

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Ricardo Tortelli

ANÁLISE DE PERFIS PULTRUDADOS COM
ÊNFASE EM SUAS UNIÕES

Passo Fundo

2015

Ricardo Tortelli

**ANÁLISE DE PERFIS PULTRUDADOS COM
ÊNFASE EM SUAS UNIÕES**

Orientador: Prof. Dr. Vagner Alves Guimarães

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2015

Ricardo Tortelli

**ANÁLISE DE PERFIS PULTRUDADOS COM
ÊNFASE EM SUAS UNIÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data da aprovação: 16 de janeiro de 2015.

Os componentes da Banca Examinadora abaixo aprovaram a Dissertação

Professor Doutor Vagner Alves Guimarães
Orientador – Universidade de Passo Fundo (UPF)

Professor Doutor Mário Wolfart Jr.
Instituto Federal Catarinense (IFC) - Campus Luzerna

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
UPF

Professora Doutora Vera Maria Rodrigues
UPF

RESUMO

Os perfis de *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP), apesar de possuírem boas propriedades mecânicas, ainda possuem em suas uniões alguns aspectos lacunares, especialmente no que tange ao comportamento dessas, bem como em relação ao procedimento de união entre os perfis, de forma a alcançar a melhor preservação de suas propriedades mecânicas. Assim considerado, o presente estudo se deu com o objetivo de mensurar a influência das uniões de perfis de GFRP em suas propriedades mecânicas para, com isso, avaliar a possível substituição de aço ASTM A36 por perfis de GFRP em estruturas de implementos rodoviários, obtendo-se, assim, a redução do peso dos equipamentos. Para tanto realizou-se uma pesquisa experimental, primeiramente, testando-se corpos de prova. Como principais resultados pode-se inferir que, em virtude das análises realizadas, a utilização do GFRP em implementos rodoviários se mostra promissora. Contudo deve-se considerar a limitação que o mesmo possui em relação aos impactos e à baixa produtividade quando comparado ao aço. Isso, devido à sua manipulação, o que permite inferir que sua utilização na implementação ainda tem muito a ser melhorada. Ainda, importa compreender que o valor que o mesmo agregará com a redução de peso, justifica a busca por mais pesquisas que justifiquem sua viabilidade econômica, ficando a cargo de seu utilizador mensurar outras variáveis de produção.

Palavras-chave: Compósitos. Implementos rodoviários. Propriedades mecânicas. Aço. GFRP.

ABSTRACT

The Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) profiles, despite having good mechanical properties, still have in its joints some lacunar aspects, especially with respect to the behavior of these, as well in relation with the procedure of union between the profiles, in order to achieve the best preservation of its mechanical properties. Thus, the present study was carried out with the objective of measuring the influence of GFRP profile joints on its mechanical properties, with this, to evaluate the possible substitution of ASTM A36 steel with GFRP profiles in road implement structures, getting, therefore, the reducing of equipment weight. For this, an experimental research was carried out, firstly, by testing the test specimens. As the main results, it can be inferred that, due to the analyzes carried out, the use of GFRP in road implements is promising. However, it should be considered the limitation that it has in relation to the impacts and to the low productivity when compared to the steel. This, because of its manipulation, which allows to infer that its use in the implementation still has much to be improved. Also, it is important to understand that the value that it will add with the weight reduction, justifies the search for more researches that justify its economic viability, being in charge of the user to measure other production variables.

Keywords: Composites. Road implements. Mechanical properties. Steel. GFRP.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM D2344	<i>Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates.</i> Método de teste padrão para a resistência de feixes curtos de materiais compósitos de matriz de polímero e seus laminados.
ASTM D5573	<i>Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints.</i> Prática padrão para classificar os modos de falha em juntas de plástico reforçado com fibra (FRP).
ASTM D638	<i>Standard test method for tensile properties of plastics.</i> Método de teste padrão para propriedades de tração de plástico.
ASTM D790	<i>Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.</i> Métodos de teste padrão para propriedades flexurais de plásticos não reforçados e reforçados e materiais elétricos isolantes.
A1	Combinações para o controle geral de deformações norma EN 13706
A2	Combinações para os níveis máximos de deformação norma EN 13706
ACCS	<i>Advanced Composite Construction System</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CEN	<i>European Committee for Standardisation</i>
cm	centímetro
CNC	comando numérico computadorizado
d	diâmetro do parafuso
FRP	<i>Fiber Reinforced Plastic</i>
g/cm ³	grama por centímetro cúbico
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
GPa	Gigapascal
H	hora
kgf	quilograma força
kN	quilo newton
kN/m ³	quilo newton por metro cúbico
m	metro
MEK	<i>Methyl ethyl ketone</i>
min	minuto
mm	milímetro
MPa	Megapascal
Nm	Newton metro

PEEK	<i>Polyetheretherketone</i>
PVC	<i>Polyvinylchloride</i>
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UPF	Universidade de Passo Fundo
UV	Radiação ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ} \text{C}$	Grau Celsius
%	por cento
γ_m	coeficiente de segurança utilizado no dimensionamento de perfis GFRP
μm	micrômetro
σ_{fu}	curvas de tensão-flexão
E_{fu}	módulo de elasticidade
ϵ_{fu}	extensão última em flexão

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha de fabricação de perfis de GFRP por pultrusão.....	21
Figura 2 - Comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP.....	24
Figura 3 - Comparação das propriedades mecânicas dos perfis GFRP com madeira, aço, alumínio e PVC.....	25
Figura 4 - Comparação entre as propriedades físicas e térmicas dos perfis de GFRP com outros materiais (madeira, aço, alumínio e PVC).....	26
Figura 5 - Possíveis ligações coladas entre perfis de GFRP.....	33
Figura 6 - Filete de uma ligação colada entre perfis de GFRP.....	36
Figura 7 - Exemplo de superfície para ligações coladas submetidas a uma carga “N”...39	
Figura 8 - Tensões de corte (τ) no adesivo, (a) para um comportamento rígido e (b) para um comportamento elástico das peças a ligar.....	41
Figura 9 - Efeito de flexão devido à excentricidade em ligações de sobreposição simples.....	41
Figura 10 - Sequência (A a C) da rotura por pelagem de uma das peças a ligar.....	42
Figura 11 - Comparação entre as distribuições de tensões normais (σ) e de corte (τ) em adesivos rígidos e flexíveis.....	42
Figura 12 - Efeito da variação da largura (b) e do comprimento (L) de uma ligação por sobreposição simples.....	43
Figura 13 - Resistência relativa de diferentes configurações de ligações coladas.....	44
Figura 14 - Tipos de rotura de ligações coladas por sobreposição simples entre substratos de GFRP.....	45
Figura 15 - Classificação exhaustiva dos modos de ruptura das ligações entre FRP, segundo a norma ASTM D5573-99.....	45
Figura 16 - Pormenor de uma ligação parafusada numa estrutura de perfis pultrudados.....	46
Figura 17 - Zonas dos perfis onde não é aconselhado fazer a ligação parafusada.....	47
Figura 18 - Distâncias mínimas entre os parafusos, consoante a direção de pultrusão (em que “d” é o diâmetro do parafuso).....	48
Figura 19 - Orientação do arrancamento das ligações parafusadas, consoante direção das pultrusão (em que d é o diâmetro do parafuso).....	48
Figura 20 - Sistema ACCS: (a) painel multicelular; (b) peça com três ligações fêmea (c) peça com uma ligação fêmea e dois machos; (d) peça de ligação; (e) duas peças acopladas com peça de ligação.....	50

Figura 21 - Luvas metálicas para união dos perfis formato “L”	52
Figura 22 - Luvas metálicas para união dos perfis formato em “T”	53
Figura 23 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “T”	54
Figura 24 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “L”	55
Figura 25 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “I”	55
Figura 26 - Fixador de corpos de prova formato “T”	56
Figura 27 - Fixador de corpos de prova formato “L”	57
Figura 28 - Corpos de prova para ensaio de tração experimental e união “L” colada	58
Figura 29 - Simulação da interação entre Perfis e Juntas formato “L”	58
Figura 30 - Simulação da interação entre Perfis e Juntas formato “T”	59
Figura 31 - Má distribuição da cola devido ao formato da luva	59
Figura 32 - Simulação das novas juntas, feitas para melhorar o espaçamento do adesivo	60
Figura 33 - Corpos de prova Tração, flexão e corte interlaminar.....	61
Figura 34 - Corpo de prova para ensaio tração formato tubular sem união	61
Figura 35 - Corpo de prova Formato “I”, união parafusada para teste de tração	61
Figura 36 - Corpo de prova Formato “I”, união colada para teste de tração	62
Figura 37 - Corpo de prova Formato “I”, união parafusada colada para teste de tração.....	62
Figura 38 - Corpo de prova Formato “T”, união, parafusada.....	63
Figura 39 - Corpo de prova Formato “T”, união, colada.....	64
Figura 40 - Corpo de prova Formato “T”, união, colada parafusada	64
Figura 41 - Corpo de prova Formato “L”, união, parafusada.....	64
Figura 42 - Corpo de prova Formato “L”, união, colada.....	65
Figura 43 - Corpo de prova Formato “L”, união, colada parafusada	65
Figura 44 - Esquema de corte dos diferentes tipos de corpos de provas retirados dos perfis quadrados.....	66
Figura 45 - Perfil de GFRP sendo usinado, segundo normas ASTM.....	67
Figura 46 - Perfil de GFRP após processo de usinagem, segundo normas ASTM.....	67
Figura 47- Distribuição dos furos adaptada para situação, segundo Sousa (2011).....	68
Figura 48 - Colagem da ligação de perfil GFRP	70
Figura 49 - Corpo de prova Tração perfis GFRP segundo norma ASTM D638.....	73
Figura 50 - Corpo de prova em tração simulando condições de ensaio indicados pela ASTM D638	75
Figura 51 - Corpos de prova para teste de tração sem união	75

Figura 52 - Corpos de prova para teste de tração de uniões	76
Figura 53 - Corpo de prova ensaio de flexão segundo norma ASTM D790.....	77
Figura 54 - Ensaio de Flexão ASTM D790.....	77
Figura 55 - Ensaio de corte interlaminar descritivo	79
Figura 56 - Corte interlaminar antes e durante o teste.....	80
Figura 57 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “T”	81
Figura 58 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “L”	82
Figura 59 - Fixador de corpos de prova empíricos.....	83
Figura 60 - Gráfico tensão deformação corpos de prova de tração padrão ASTM D638	85
Figura 61 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração sem união.....	87
Figura 62 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada.....	88
Figura 63 - Comportamento dos corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada parafusada.....	89
Figura 64 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração união parafusada.....	90
Figura 65 - Comparativo entre Uniões de perfis de GFRP	91
Figura 66 - Curvas tensão deformação do ensaio de flexão dos corpos de prova ASTM.....	93
Figura 67 - Curva força-deslocamento dos corpos de prova para o ensaio de corte Interlaminar	94
Figura 82 - Comportamento ensaio experimental de união colada formato “L”.....	96
Figura 83 - Comportamento ensaio experimental de união colada parafusada formato “L”.....	97
Figura 84 – Comportamento do ensaio experimental de uniões parafusadas formato “L”.....	98
Figura 85 - Comportamento união experimental colada formato “T”.....	99
Figura 86 - Comportamento união experimental colada parafusada formato “T”	100
Figura 87 - Comportamento união experimental parafusada formato “T”	101
Figura 88 - Perfis de GFRP com união parafusada segundo a literatura.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Mecânicas ASTM A36 segundo fabricante Gerdau	19
Tabela 2 - Propriedades mecânicas na direção axial de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente	22
Tabela 3 - Propriedades mecânicas na direção normal de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente	23
Tabela 4 - Vantagens e limitações de perfis pultrudados GFRP	27
Tabela 5 - Descrição dos esforços formato “T”	54
Tabela 6 - Descrição dos esforços formato “L”	55
Tabela 7 - Descrição dos esforços impostos nos perfis em formato “I”	55
Tabela 8 - Corpos de prova para caracterização do material	60
Tabela 9 - Corpos de prova para caracterização do tubo e uniões	62
Tabela 10 - Corpos de Prova para análise de juntas	63
Tabela 11 - Descrição dos esforços formato “T”	81
Tabela 12 - Descrição dos esforços formato “L”	82
Tabela 13 - Resultado do ensaio de tração	85
Tabela 14 - Resultados dos corpos de prova experimentais de tração sem união	87
Tabela 15 - Resultados dos corpos de prova experimentais de tração união colada	88
Tabela 16 - resultados dos corpos de prova experimentais de tração com união colada parafusada	89
Tabela 17 - Resultado ensaio de tração colado parafusado	91
Tabela 18 - Comparativo entre uniões	92
Tabela 19 - Resultado ensaio de flexão	93
Tabela 20 - Resultado ensaio de corte interlamelar	94
Tabela 21 - Resultado do ensaio experimental união formato “L”	96
Tabela 22 - Resultados do ensaio experimental união colado parafusado formato “L” ..	97
Tabela 23 - Resultado do ensaio experimental união parafusada formato “L”	98
Tabela 24 - Resultado do ensaio experimental união colada formato “T”	99
Tabela 25 - Resultado do ensaio experimental união colada parafusada formato “T” ..	100
Tabela 26 - Resultado do ensaio experimental união parafusada formato “T”	101
Tabela 27 - Resultado da caracterização do material GFRP encontrado na bibliografia	102
Tabela 28 - Resultado da caracterização do material GFRP foco do trabalho	102

Tabela 29 - Comparativo entre área de uniões foco do estudo x bibliografia.....	104
Tabela 30 - Comparativo de força e eficiência de ligação entre uniões segundo Correia, Branco e Ferreira (2006).....	104
Tabela 31- Comparativo de força e eficiência de ligação entre uniões, caso estudado.	104

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA	17
2 MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	19
2.1 AÇOS	19
2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS	20
2.2.1 Pultrusão	20
2.3 CARACTERIZAÇÃO GERAL DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO (GFRP)	22
2.3.1 Propriedades típicas dos perfis pultrudados de GFRP.....	22
2.3.2 Vantagens e limitações	26
2.4 DURABILIDADE DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO (GFRP)	27
2.4.1 Soluções aquosas e umidade	28
2.4.2 Ambientes alcalinos e cloretos	28
2.4.3 Efeitos térmicos.....	29
2.4.4 Radiação ultravioleta nos GFRP.....	29
2.4.5 Fogo e temperaturas elevadas	29
2.4.6 Fadiga	30
2.4.7 Resistência ao impacto	31
2.4.8 Fluência	32
2.5 LIGAÇÕES DE PERFIS GFRP	32
2.5.1 Ligações coladas.....	33
2.5.1.1 Classificação dos adesivos.....	37
2.5.1.2 Preparação da superfície do substrato	40
2.5.1.3 Estados de tensão e modos de rotura	40
2.5.2 Ligações parafusadas	46
2.5.3 Ligações parafusadas coladas.....	49
2.5.4 Ligações por encaixe (<i>interlock</i>)	49
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
3.1.1 Concepção dos corpos de prova	51
3.1.1.1 Ideologia dos testes e uniões	53
3.1.1.1.1 Corte	66
3.1.1.1.2 Estudos de furação e torque.....	68
3.1.1.1.3 Colagem.....	69
3.1.2 Procedimento de montagem dos corpos de prova tubulares	71
3.1.2.1 União parafusada	71
3.1.2.2 União colada.....	71
3.1.2.3 União colada parafusada.....	71
3.2 ENSAIOS	72
3.2.1 Ensaio de tração.....	72
3.2.2 Ensaio de tração dos tubos.....	74
3.2.3 Ensaio de flexão	76
3.2.4 Ensaio de corte interlaminar	79
3.2.5 Ensaio experimental de união dos tubos	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	84
4.1.1 Corpos de prova ASTM	84
4.1.2 Corpos de prova experimentais em tração.....	86
4.1.2.1 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração sem união	86
4.1.2.2 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada	88
4.1.2.3 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada parafusada.....	89
4.1.2.4 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união parafusada.....	90
4.1.2.5 Comparativo entre uniões submetidas à tração	91
4.1.3 Ensaio de flexão	92
4.1.4 Corte interlaminar.....	93
4.1.5 Corpos de prova experimentais.....	95
4.1.5.1 Ensaio experimental de juntas “L”	95
4.1.5.1.1 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões coladas.....	95
4.1.5.1.2 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões coladas parafusadas.....	96
4.1.5.1.3 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões parafusadas.....	97

4.1.5.2 Ensaio experimentais de juntas “T”	98
4.1.5.2.1 Ensaio experimentais de juntas “T” com uniões coladas.....	99
4.1.5.2.2 Ensaio experimentais de juntas “T” com uniões coladas parafusadas.....	100
4.1.5.2.3 Ensaio experimentais de juntas “T” com uniões parafusadas.....	101
4.1.5.3 Análise comparativa dos resultados	102
4.1.5.3.1 Análise do resultado da união colada	105
4.1.5.3.2 Análise do resultado da união colada parafusada.....	105
4.1.5.3.3 Análise do resultado da união parafusada	106
5 CONCLUSÕES.....	108
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
REFERÊNCIAS	110

1 INTRODUÇÃO

Segundo Correia (2006), ao longo da história das construções, os principais avanços na engenharia estrutural apareceram ligados à aplicação de novos materiais. Dentre esses, o ferro a partir dos séculos XVIII e XIX, e do concreto armado, a partir da primeira metade do século XX. Os mesmos foram fatores decisivos para o desenvolvimento das sociedades em geral, tendo contribuído, respectivamente, para a revolução industrial e a rápida reconstrução no pós-guerra.

