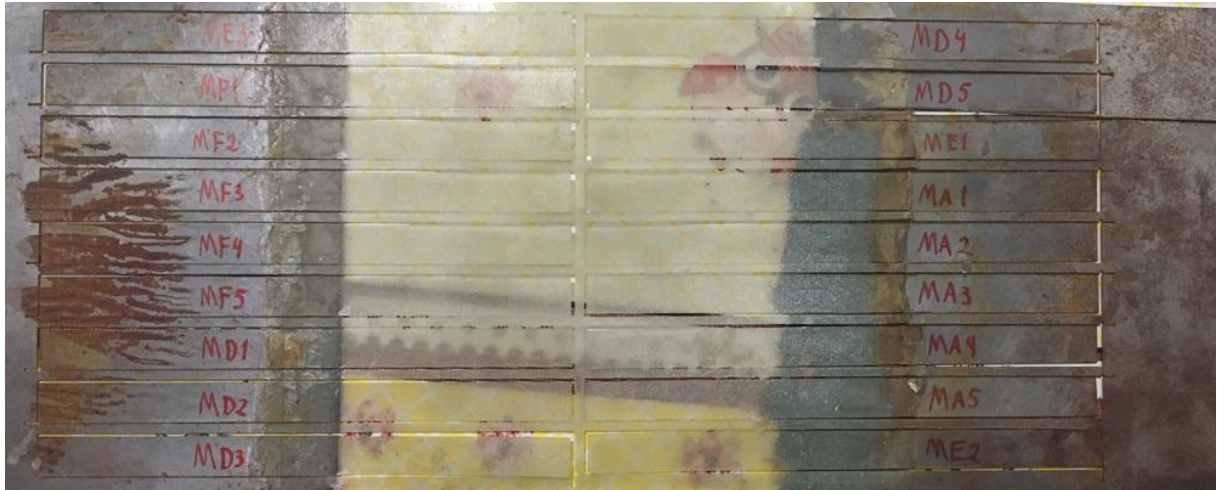
- **Distribuição da fibra e gramatura:** Este é um dos ruídos que não existe um método simples para controle. Seria necessário levar a manta a um laboratório e garantir que as fibras estivessem posicionadas da mesma exata forma por todo o material. Visto que isto é impraticável, este ruído não foi controlado.
- **Proporção entre os componentes do adesivo PLEXUS:** A mesma mistura do adesivo foi usada para a adesivagem de todos corpos.
- **Espessura do filme de adesivo aplicado:** Apesar de ter respeitado o mínimo que ITW PANA (2015) requer, foi muito complicado controlar a mesma espessura de filme para toda a chapa. Quando o adesivo entra em contato com a resina, ele ataca o compósito deixando-o oleoso, fazendo com que o retrabalho para padronização na espessura do filme de adesivo fosse difícil de controlar.
- **Qualidade da laminação:** Principalmente da laminação manual, a utilização de um rolo anti-bolhas foi aplicado de forma a tentar retirar o máximo possível das bolhas de dentro da chapa.
- **Padronização dos tamanhos de grão do metal:** Impraticável de ser controlada. No entanto, como o objeto de estudo é a união, e também é onde a prevista falha ocorrerá, este ruído identificado não é de importância.
- **Defeitos na estrutura cristalina do metal:** Assim como no item acima.

### 3.3 AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Com os corpos de prova cortados, cada um foi marcado com uma sigla referenciando qual o tipo de união juntamente de um número para que uma lista de caracterização dos corpos fosse produzida (a lista encontra-se no Apêndice 5). Também foi necessário identificar a posição original de cada corpo antes do corte já que o responsável pelo corte misturou todos corpos de prova. Por sorte, a identificação dos corpos não foi difícil. As marcações juntamente das posições originais podem ser

vistas na Figura 13.

Figura 13 – Marcações e posições originais dos corpos de prova



Fonte: Autoria nossa.

Para quantificar o peso de cada corpo foi utilizada uma balança *Electronic Kitchen scale* SF-400 que, segundo seu manual, possui capacidade de 1000g e uma resolução de 1g – seu erro de medição não é listado. A balança é idêntica a usada para medir a quantidade de resina ilustrada na Figura 8.

Para as medidas dos corpos, várias medidas foram feitas utilizando um Paquímetro Aço Inox Universal Digital 150 mm da marca MTX com resolução de 0,01 mm. Como o instrumento estava sem seu manual, Ferramentas Kennedy (2019) informa que o paquímetro possui um erro de 0,02 mm medindo 100 mm e 0,03 mm medindo de 100 a 150 mm.

Propõe-se que as seguintes medidas sejam avaliadas em cada corpo de prova:

- CM – Comprimento da lâmina de metal;
- CC – Comprimento da lâmina de compósito;
- EM – Espessura da lâmina de metal;
- ES – Espessura da sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito;
- ECI – Espessura no início da lâmina de compósito;
- ECM – Espessura no meio da lâmina de compósito;
- ECF – Espessura no fim da lâmina de compósito;
- L – Largura do corpo de prova; e
- CS – Comprimento da sobreposição (união) das lâminas de metal e



compósito.

O ensaio para avaliar a resistência dos corpos de prova é o teste de cisalhamento. A velocidade de avanço ( $V_a$ ) utilizada pela EMIC DL-10000 foi de 1.3 mm/min sugerida por ASTM (2015a), onde dois metais são unidos por um adesivo. Esta máquina possui um limite de carga de 10.000 kgf; no entanto, uma célula de carga de 5.000 kgf (aproximadamente 49 kN) foi utilizada pois seria o suficiente e os resultados mais precisos. A máquina utilizada no ensaio de cisalhamento encontra-se na Figura 14. O tipo de garra utilizada para fixação dos corpos de prova é a autotravante por efeito cunha e seu material é metálico.

Figura 14 – Máquina universal de ensaio mecânicos utilizada



Fonte: Autoria nossa.

### 3.4 MÉTODO DE ANÁLISE DOS DADOS

Assim, os experimentos objetivam analisar se existe diferença de desempenho entre os corpos de prova com união por laminação direta na chapa metal (Colagem Direta), com adição de adesivo (Adesivado) e por laminação direta na chapa de metal

com furos (Metal Furado).

Para se fazer esta análise, pode-se utilizar uma Análise da Variância (ANOVA) de um fator com  $n$  repetições, sendo que cada uma das formas de união é um tratamento diferente; portanto, neste trabalho, o fator é o tipo de união e são abordados 3 tratamentos com 5 repetições cada.

O Quadro 2 apresenta o delineamento de um experimento com  $k$  tratamentos e  $n$  repetições, totalizando  $k \cdot n$  observações.

Quadro 2 – Delineamento de um experimento com  $k$  tratamentos e  $n$  repetições

Tratamento 1	Tratamento 2	...	Tratamento k
$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1k}$
$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2k}$
...	...	...	...
$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nk}$

Fonte: Autoria nossa.

Em um experimento como o estudado neste trabalho é razoável considerar que cada uma das observações apresentadas no Quadro 2 sejam mutuamente independentes e aleatórias.

Esta é uma das considerações necessárias para se aplicar a ANOVA de um fator. A seguir são apresentadas os requisitos para realizar a ANOVA:

- Os dados das populações aderem a uma distribuição Normal;
- As variâncias dos  $k$  tratamentos são iguais;
- Os dados  $x_{nk}$  são aleatórios e mutuamente independentes; e
- O número de repetições em cada tratamento deve ser o mesmo, no caso, as  $n$  repetições.

O Quadro 3 apresenta a modelagem matemática para a análise de variância.

Sendo:

- $k$  – Número de tratamentos;
- $n$  – Número de repetições em cada tratamento;
- $x_{ij}$  – Valor observado de cada ensaio;
- $\bar{x}_j$  – Estimador da média com base na amostra de cada tratamento;

Quadro 3 – Modelo de ANOVA de um fator com com  $k$  tratamentos e  $n$  repetições

Fonte de variação	SQ	$gl$	QM	$f$
Entre	$SQ_E = \sum_{j=1}^k n(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2$	$k - 1$	$\frac{SQ_E}{gl_E}$	$\frac{QM_E}{QM_D}$
Dentro	$SQ_D = SQ_T - SQ_E$	$k(n - 1)$	$\frac{SQ_D}{gl_D}$	
Total	$SQ_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2$	$k \cdot n - 1$		

Fonte: Adaptado de Montgomery (2003)

- $\bar{\bar{x}}$  – Estimador da média com base em todos os dados observados;
- $SQ$  – Soma dos quadrados;
- $gl$  – Grau de liberdade; e
- $QM$  – Quadrado médio.

Pode-se, então, avaliar as seguintes hipóteses em uma ANOVA de um fator:

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$ , isto é, os tratamentos em média são iguais; e
- $H_1 : \mu_j \neq \mu$ , isto é, pelo menos uma média difere das outras.

Assim, se  $H_0$  for verdadeiro, espera-se pequenos valores para a razão  $f$  e, caso a razão  $f$  supere o valor considerado crítico (adotando uma probabilidade máxima de erro<sup>1</sup> de 5%), pode-se descartar a hipótese nula  $H_0$  e assumir a hipótese alternativa  $H_1$ .

Como, neste trabalho, são avaliados 3 tratamentos ( $k = 3$ ) com 5 repetições ( $n = 5$ ), a distribuição F terá 2 graus de liberdade no numerador ( $k - 1$ ) e 12 graus de liberdade no denominador ( $k(n - 1)$ ), resultando em um valor crítico de  $f$  de 3,89 (MONTGOMERY, 2003).

Por fim, pode-se calcular, pela Equação 2, a diferença mínima significativa (DMS) para que se considere que existe diferença entre tratamentos – no caso de se rejeitar  $H_0$  (MONTGOMERY, 2003, p. 280).

$$DMS = t_{\alpha/2, k(n-1)} \sqrt{\frac{2 \cdot QM_E}{n}} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Chamado de nível de significância  $\alpha$ .

Onde  $t_{\alpha/2, k(n-1)}$  é o valor da estatística  $t$  de Student para  $k(n - 1)$  graus de liberdade e uma probabilidade igual a metade do nível de significância<sup>2</sup>,  $\alpha/2$ , pois o teste é bilateral – uma vez que não se sabe qual média é maior que a outra.

Na condição deste trabalho, no qual existem três tratamentos ( $k = 3$ ) com cinco repetições cada ( $n = 5$ ) e foi adotado um nível de significância de cinco por cento ( $\alpha = 5\%$ ), a estatística  $t_{2,5\%; 12}$  é igual a 2,179 (MONTGOMERY, 2003).

---

<sup>2</sup> Lembrando que o nível significância ( $\alpha$ ) é a probabilidade de se rejeitar  $H_0$ , sendo  $H_0$  verdadeira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresenta-se o resultado da avaliação dos corpos de prova elaborados bem como a análise dos dados obtidos.