Os perfis pultrudados de fibra de vidro, ou perfis de *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP), são materiais compósitos constituídos por fibras de vidro, embebidas numa matriz polimérica, em geral, de poliéster ou vinil éster. Assim, integram-se no grupo dos materiais poliméricos reforçados com fibras, ou materiais *Fiber Reinforced Polymer* (FRP).

Inicialmente desenvolvidos na década de 1940 pela indústria aeroespacial e a naval, os materiais FRP começaram a ter, a partir da década de 1980, um número crescente de aplicações no setor da construção civil. Segundo Lima Sobrinho (2005), o progressivo aumento no uso de compósitos em aplicações estruturais se estende para a infraestrutura civil tal como pontes e túneis, para veículos de alto desempenho, tais como carros de corrida e aeronaves militares e, também, está sendo bastante difundida a aplicação desses materiais como reparos em estruturas sujeitas à corrosão.

Com as mudanças do ambiente no qual as empresas estão inseridas, as alterações econômicas, políticas, sociais e tecnológicas determinam novas necessidades, tanto das empresas quanto dos consumidores cada vez mais exigentes. Diante da necessidade de sobrevivência, as organizações direcionam-se para o desenvolvimento dos processos de novos produtos, exigindo novas estratégias. Nessa direção, diversas ferramentas são desenvolvidas para auxiliar as empresas a se posicionarem competitivamente no mercado. Com base nesse cenário, as empresas do ramo rodoviário buscam, incansavelmente, uma solução para uma das principais necessidades do mercado, que é obter a maior rentabilidade possível de seu investimento. Para tanto, uma das possibilidades consiste em reduzir o peso dos produtos, favorecendo um melhor rendimento e aumento da durabilidade do conjunto mecânico e, ainda, a diminuição do consumo de combustível.

Segundo Sousa (2011), uma das saídas encontrada por várias empresas no mundo foi a utilização de GFRP em estruturas. Tal escolha, justificada pela existência de algumas vantagens no uso desses materiais, tais como o baixo peso específico, a elevada relação entre a resistência e o seu peso, a facilidade de montagem e transporte, os baixos custos de manutenção ou mesmo

a transparência eletromagnética. No entanto, o custo de produção é, ainda, pouco competitivo na maioria das situações.

Assim sendo, o uso atual de perfis de GFRP requer ainda um estudo extensivo, focando, entre outros aspectos, na sua durabilidade, uma vez que ainda existem incógnitas a respeito de sua utilização em implementos rodoviários. A análise da durabilidade desse tipo de materiais tem sido considerada como um aspecto fundamental, no que diz respeito à sua utilização e aplicação. Por isso, objeto central deste estudo.

1.2 OBJETIVO

1.2.1 Objetivo geral

O foco principal deste trabalho é mensurar a influência das uniões de perfis de GFRP em suas propriedades mecânicas para, com isso, avaliar a possível substituição de aço ASTM A36 por perfis de GFRP em estruturas de implementos rodoviários, obtendo-se, assim, a redução do peso dos equipamentos.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar as principais propriedades mecânicas de um perfil pultrudado disponível no mercado nacional;
- b) avaliar os métodos de união de perfis;
- c) desenvolver um método de ensaio de uniões por tração e momento fletor, para perfis de GFRP e suas uniões.
- d) desenvolver método de colagem para perfis de GFRP;
- e) caracterizar as principais propriedades mecânicas das uniões de perfis GFRP;
- f) avaliar as possibilidades de utilização de perfis GFRP em uma linha de implementos rodoviários.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os projetos de implementos rodoviários buscam a redução de peso com o objetivo de diminuir a massa do equipamento e maximizar a capacidade de carga, mantendo a confiabilidade e respeito às normas técnicas que se aplicam a esse tipo de produto. Dentre as

diversas possibilidades de redução de peso, a substituição do aço estrutural por materiais compósitos está entre as mais promissoras, e os perfis pultrudados de GFRP surgem como uma possibilidade para esse ramo de atividade. Mesmo considerando as excelentes propriedades dos perfis, restam dúvidas sobre os procedimentos de união dos componentes, a resistência mecânica das principais opções de união desses perfis e os procedimentos de união dos componentes dentro do projeto de um conjunto integrante de um implemento rodoviário. Tais dúvidas justificam a realização deste estudo, cujos resultados podem identificar as limitações e as potencialidades da utilização desse tipo de perfil em uma linha de implemento rodoviário.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo contempla a revisão bibliográfica realizada para dar base à pesquisa prática. Sendo assim, abordou-se, primeiramente, os aços que estão sendo utilizados atualmente no ramo rodoviário. Na sequência, pormenorizando detalhes a respeito, trouxe-se informações teóricas a respeito do material polimérico reforçado com fibras - o GFRP, abordando-se e o

2.1 AÇOS

Atualmente o ramo rodoviário é composto de grandes, médias e pequenas empresas, todas elas com seus portfólios de produtos devidamente conhecidos no mercado nacional. Contudo, há uma gama de pequenas e médias empresas que dominam grande parte da produção de implementos rodoviários no mercado nacional. Essas com produtos fundamentados em conhecimentos já comprovadamente testados e baseados em custos. Logo, não se enquadram no padrão tecnológico das grandes empresas, mas, ainda assim, mantêm-se vigorosas no mercado nacional.

De acordo com Chiaverinni (1998), aços carbono são aços que possuem de 0,008% a 2,1% de carbono, porém, possuem baixas concentrações de alguns elementos residuais que são resultados do seu processo de fabricação. A aplicação destes aços varia de acordo com a necessidade de resistência mecânica desejada e fatores como soldabilidade, temperabilidade, dentre outros

As empresas do ramo rodoviário utilizam aços de diferentes denominações, mas a grande demanda solicitada por elas está no aço ASTM A36, no SAE 1010 e no SAE 1020. Aços que são produzidos em grandes escalas e, por isso, possuem um preço atraente para estes fabricantes. A grande diferença entre estes aços está na sua utilização, o ASTM A36 é basicamente utilizado em estruturas, enquanto o SAE 1010 e 1020 são utilizados nas demais áreas. O aço ASTM A36, de acordo com a Tabela 1, é muito utilizado no mercado, pois suas características mecânicas são de conhecimento comum.

Tabela 1: Características mecânicas ASTM A36, segundo fabricante Gerdau

Aço	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Ruptura (Mpa)	Alongamento mínimo, % (BM 200 mm)
ASTM A36	250	400 a 500	18

Fonte: Gerdau (2015).

O aço ASTM A36 descrito na Tabela 1 assume especial importância neste estudo, em virtude de suas propriedades mecânicas. Em função dessas será alvo do estudo comparativo que assume o mote principal desta pesquisa.

2.2 MATERIAIS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Dentre a gama de materiais poliméricos reforçados com fibras, assume especial importância o GFRP, sobre o qual impõe-se maior esforço de descrição e compreensão. Assim, inicia-se por descrever o método de desenvolvimento (pultrusão), seguindo-se pela sua caracterização, indicando-se as propriedades típicas dos perfis pultrudados de GFRP, bem como vantagens e limitações e a influência do meio ambiente em suas propriedades mecânicas

2.2.1 Pultrusão

De acordo com Sousa (2011), pultrusão é um método desenvolvido que melhorou em muito a eficiência na construção dos materiais compósitos. Esse consegue aumentar a produtividade em relação aos usuais métodos de utilização de compósitos, permitindo obter materiais de elevada resistência, minimizando os custos e, ainda, garantido um alto padrão de qualidade e poucos desperdícios. Segundo o referido autor, a pultrusão originou-se nos anos 1950, quando W. Brant Goldsworthy desenvolveu um processo baseado numa linha de fabricação onde os compósitos passavam através de um molde aquecido, criando, assim, perfis contínuos de material. Dessa forma, nesse método as dimensões dos perfis são apenas condicionadas pela capacidade de transporte dos mesmos.

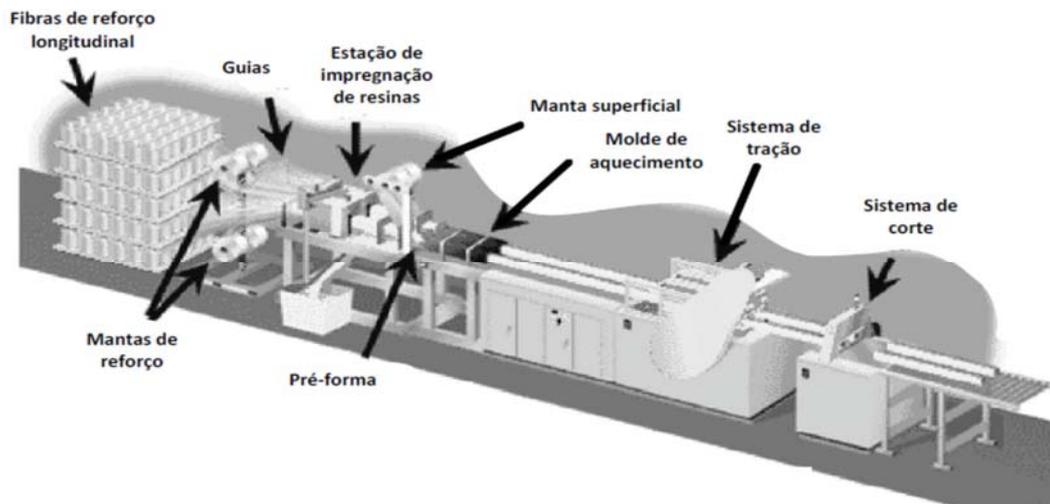
Ainda conforme Sousa (2011), o termo pultrusão surge da combinação das palavras “*pull*” e extrusão. Extrusão, muito sucintamente, consiste na passagem forçada de material através de fôrmas de geometria específica, de modo a se obterem os formatos pretendidos. Nesse caso, o material é puxado através de *fôrmas* de pré-forma, conferindo o formato desejado à secção do perfil.

Teixeira (2010) ressalta que a pultrusão permite a produção de perfis de secção transversal aberta (por exemplo, em I ou U) ou fechada (tubos), bem como de seções multicelulares fechadas. O comprimento total das peças só é limitado pelo processo de transporte do material.

Segundo Mendes Correia (2012), no processo de pultrusão tradicional as fibras de reforço longitudinais e as mantas de reforço são submetidas a um banho de resina na estação de

impregnação. No processo correntemente mais utilizado, as resinas e aditivos são aplicados por injeção (pultrusão por injeção). As guias, para além da função de manter as fibras de reforço e as mantas na posição desejada, têm como funcionalidade adicional remover o excesso de resina do perfil. O material passa por uma pré-forma que lhe confere o formato final aproximado. O molde de aquecimento proporciona a forma e a cura desejada para o GFRP que é puxado (*pull*) pelo sistema de tração (origem do termo *pultrusão*); este sistema tem normalmente uma capacidade de tração que varia entre 50 kN e 200 kN. No final da linha de fabricação, uma serra diamantada corta os perfis na medida desejada conforme Figura 1.

Figura 1 - Linha de fabricação de perfis de GFRP por pultrusão



Fonte: Adaptado de Mendes Correia (2012).

O uso da pultrusão por injeção tem a vantagem de permitir controlar com mais eficácia a posição do reforço, havendo uma maior uniformidade do material. Para além disso, permite a alteração da produção ou a introdução de alterações na composição da matriz durante o processo de fabricação. Esse processo reduz a evaporação de solventes da matriz, havendo um melhor ambiente de trabalho. Em ambos os sistemas de pultrusão, durante o processo de cura no interior do molde, o material sofre retração e separa-se das paredes desse, atingindo a estabilidade dimensional à saída (MARTINS, 2011).

Sousa (2011) salienta que a pultrusão apresenta um leque variado de vantagens sobre outros tipos de processamento de materiais compósitos. Torna-se possível garantir, dependendo do grau de calibração do sistema, a mesma qualidade e consistência verificada entre os primeiros 10 m de perfil produzido, e os perfis produzidos após 100 m de pultrusão. Normalmente, 80 a 90% do custo registrado consistem no custo unitário dos materiais em si. O custo amortizado da maquinaria e o custo de operação e manutenção das máquinas revelam-se

apenas como uma pequena fração do custo inicial. Os perfis obtidos por pultrusão são, na sua maioria, mais resistentes do que os perfis elaborados manualmente ou com outro tipo de processamento. O teor volumétrico de fibras é muito elevado, pois todo o excesso de resina acumulada é confinado na sua entrada para o molde antes de ser recolhida. Uma desvantagem desse processo consiste na limitação a secções de geometria constante dos perfis. Mesmo assim, tem sido extensamente utilizado na fabricação de perfis estruturais, treliças de suporte em edifícios temporários e corrimões.

2.3 CARACTERIZAÇÕES GERAL DE GFRP

Para se caracterizar o GFRP aborda-se suas propriedades típicas enquanto perfil pultrudado e, ainda, suas vantagens e limitações.

2.3.1 Propriedades típicas dos perfis pultrudados de GFRP

De acordo com Sousa (2011), as propriedades dos perfis pultrudados de GFRP dependem das características dos materiais que os constituem, ou seja, do tipo de fibras, matriz poliméricas e restantes constituintes. A orientação das fibras de reforço e a interação fibra-matriz também influenciam as suas propriedades, tal como acontece na maioria dos materiais poliméricos reforçados com fibras.

Sousa (2011) relata, também, que devido às inúmeras possibilidades de combinação desses elementos torna-se difícil estipular suas características básicas, ou seja, graças à flexibilidade do processo cada fabricante consegue alterar as características de mecânicas dos perfis. Comparam-se nas Tabelas 2 e 3 algumas propriedades mecânicas de diferentes produtoras de perfis pultrudados de GFRP, na direção paralela e normal às fibras, respectivamente. Os materiais produzidos apresentam comportamento anisotrópico, pois são obtidos pelo processo de pultrusão já referido, obtendo-se como produto final perfis com as fibras orientadas numa direção preferencial, sendo as propriedades mecânicas altamente dependentes desta orientação.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas na direção axial de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente

Propriedade	Produtora		
	<i>Fiberline</i>	<i>Strongwell</i>	<i>Creative P. Inc.</i>
Resistência à tração [MPa]	240	207	228-258

Resistência à compressão [MPa]	240	207	228-258
Resistência à flexão [MPa]	240	207	228-258
Resistência ao corte [MPa]	25	31	38-41
Módulo de elasticidade [GPa]	23-28	17-19	19-22
Módulo de distorção [GPa]	3,0	2,9	2,9
Coefficiente de Poisson	0,23	0,33	0,35

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas na direção normal de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente

Propriedade	Produtora		
	<i>Fiberline</i>	<i>Strongwell</i>	<i>Creative P. Inc.</i>
Resistência à tração [MPa]	50	48	52-55
Resistência à compressão [MPa]	70	69	76-88
Resistência à flexão [MPa]	100	110	113-137
Módulo de elasticidade [GPa]	8,5	5,5	5,5-6,9
Coefficiente de Poisson	0,09	0,14	0,15

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

Ainda consoante Sousa (2011), tem-se que devido a essa variação, a *European Committee for Standardization* (CEN) publicou, em 2002, uma norma europeia designada de EN 13706, que define especificações para os perfis pultrudados. Arbitra, ainda, sobre duas categorias de perfis, especificando as propriedades mínimas que um perfil deve apresentar para pertencer a cada categoria. Além dessa divisão, a norma também determina os tipos de ensaios mecânicos, físicos e térmicos normatizados que se devem utilizar para caracterizar essas propriedades dos perfis.

Através da análise das Tabelas 2 e 3, observa-se, ainda, que a resistência ao corte e o módulo de distorção não dependem da orientação das fibras e têm o mesmo valor para qualquer configuração, sendo apenas apresentados na primeira. De igual forma, como pode ser visto na Tabela 2 e posteriormente na Tabela 3, os fabricantes (*Fiberline*, *Strongwell*, *Creative P. Inc.*), oferecem materiais com propriedades mecânicas diferenciadas e que podem variar em função de sua orientação de fibras, como também em função de sua composição, o que torna a fórmula que indica proporções dos componentes de cada material segredo industrial, explicando o sigilo com que cada uma trata seus materiais.

Sousa (2011) salienta, ainda, que para o dimensionamento de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente deve-se levar em conta os valores dos coeficientes de segurança (γ_m), de acordo com a norma EN 13706 para os estados limites últimos. Esse coeficiente é obtido através da multiplicação de quatro coeficientes parciais (γ_{m1} a γ_{m4}), considerando-se o

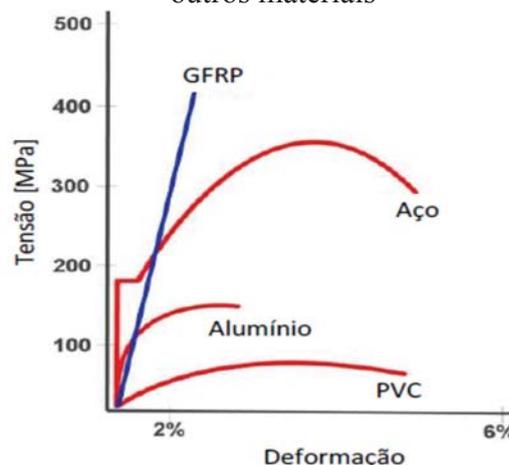
método de produção, grau de pós-cura, estabilidade dimensional em função da temperatura e a temperatura de operação. Ainda, a EN 13706 especifica vários tipos de combinações possíveis, desde as combinações A1 para o controle geral de deformações e as combinações A2 para os níveis máximos de deformação. Em quaisquer dessas combinações não é necessária a consideração de fatores de segurança para as propriedades mecânicas dos perfis.

Outra e decisiva característica de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente, segundo Nunes (2012), é seu peso próprio - tipicamente 18 kN/m^3 , com um teor de fibras que varia entre 25 e 60% e um coeficiente de dilatação térmica de $7,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Ou seja, em geral, os perfis pultrudado possuem peso que equivale de 25 a 40% do peso do aço, dependendo de sua configuração. Os materiais, geralmente, mais utilizados na produção de perfis pultrudados são as fibras de vidro com matriz de poliéster ou viniléster.

Guimarães (2007) cita que os perfis pultrudados possuem um peso 80% menor que o do aço e 30% menor que o do alumínio, enquanto sua densidade pode ser de $1,9 \text{ g/cm}^3$, o que pode ser considerada baixa se comparada a $7,9 \text{ g/cm}^3$ do aço e $2,8 \text{ g/cm}^3$ do alumínio.

Comparativamente com os materiais recorrentemente utilizados na engenharia de estruturas, Nunes (2012) relata que os perfis pultrudados de GFRP são caracterizados por possuírem uma resistência igual ou superior a do aço e comportamento praticamente elástico, linear até à ruptura (Figura 2).

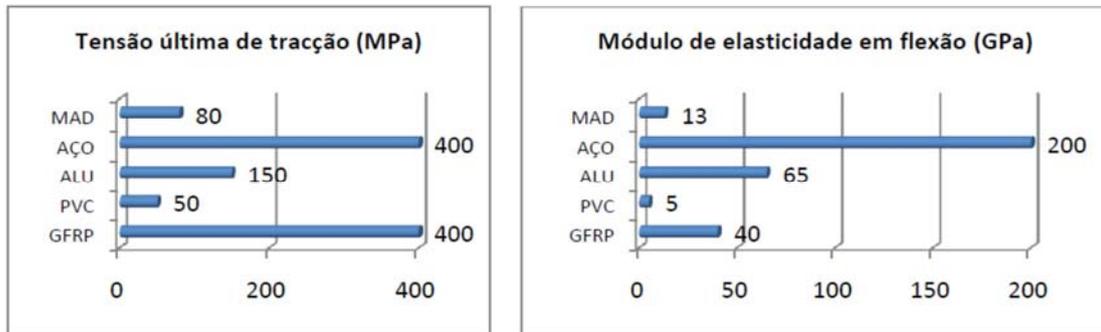
Figura 2 - Comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP em comparativo com outros materiais



Fonte: Adaptado de Nunes (2012).

Apresentam-se, na Figura 3, os valores típicos da tensão última de tração e do módulo de elasticidade em flexão dos perfis pultrudados de GFRP do fabricante europeu Fiberline.

Figura 3 - Comparação das propriedades mecânicas dos perfis GFRP com madeira, aço, alumínio e *Polyvinylchloride* (PVC)



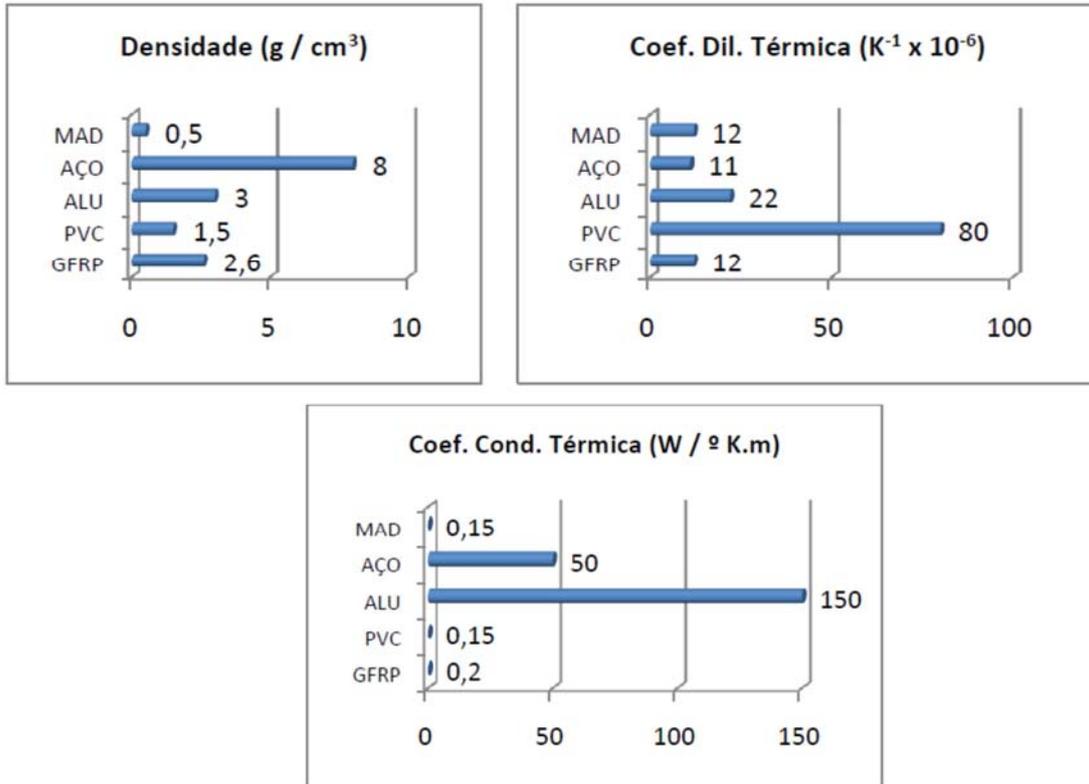
Fonte: Martins (2011).

Com base na análise da Figura 3, Martins (2011) salienta as seguintes diferenças nas propriedades mecânicas de GFRP, em relação ao aço, o principal material concorrente:

- a) relação tensão-deformação elástica-linear até a ruptura, o que contrasta com o comportamento dúctil do aço;
- b) tensão última superior à da generalidade dos aços estruturais;
- c) módulo de elasticidade reduzido, variando entre 10% a 20% do módulo de elasticidade do aço.

Na Figura 4 apresenta-se a comparação da densidade, coeficiente de dilatação térmica e coeficiente de condutividade térmica dos perfis pultrudados de GFRP do fabricante europeu Fiberline, em comparação com outros materiais (aço, alumínio, madeira e PVC).

Figura 4 - Comparação entre as propriedades físicas e térmicas dos perfis de GFRP com outros materiais (madeira, aço, alumínio e PVC)



Fonte: Adaptado de Martins (2011).

Martins (2011), com base nas figuras anteriores, salienta as seguintes propriedades dos perfis de GFRP, em relação ao aço:

- material extremamente leve, com uma densidade cerca de quatro a cinco vezes inferior a do aço;
- coeficiente de dilatação térmica semelhante ao do aço;
- coeficiente de condutividade térmica muito reduzido e significativamente inferior ao do aço.

2.3.2 Vantagens e limitações

De acordo com Sousa (2011), apresenta-se na Tabela 4 uma série de vantagens e limitações dos perfis pultrudados de GFRP.

Tabela 4 - Vantagens e limitações de perfis pultrudados GFRP

Vantagens	Limitações
Baixo peso específico.	Reduzido módulo de elasticidade.
Elevada relação entre a resistência mecânica e o peso próprio.	Comportamento frágil.
Possibilidade de produção de qualquer forma estrutural.	Necessidade de desenvolvimento de novas formas estruturais para materiais inteiramente compósitos e soluções híbrida.
Elevada resistência à fadiga.	
Elevada resistência à corrosão.	Necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de processamento ao nível das ligações.
Transparência eletromagnética.	
Facilidade no transporte para o estaleiro e instalação em obra.	
Baixos custos de manutenção.	Ausência de regulamentação específica.
	Custos iniciais ainda pouco competitivos na maioria das aplicações.

Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

2.4 DURABILIDADE DE GFRP

Lima Sobrinho (2005) salienta que os compósitos de matriz de resina têm sido usados extensivamente em vários setores industriais, e muitas dessas aplicações expõem o material a ambientes que comprometem a sua durabilidade. Para utilizar todo o potencial dos materiais compósitos, seu desempenho durante e após a exposição em altas temperaturas e ambientes com elevada umidade deve ser conhecido. Por essa razão, grande interesse tem sido concentrado sobre o efeito da exposição de materiais compósitos a condições de umidade e tem sido mostrado que, particularmente, a elevadas temperaturas, deve ocorrer degradação do compósito.

De acordo com Sousa (2011), em geral, os materiais FRP e respectivos componentes utilizados em aplicações de engenharia estão sujeitos a uma variedade de ambientes de exposição que podem agir individualmente ou interagir de uma forma sinérgica. Naturalmente, essa interação é importante, pois os materiais estão sujeitos, de um modo geral, a vários fatores de degradação. Salienta-se que a resistência individual de um material aos efeitos a que está exposto não implica necessariamente a deterioração do mesmo quando considerada a combinação simultânea dos mesmos fatores.

Conforme Martins (2011), para a análise do comportamento em serviço da estrutura é necessário ter em conta os aspectos de durabilidade. Segundo o referido autor, existe uma

lacuna no conhecimento dos principais agentes de degradação que atuam sobre o material, devido à escassez de informação sobre a durabilidade dos FRP. Alguns dos principais agentes ambientais com influência na durabilidade dos FRPs utilizados em aplicações estruturais, no entanto, já foram identificados, sobre os quais deverá incidir o esforço de investigações futuras:

- a) soluções aquosas e umidade;
- b) ambientes alcalinos;
- c) efeitos térmicos;
- d) radiação ultravioleta;
- e) fogo e temperaturas elevadas;
- f) fadiga;
- g) fluência;
- h) efeitos sinérgicos (combinação de vários fatores em simultâneo de modo a amplificar a degradação).

Descreve-se em seguida os fatores ambientais considerados, enfatizando de um modo mais detalhado as soluções aquosas, a umidade e a radiação ultravioleta, pois são os aspectos mais pertinentes para o estudo experimental desenvolvido na presente dissertação.

2.4.1 Soluções aquosas e umidade

De acordo com Sousa (2011), o envelhecimento de compósitos é relevante em atmosfera úmida ou meio aquoso. A penetração de umidade pode ocorrer através de cada uma das fases que constituem o material: fibra, matriz e interface fibra/matriz, ocasionando a plastificação da matriz, dilatação do material devido à absorção de água, fragilização devido à degradação por hidrólise da estrutura macromolecular, trincamentos e danos na interface fibra/matriz.

2.4.2 Ambientes alcalinos e cloretos

Consoante Sousa (2011), há várias pesquisas sobre a degradação de fibras de vidro em contato com ou imersas em soluções alcalinas, especialmente, soluções derivadas do concreto. Em tais meios verifica-se que as fibras de vidro expostas sofrem degradações severas devido a combinações de mecanismos que incluem a formação de pequenas cavidades por oxidação (*pitting*), a hidroxilação e a hidrólise, afetando os óxidos de silício das fibras.

2.4.3 Efeitos térmicos

Os efeitos térmicos incluem mudanças do material em resposta a variações de temperatura, ciclos térmicos, temperaturas acima da de cura do compósito e ciclos gelo-degelo. É reconhecido, no entanto, que nem todas as exposições térmicas são nefastas, pois em vários casos fomentam o já referido efeito de pós-cura. Mesmo assim, a exposição a temperaturas acima da de processamento pode resultar na degradação severa da estrutura da matriz polimérica e da interface fibra-matriz (SOUSA, 2011).

2.4.4 Radiação ultravioleta

Segundo Martins (2011), a radiação proveniente da luz solar atinge a Terra com uma gama de comprimentos de onda de grandeza suficiente para romper as ligações nos materiais poliméricos. A incidência da radiação UV é responsável pelo desencadear do mecanismo de fotodegradação. Esse afeta apenas a camada superficial (na ordem de 50 μm a 100 μm), podendo originar tensões localizadas nos perfis de GFRP.

Se um material compósito não for preparado para resistir a esse tipo de radiação, quer seja por uma tinta protetora ou mesmo por um material de revestimento, irá sofrer uma degradação superficial, a qual, em longo prazo, poderá deixar a descoberto as fibras de reforço. A nível estético, os principais problemas são a perda de brilho e o amarelecimento dos compósitos (MARTINS, 2011).

2.4.5 Fogo e temperaturas elevadas

A resistência ao fogo é uma das grandes preocupações, quando se fala em estruturas de GFRP. Conforme Martins (2011), como esses compósitos utilizam matrizes orgânicas, pode ser mais difícil o controle da propagação da chama, podendo ocorrer a libertação de fumos e gases.

Segundo o referido autor, há duas grandes preocupações relativas a esse compósito consoante o seu tipo de utilização:

a) se estiverem a ser utilizados em espaços confinados, como os túneis, é importante avaliar o nível de toxicidade dos fumos (e gases) libertados durante um incêndio;

b) se estiverem a ser utilizados como elementos estruturais (pontes, por exemplo), é necessário saber se a redução da resistência resultante da exposição a um incêndio é significativa para causar um possível colapso.