Por fim, apresenta-se algumas considerações sobre o procedimento para elaboração dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.

### 4.1 RESULTADO DA AVALIAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As dimensões e pesos avaliados conforme descrito no capítulo anterior estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos corpos de prova laminados manualmente.

CP	Massa [g]	CM [mm]	CC [mm]	EM [mm]	EU [mm]	ECI [mm]	ECM [mm]	ECF [mm]	L [mm]	CS [mm]
MF1	15,00	113,42	113,99	1,15	2,56	0,75	0,77	0,94	15,05	27,12
MF2	15,00	113,01	109,53	1,13	2,65	0,79	0,81	1,17	14,88	25,31
MF3	15,00	113,02	109,16	1,11	2,63	0,91	0,91	1,16	15,05	22,31
MF4	15,00	113,01	109,46	1,09	2,61	0,94	0,86	1,13	15,14	23,23
MF5	15,00	112,84	109,37	1,09	2,62	0,92	0,89	0,90	15,11	22,67
MD1	15,00	112,87	108,97	1,11	2,38	0,88	1,13	1,05	14,94	21,36
MD2	16,00	112,70	113,61	1,11	2,32	0,86	1,02	1,08	15,10	21,88
MD3	16,00	112,50	109,61	1,10	1,96	0,89	0,90	0,89	15,08	25,45
MD4	15,00	111,12	114,22	1,09	2,09	1,16	0,94	0,92	15,11	23,60
MD5	15,00	110,99	113,84	1,12	2,01	1,20	0,90	1,07	15,03	24,69
MA1	16,00	112,19	116,26	1,12	2,64	0,98	1,11	1,13	15,07	23,37
MA2	16,00	113,90	120,63	1,11	2,84	0,96	0,95	1,17	15,12	26,44
MA3	17,00	114,79	114,98	1,11	2,83	0,82	0,96	0,88	15,14	26,56
MA4	16,00	115,47	116,03	1,12	2,85	0,76	0,88	1,00	15,32	31,69
MA5	17,00	116,26	121,94	1,09	3,02	1,00	0,91	0,91	15,19	37,79

Fonte: Autoria nossa.

Sendo:

- MF<sub>x</sub> – Corpos de prova “METAL FURADOS”;
- MD<sub>x</sub> – Corpos de prova com “COLAGEM DIRETA”;
- MA<sub>x</sub> – Corpos de prova “ADESIVADOS”;
- CM – Comprimento da lâmina de metal;

- CC – Comprimento da lâmina de compósito;
- EM – Espessura da lâmina de metal;
- ES – Espessura da sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito;
- ECI – Espessura no início da lâmina de compósito;
- ECM – Espessura no meio da lâmina de compósito;
- ECF – Espessura no fim da lâmina de compósito;
- L – Largura do corpo de prova; e
- CS – Comprimento de sobreposição (união) das lâminas de metal e compósito.

Uma vez caracterizados, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de cisalhamento. No entanto, parte dos corpos de prova falharam na lâmina de compósito antes de falharem na união. Com isso, a análise entre os tipos de união ficou bastante prejudicada.

A Tabela 3 apresenta as tensões no momento da falha dos corpos de prova.

Tabela 3 – Tensões nos corpos de prova na falha.

CP	Local de Falha	Força Máxima [N]	Área da seção transversal da lâmina [mm <sup>2</sup> ]	Área da seção da união [mm <sup>2</sup> ]	Tensão Cisalhante [MPa]	Tensão Normal [MPa]
MD1	União	802,43	13,15	319,12	2,51	*
MD2	União	952,12	12,99	330,39	2,88	*
MD3	Compósito	866,83	13,42	383,79	*	64,59
MD4	Compósito	732,80	13,90	356,60	*	52,71
MD5	Compósito	856,39	13,53	371,09	*	63,31
MA1	Compósito	872,05	14,77	352,19	*	59,05
MA2	Compósito	628,37	14,36	399,77	*	43,75
MA3	Compósito	899,90	12,41	402,12	*	72,49
MA4	Compósito	670,14	11,64	485,49	*	57,56
MA5	Compósito	1171,40	13,82	574,03	*	84,74
MF1	União	520,45	11,29	408,16	1,28	*
MF2	União	743,25	11,76	376,61	1,97	*
MF3	União	931,23	13,70	335,77	2,77	*
MF4	União	706,69	13,02	351,70	2,01	*
MF5	*	0,00	13,45	342,54	0,00	0,00

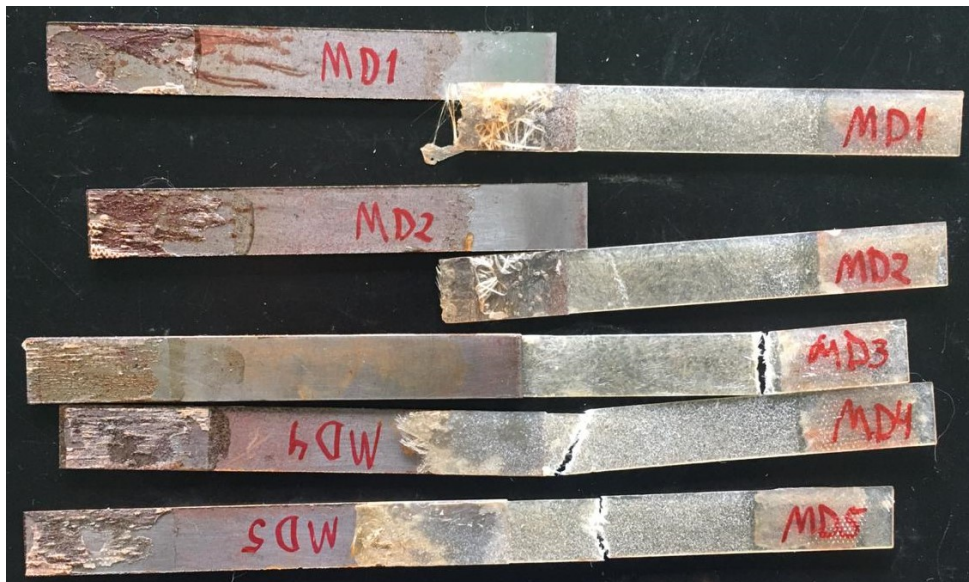
Fonte: Autoria nossa.

No total, dos cinco corpos de prova com “colagem direta”, apenas dois falharam na união; dos corpos de prova “metal furado”, quatro falharam na união; e nos corpos de prova “adesivado”, nenhum.

Note-se que, quando a falha ocorreu na união, a falha é oriunda da tensão cisalhante. Já quando ocorre na lâmina de compósito, esta é oriunda da tensão normal.

As Figuras 15, 16 e 17 mostram os corpos de prova após o ensaio de cisalhamento, já os Quadros 4, 5 e 6 apresentam uma análise do local da falha e possíveis motivos que justificam tais falhas.

Figura 15 – Corpos de prova MD pós teste



Fonte: Autoria nossa.

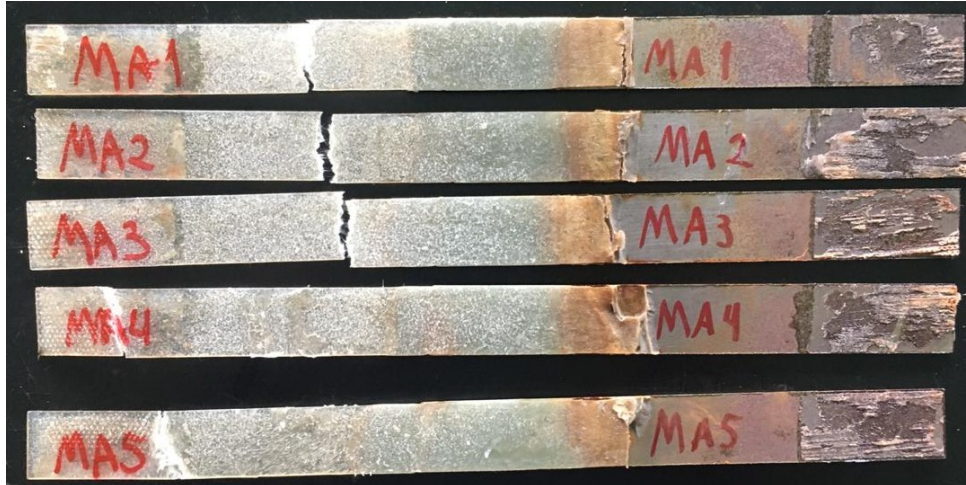
Quadro 4 – Análise de falhas dos corpos de prova MD

CP	Local da Falha	Possíveis motivos
MD1	União	Adesão da resina e metal incompleta
MD2	União	Adesão da resina e metal incompleta
MD3	Próximo a garra	Pré-tensões devido ao esmagamento da garra
MD4	Compósito próximo a união	Região mais frágil do compósito
MD5	Centro do compósito	Ponto de maior aplicação de força no laminado

Fonte: Autoria nossa.

Dos corpos de prova MD apenas MD1 e MD2 falharam na união, os outros sofreram ruptura do compósito em posições diferentes.

Figura 16 – Corpos de prova MA pós teste



Fonte: Autoria nossa.

Quadro 5 – Análise de falhas dos corpos de prova MA

CP	Local da Falha	Possíveis motivos
MA1	Centro do compósito	Ponto de maior aplicação de força no laminado
MA2	Centro do compósito	Ponto de maior aplicação de força no laminado
MA3	Centro do compósito	Ponto de maior aplicação de força no laminado
MA4	Garra	Pré-tensões devido ao esmagamento da garra
MA5	Garra	Pré-tensões devido ao esmagamento da garra

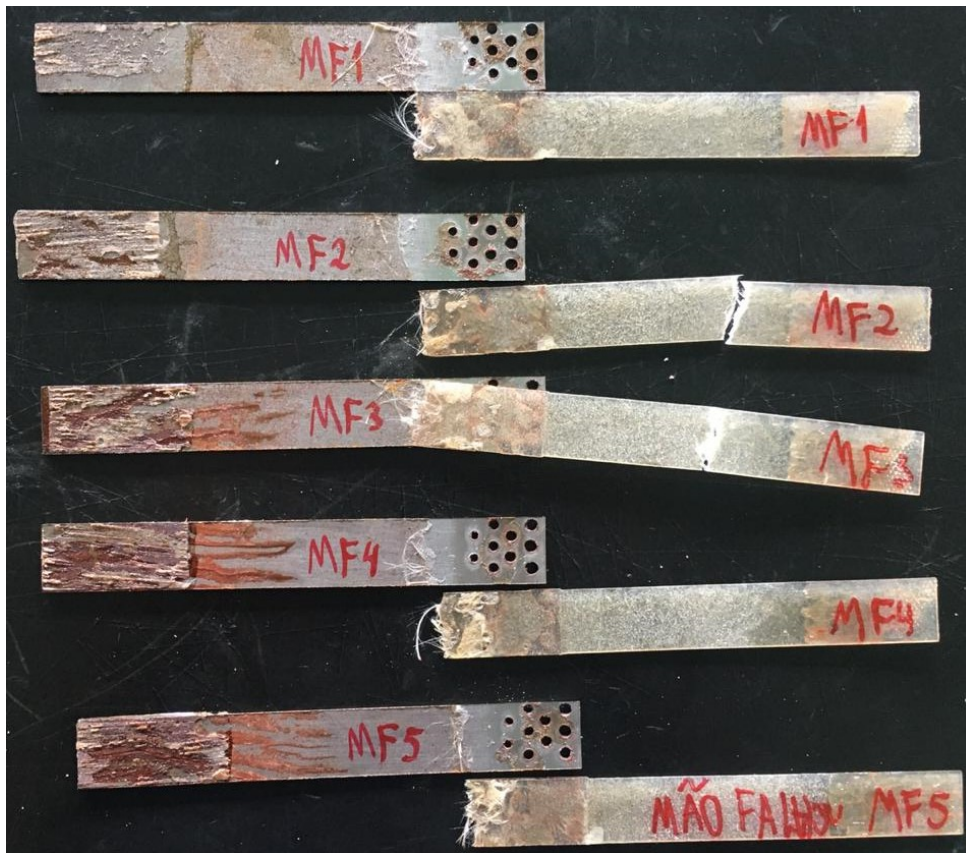
Fonte: Autoria nossa.

Dos corpos de prova MA, nenhum falhou na união, o que foi um resultado indesejado e não esperado. Todas falhas ocorridas nos corpos de prova MA foram no compósito, seja no centro deste ou na garra.

A maioria dos corpos MF sofreram falha na união, com apenas o corpo MF5 que apresentava tão pouca adesão que sua falha ocorreu antes de ser posicionado para o ensaio. O corpo de prova MF3 falhou com uma mistura dos dois locais pois quando a união estava próxima de falhar o corpo rompeu no compósito.



Figura 17 – Corpos de prova MF pós teste



Fonte: Autoria nossa.

Quadro 6 – Análise de falhas dos corpos de prova MF

CP	Local da Falha	Possíveis motivos
MF1	União	Adesão da resina e metal incompleta
MF2	União e centro do compósito	Adesão da resina e metal incompleta, ponto de maior aplicação de força no laminado
MF3	União e centro do compósito	Adesão da resina e metal incompleta, ponto de maior aplicação de força no laminado
MF4	União	Adesão da resina e metal incompleta
MF5	*	*

Fonte: Autoria nossa.

## 4.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Uma vez que os corpos de prova adesivados (MA) sofreram todas falhas no compósito e não na união, só é possível comparar as tensões de cisalhamento entre os corpos de prova com metal furado (MF) e com colagem direta (MD).

A Tabela 4 apresenta as tensões dos corpos de prova que falharam por cisalhamento, bem como o número de elementos em cada amostra ( $n$ ) e os estimadores das médias ( $\bar{x}$ ) e das variâncias ( $s^2$ ).

Tabela 4 – Tensões na união dos corpos de prova que falharam por cisalhamento, número de corpos, estimadores das médias e das variâncias.

MD	MF		
2,51	1,28	$n_{MD} = 2$	$n_{MF} = 4$
2,88	1,97	$\bar{x}_{MD} = 2,70$	$\bar{x}_{MF} = 2,01$
	2,77	$s_{MD}^2 = 0,0675$	$s_{MF}^2 = 0,3747$
	2,01		

Fonte: Autoria nossa.

Visto que a análise está restrita à duas amostras, não é possível aplicar a ANOVA apresentada no Capítulo 3 – sendo mais interessante utilizar uma análise pelo Teste  $t$ , de Student, para duas amostras independentes.

Para tanto, pode-se analisar as seguintes hipóteses.

- $H_0 : \mu_{MD} = \mu_{MF}$ , isto é, os tratamentos em média são iguais; e
- $H_1 : \mu_{MD} \neq \mu_{MF}$ , isto é, existe diferença entre os tratamentos.

Assim como na ANOVA, no Teste  $t$  para duas amostras independentes também são feitas algumas considerações a saber:

- Os dados das populações aderem a uma distribuição Normal;
- As variâncias dos dois tratamentos são iguais; e
- As observações são aleatórias e mutuamente independentes.

No entanto, não existe a necessidade do número de repetições em cada tratamento de ser o mesmo.

A Equação 3 apresenta a estatística  $t$  para duas amostras com diferentes número de elementos, com  $n_{MD} + n_{MF} - 2$  graus de liberdade ( $gl$ ).

$$t = \frac{\bar{x}_{MD} - \bar{x}_{MF}}{\sqrt{\frac{s_{MD}^2}{n_{MD}} + \frac{s_{MF}^2}{n_{MF}}}} \quad (3)$$

Para os valores apresentados na Tabela 4 e utilizando a Equação 3 é possível obter a probabilidade de rejeitar  $H_0$  sendo a hipótese nula verdadeira (*Valor p*).

No caso,  $t = 1,9339$  e  $gl = 4$ , obtém-se um *Valor p* = 12,52%.

Assim, aceita-se a hipótese de que as médias podem ser iguais ( $H_0$ ), pois a probabilidade de errar se a hipótese nula for rejeitada é muito alta, 12,5%.

Isso não implica em dizer que não existe diferença, em média, entre as uniões com colagem direta (MD) e com metal furado (MF); mas, que as amostras realizadas não foram capazes de evidenciar uma eventual diferença.

Outra análise possível de ser realizada é verificar se existe diferença na média das cargas aplicada aos corpos de prova que falharam por cisalhamento na união e que falharam por ruptura da lâmina de compósito.

Para avaliar se existe diferença significativa também é possível fazer um Teste  $t$  comparando os valores de carga, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cargas que resultaram na falha de corpos de prova (CPs) por cisalhamento na união e por ruptura na lâmina de compósito.

Carga dos CPs com falha na união [N]	Carga dos CPs com falha no compósito [N]		
802,43	866,83	$n_U = 6$	$n_C = 8$
952,12	732,80	$\bar{x}_U = 776,03$	$\bar{x}_C = 837,24$
520,45	856,39	$s_U^2 = 25399,08$	$s_C^2 = 28642,86$
743,25	872,05		
931,23	628,37		
706,69	899,90		
	670,14		
	1171,40		

Fonte: Autoria nossa.

Mais uma vez as hipóteses de análise são:

- $H_0 : \mu_U = \mu_C$ , isto é, os tratamentos em média são iguais; e
- $H_1 : \mu_U \neq \mu_C$ , isto é, existe diferença entre os tratamentos.

Pode-se, então, calcular o valor da estatística  $t$  utilizando a Equação 3 os valores apresentados na Tabela 5, resultando em  $t = 0,6924$  com  $gl = 12$  e, portanto, um *Valor p* = 50,18%.

Assim, aceita-se a hipótese de que as médias podem ser iguais ( $H_0$ ), pois a probabilidade de errar se a hipótese nula for rejeitada é superior a 50%.

Isso indica que nos corpos de prova com adesivagem direta (MD), por exemplo, possivelmente as falhas aconteceram de forma aleatória na união e na lâmina de compósito.

Já nos corpos de prova com adição de adesivo, é possível especular que a adesão nas lâminas de metal e de compósito melhorou, fazendo com que a tensão de cisalhamento necessária para a falha da união exigisse uma carga superior a necessária para romper a lâmina de compósito. Desta forma, todos os corpos de prova falharam por ruptura das lâminas.

#### 4.3 DISCUSSÃO SOBRE O PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO

Analisando os resultados dos experimentos constatou-se que houve problemas relacionados ao projeto dos corpos de prova, a sua laminação e ao ensaio de cisalhamento.

Quanto ao projeto do corpo de prova dois grandes problemas foram identificados, sendo eles: a espessura dos corpos de prova e a opção pela manta de fibra de vidro para a construção do corpo de prova.

As espessuras finais dos corpos de prova foram menores que a projetada (a média das medidas apresentadas na Tabela 2 é de 0,96 mm, contra 1,2 mm projetada). No entanto, mesmo a espessura projetada possivelmente ainda é pequena demais para garantir que as falhas ocorressem todas na união – uma vez que todas falhas nos corpos de prova adesivados (MA) ocorreram no compósito e as falhas nos outros dois tipos de corpos de prova ocorreram de forma aleatória, ora na lâmina de compósito e ora na união.

Note-se que a definição da espessura dos corpos de prova foi feita com base nas recomendações da norma ASTM D3039/D3039M-14 (vide Quadro 1); no entanto, em decorrência das falhas nas lâminas de compósito, verificou-se que é necessário

fazer este dimensionamento com base nas estimativas da resistência ao cisalhamento da união e da resistências a ruptura da lâmina de compósito.

Assim, a seguir apresenta-se uma modelagem matemática a fim de estimar as tensões atuantes na lâmina de compósito e na união.

De acordo com Soliman (1995, p. 44) a estimativa da tensão de cisalhamento da união de duas lâminas é dada pela Equação 4.

$$\tau = \frac{P}{L \cdot CS} \quad (4)$$

Sendo:

- $\tau$  – Tensão de cisalhamento média do adesivo; e
- $P$  – Carga aplicada ao corpo.

Note-se que este modelo matemático considera que as partes unidas (no caso, as lâminas de metal e de compósito) são rígidas e que o adesivo se deforma somente por cisalhamento decorrente da força cortante na união – desta forma, foram desconsiderados momentos fletores decorrentes da excentricidade das lâminas. Outra hipótese simplificadora importante feita, levantada por Soliman (1995, p. 44), é que a aderência do adesivo nas lâminas é perfeita; portanto, nesta condição, a falha sempre acontecerá por cisalhamento no adesivo.

Assim, para identificar a carga que a união resistirá, por essa modelagem, pode-se trabalhar a Equação 4 para isolar a força, e então tem-se que:

$$P = \tau \cdot L \cdot CS \quad (5)$$

O limite de resistência ao cisalhamento do adesivo PLEXUS MA 832 fornecido pelo fabricante é de 19,3 MPa (ITW PANA, 2015).

Como o fabricante da resina não forneceu o valor das tensões de cisalhamento, esta foi estimada pelo trabalho de Gurit (2001) que apresenta 30 MPa para a tensão de cisalhamento inter-laminar (ILSS – Inter-Laminar Shear Strength), que é a tensão necessária para cisalhar as camadas da resina entre as camadas de matriz.