De acordo com Sousa (2011), o fogo pode aquecer a superfície de uma estrutura compósita até mais de 100 °C em poucos segundos e até mais de 400 °C em alguns minutos. Nos compósitos expostos, a altas temperaturas (tipicamente acima de 100 °C), a matriz polimérica amolece, podendo causar fenômenos de distorção, encurvadura ou ruptura em estruturas compósitas.

Inferre Martins (2011), que há três aspectos importantes a considerar nos FRP para analisar o seu comportamento ao fogo:

- a) efeito de temperaturas elevadas próximas ou até superiores à temperatura de transição vítrea;
- b) efeito da combustibilidade; e, por fim,
- c) efeito da toxicidade dos fumos libertados.

2.4.6 Fadiga

Expõe Martins (2011), que a fadiga é um fenômeno físico, que através da aplicação de ciclos de carga-descarga causa a ruptura do material ou dos seus constituintes. A carga aplicada nesse tipo de fenômeno não é suficientemente elevada para causar a ruptura na primeira aplicação. Normalmente, a fadiga é medida através do número de ciclos com uma dada amplitude necessária para que ocorra a ruptura do material.

Sousa (2011) salienta que a fadiga pode ser mecânica, térmica ou química. Para solicitações mecânicas, a ruptura por fadiga ocorre tipicamente em nós com ligações ou descontinuidades geométricas, iniciando-se por microfendilhação da matriz e degradação das ligações na interface fibra-matriz.

Correia (2008) relata que em materiais homogêneos e isotrópicos a ruptura por fadiga é ditada pela iniciação e propagação de uma fenda, ao passo que nos materiais compósitos ocorre uma acumulação generalizada de dano de natureza diversa: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminação e ruptura de fibras.

Segundo Freire Júnior (2001), devido à falha por fadiga todos os projetos estruturais ou de elementos de máquinas que sofrem a ação de cargas cíclicas devem ser dimensionados considerando a vida útil do material. Nesse sentido, convém pontuar que se pode medir a vida útil do material pelo tempo de uso ou pelo número de ciclos que o material deve suportar antes de falhar por fadiga, dando-se preferência a esse último. Por exemplo, componentes de aeronaves devem suportar pelo menos um milhão de ciclos (10⁶) antes de apresentarem falhas,

helicópteros devem suportar 100 milhões de ciclos (108) e para projetos de estruturas que devem durar trinta anos o mesmo deve suportar 5 bilhões de ciclos.

2.4.7 Resistência ao impacto

Relata Correia (2008) que os compósitos de alto desempenho possuem, relativamente aos metais em aplicações que requerem alta resistência, elevada rigidez e baixo peso, porém quando um dos requisitos de projeto passa ser resistência a impacto, seu uso deve ser reavaliado. De fato, esses materiais podem apresentar uma fraca resistência a esse tipo de solicitação, o que se traduz numa importante redução da sua resistência residual à compressão.

Os impactos gerados à baixa velocidade são, sem dúvida, a solicitação mais perigosa. As extensas zonas danificadas introduzidas pelo impacto e o tipo de dano que provoca (caracterizado por delaminagens entre camadas com diferentes orientações e por fissuração transversal), podem afetar de forma drástica a resistência residual da estrutura, principalmente, quando esta é submetida a solicitações de compressão. Também pelo fato de o dano poder não ser visível a olho nu, pode não ser possível observar fissuração superficial, sendo necessário recorrer a técnicas de análise relativamente sofisticadas, tais como os ultrassons e as radiografias (CORREIA, 2008).

A simples queda de uma ferramenta durante a fabricação ou manutenção de estruturas laminadas em material compósito, o manuseamento descuidado dessas, a queda de granizo, o impacto de aves nas aeronaves, dentre outros fatores, são algumas das situações típicas que poderão conduzir ao aparecimento do dano de laminagem (CORREIA, 2008). Há, de acordo com a referida autora, diversas possibilidades de melhorar o desempenho de uma estrutura compósita perante solicitações de impacto. No que se refere às propriedades do material, uma regra básica consiste em usar aqueles com maior tenacidade, porque absorvem maiores níveis de energia de deformação e dissipam mais energia durante os processos de danificação. São preferíveis, portanto, resinas dúcteis, como é o caso das resinas de epóxido modificado com partículas de borracha, ou as matrizes termoplásticas. Nesse caso, os requisitos no nível de resistência a condições ambientais adversas (umidade e temperatura) exigem a seleção de materiais bastante dispendiosos e mais difíceis de processar, como é o caso do *Polyetheretherketone* (PEEK) e das poliamidas.

A colocação de camadas adesivas mais tenazes - *interleaves* -, nas interfaces susceptíveis de delaminar, aumenta significativamente a resistência ao impacto, à medida que diminui claramente as tensões de corte interlaminares, diminuindo, assim, o tamanho das

delaminagens e a ruptura da matriz. Por outro lado, a hibridização, que consiste na introdução de dois ou mais tipos de fibras diferentes no mesmo laminado é, atualmente, um dos métodos mais usados para aumentar o desempenho dos compósitos ao impacto. A introdução de fibras de vidro em laminados de carbono é, frequente, a medida que, além de melhorar a resposta ao impacto, reduz o custo do laminado (CORREIA, 2008).

2.4.8 Fluência

Segundo Martins (2011), fluência é o aumento da deformação sob ação de uma carga constante ao longo do tempo, está relacionada com as propriedades visco elásticas das resinas que constituem a matriz do material compósito. O comportamento à fluência do material é dependente da orientação das fibras, os efeitos da fluência serão mais ou menos importantes, em função da orientação da solicitação e do sentido das fibras. As deformações por corte são muito mais dependentes da fluência do que as deformações por tração ou compressão. Resinas com um grau de cura incompleto, especialmente as resinas curadas à temperatura ambiente, apresentam efeito da fluência bastante significativo, existindo uma maior susceptibilidade de se originar microfendilhação no material.

Afirma Sousa (2011), que a resposta no tempo de componentes estruturais está frequentemente associada aos fenômenos de fluência. A fluência é, normalmente, um fenômeno indesejado, pois, muitas vezes, representa o fator que limita a vida útil do material. A relaxação é o inverso da fluência, onde o material é sujeito à deformação constante e verificam-se reduções de tensão ao longo do tempo.

Salienta Sousa (2011), ainda, que a durabilidade de um compósito FRP corresponde às condições de carregamento na componente de aplicação estrutural. Não existe nenhuma solução universal para os problemas de durabilidade. Perfis pultrudados de FRP sujeitos a fenômenos de fluência por um período de um ano, registaram entre 13 e 19% de deformação em relação à estática inicial. Por outro lado, as previsões de deformação por fluência excederam 70% da deformação inicial para um período de 30 anos, sugerindo a importância desse fator e a necessidade de estabelecer um critério de limitação da deformação.

2.5 LIGAÇÕES DE PERFIS GFRP

Segundo Mendes Correia (2012), a ligação entre elementos tem como objetivo a transferência de esforços entre eles; sempre que possível, as ligações são evitadas uma vez que

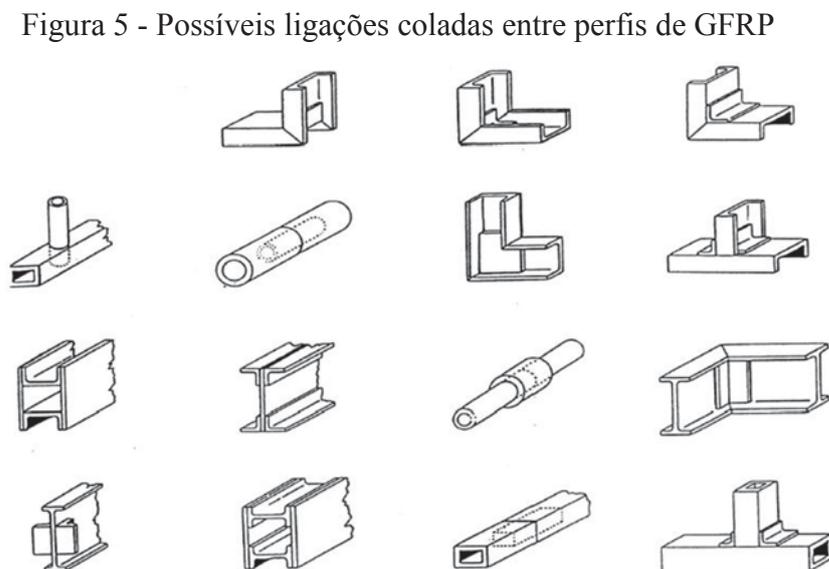
a concentração de tensões na zona de ligação pode levar à ruptura dos elementos. Há, essencialmente, três tipos de ligação utilizados em estruturas de GFRP: parafusadas, coladas e combinadas (parafusadas e coladas).

De acordo com Martins (2011), as ligações entre os perfis de GFRP são, na sua maioria, aparafusadas, assim, as ligações coladas são mais adaptadas às características específicas dos perfis de GFRP. Essas são menos utilizadas devido às dificuldades associadas à sua análise e dimensionamento, bem como às dúvidas quanto ao seu comportamento em longo prazo ou em situação de incêndio.

2.5.1 Ligações coladas

Os adesivos estruturais têm sido maioritariamente desenvolvidos pela indústria aeronáutica. No início do século XX, as aeronaves utilizavam adesivos resultantes de materiais poliméricos naturais à base de caseína, os quais apresentavam um bom funcionamento exceto quando submetidos a ambientes úmidos. Nos anos 1940 do mesmo século, surgiram os adesivos sintéticos, que ultrapassaram os problemas de durabilidade dos adesivos naturais. As indústrias automotivas e naval têm tido uma utilização crescente de materiais de plástico e compósito, os quais são difíceis de ligar por métodos tradicionais. Assim, as ligações coladas com adesivos constituem o método de ligação mais adequado (MARINHO, 2012).

Na Figura 5, representam-se alguns exemplos de possíveis ligações coladas entre perfis de GFRP.



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

As ligações adesivas estruturais, quando comparadas com outros métodos de ligação, apresentam as seguintes vantagens (MARINHO, 2012):

- a) distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área de sobreposição, permitindo uma maior rigidez e transmissão de carga;
- b) redução ou eliminação de concentrações de tensões, devido à inexistência de furos;
- c) elevada capacidade de amortecimento de vibrações, o que permite melhorar a resistência à fadiga;
- d) capacidade de ligação de materiais diferentes e com diferentes coeficientes de expansão;
- e) possibilidade de automatizar os processos de mistura e aplicação do adesivo;
- f) permitem estruturas com contornos regulares, pois evitam furos e marcas de soldadura.

Segundo Martins (2011), as ligações coladas possuem, além das citadas acima, as seguintes vantagens:

- a) é mais fácil disfarçar as juntas;
- b) alguns tipos de cola são extremamente resistentes e rígidos, fazendo com que a área de ligação seja menor.

As ligações coladas, apesar de parecerem ser mais bem adaptadas à natureza frágil e anisotrópica dos materiais FRP, são as menos utilizadas, pois apresentam algumas limitações em relação aos outros métodos de ligação, destacando-se as seguintes (MARINHO, 2012):

- a) a geometria deve garantir uma distribuição uniforme de tensões;
- b) necessidade de utilização de ferramentas de fixação, mantendo as peças em posição enquanto o adesivo endurece;
- c) necessidade de preparar as superfícies para melhorar a aderência entre o adesivo e o substrato, de modo a obter melhor desempenho e resistências mecânicas mais elevadas;
- d) a maioria dos adesivos são curados a temperaturas elevadas, sendo necessária a utilização de calor;
- e) durabilidade fortemente dependente das condições de processamento;
- f) processo de endurecimento lento (pode chegar a 15 horas);
- g) dificuldade em garantir as condições de qualidade necessárias, sobretudo em obra;
- h) impossibilidade de retificar as peças ligadas após a cura do adesivo;
- i) dificuldades associadas à sua análise e funcionamento;
- j) inflamabilidade e toxicidade da maioria dos adesivos;
- l) incerteza quanto ao seu comportamento a longo prazo;

m) dúvidas sobre o seu desempenho em caso de incêndio.

A determinação da resistência das ligações coladas entre materiais poliméricos reforçadas com fibras é difícil por diversos fatores, entre os quais (MARINHO, 2012):

a) a natureza anisotrópica e o seu comportamento linear até à ruptura do material FRP a ligar;

b) a sensibilidade da ligação à taxa de deformação e às condições ambientais;

c) a complexidade da distribuição de tensões multi-axial e das dificuldades associadas

d) à determinação de uma resposta exata de tensão-deformação;

e) as incertezas relativas ao processo de ruptura e à resistência do material associado.

As ligações coladas, quando comparadas com as ligações parafusadas, permitem obter ligações com maior eficiência e rigidez. Sendo a última característica importante pelo fato da deformabilidade ser um dos requisitos condicionantes para o dimensionamento de perfis de GFRP (MARINHO, 2012). Nas ligações coladas, as forças são transmitidas de uma forma uniforme, primeiramente, à matriz, que é frágil, e, posteriormente, às fibras de reforço.

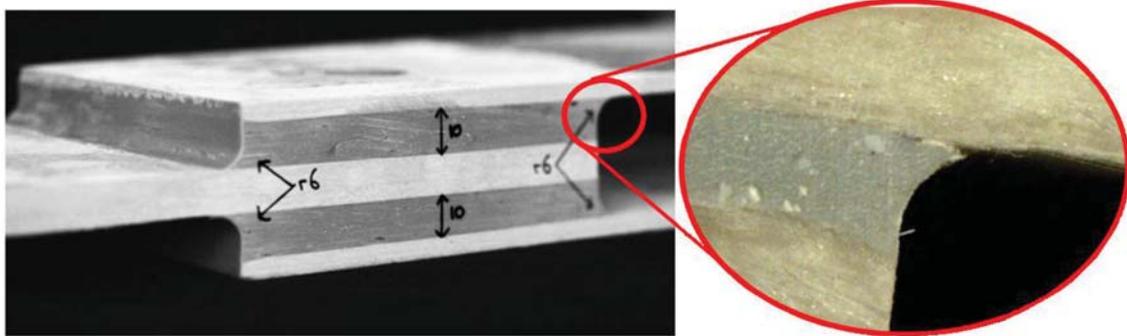
Contudo, quando se trata de rigidez de ligações, a estrutura colada leva vantagem por aproximar a situação determinada por engenheiros calculistas, o que, segundo Cunha, Foltête e Bouhaddi (2006), na necessidade de dimensionamento de estruturas isostáticas e hiperestáticas deve ser considerado em virtude da influência do comportamento das ligações. Em termos de cálculo estrutural, a questão que se coloca em relação à condição de extremidade das barras, vigas e pilares é a de saber qual é o comportamento da ligação, se é rígido ou flexível. Por facilidade de modelagem, observa-se, na prática, que os engenheiros calculistas supõem que a ligação ou é rígida ou é rotulada, essa simplificação pode gerar estruturas que trabalham com apenas uma fração de sua resistência última.

Há quatro mecanismos de adesão em ligações coladas, que Magalhães (1999 apud MARINHO, 2012) identifica como sendo os mais usuais: a teoria mecânica, a teoria da difusão, a teoria eletrônica e a teoria da absorção. A teoria mecânica defende que a força de adesão se deve, maioritariamente, à fixação “física” do adesivo nas irregularidades da superfície do substrato. A adesão por difusão polimérica só é considerada, quando ambos, os substratos e o adesivo, são polímeros. A teoria eletrônica considera a existência de uma dupla camada eletrostática entre determinadas interfaces. Por último, a teoria de absorção defende a existência de forças interatômicas e intermoleculares desenvolvidas nas superfícies do adesivo e do substrato, quando se estabelece contato molecular na interface.

Os fatores que influenciam o comportamento de ligações coladas são os mais variados, como, por exemplo, o comprimento de sobreposição, a espessura do adesivo e do substrato, e,

ainda, a geometria do filete. Entende-se por filete a zona de adesivo na extremidade do comprimento de sobreposição (Figura 6).

Figura 6 - Filete de uma ligação colada entre perfis de GFRP



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

Vallée e Keller (2006) estudaram a influência do comprimento de sobreposição e da espessura, quer do adesivo quer do substrato, em ligações coladas duplas entre perfis pultrudados de GFRP. Concluíram que a variação na espessura da camada de adesivo (entre 1 e 3 mm) tem pouca influência na distribuição das tensões e praticamente nenhuma influência na resistência da ligação. Com o incremento do comprimento de sobreposição (entre 50 e 200 mm), a carga de ruptura converge para um valor constante.