Considerando os valores projetados de comprimento da união de 20 mm e de largura de 15 mm e os valores de resistência ao cisalhamento estimadas, pode-se obter pela Equação 5 que a união por PLEXUS MA 832 irá tolerar 5,79 kN e a união direta, por resina éster-vinílica, resistir até 9,00 kN.

Como a adesão entre as lâminas é considerada perfeita na Equação 4, não existe diferença entre as estimativas de resistência ao cisalhamento dos corpos furados e diretos – uma vez que a função dos furos é de melhorar a adesão.

A tensão de ruptura da lâmina de compósito, por sua vez, pode ser obtida pela chamada “lei das misturas modificada” (CASARIL et al., 2007, p. 409), que pode ser expressa pela Equação 6, desconsiderando a possibilidade de se ter particulado no compósito<sup>1</sup>.

$$\sigma_c = \beta \cdot \sigma_f \cdot V_f + \lambda \cdot \sigma_m \cdot V_m \quad (6)$$

Sendo:

- $\sigma_c$  – Tensão de ruptura do compósito;
- $\sigma_f$  – Tensão de ruptura da fibra;
- $\sigma_m$  – Tensão de ruptura da resina;
- $\beta$  – Fator de eficiência de alinhamento das fibras;
- $\lambda$  – Fator de adesão entre as fibras e a matriz
- $V_f$  – Fração em volume de fibra; e
- $V_m$  – Fração em volume de resina.

Neste estudo o fator de eficiência de alinhamento das fibras ( $\beta$ ) indicado por Casaril et al. (2007) é igual a 0,375, pois utilizou-se manta de fibra de vidro na qual as fibras estão distribuídas uniforme e randomicamente num plano específico.

Para o fator  $\lambda$  que é utilizado para regular a tensão de ruptura da resina devido a sua adesão à matriz, visto que a laminação utilizada no procedimento de fabricação dos corpos de prova foi manual, Casaril et al. (2007) indicam um  $\lambda$  de 0,85.

Desta forma, para uma fração de 70% de resina, com  $\sigma_m$  de 78 MPa (CRAY VALLEY, 2004), e 30% de fibra de vidro, com  $\sigma_m = 900$  MPa (FIORELLI, 2002), chega-se a uma  $\sigma_c$  de 147,66 MPa.

Assim, pode-se estimar a carga que cada parte do corpo de prova irá resistir pela Equação 7.

$$P = \sigma \cdot L \cdot t \quad (7)$$

<sup>1</sup> O trabalho de Casaril et al. (2007) considera a possibilidade dos materiais compósitos conterem fibras curtas e partículas.

Sendo:

- $P$  – Carga que a lâmina resiste;
- $\sigma$  – Resistência do compósito;
- $L$  – Largura da lâmina; e
- $t$  – Espessura das chapas.

Em condição de projeto, espera-se que  $E_{CI} = E_{CM} = E_{CF} = E_M = t$ . Considerando os valores projetados de largura de 15 mm e espessura de 1,2 mm, as cargas para a ruptura do corpo de compósito é de 2,6 kN.

O Quadro 7 resume as cargas calculadas, no qual constata-se que – por essa análise – a falha deveria acontecer na lâmina de compósito.

Quadro 7 – Estimativa das cargas para ruptura.

Parte do corpo de prova	Tensão máxima admissível [MPa]	Área sujeita a tensão [mm <sup>2</sup> ]	Carga máxima admissível [kN]
Compósito	147,66	18	2,60
União por adesivo	19,30	300	5,79
União por resina	30,00	300	9,00

Fonte: Autoria nossa.

É importante destacar que os modelos utilizados para os cálculos das cargas apresentadas no Quadro 7 fazem considerações simplificativas que podem alterar significativamente os resultados a serem avaliados experimentalmente.

Na estimativa da carga de ruptura do compósito, por exemplo, não foi considerada a presença de poros ou outras imperfeições. Isto também não foi considerado na estimativa da carga de cisalhamento da união, além das considerações já mencionadas.

Outro ponto é que a tensão de cisalhamento estimada nesse modelo é uma tensão média, mas existe uma variação da tensão ao longo da união. Assim, parte da união pode estar sujeita a tensões significativamente superiores a média.

Portanto, os valores apresentados no Quadro 7 podem ser utilizados para o dimensionamento dos corpos de prova, mas podem divergir significativamente do observado experimentalmente.

Nesse sentido, pode-se trabalhar as Equações 5 e 7 igualando as cargas de falha e isolando a espessura  $t$  mínima para que a falha não ocorra na lâmina de

compósito, obtendo a Equação 8.

$$t > \frac{\tau \cdot CS}{\sigma} \quad (8)$$

Como as estimativas da tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) são de 19,3 MPa para o adesivo PLEXUS MA 832 e de 30 MPa para a resina éster-vinílica, o caso crítico para o dimensionamento da espessura é com a resina.

Assim, para uma resistência a ruptura da lâmina de compósito ( $\sigma_c$ ) de 147,66 MPa e um comprimento de sobreposição na união ( $CS$ ) de 20 mm, chega-se a uma espessura mínima ( $t$ ) de 4,06 mm.

É importante destacar que esta espessura considerou a resistência do compósito construído com manta de fibra de vidro. No entanto, esta configuração não se mostrou interessante para ser adotada nos corpos de prova de ensaio de cisalhamento em junta de materiais dissimilares – sendo este o segundo problema identificado na caracterização do corpo de prova.

De fato, a manta confere ao compósito uma resistência a tração inferior ao tecido, sendo a manta escolhida por terem propriedades próximas de um material isotrópico, além de ser suficiente para produzir uma lâmina com a espessura definida para o corpo de prova, de 1,2 mm.

No entanto, alguns autores – a exemplo de Nasseh (2007) – considera a manta um reforço extremamente ineficiente para conferir resistência a tração, sendo indicada para prevenir a delaminação, que neste caso é o cisalhamento entre as lâminas do compósito (também designado de cisalhamento interlaminar).

Assim, para prevenir a delaminação, intercalam-se camadas de manta com um maior teor de resina entre tecidos. Esta é a principal razão por que, normalmente, barcos de produção são construídos com tecido biaxiais combinados com mantas costuradas. As camadas de manta fornecem orientação aleatória das fibras que irão aderir em ambas as camadas de tecido, apesar das propriedades gerais do laminado serem reduzidas pelo uso de um reforço extremamente ineficiente como a manta. (NASSEH, 2007, p. 29)

Note-se que, na estimativa de resistência à ruptura do compósito apresentada na Equação 6, o fator  $\beta$  sobe de 0,375 em mantas (fibras distribuídas uniforme e randomicamente num plano específico) para 0,5 em tecidos (fibra bidirecionais). Adicionalmente, também é possível obter fração em volume de resina e fibra melhores, o que também contribui para a melhoria da resistência à tração do compósitos.



Assim, avalia-se a partir dos resultados experimentais deste trabalho e das análises de resistência da união e da lâmina de compósito que os corpos de prova tenham espessura significativamente maior que a inicialmente definida e que a laminação seja feita alternando camadas de tecido (para conferir boa resistência a tração) e de manta (para melhorar a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito).

Caso optar-se por laminação manual, que tem uma variabilidade maior de resultado, sugere-se que a espessura seja significativamente superior ao estimado pela Equação 8, por exemplo 8 mm, para um coeficiente de segurança igual a 2.

No que se refere à laminação dos corpos de prova, pode-se observar uma série de fatores que podem ter influenciado na diferença da tensão de ruptura observada nos ensaios e a estimada pela Equação 6, cujo resultado está apresentado no Quadro 7, a saber:

- Presença de imperfeições, tais como bolhas;
- Baixa adesão entre a resina e as fibras de vidro;
- Baixa penetração da resina na manta de fibra de vidro;
- Baixa penetração da resina nos furos da lâmina de metal;
- A relação volumétrica de resina e fibra de vidro obtida foi diferente da projetada (70% / 30%); e
- O controle da espessura e da área de cobertura do adesivo é ruim, resultando em heterogeneidade nos corpos de prova.

Apesar dos cuidados na laminação, o processo manual tipicamente gera laminados com um alto percentual de bolhas – que reduzem significativamente a resistência do corpos de prova.

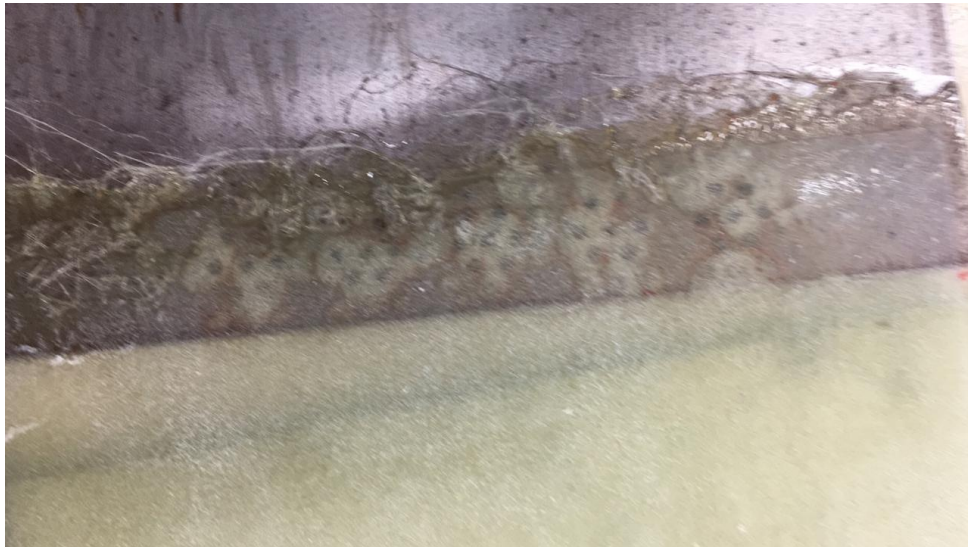
A baixa adesão entre a resina e as fibras de vidro e a baixa penetração da resina na manta de fibra de vidro também podem ocorrer em laminações manuais. Para tanto, recomenda-se dosar a quantidade de iniciador e acelerador para dar tempo da resina ter boa penetração. Neste trabalho a cura aconteceu em tempo satisfatório (com um gel time de 30 minutos) e, portanto, a expectativa é de que esses dois problemas tenham sido minimizados.

O processo de laminação manual também causou várias falhas nas uniões como falta de penetração da resina nos furos exibidos na Figura 18, ou até mesmo

falta de adesão a superfície metálica. Isto aconteceu pois pressão contínua não foi aplicada nas chapas metálicas, visto que caso fossem aplicadas pressões sem um controle exato, estas causariam mais um ruído no experimento.

Em experimentos futuros é recomendado avaliar e quantificar a pressão necessária nas chapas metálicas de forma a causar penetração da resina nos furos e adesão entre os materiais. Também pode ser interessante adotar outra técnica de laminação, como a laminação a vácuo, a fim de favorecer a penetração da resina nos furos da chapa metálica.

Figura 18 – Falta de adesivagem na região dos furos ao final da laminação.



Fonte: Autoria nossa.

Um dos grandes problemas da laminação manual é o controle da relação volumétrica de resina e fibra de vidro. Com isso, não é possível garantir que a proporção projetada, de 70% de resina e 30% de fibra de vidro, tenha sido obtida. Desta forma, um corpo de prova com maior proporção de resina teria uma tensão de ruptura inferior ao estimado no Quadro 7.

O controle do trabalho durante a aplicação do adesivo precisa ser melhorada visto que existiu uma grande variância entre os comprimentos de união adesivada medidos. Isto ocorreu pois o adesivo quando aplicado ao compósito ataca a resina deixando-a líquida e dificultando o retrabalho quando necessário. Como sugestão, seria possível aplicar o adesivo primeiramente ao metal e então pressionar o metal ao compósito para realizar a colagem. De acordo com (ASTM, 2015a) é necessário

que o adesivo ultrapasse a união no mínimo 6 mm e então é necessário adicionar uma quantidade maior de adesivo a extremidade do metal para que este requerimento seja atendido pois o excesso irá sair pela extremidade quando a chapa metálica for pressionada contra o compósito. O excesso deve então ser espalhado rapidamente para atender a norma.

Além dos problemas relacionados ao projeto dos corpos de prova e a sua laminação, também constatou-se a necessidade de se prever alguns procedimentos experimentais para realizar o ensaio de cisalhamento.

Como a fixação dos corpos de prova na máquina universal de ensaios mecânicos foi realizada por efeito cunha e o material da garra é metálico, tais características tendem causar esmagamento das abas dos corpos de prova, fazendo com que o ensaio mecânico causasse falhas nas lâminas de compósitos. Este esmagamento provocou pré-tensões no laminado que promoveram a falha da região da garra. Para tal, recomenda-se a criação de calços na região de fixação dos corpos de prova a fim de evitar o esmagamento e também realizar o alinhamento dos corpos de prova principalmente se a espessura das lâminas forem aumentadas. Além dos calços, também é possível encontrar outros tipos de garra que talvez sejam mais apropriadas no ensaio, como por exemplo fixação por alavanca e garras de borracha.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou estudar a confecção de corpo de prova para ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos a fim de avaliar juntas de materiais dissimilares.

Foi feito um estudo de normas para fundamentar a caracterização do corpo de prova, destacadamente a ASTM D3039/D3039M-14 (Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials), para ensaio de tração de corpos de prova em compósitos; a ASTM E8/E8M-15a (Standard test methods for tension testing of metallic materials), para ensaio de tração de corpos de prova em metais; e a ASTM D1002-10 (Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading), para ensaio de cisalhamento de corpos de prova adesivados. Com base nessas normas foi proposta uma caracterização do corpo de prova para ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos a fim de avaliar juntas de materiais dissimilares.

A partir dessa caracterização foram produzidos três diferentes tipos corpos de prova, a saber: corpos de prova com união por laminação direta na chapa metal (Colagem Direta), com adição de adesivo (Adesivado) e por laminação direta na chapa de metal com furos (Metal Furado).

A laminação foi única para todos os corpos de prova a fim de diminuir a variação de propriedades mecânicas que tipicamente ocorrem entre laminações. Outros ruídos experimentais também foram identificados e foram trassadas medidas para reduzi-los ou mitigá-los.

O corte utilizado para produção dos corpos de prova foi aceitável, mas produziu uma pequena assimetria nos corpos de prova furados. Recomenda-se adequar o método de corte para futuros experimentos onde a chapa à ser cortada possua referências, como os furos deste trabalho, pois estas limitam o número de máquinas e vendedores do serviço de corte.

Os corpos de prova foram, então avaliados dimensionalmente a fim de estimar melhor as tensões envolvidas no ensaio de mecânico.

Foi possível realizar o ensaio de cisalhamento e obter valores de resistência ao

cisalhamento de parte dos corpos de prova. No total, dos cinco corpos de prova com “colagem direta”, apenas dois falharam na união; dos corpos de prova “metal furado”, quatro falharam na união; e nos corpos de prova “adesivado”, nenhum.

Um Teste  $t$ , para duas amostras independentes, foi utilizado para confrontar os valores de tensão de cisalhamento dos dois corpos de prova com “colagem direta” e dos quatro corpos de prova “metal furado”; mas não foi possível evidenciar diferença entre as média dos dois processos de união – uma vez que a probabilidade de errar ao rejeitar a hipótese das médias serem iguais era muito alta, 12,5%.

Já nos corpos de prova com adição de adesivo, é possível especular que a adesão nas lâminas de metal e de compósito melhorou, fazendo com que a tensão de cisalhamento necessária para a falha da união exigisse uma carga superior a necessária para romper a lâmina de compósito. Desta forma, todos os corpos de prova falharam por ruptura das lâminas.

No entanto, não foi possível identificar – de forma conclusiva – qual do processos de união confere a união mais resistente ao cisalhamento da lâmina metálica e da de compósitos.

No trabalho foi realizada uma tentativa de utilizar blocos de madeira com os objetivos de alinhar os corpos de prova de forma a reduzir o momento gerado pela excentricidade da carga e também para aliviar as pré-tensões geradas pela garra do ensaio de cisalhamento. No entanto os blocos de madeira utilizados (vide Apêndice D) fizeram com que a espessura das extremidades do corpo de prova ficassem acima do limite das garras da máquina utilizada nos ensaios de cisalhamento. Por este motivo recomenda-se a adequação da espessura dos blocos de madeira de forma a serem compatíveis com as garras da máquina.

Com os resultados obtidos percebe-se que a concepção dos corpos de prova eleita, baseada em normas, causou falhas indesejadas e, portanto, o corpo de prova projetado não atende a necessidade do ensaio de cisalhamento em máquina universal de ensaio mecânicos.

Foram identificados dois problemas principais na caracterização do corpo de prova: que a espessura das lâminas ficou muito pequena e que o uso apenas de manta na laminação se mostrou inadequado.

Assim, sugere-se que a laminação seja feita alternando camadas de tecido

(para conferir boa resistência a tração) e de manta (para melhorar a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito).

No que se refere à espessura, foi realizada uma estimativa de tensões atuantes no corpo de prova e pode-se concluir que a espessura deve ser significativamente superior. Como consequência, sugere-se a mesma espessura para a lâmina metálica a fim de conferir simetria ao ensaio.

Note-se que, ao aumentar as espessuras, a excentricidade do corpo de prova também aumentará, e com isto a utilização dos calços sugeridos anteriormente é de maior importância.

Como sugestão para trabalhos futuros, além das recomendações apontadas, pode-se indicar:

- Corrigir os problemas identificados neste trabalho para a produção de corpo de prova de forma adequada;
- Produzir um número maior de corpos de prova de forma a garantir que o número de repetições de cada amostra seja alto o suficiente para que a análise seja mais conclusiva;
- Comparar o resultado da laminação manual, vácuo e infusão de uniões dissimilares;
- Propor diferentes tipos de união além dos propostos neste trabalho e avaliá-los;
- Produzir corpos de prova com diferentes disposições, gramaturas e materiais de fibra forma a verificar se afetam a união.
- Realizar uniões com diferentes tipos de adesivo e compara-los; e
- Utilizar corpos de prova laminados com resinas diferentes de forma analisar a compatibilidade química entre os materiais utilizados na união.

## REFERÊNCIAS

AMANCIO-FILHO, S. T. Rebitagem por fricção (“fricriveting”). desenvolvimento de uma nova técnica de união para juntas híbridas do tipo polímero-metal. Parte II: propriedades térmicas e mecânicas. **Soldagem & Inspeção**, scielo, v. 16, p. 396 – 404, 12 2011. ISSN 0104-9224. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-92242011000400011&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-92242011000400011&nrm=iso).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **D1002-10**: Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to metal). Pennsylvania, 2015.

\_\_\_\_\_. **D3039/D3039M-14**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Pennsylvania, 2015.

\_\_\_\_\_. **E8/E8M-15a**: Standard test methods for tension testing of metallic materials. Pennsylvania, 2015.

BOYD, S. W. Integrity of hybrid steel-to-composite joints for marine application. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 218, p. 235–246, out/nov, 2004.

CAO, J. **Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls**. Mestrado — Mechanical Engineering, Mechanical Engineering And Mechanics, 2018.

CASARIL, A. et al. Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas. **Revista Matéria**, v. 12, p. 408–419, 2007.

CRAY VALLEY KOREA CO., LTD. **Epovia RF-1001**: Bisphenolic epoxy based vinyl ester resin. Korea, 2004.

DUTRA, G. B. **Aula 7**: Reforços: Fibra de vidro. Joinville, 2015. Disciplina EMB5711 Materiais e Processos de Construção Naval II, 35 slides, color.

FERRAMENTAS KENNEDY. **Paquímetro Digital em Aço Inox 150 MM 316119 Mtx**: Medições em polegadas e milímetros: externa, interna, profundidade e ressalto. Curitiba, 2019. Disponível em: <https://www.ferramentaskennedy.com.br/108003/paquimetro-digital-em-aco-inox-150-mm-316119-mtx>. Acesso em: 2019-10-30.

FIORELLI, J. **UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE CARBONO E DE FIBRAS DE VIDRO PARA REFORÇO DE VIGAS DE MADEIRA**. Mestrado — Ciência e Engenharia de Materiais, 2002.

FRANCO, R. A. V. S. **Produção de Componentes em Materiais Compósitos por Infusão de Resina**. Mestrado — Engenharia e Arquitetura Naval, 2008.

GERR, D. **The Elements of Boat Strength: For Builders, Designers, and Owners**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2000. (International Marine-RMP). ISBN 9780070231597.

GURIT. **Resin Properties for Composite Materials**. [S.l.], 2001. Disponível em: <https://www.aerosol.co.il/wp-content/uploads/2018/04/1366983497b97Qp.pdf>. Acesso em: 2019-11-27.

ITW POLYMERS ADHESIVES NORTH AMERICA. **Technical Datasheet: MA832**. Massachusetts, 2015.

\_\_\_\_\_. **KIT - SAFETY DATA SHEET**. Massachusetts, 2018.

LONGO, G. S. **Análise das características de um aço SAE 1020 para utilização em projetos mecânicos**. Graduação — Engenharia Mecânica, 2017.

MONTGOMERY, D. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003. ISBN 9788521613602.

NASSEH, J. **Métodos Avançados de Construção em Composites**. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2007. ISBN 9788590711209.