Na mesma direção, vários autores pesquisaram o efeito da redução de tensão provocada pela geometria do filete. Adams e Peppiatt (1987 apud MARINHO, 2012), analisaram a influência da geometria dos filetes na distribuição da tensão em ligações entre substratos metálicos e demonstraram que a presença de filetes reduz significativamente os picos de tensão nas extremidades da sobreposição. Os referidos autores investigaram, ainda, o efeito de mudanças locais na geometria do filete de ligações coladas simples e concluíram que a inclusão de um filete triangular pode provocar um aumento de 25% da resistência da ligação, quando comparada com uma ligação sem filete. Se, para além do filete triangular, os substratos forem arredondados, a resistência de colagem sofre um acréscimo de 50%.

Lang e Mallick (1998 apud MARINHO, 2012), também estudaram a influência de diferentes geometrias de filetes e chegaram à conclusão que existe uma grande redução da tensão de pico para os filetes triangulares e redondos de grandes dimensões. Vallée e Keller (2006) buscaram compreender a influência da espessura do adesivo, do raio do filete circular e do comprimento de sobreposição em ligações coladas duplas. Esses autores demonstraram que a resistência da ligação aumenta linearmente com o aumento do comprimento de sobreposição, mas diminui consideravelmente com o aumento da espessura da camada de adesivo.

Concluíram, ainda, que o aumento do raio do filete apenas provoca um ligeiro aumento na resistência da ligação.

2.5.1.1 Classificação dos adesivos

A classificação dos adesivos varia de autor para autor, podendo ser feita com base em diversos critérios, de entre os quais se destacam (MARINHO, 2012):

- a) natureza;
- b) função;
- c) composição química;
- d) método de reação;
- e) forma física.

Quanto à sua natureza, os adesivos podem ser classificados como sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos são fabricados através de materiais produzidos pelo Homem. Por outro lado, os adesivos classificados como naturais são produzidos a partir de subprodutos animais ou agrícolas (MARINHO, 2012).

Ainda de acordo com Marinho (2012), os adesivos, quanto à sua função, podem-se subdividir em estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais apresentam elevada resistência e desempenho, resistindo a cargas elevadas sem apresentarem grande deformação. Na maioria dos casos, esse tipo de adesivos apresenta uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa. Os adesivos não estruturais limitam-se apenas a manter em posição peças mais leves. Esse tipo de adesivo apresenta uma fluência considerável quando sujeitos a cargas moderadas e uma maior degradação do que os adesivos estruturais, quando expostos ao meio ambiente durante longos períodos de tempo.

Os adesivos termoendurecíveis, termoplásticos e elastômeros são subtipos de adesivos segundo a sua composição química. Os adesivos termoendurecíveis, uma vez reticulados, podem ser moderadamente aquecidos, no entanto, não podem ser refundidos. Esse tipo de adesivo apresenta um processo de cura irreversível. A reticulação dos adesivos termoendurecíveis é resultado de uma ligação química, de onde resulta a união de dois polímeros lineares, formando uma estrutura tridimensional (MARINHO, 2012).

Os adesivos termoplásticos, ao contrário dos adesivos termoendurecíveis, não curam com o calor. Originalmente, esses adesivos apresentam-se sob a forma de polímeros sólidos, que se fundem quando sujeitos a temperaturas elevadas. A exposição repetida de ciclos térmicos, até à temperatura de fusão, pode causar a degradação do material por oxidação. Os

adesivos termoplásticos apresentam uma temperatura de serviço mais reduzida do que os adesivos termoendurecíveis e não tendem a fluir pela ação de cargas a temperaturas reduzidas. Esse tipo de adesivo sofre efeitos de fluência a longo prazo, o que limita a sua utilização em aplicações estruturais. Os adesivos elastoméricos apresentam elevada tenacidade e capacidade de deformação, retomando o seu comprimento inicial após a descarga da peça. Esses adesivos apresentam um comportamento visco-elástico, o que lhes permite obter uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade, permitindo ligar substratos com coeficientes de expansão térmica diferente (MARINHO, 2012).

O método de reação dos adesivos é também uma forma de os classificar, distinguindo o modo como esses solidificam. Os adesivos podem solidificar segundo os seguintes métodos (MARINHO, 2012):

- a) por reação química;
- b) por perda de solvente;
- c) por perda de água;
- d) por arrefecimento a partir do estado fundido.

A forma física é um método muito comum de classificar os adesivos. Esses podem se subdividir nas formas de:

- a) pasta: policomponente sem solvente ou monocomponente sem solvente;
- b) líquido: adesivo com solvente ou adesivos aquosos;
- c) sólido: fita e filme ou pó (MARINHO, 2012).

Para o referido autor, os adesivos em líquido e em pasta têm características semelhantes, diferindo, essencialmente, na sua viscosidade. Os adesivos em pasta são menos viscosos do que os líquidos e, ao contrário destes, podem apresentar um comportamento tixotrópico, facilitando o processo de colagem, pois não escoam durante a cura.

Os adesivos monocomponentes são mais vantajosos do que os adesivos policomponentes para produções industriais, devido à mistura e às perdas associadas ao processo. As variedades de componentes do adesivo policomponente devem ser misturadas imediatamente antes de serem utilizadas, pois a sua trabalhabilidade após essa mistura tem um período de tempo limitado. Em geral, os adesivos policomponentes, ao contrário dos adesivos monocomponentes, podem curar à temperatura ambiente (MARINHO, 2012).

Os adesivos com solvente e com água apresentam-se sob a forma de líquido. Tanto o solvente como a água evaporam ou difundem-se no substrato se esse for poroso. Esse tipo de adesivo, por ser líquido, apresenta uma viscosidade reduzida, o que facilita a sua aplicação. Os adesivos aquosos são, muitas vezes, substitutos dos adesivos com solvente por esses últimos

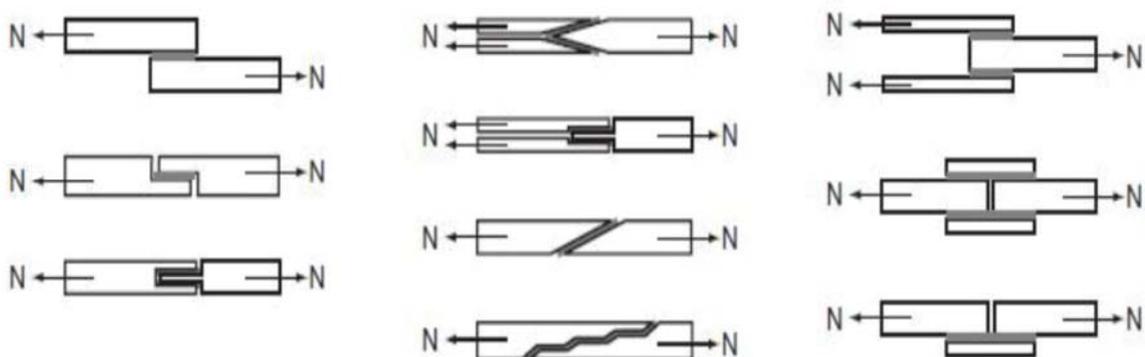
constituírem-se em uma preocupação para a saúde, segurança e meio ambiente. No entanto, os adesivos aquosos apresentam alguns inconvenientes como, por exemplo, o maior consumo de energia, a necessidade de mais tempo e calor para curar e a possibilidade de provocar corrosão em fornos utilizados para aplicações de engenharia civil (MARINHO, 2012).

Os adesivos sob a forma de sólido são os mais apreciados em produções industriais, por poderem ser aplicados de forma uniforme nos substratos com desperdícios mínimos ou nulos. O fato de apenas possuírem um só componente também representa uma vantagem para a sua aplicação, visto não necessitarem de nenhuma dosagem ou mistura (MARINHO, 2012).

Hoje em dia, o conhecimento sobre ligações coladas é reduzido em comparação com as ligações parafusadas. Quando o conhecimento sobre as ligações chegar a um ponto aceitável, possivelmente, os testes necessários de verificação às ligações coladas (que são bastante mais exaustivos em comparação com as ligações parafusadas), deixarão de ser necessários, tornando esta ligação como a mais usada em perfis GFRP (MARINHO, 2012). Vários testes demonstram que a combinação de ligações coladas com ligações parafusadas pode ser interessante, desde que os parafusos sejam devidamente colocados, uma vez que esses parafusos podem prevenir a propagação de fissuras que poderão levar à ruptura das ligações coladas (MARINHO, 2012).

Nas ligações coladas, as superfícies entre os perfis a colar deverão ser preparadas, deixando a superfície organizada para que a ligação ocorra, através da limpeza com recurso a ar comprimido, a acetona, de forma que a superfície fique rugosa para que essa ligação seja o mais eficiente possível, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de superfície para ligações coladas, submetidas a uma carga “N”



Fonte: Adaptado de Martins (2011).

2.5.1.2 Preparação da superfície do substrato

A preparação da superfície do substrato constitui uma condição necessária para o estabelecimento de uma ligação forte. A compatibilidade entre o adesivo e o substrato é um fator de extrema importância para o sucesso de uma ligação. Magalhães (1999 apud MARINHO, 2012) define compatibilidade como a maior ou menor facilidade com que o adesivo molha a superfície, consequência da energia superficial de cada um.

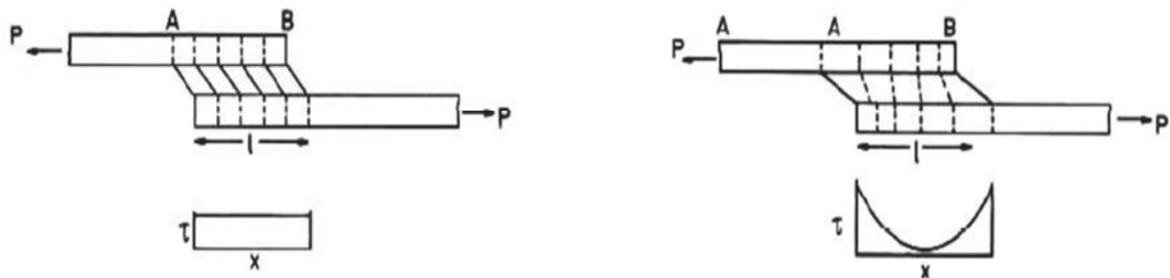
Os materiais de GFRP com matriz polimérica do tipo termoplástica devem ser limpos e secos, não devendo apresentar depósitos de gorduras, agentes antiestáticos, ceras ou agentes de desmoldagem. Para os materiais de GFRP com matriz polimérica do tipo termoendurecível, o processo mais comum de preparação da superfície é a remoção por lavagem com detergentes ou solventes, seguida de uma lixagem para aumentar a rugosidade superficial. Os solventes mais comuns são os seguintes: acetona, tolueno, tricloroetileno, *Methyl ethyl ketone* (MEK), e o isopropanol. A abrasão deve ser realizada com lixas de granulometria fina, abrasivos à base de carborundum ou alumina, lãs metálicas ou projeção de partículas metálicas. Para a ligação entre superfícies termoendurecíveis com resina epoxídica, para além dos processos descritos, é necessária a limpeza com um pano para a remoção de poeiras e a repetição do tratamento com solvente (MARINHO, 2012).

Quanto ao lixamento, Ribeiro, De Jesus e Ferreira (2006) salientam o quão os processos de limpeza e lixamento são importantes para o sucesso da colagem. Contudo, o mesmo cita, também, que além do processo de lixamento pode ser executada a escarificação, que consiste em produzir ranhuras no objeto a ser colado, com o intuito de aumentar o ancoramento do adesivo. Ribeiro, De Jesus e Ferreira (2006) afirmam, também, ancorados em seu estudo, a eficiência da utilização de lixa de granulometria 120, para melhorar a rugosidade de superfície.

2.5.1.3 Estados de tensão e modos de ruptura

Considerando que numa ligação colada por sobreposição simples, sujeita a um esforço axial de tração, os substratos são rígidos e o adesivo deforma-se elasticamente em corte puro, origina-se um estado de tensão de cisalhamento uniforme no adesivo, tal como ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Tensões de corte (τ) no adesivo, (a) para um comportamento rígido e (b) para um comportamento elástico das peças a ligar

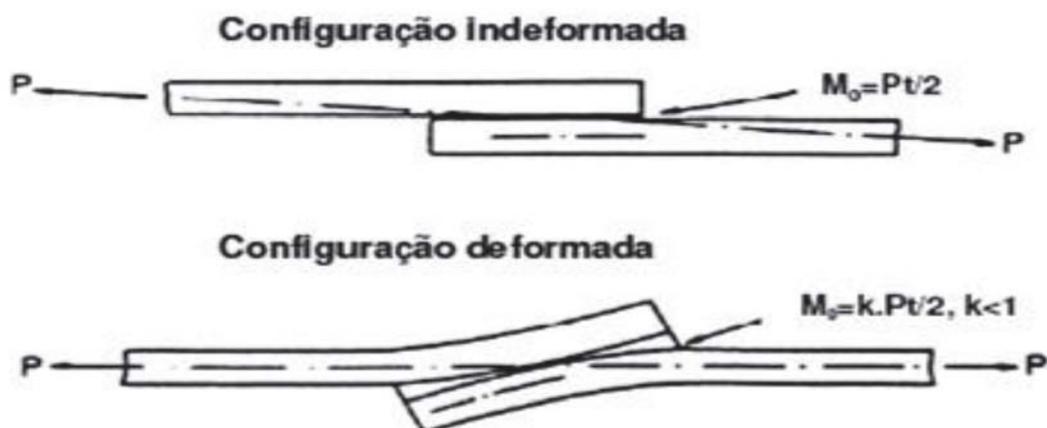


Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

Conclui-se, ao analisar a Figura 8, que se considerar a deformação elástica dos substratos, as tensões de corte deixam de ser uniformes, observando-se concentrações de tensões nas extremidades da ligação (MARINHO, 2012). Goland e Reissner (1944 apud MARINHO, 2012), demonstraram que em ligações coladas por sobreposição simples, o efeito de flexão devido à excentricidade da carga em relação ao adesivo deve ser contabilizado, como é possível observar na Figura 8.

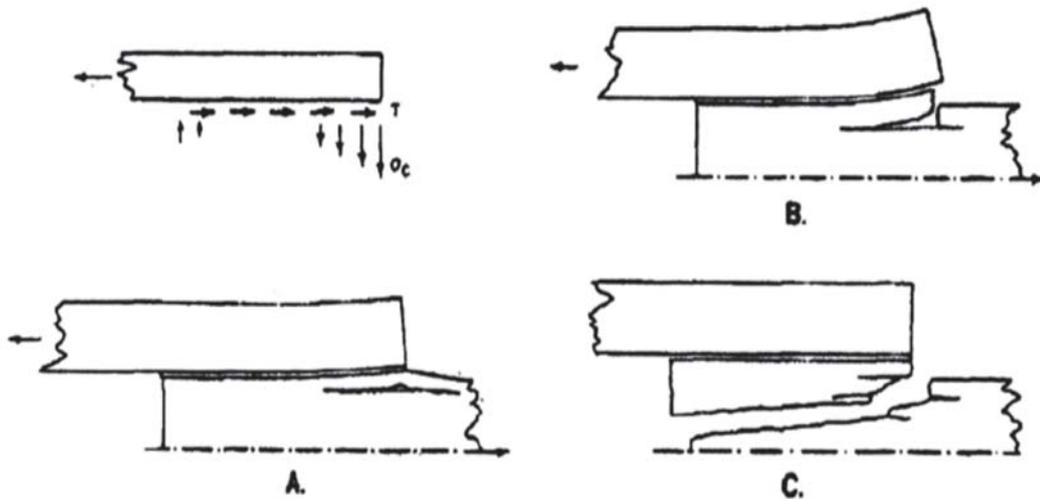
Foram ainda verificadas, pelos citados autores, tensões de tração normais ao plano dos substratos, podendo ocorrer delaminação nas extremidades dos substratos (Figura 9 e Figura 10).