NGUYEN, A. Hierarchical surface features for improved bonding and fracture toughness of metal–metal and metal–composite bonded joints. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 2016.

PEREIRA, J. C. **Curso de projeto estrutural com materiais compostos**. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <http://www.grante.ufsc.br/download/MatCompostos/MAT-COMPOSTOS-Apostila-J.Carlos.pdf>. Acesso em: 15 out. 2015.

QUINI, J. G. **Histórico e Conceitos Básicos dos Adesivos**. São Paulo: CENATEC, 1998. Disponível em: <https://www.doccity.com/pt/historico-e-conceitos-basicos-dos-adesivos/4734652/>. Acesso em: 08 nov. 2018.

SOETHE, V. L. **Unidade 4: Materiais metálicos para construção naval**. Tipos, propriedades e aplicações: aços. Joinville, 2015. Disciplina EMB5705 Materiais e Processos de Construção Naval I, 40 slides, color.

SOLIMAN, G. N. **Adhesive overlap joints**. Mestrado — Civil Engineering, 1995.

TINÔ, S. R. L. Fracture characteristics and anisotropy in notched glass fiber reinforced plastics. **Materials Research**, v. 17, p. 1610–1619, 2014.

VLADIMIR, S. **Hybrid Ship Hulls**. San Diego: Elsevier Inc., 2014. ISBN 9780128010921.

WEITZENBÖCK, J. R. Application of composites in ships and offshore - a review and outlook. **Research Gate**, 2010.

WORLD MARITIME UNIVERSITY DISSERTATIONS. **An analysis of the study of mechanical properties and microstructural relationship of HSLA steels used in ship hulls**. Pennsylvania, 2007.

ZHANG, Q. Investigation of tensile behavior and influence factors of composite-to-metal 2d-scarf bonded joint. **Engineering Structures**, 2018.



## APÊNDICE A - ETAPAS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO MANUAL

Aqui serão listadas em ordem as etapas que foram realizadas para a laminação manual.

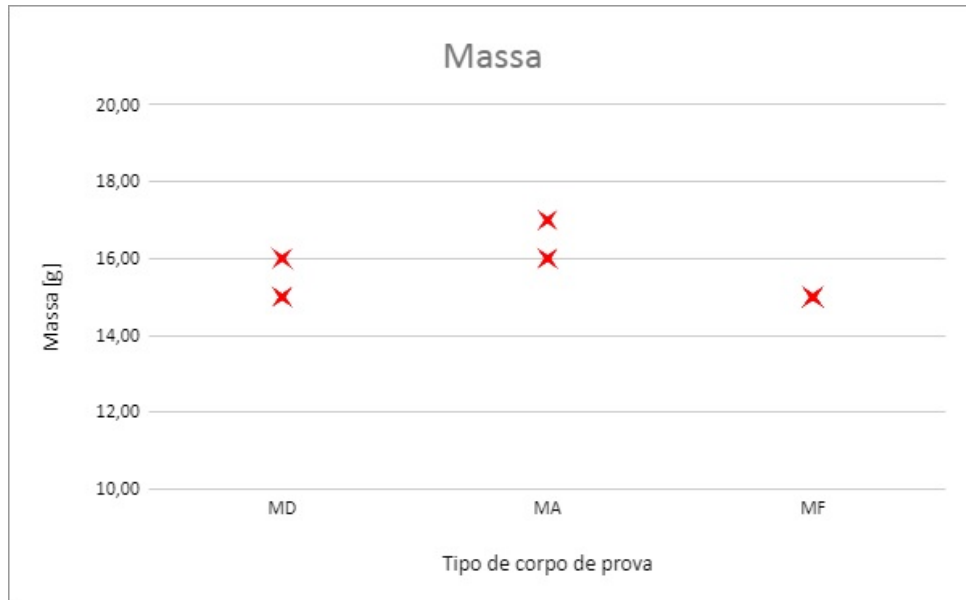
1. Posicionar template de laminação abaixo do vidro como referência.
2. Limpar bem a superfície de vidro com a solução de limpeza.
3. Demarcar região de laminação utilizando o template como guia, e usando fita adesiva pra delimitar a área de laminação.
4. Aplicar e aguardar secagem da cera desmoldante.
5. Marcar e cortar dois retalhos da fibra de vidro na medida correta.
6. Amassar ambos retalhos juntos.
7. Posicionar corretamente um dos retalhos da manta em sua região conforme o template.
8. Posicionar os apoios para o metal que compensarão a espessura da fibra, deixando o metal reto.
9. Posicionar o metal e fazer marcações na fita adesiva, como referência de posicionamento após a laminação.
10. Misturar a quantidade calculada de resina, catalisador e acelerador.
11. Despejar de forma homogênea a mistura sobre a manta de fibra de vidro.
12. Utilizar o rolo anti-bolhas para espalhar a resina e também remover bolhas que forem identificadas.
13. Posicionar e pressionar levemente as chapas metálicas em sua posição anteriormente testada e marcada.
14. Aguardar a cura completa da resina.
15. Desmoldar.

## APÊNDICE B - LISTA DE MATERIAIS

1. Solução de limpeza.
2. Primer PC120 para metais.
3. Pano para limpeza.
4. Pinceis para auxiliar na laminação.
5. Catalisador BRASNOX DM50 e acelerador de cobalto 6%.
6. Manta de fibra de vidro com 450 g/m<sup>2</sup> de gramatura.
7. Templates impressos para referência.
8. Superfície de vidro para realização das laminações.
9. Resina éster-vinílica.
10. Desmoldante.
11. Adesivo PLEXUS MA 832.
12. Serra para corte da madeira de encaixe da mangueira.
13. Tesoura para corte dos materiais.
14. Luvas.
15. Rolo anti-bolhas.
16. Balança.
17. Fita adesiva.
18. Papel toalha para limpeza.
19. Pipeta.

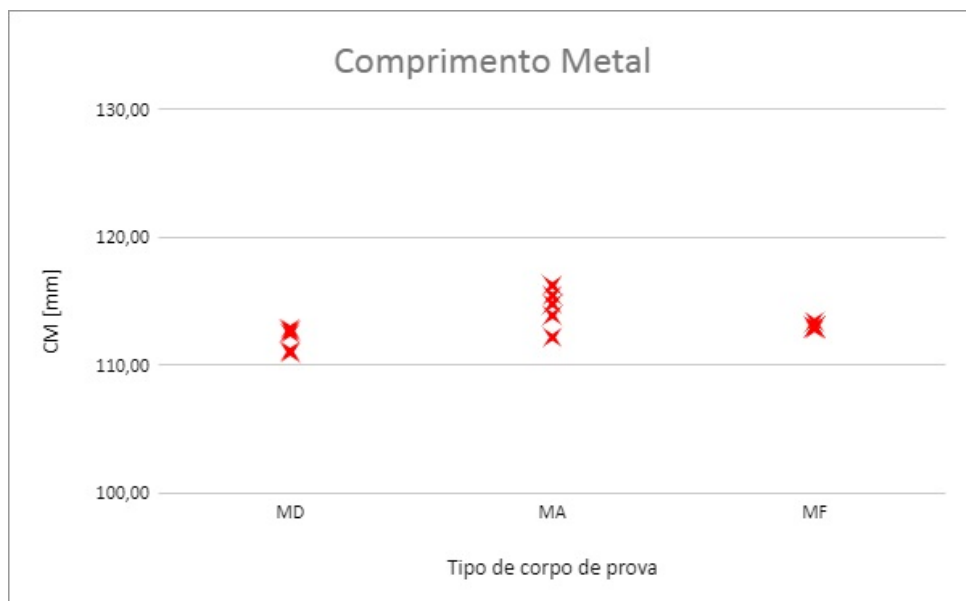
**APÊNDICE C - GRÁFICOS DAS CARACTERIZAÇÕES DOS CORPOS DE PROVA**

Figura 19 – Massa dos corpos de prova



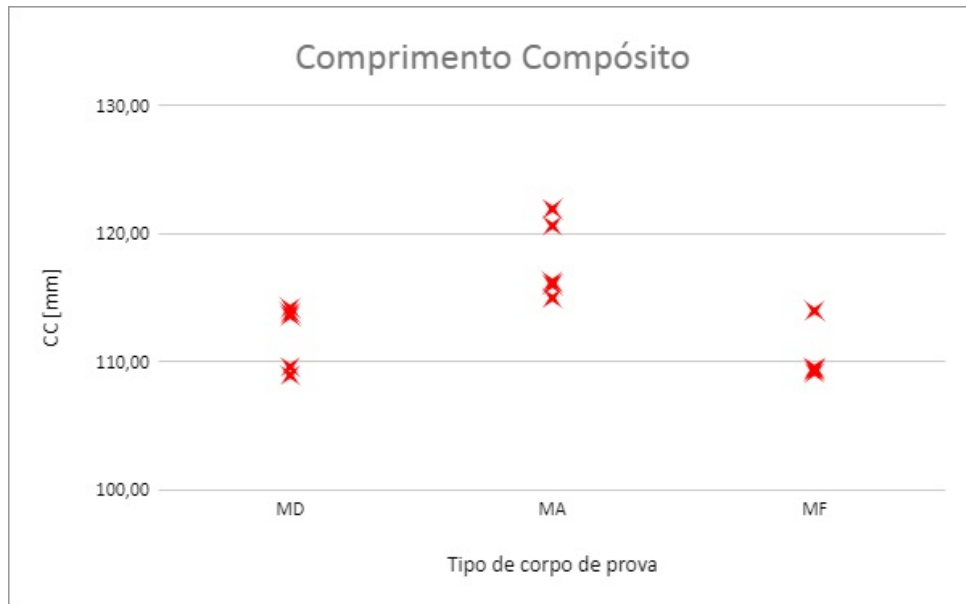
Fonte: Autoria nossa.

Figura 20 – Comprimento do Metal dos corpos de prova



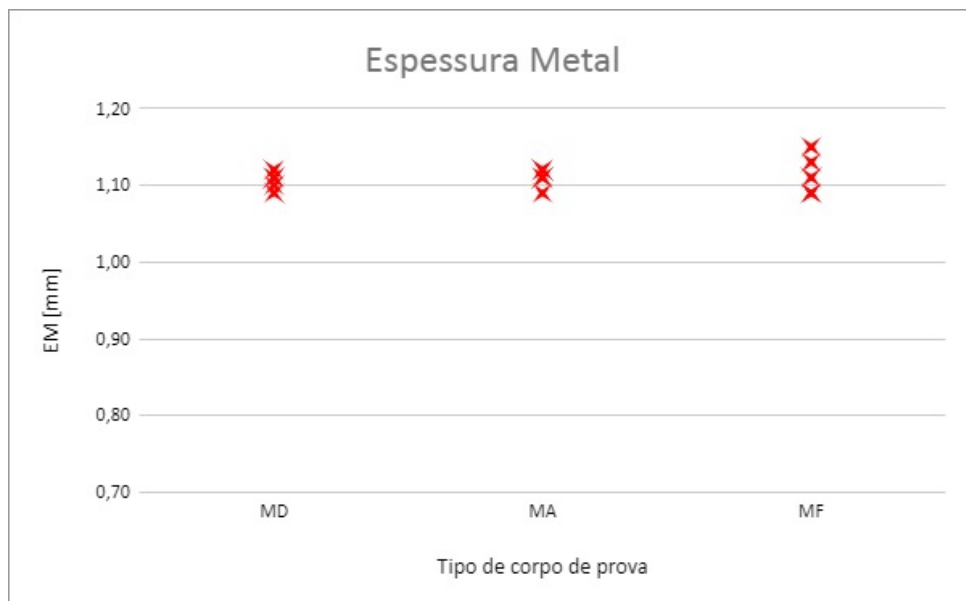
Fonte: Autoria nossa.

Figura 21 – Comprimento do compósito dos corpos de prova



Fonte: Autoria nossa.

Figura 22 – Espessura do metal dos corpos de prova



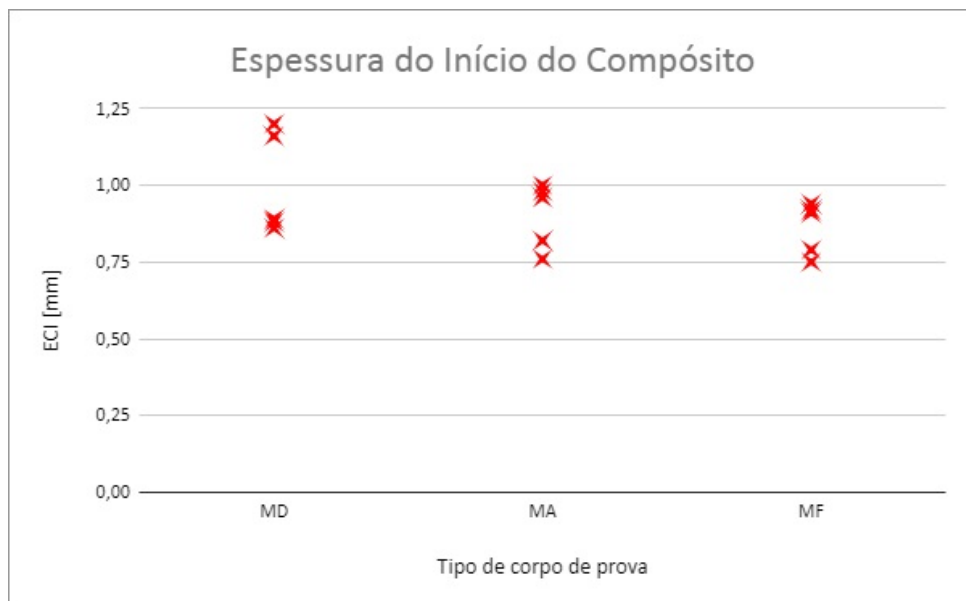
Fonte: Autoria nossa.

Figura 23 – Espessura da união dos corpos de prova



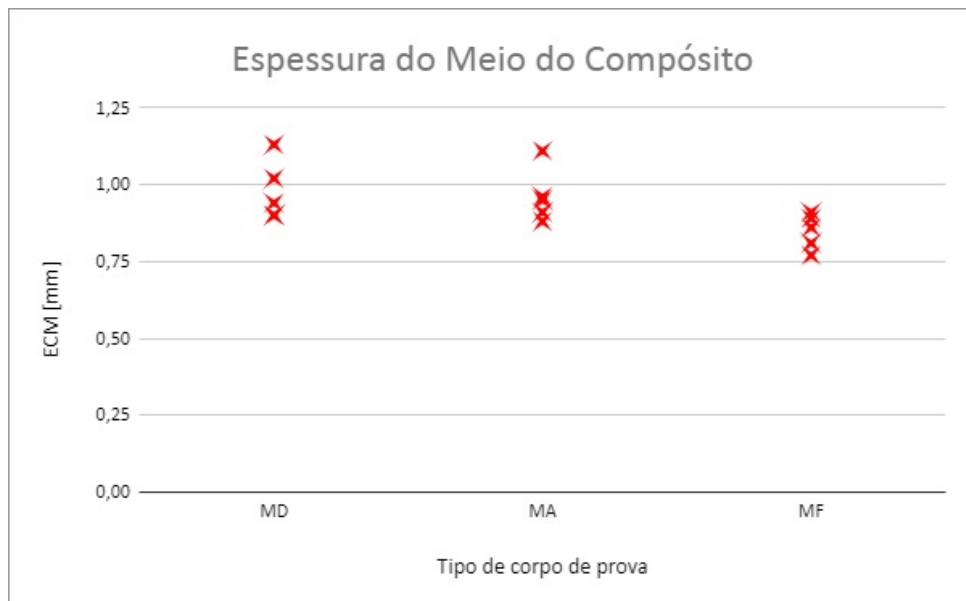
Fonte: Autoria nossa.

Figura 24 – Espessura no início do compósito dos corpos de prova



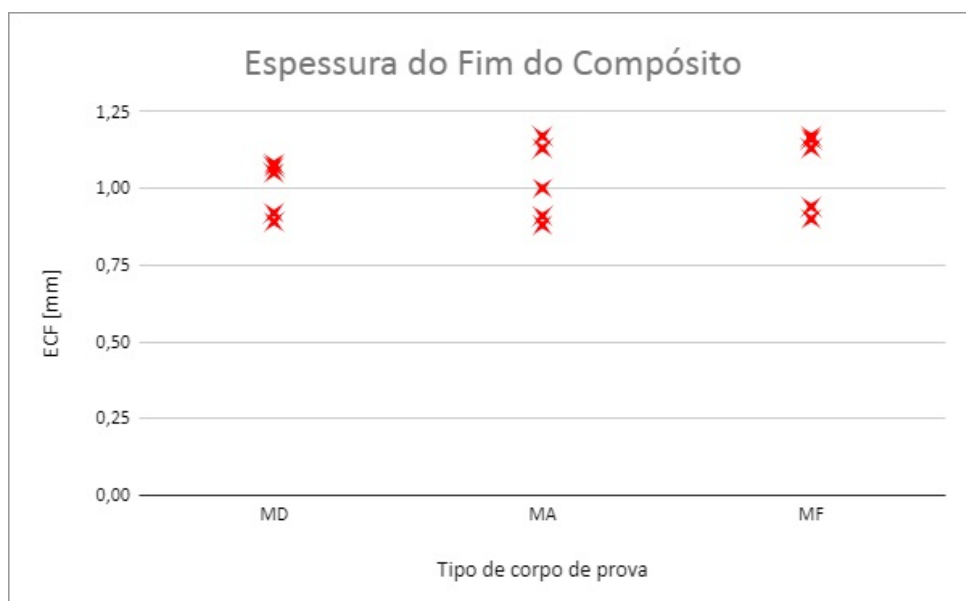
Fonte: Autoria nossa.

Figura 25 – Espessura no meio do compósito dos corpos de prova



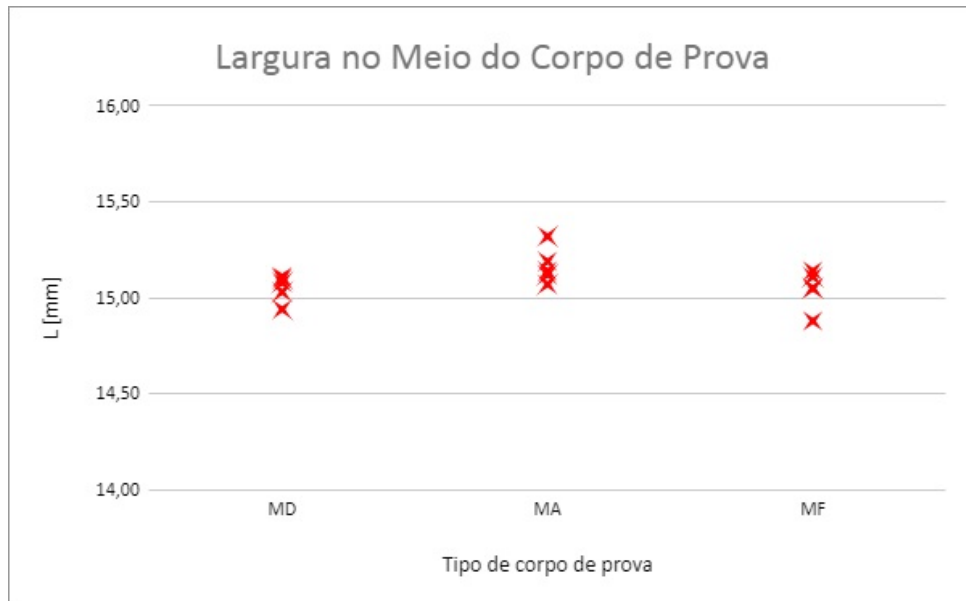
Fonte: Autoria nossa.

Figura 26 – Espessura no fim do compósito dos corpos de prova



Fonte: Autoria nossa.

Figura 27 – Largura do meio dos corpos de prova



Fonte: Autoria nossa.

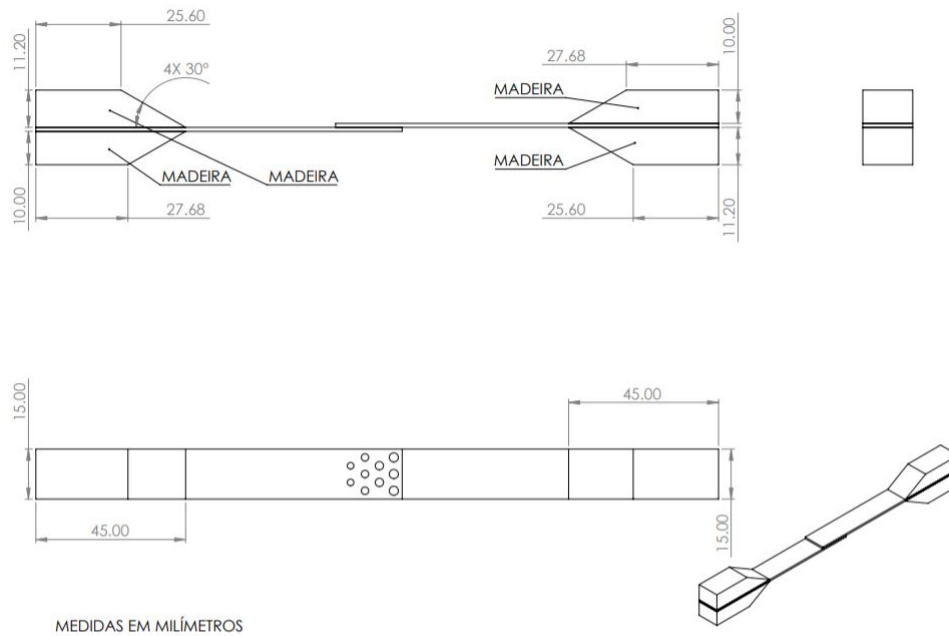
Figura 28 – Comprimento da união dos corpos de prova



Fonte: Autoria nossa.