Figura 9 - Efeito de flexão devido à excentricidade em ligações de sobreposição simples



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

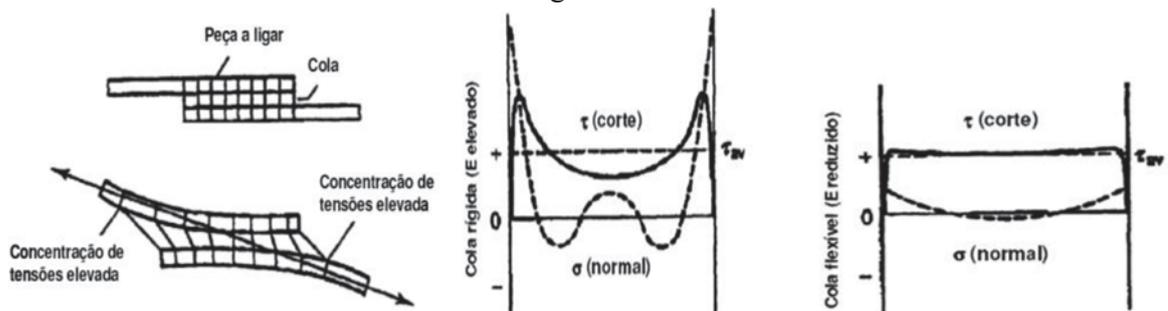
Figura 10 - Sequência (A C) da ruptura por pelagem de uma das peças a ligar



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

Outro fator que influencia o comportamento das ligações coladas é a flexibilidade dos adesivos. Quanto maior for a flexibilidade do adesivo, mais uniformes serão as tensões normais e de corte. Segundo Adams e Peppiatt (1973 apud MARINHO, 2012), podem-se desenvolver concentrações elevadas de tensão ao longo da largura da ligação, sendo tensões de corte no adesivo e tensões normais nos substratos, tal como é ilustrado na Figura 11.

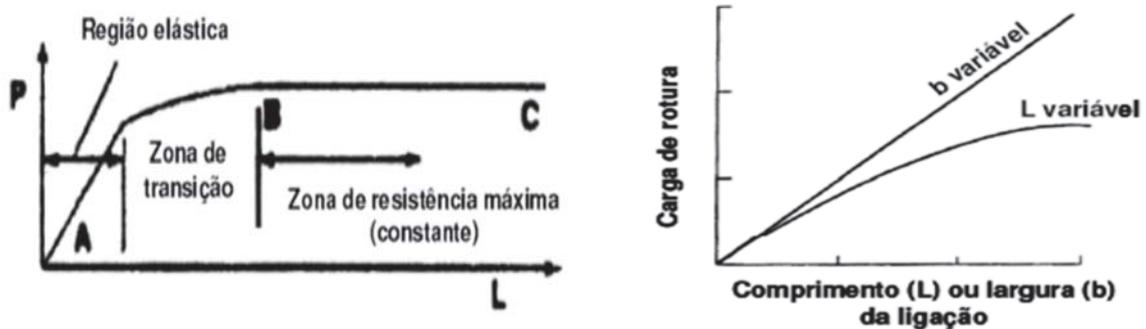
Figura 11 - Comparação entre as distribuições de tensões normais (σ) e de corte (τ) em adesivos rígidos e flexíveis



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

O comprimento de sobreposição da ligação influencia, de forma assintótica, o valor da resistência da ligação, ao contrário da largura da ligação, que tem uma influência diretamente proporcional à resistência da ligação (Figura 12).

Figura 12 - Efeito da variação da largura (b) e do comprimento (L) de uma ligação por sobreposição simples



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

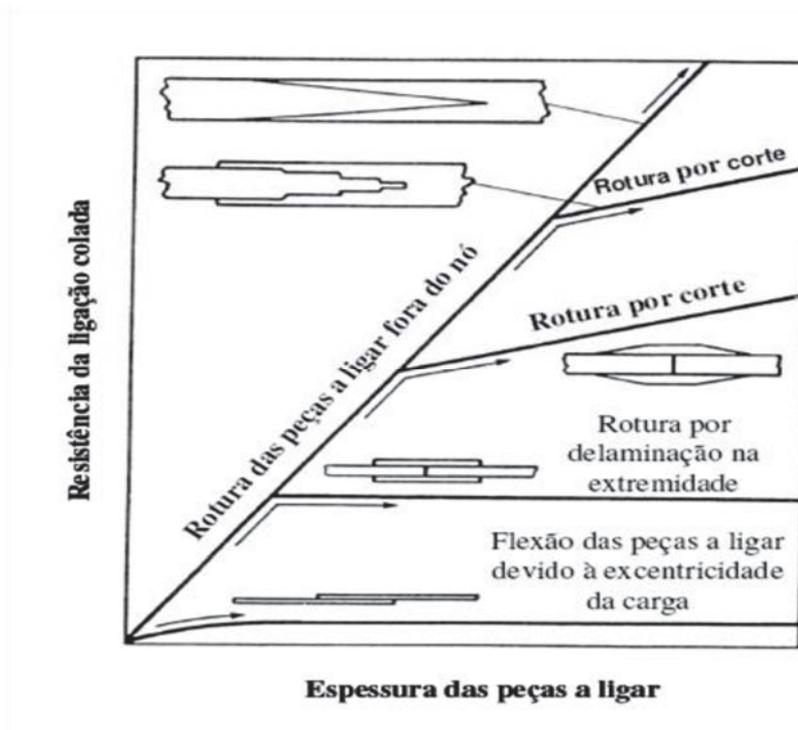
A Figura 12 ilustra a resistência de diferentes configurações de ligações coladas, em função da espessura dos substratos a ligar. A eficiência das ligações por sobreposição simples é limitada pela espessura dos substratos, não devendo exceder 1,5 mm, e pelo comprimento da ligação, que deve ser cerca de 30 vezes a espessura dos substratos. Nesse tipo de configuração de ligação, a ruptura ocorre, geralmente, por delaminação da extremidade dos substratos.

Na indústria da construção, apenas a adaptação de configurações mais complexas, como entalhe em degrau ou oblíquo, permite obter ligações com resistências elevadas, já que, em geral, as peças a ligar têm espessuras superiores a 10 mm. Nesse tipo de ligação, a ruptura ocorre devido a tensões de corte e a resistência da ligação aumenta sempre com a espessura dos substratos a ligar.

Os modos de ruptura de ligações coladas entre perfis de GFRP podem ser classificados, como mostra-se à Figura 13, de acordo com Marinho (2012), da seguinte forma:

- a) ruptura na interface entre o adesivo e o perfil (ruptura adesiva);
- b) ruptura dentro da camada de adesivo (ruptura coesiva);
- c) ruptura por delaminação do perfil;
- d) ruptura por tração do perfil;
- e) ruptura por tensões transversais no perfil.

Figura 13 - Resistência relativa de diferentes configurações de ligações coladas



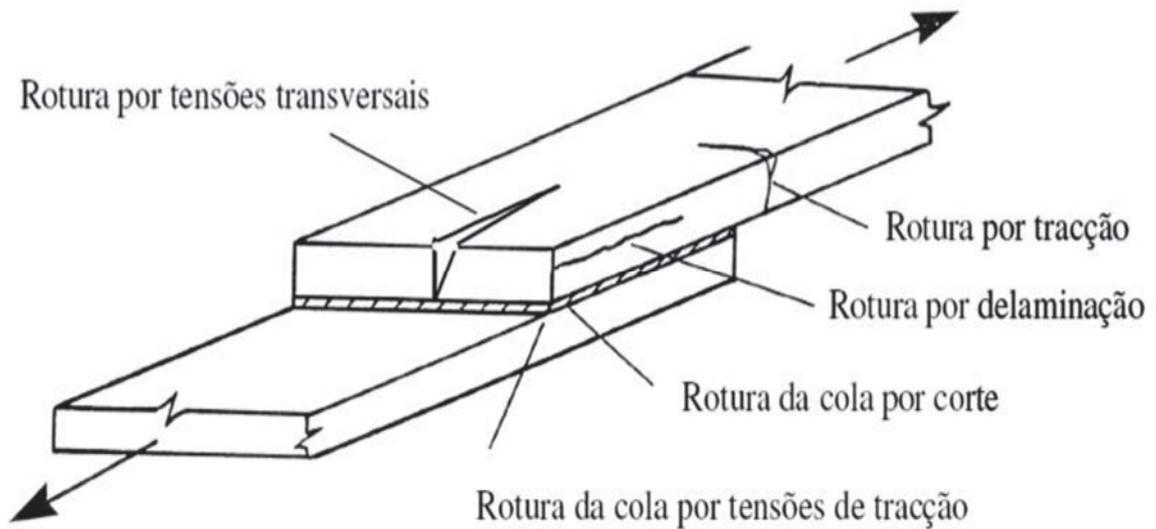
Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

A ruptura adesiva dá-se pela interface entre o adesivo e o perfil e ocorre, normalmente, devido a uma inadequada preparação da superfície ou a uma inapropriada combinação entre os materiais. A ruptura coesiva incide sobre a camada do adesivo e é, geralmente, devida ao excesso de tensões principais: tensões de corte e, dependendo da geometria da ligação e dos materiais, tensões de arrancamento (MARINHO, 2012).

A Figura 14 ilustra uma classificação exhaustiva dos modos de ruptura de ligações entre elementos em FRP, de acordo com a norma americana ASTM D5573 (2012):

- a) ruptura por tensões transversais;
- b) ruptura por tração;
- c) ruptura por delaminação;
- d) ruptura da cola por corte ou cisalhamento;
- e) ruptura da cola por tensões de tração.

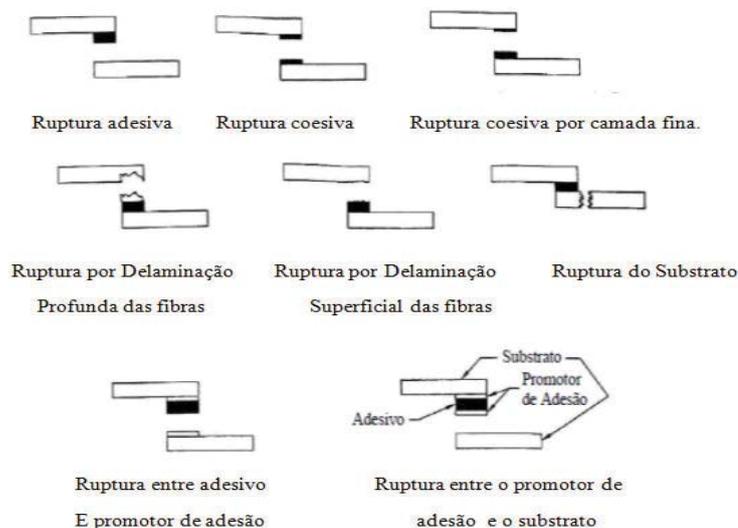
Figura 14 - Tipos de ruptura de ligações coladas por sobreposição simples entre substratos de GFRP



Fonte: Adaptado de Marinho (2012).

Comparando com a descrição anterior, a norma ASTM D5573 (2012) distingue, ainda, dois subtipos de rupturas por delaminação de acordo com a profundidade da superfície de ruptura: a ruptura por delaminação profunda, que ocorre no interior da matriz polimérica do perfil; e a ruptura por delaminação superficial, ocorrendo ao nível da superfície do perfil. A norma americana também introduz dois subtipos de rupturas do adesivo, envolvendo o conceito de promotor de adesão. Assim, são definidos os seguintes novos tipos de ruptura: ruptura entre o adesivo e o promotor de adesão e ruptura entre o promotor de adesão e o substrato (Figura 15).

Figura 15 - Classificação dos modos de ruptura das ligações entre FRP, segundo a norma

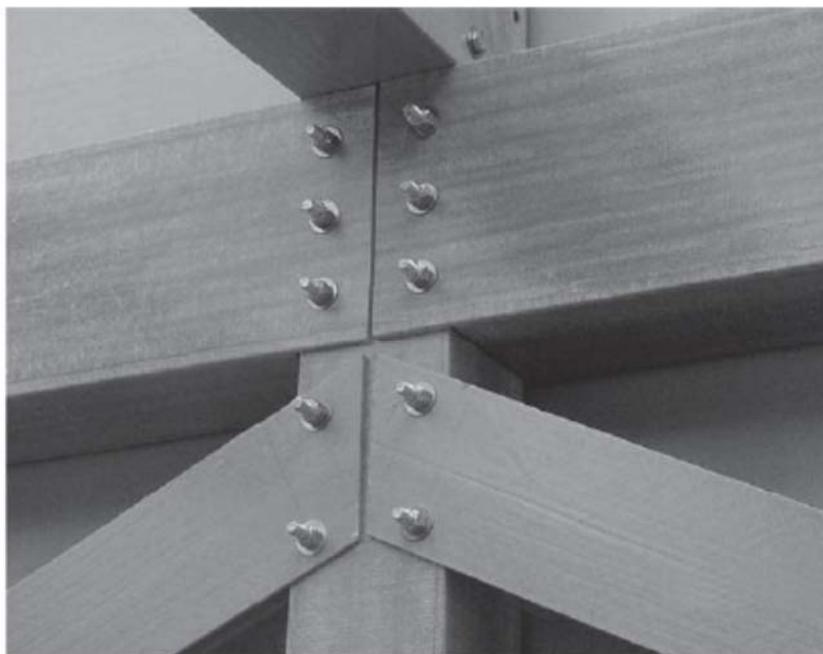


Fonte: ASTM D5573 (2012) adaptado.

2.5.2 Ligações parafusadas

Segundo Mendes Correia (2012), as ligações parafusadas são as mais comumente utilizadas em GFRP, conforme mostra-se na Figura 16. Esse método, adaptado das estruturas metálicas, revela algumas desvantagens em estruturas de GFRP. A execução do furo rompe localmente as fibras de reforço, originando uma fragilização do elemento. A concentração de tensões na zona da ligação pode também levar à ruptura, pois pelo fato de o material ter um comportamento frágil e não ter ductilidade que permita fazer uma redistribuição de esforços, leva a uma maior sollicitação da ligação, comparativamente às estruturas metálicas. Como vantagem apresenta uma fácil execução e manutenção.

Figura 16 - Demonstração de uma ligação parafusada numa estrutura de perfis pultrudados



Fonte: Mendes Correia (2012).

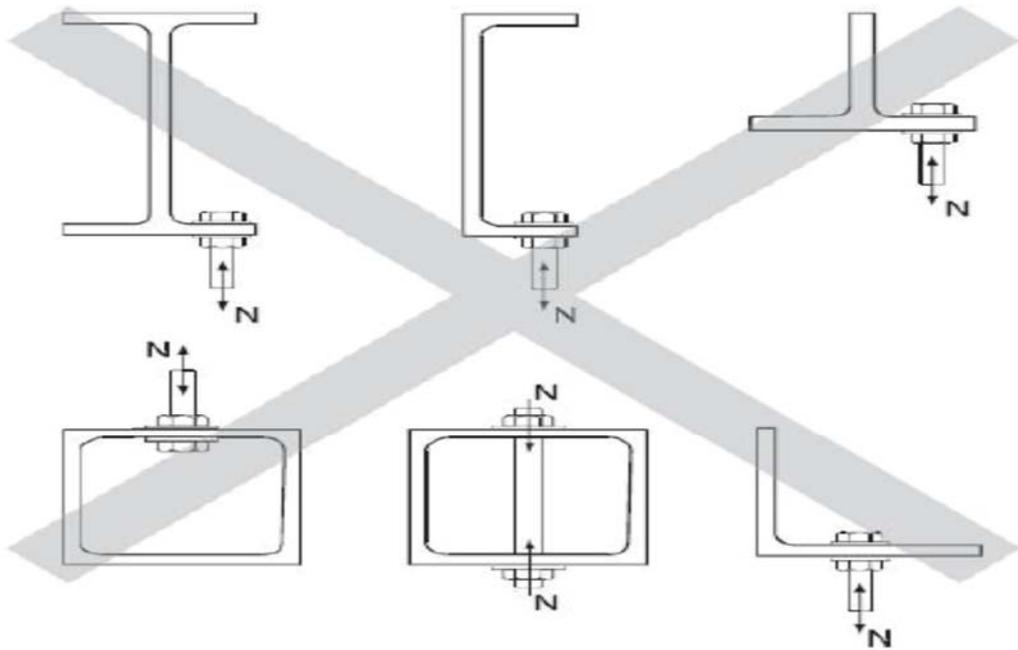
De acordo com Martins (2011), a capacidade de carga de uma ligação parafusada é suficiente quando os seguintes pontos são satisfeitos:

- a) o aperto dos parafusos tem de ser suficiente para que o equilíbrio com as forças de corte seja conseguido;
- b) a compressão provocada pelo aperto do parafuso com o perfil deve ser absorvida localmente. Isto é garantido se não se excederem os limites estabelecidos entre o diâmetro do parafuso e a espessura do perfil;

c) as ligações dimensionadas para forças de corte devem transmitir as forças pela superfície do perfil entre as ligações e o resto do perfil.

As formas dos perfis presentes na Figura 17, segundo Martins (2011), apresentam algumas limitações ao nível das ligações parafusadas em diversos tipos de perfis, de forma a que o perfil não frature ou apresente anomalias.

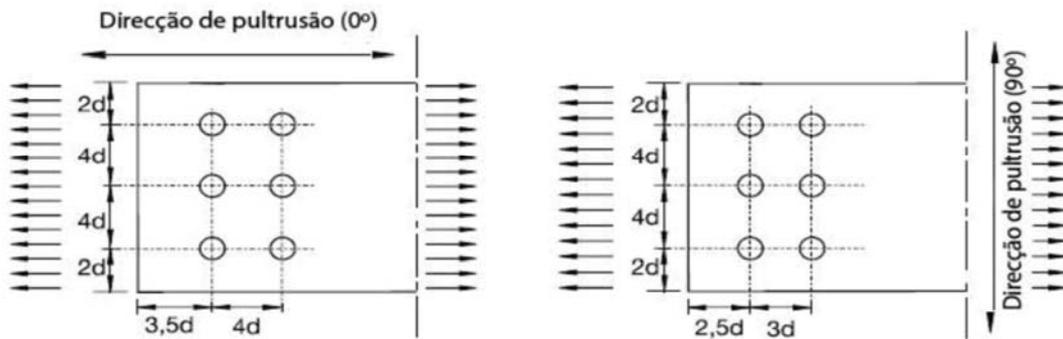
Figura 17 - Zonas dos perfis onde não é aconselhado fazer a ligação parafusada.



Fonte: Adaptado de Martins (2011).

De acordo com Martins (2011), as ligações parafusadas têm ainda limitações ao nível da distância entre os parafusos, como demonstra a Figura 18. Essa distância varia consoante a direção do processo de pultrusão. Tal fato deve-se a não excessiva proximidade dos parafusos, o que poderá provocar tensões entre esses, causando a ruptura do material.

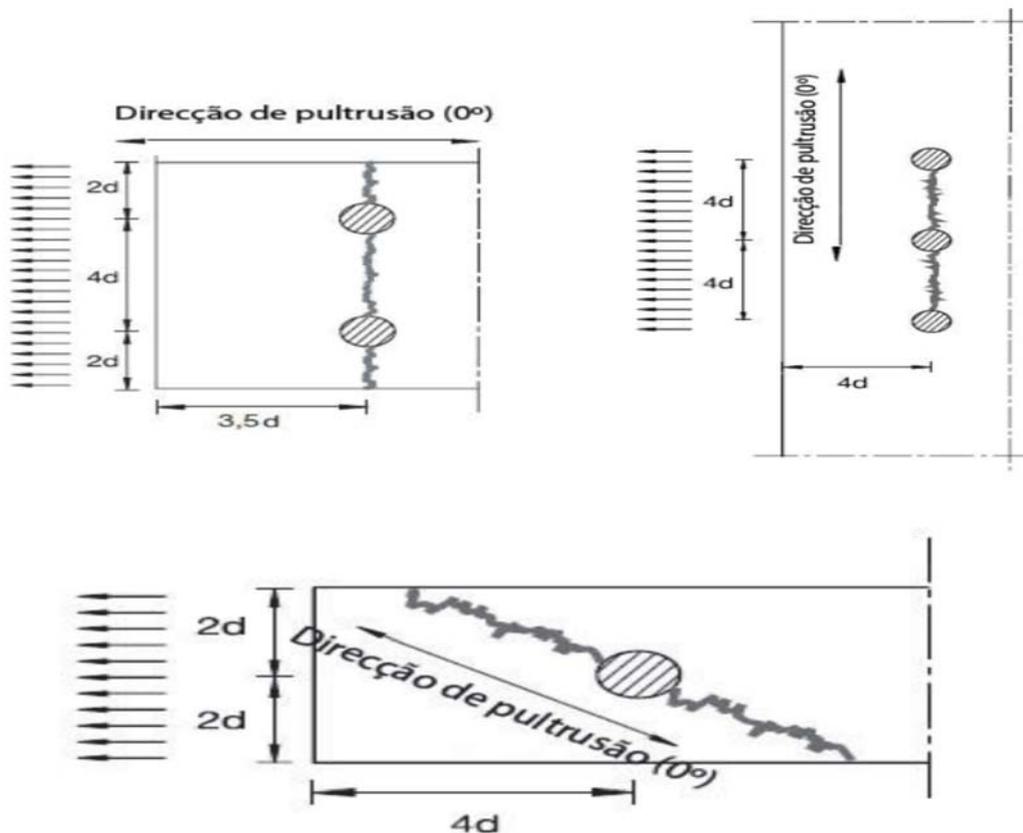
Figura 18 - Distâncias mínimas entre os parafusos, consoante a direção de pultrusão (em que “d” é o diâmetro do parafuso).



Fonte: Adaptado de Martins (2011).

A ruptura por arrancamento das ligações ocorre de diferentes modos, consoante a distância entre parafusos e a direção de pultrusão, como demonstra a Figura 19.

Figura 19 - Orientação do arrancamento das ligações parafusadas, consoante direção das pultrusão (em que d é o diâmetro do parafuso)



Fonte: Adaptado de Martins (2011).

2.5.3 Ligações parafusadas coladas

De acordo com Mendes Correia (2012), as ligações que combinam as duas anteriores, colada e parafusada, não têm nenhuma vantagem em particular do ponto de vista de uma maior capacidade resistente da ligação. Visto que a distribuição de esforços é praticamente inexistente, a resistência fica na sua grande parte a cargo do material adesivo, não havendo por isso um funcionamento conjunto dos dois, mas sim um comportamento independente. Pode-se tirar partido dessa característica no dimensionamento da estrutura, atribuindo contribuições distintas às duas ligações. Exemplo disso é uma ligação em que os parafusos têm uma função preventiva, no caso da ligação colada perder as suas propriedades a longo-prazo.

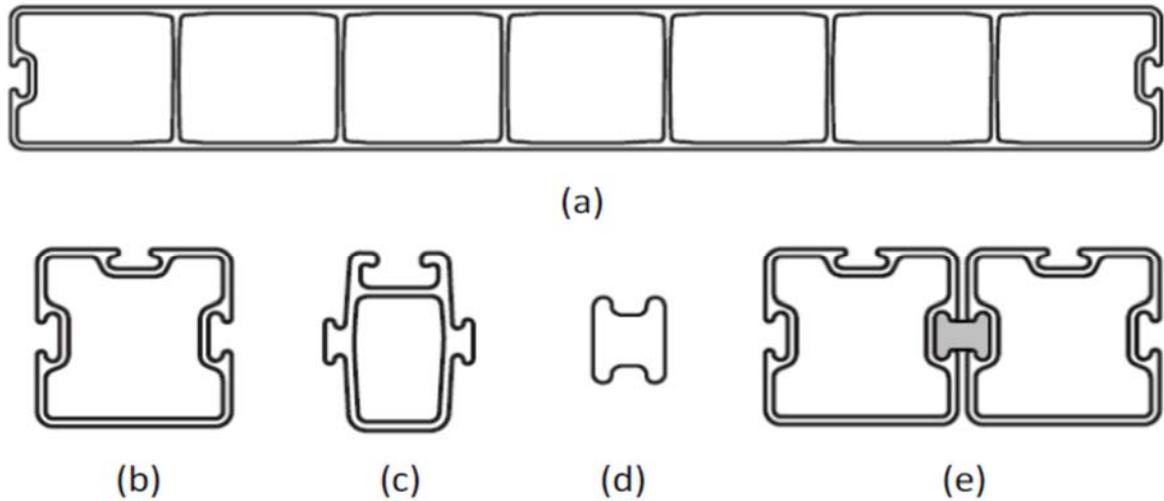
Numa ligação mista, ocorrem duas fases de ruptura: ruptura da ligação adesiva e ruptura da ligação parafusada. A primeira ruptura ocorre por descolamento das peças, havendo, posteriormente, uma transferência de carga para a ligação parafusada, após o que, se dá a ruptura final. Contudo, a utilização desse tipo de ligações pode justificar-se nas seguintes situações (MENDES CORREIA, 2012):

- a) caso se pretenda que os parafusos previnam os efeitos de uma colagem deficiente ou da deterioração do adesivo durante a fase de serviço;
- b) caso se pretenda utilizar a colagem para garantir as exigências de deformabilidade, satisfazendo os parafusos às exigências de resistência;
- c) caso se pretenda melhorar o processo de colagem, garantindo aperto por parte dos parafusos.

2.5.4 Ligações por encaixe (*interlock*)

No âmbito do desenvolvimento de novas formas estruturais de perfis de GFRP, surgiu uma nova tecnologia de ligação, a *Advanced Composite Construction System* (ACCS). Esse sistema é composto por várias peças modulares, que são combinadas através do sistema *interlock* de encaixe mecânico, tal como representado na Figura 20. A principal vantagem desse sistema é a sua fácil montagem; o sistema de encaixe geométrico pode ser complementado com uma ligação colada ou mecânica.

Figura 20 - Sistema ACCS: (a) painel multicelular; (b) peça com três ligações fêmea (c) peça com uma ligação fêmea e dois machos; (d) peça de ligação; (e) duas peças acopladas com peça de ligação



Fonte: Adaptado de Mendes Correia (2012).

Tendo-se por base as considerações arroladas neste capítulo, parte-se por descrever o procedimento experimental desenvolvido para chegar-se aos resultados desta pesquisa, retomando-se seu objetivo central que é o de mensurar a influência das uniões de perfis de GFRP em suas propriedades mecânicas para, com isso, avaliar a possível substituição de aço ASTM A36 por perfis de GFRP em estruturas de implementos rodoviários, obtendo-se, assim, a redução do peso dos equipamentos.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O propósito deste capítulo é apresentar como se desenvolveu o procedimento experimental realizado com o objetivo de avaliar, em caráter comparativo, a influência das uniões coladas, parafusadas e coladas parafusadas em perfis pultrudados de GFRP, investigando as propriedades físicas e mecânicas deste material e avaliando algumas metodologias de preparação para fixação. O material utilizado para a realização do estudo foi alvo de vários ensaios que auxiliaram a captar dados para o desenvolvimento do estudo e alcançar os objetivos definidos anteriormente.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

O material em questão foi disponibilizado por empresa brasileira e consiste em vários perfis de formato tubular quadrado constituídos de matriz isoftálica e dimensões de 36 mm X 36 mm x 6000 mm. Esses perfis foram produzidos através do processo de pultrusão, sendo constituídos basicamente por uma matriz de resina reforçada com fibras de vidro, os demais componentes inseridos no processo de fabricação não foram divulgados pelo fabricante. Tais perfis apresentam uma tonalidade acinzentada e foram fornecidos como perfis estruturais.

3.1.1 Concepção dos corpos de prova

Para a quantificação das propriedades mecânicas do material, foi feito um estudo de como alcançar os objetivos almejados com o material que foi fornecido. Para isso optou-se por seguir modelos de execução encontrados nas normas para definir como proceder.

O início do trabalho experimental foi definir a caracterização mecânica do material, para isso foram fabricados conjuntos de corpos de prova segundo as normas *American Society for Testing and Materials* (ASTMD) 638, D790 e D2344. Para uniões foi optado por utilizar os perfis tubulares sem alteração, assim, logo surgiu a necessidade de adaptar as normas para tal. O sistema de ensaio de tração utilizado para definir propriedades mecânicas do material GFRP disposto em formato tubular pode ser encontrado na norma ASTM D638. Com base nele, foi definido como avaliar de maneira comparativa o desempenho das diferentes formas de união, tirando por base o resultado da tração sem união.

Obtendo o resultado da força necessária para romper um tubo em tração sem uniões, pode-se definir o ponto de máxima eficiência para as uniões. Com isso, fazendo um

comparativo entre o material sem união com o material com diferentes uniões, tem-se a influência das mesmas na resistência mecânica do material.

Contudo, quando se dimensiona uma estrutura, outras forças interferem na união, além do esforço em tração. Com o intuito de analisar o comportamento das uniões quando submetidas a diferentes tipos de esforços desenvolveu-se outros dois formatos de corpos de prova para ensaio, nos formatos de “T” e “L”.

Os formatos das uniões possibilitam a utilização de vários materiais que atuam como luvas dando sustentação e servindo como base para apoio e acorrentamento dos perfis. Optou-se, então, por utilizar luvas de aço. Essas foram confeccionadas a partir de chapas de aço SAE 1020 de espessura 2 mm. O formato foi definido utilizando como critério básico a distribuição de esforços.

O corte foi feito via plasma comando numérico computadorizado (CNC) e, posteriormente, conformado com o auxílio de uma dobradeira. Como pode ser visto nas Figuras 21 e 22, os cantos das luvas foram arredondados para auxiliar na retenção do excesso de adesivo. Outro fator importante que foi considerado, relaciona-se às tolerâncias dimensionais das luvas que podem influenciar diretamente na espessura do adesivo. Tal influência será abordada no procedimento de colagem a ser visto mais adiante.

Figura 21 - Luvas metálicas para união dos perfis, formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Figura 22 - Luvas metálicas para união dos perfis, formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

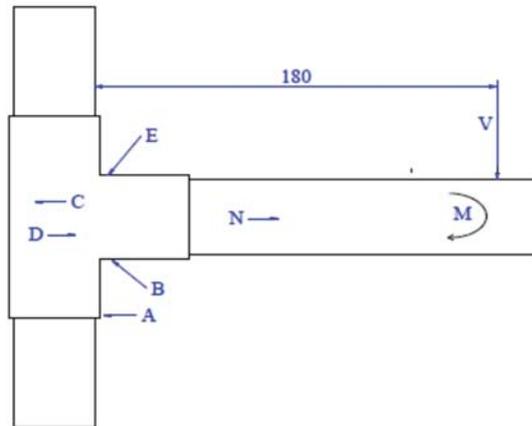
3.1.1.1 Ideologia dos testes e uniões

Como o objetivo dos testes não é só a caracterização do material, mas também a análise do procedimento de ligação e a análise do comportamento das uniões, optou-se por desenvolver corpos de prova que se aproximasse das situações que o perfil de GFRP seria submetido diariamente como estrutura de um implemento rodoviário.

Para analisar como os diferentes tipos de uniões podem influenciar na resistência e comportamento mecânico dos tubos de GFRP, aplicou-se um carregamento estático simulando algumas das condições mais básicas encontradas em estruturas de equipamentos rodoviários.

Como pode ser visto nas Figuras 23, 24 e 25, bem como nas Tabelas 5, 6 e 7, as distribuições de esforços nas uniões experimentais são as mais variadas e o cálculo estrutural pode não ser suficiente para um dimensionamento. Logo, os ensaios foram úteis para analisar como os esforços atuam sobre o material e como as ligações podem influenciar no comportamento mecânico do mesmo. Nas referidas ilustrações desprezou-se os esforços atribuídos às uniões pelos parafusos. Nas Tabelas 5, 6 e 7 está representado o descritivo dos esforços sofridos no formato das ligações, esses podendo variar de intensidade devido à capacidade de cada forma de união tem de distribuir os esforços e aumentar a resistência em situações diferentes.