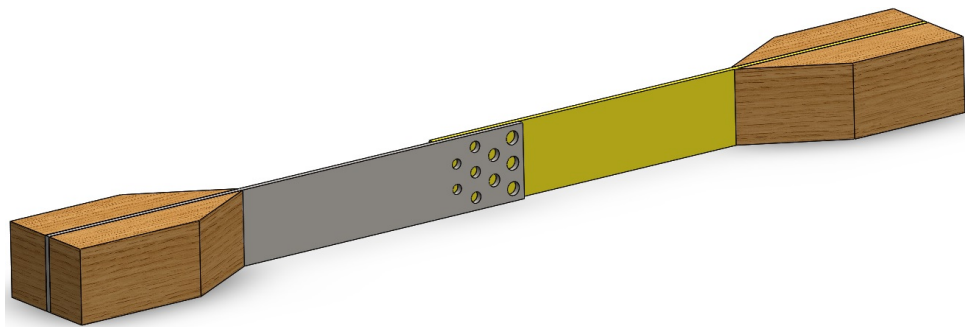
## APÊNDICE D - BLOCOS DE MADEIRA

Figura 29 – Template para fabricação dos blocos de madeira



Fonte: Autoria nossa.

Figura 30 – Modelo 3D renderizado do corpo de prova com as madeiras

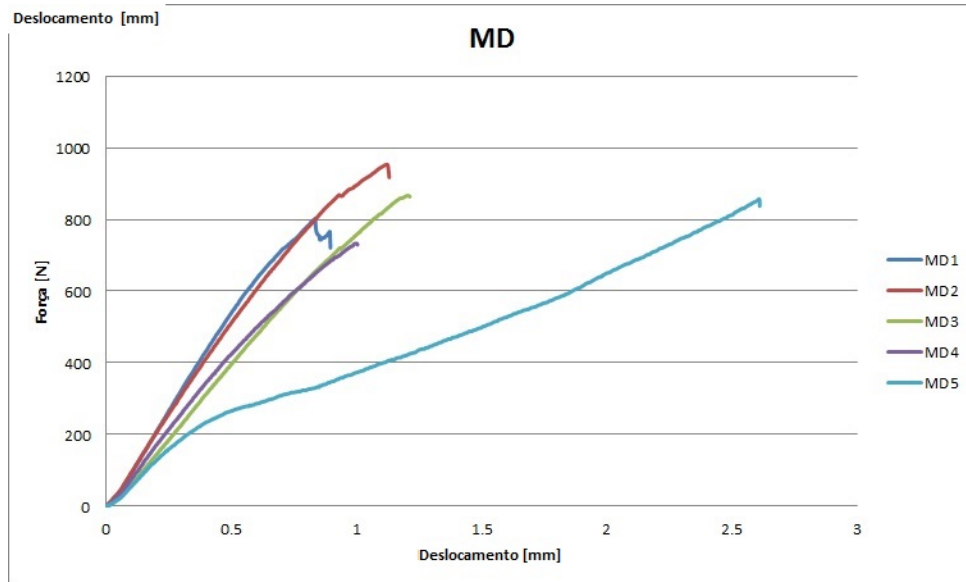


Fonte: Autoria nossa.



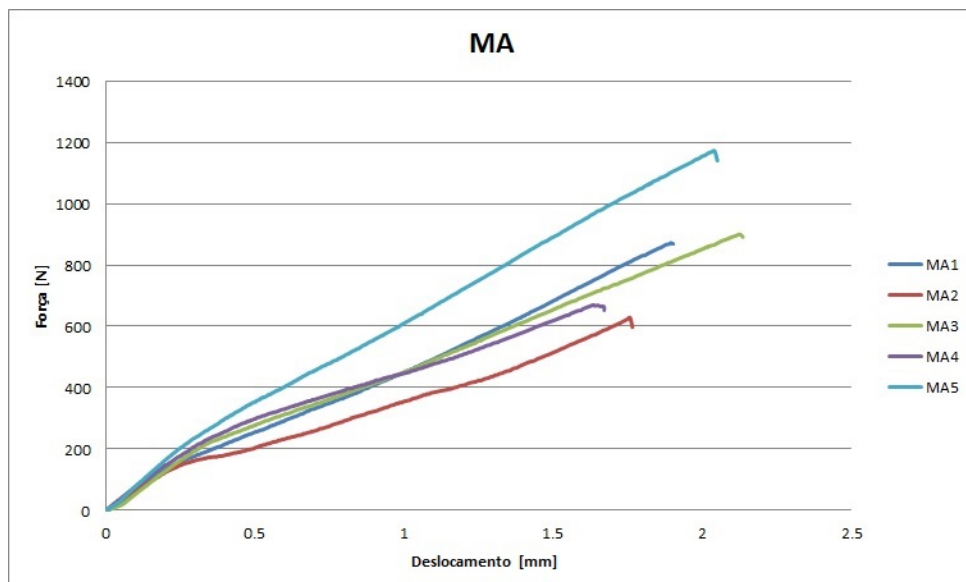
**APÊNDICE E - GRÁFICOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO**

Figura 31 – Gráfico comparativo entre CPs MD



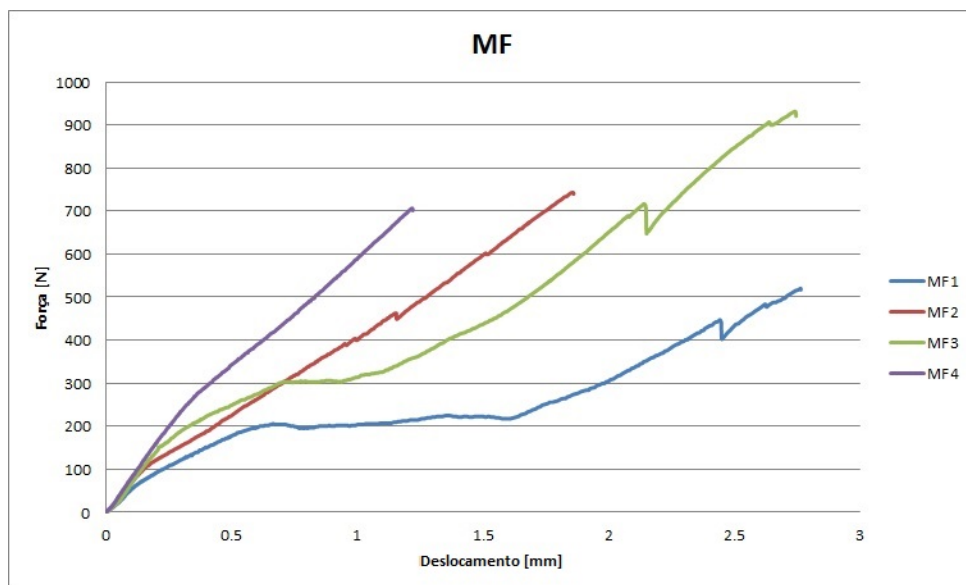
Fonte: Autoria nossa.

Figura 32 – Gráfico comparativo entre CPs MA



Fonte: Autoria nossa.

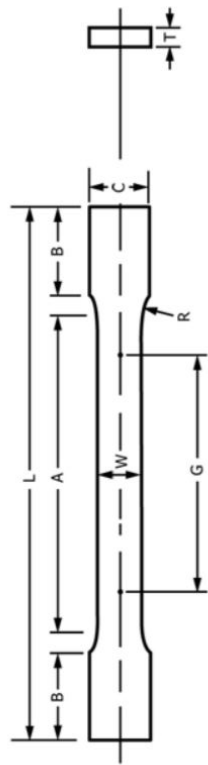
Figura 33 – Gráfico comparativo entre CPs MF



Fonte: Autoria nossa.

## ANEXO A - GEOMETRIA PADRÃO PARA CORPOS DE PROVA METÁLICOS

Figura 34 – Dimensão e geometria padrão sugerida pela norma de ensaio de tração para materiais metálicos



	Dimensions	
	Standard Specimens	Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]
A—Length of reduced section, min	225 [9]	57 [2.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]

Fonte: ASTM (2015c, p. 4, tradução nossa)

## ANEXO B - QUADROS DOS COMPONENTES DO ADESIVO

A ficha técnica do adesivo foi fornecida e nesta se encontravam os quadros de composição de cada componente que foram traduzidos e estão nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8 – Composição do Componente A

Nome Químico		
Inglês	Tradução nossa	Porcentagem do ingrediente
Proprietary Ingredient(s)	Ingrediente(s) Proprietário	20 - 30 por massa
Benzoyl Peroxide	Peróxido de benzoílo	20 - 30 por massa
Titanium Dioxide	Dióxido de titânio	1 - 10 por massa
Bisphenol A diglycidyl ether resin	Éter diglicidílico de bisfenol A	10 - 20 por massa
Diisodecyl adipate	Adipato de diisodecilo	10 - 20 por massa
Propanol, oxybis-, dibenzoate	Propanol, oxibis, dibenzoato	1 - 10 por massa
Black iron oxide	Óxido de ferro preto	0.1 - 1.0 por massa
Aluminum Hydroxide	Hidróxido de alumínio	0.1 - 1.0 por massa

Fonte: ITW PANA (2018, p. 8, tradução nossa).

Quadro 9 – Composição do Componente B

Nome Químico		
Inglês	Tradução nossa	Porcentagem do Ingrediente
Polychloroprene	Policloropreno	1 - 10 por massa
Methyl Methacrylate Monomer	Monômero de metacrilato de metila	50 - 60 por massa
Methacrylic acid	Ácido metacrílico	1 - 10 por massa
Styrene-Butadiene -Styrene Polymer	Polímero de estireno-butadieno -estireno	1 - 10 por massa
Proprietary ingredient(s)	Ingrediente(s) Proprietário	20 - 30 por massa
Methacryloyloxyethyl acid phosphate	Fosfato de ácido metacrililoxietil	1 - 10 por massa
Paraffin wax	Parafina	1 - 10 por massa
Rosin	Breu	0.1 - 1.0 por massa
2-Propenoic acid, 2-methyl-, tetradecyl ester	Éster 2-metil-, tetradecílico do ácido 2-propenóico	0.1 - 1.0 por massa

Fonte: ITW PANA (2018, p. 8, tradução nossa).