Figura 23 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “T”



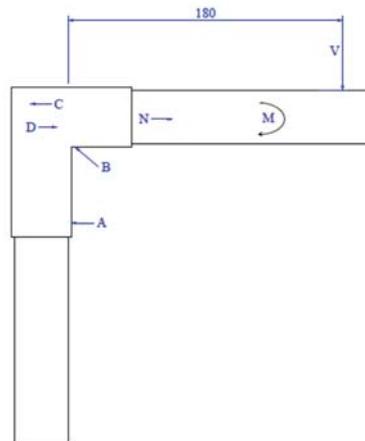
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 5 - Descrição dos esforços formato “T”

Região	Verificação
A	Pressão de Contato
B	Compressão na Luva
C	Tração
D	Compressão
E	Tração cisalhante
N	Força normal
M	Momento Gerado pela Força
V	Ponto de Aplicação da Força

Fonte: Autor, 2015.

Figura 24 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “L”



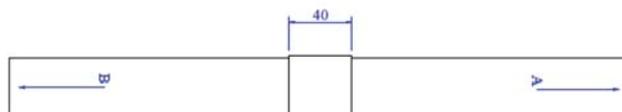
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 6 - Descrição dos esforços formato “L”

Região	Verificação
A	Pressão de Contato
B	Compressão na Luva
C	Tração
D	Compressão
N	Força normal
M	Momento Gerado pela Força
V	Ponto de Aplicação da Força

Fonte: Autor, 2015.

Figura 25 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “I”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 7 - Descrição dos esforços impostos nos perfis em formato “I”.

Região	Verificação
A	Esforço de Tração
B	Esforço de Tração

Fonte: Autor, 2015.

Além da necessidade de confecção das luvas que fizeram a união dos perfis, tornou-se imperativa a confecção também dos gabaritos para fixação dos corpos de prova à máquina universal de ensaios, levando-se em conta as normas vigentes já declaradas e a melhor maneira de dimensionamento.

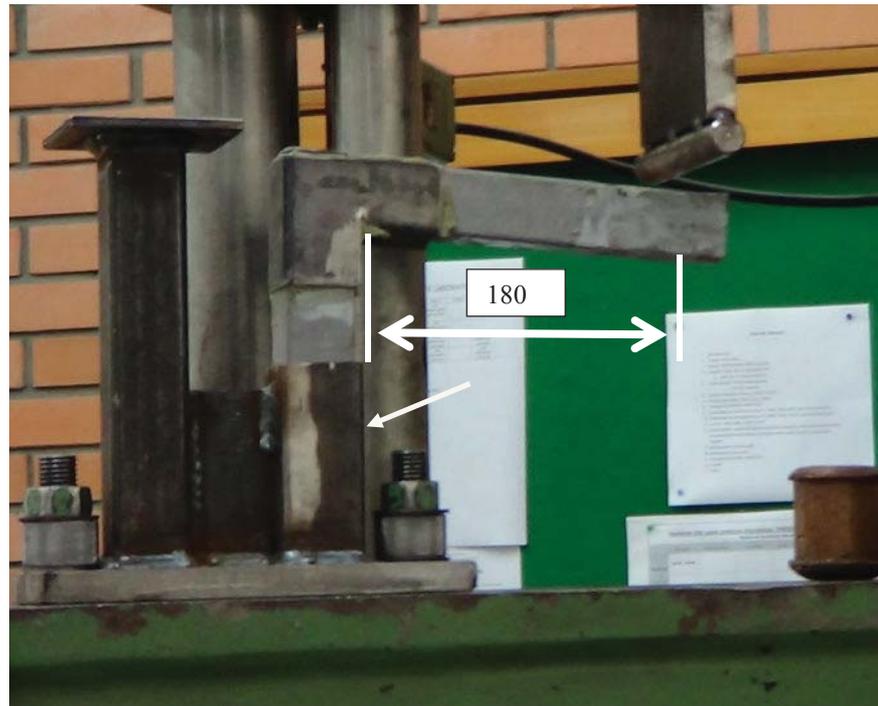
Nas Figuras 26 e 27 visualizam-se os fixadores que foram desenvolvidos para auxiliar nos testes. Outro fator que se pode visualizar é a robustez do gabarito, fundamental para a rigidez que deve ser transmitida ao corpo de prova na hora do teste, bem como, a posição exata em relação ao ponto de pressão do equipamento.

Figura 26 - Fixador de corpos de prova formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

Figura 27 - Fixador de corpos de prova formato “L”

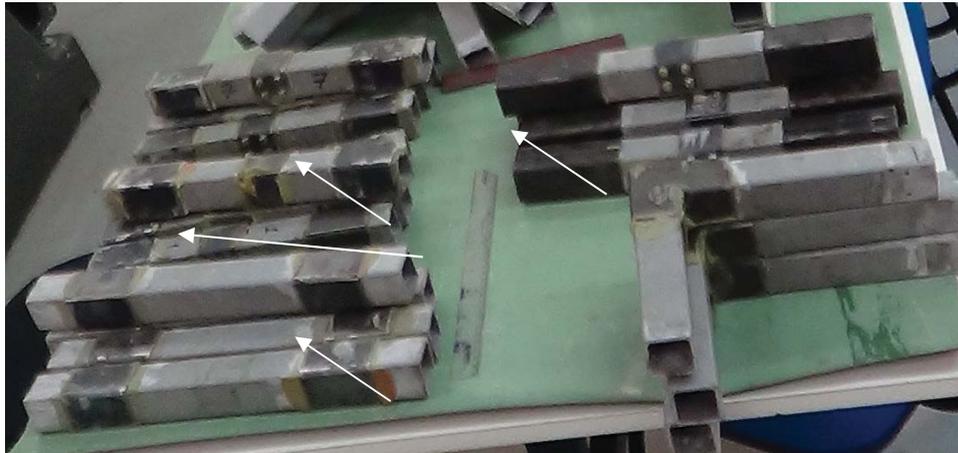


Fonte: Autor, 2015.

Outro fator que demandou atenção foi o sistema de fixação dos corpos de prova na máquina universal de ensaios *Schenk*, feito via garras de fricção. Essas garras além aumentarem a tensão de aperto conforme o deslocamento de tração ocorre, usualmente são utilizadas para tracionar corpos de prova de materiais metálicos, não dando pistas de qual será o comportamento quando tracionar o material de estudo. Logo, surgiu a necessidade de saber se ela conseguiria tracionar os corpos de prova. Para tirar a prova foi executado um teste com corpos de prova de GFRP em tração, segundo a norma ASTM D638. O resultado foi uma mastigação do corpo de prova devido à pressão das garras. Com isso, optou-se por enviar os corpos de prova de tração para o laboratório de polímeros da Universidade de Caxias do Sul (UCS), onde foram ensaiados em maquinário apropriado para o material.

Para o caso dos corpos de prova empíricos em formato “I” que foram tracionados, anexou-se ao exterior dos mesmos, luvas metálicas devidamente unidas aos tubos de GFRP com adesivo; ainda, na parte interna foi inserido um plug metálico para evitar a quebra do perfil, garantindo que as garras pudessem aderir e executar o procedimento. Na Figura 28 pode-se ver as luvas coladas nos perfis antes do ensaio.

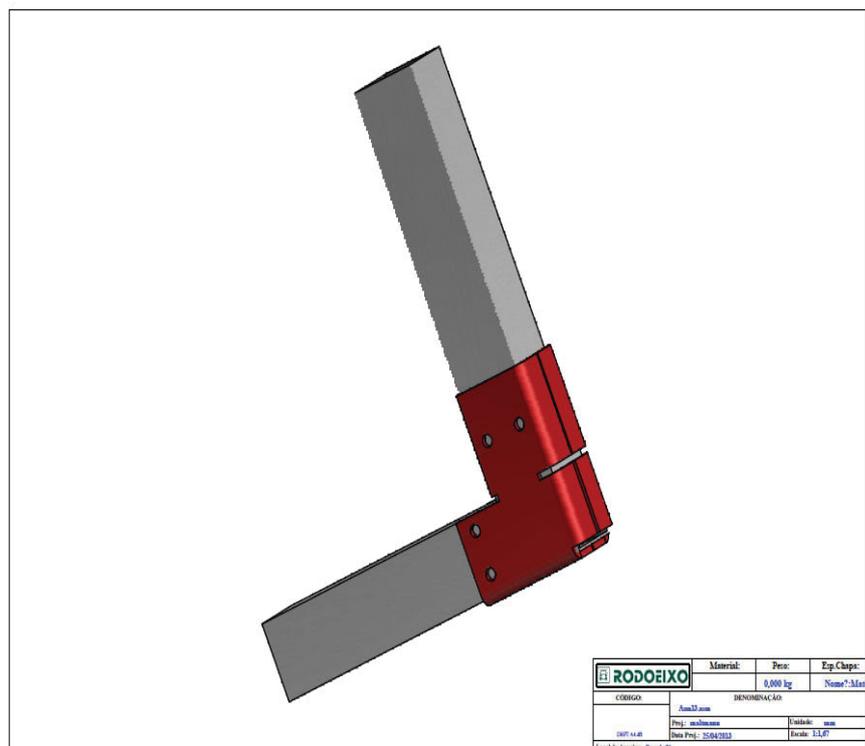
Figura 28 - Corpos de prova para ensaio de tração experimental e união “L” colada



Fonte: Autor, 2015.

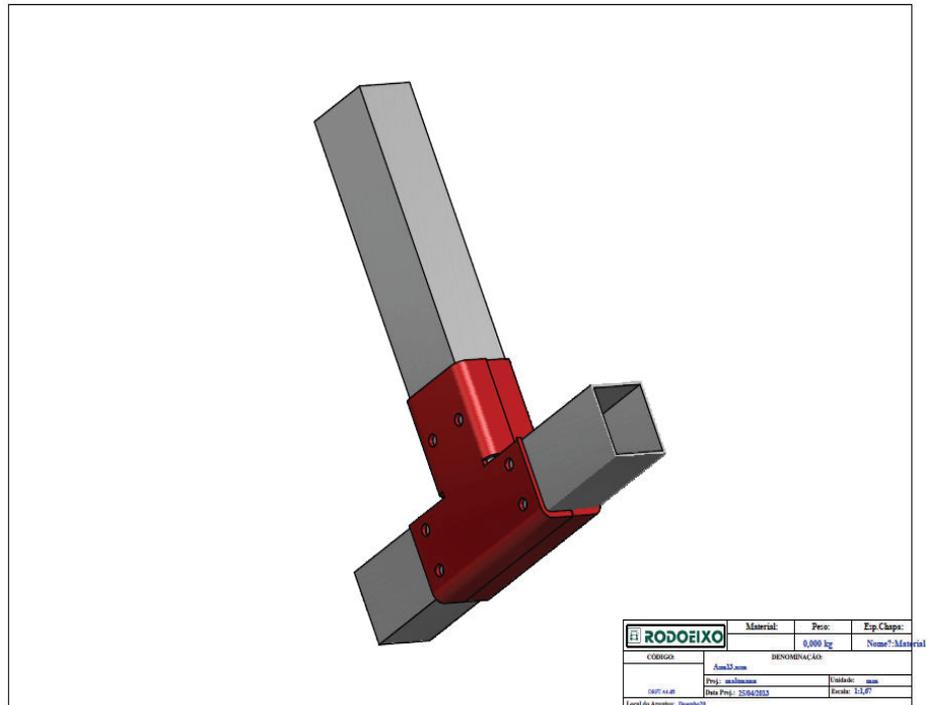
Contudo, a dificuldade de alcançar as tolerâncias não permitiu a utilização das luvas ilustradas nas Figuras 29 e 30.

Figura 29 - Simulação da interação entre perfis e juntas formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Figura 30 - Simulação da interação entre perfis e juntas formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

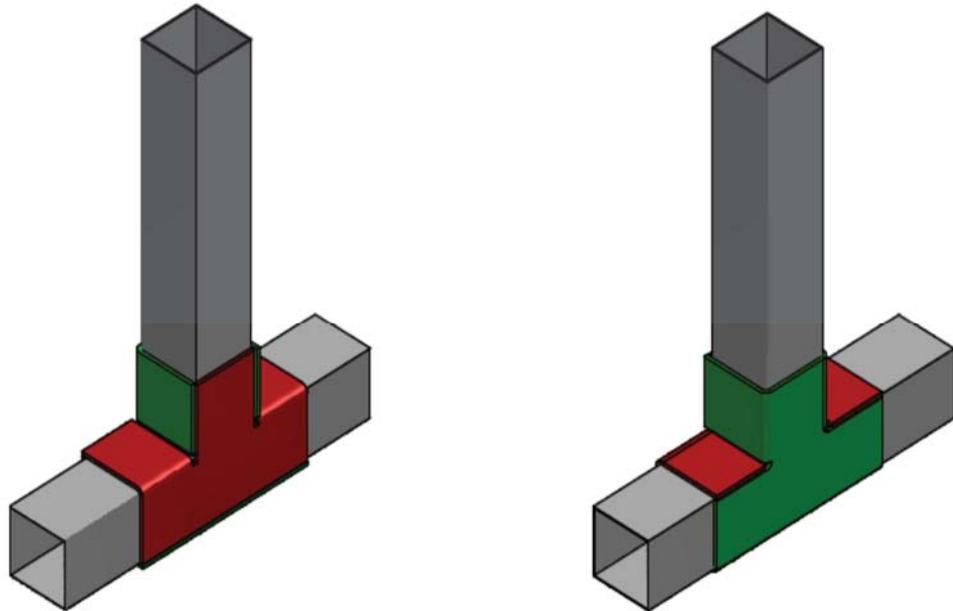
O formato das luvas da primeira etapa não permitia a distribuição correta do adesivo, como pode ser visto na Figura 31, quanto menos o espaçamento exato entre o perfil de GFRP e a luva metálica para a correta utilização do adesivo. Diante disso, surgiu a necessidade de desenvolver novos formatos de luvas. Os novos formatos além de conterem o material e a cola, nas devidas proporções, permitiram o real espaçamento entre perfil, cola e luva, como pode ser visto na Figura 32.

Figura 31 - Má distribuição da cola devido ao formato da luva



Fonte: Autor, 2015.

Figura 32 - Simulação das novas juntas, feitas para melhorar o espaçamento do adesivo



Fonte: Autor, 2015.

Para a caracterização do material, optou-se por ensaios devidamente embasados nas normas ASTM (D638, D790 e D2344), os mesmos podem ser vistos na Tabela 8 e na Figura 33, demonstradas a seguir.

Tabela 8 - Corpos de Prova para caracterização do material

Tipo de Ensaio	Formato	Nº de Corpos de Prova
Tração	Padrão ASTM D638	5
Flexão	Padrão ASTM D790	5
Corte Interlaminar	Padrão ASTM D2344	15

Fonte: Autor, 2015.

Figura 33 - Corpos de prova tração, flexão e corte interlaminar



Fonte: Autor, 2015.

A partir da necessidade de saber a resistência à tração do tubo, criou-se o primeiro teste de uniões que faz uma analogia ao esforço, pois, a intenção foi a de unir o perfil e conferir a ele a maior eficiência de ligação possível. Partindo do princípio de teste estipulado pelas normas ASTM D638, gerou-se o formato “I”, demonstrado nas Figuras 34 a 37.

Figura 34 - Corpo de prova para ensaio tração formato tubular sem união



Fonte: Autor, 2015.

Figura 35 - Corpo de prova formato “I”, união parafusada para teste de tração



Fonte: Autor, 2015.

Figura 36 - Corpo de prova formato “I”, união colada para teste de tração



Fonte: Autor, 2015.

Figura 37 - Corpo de prova formato “I”, união parafusada colada para teste de tração



Fonte: Autor, 2015.

Com o teste de tração do tubo sem emendas, em seu estado perfeito, pode-se analisar a eficiência da transmissão da força que as uniões conseguem suportar. Em suma, verificou-se qual a percentualidade de eficiência que cada união consegue conferir ao material depois do procedimento executado. Na Tabela 9, pode-se visualizar quantos corpos de prova foram feitos para cada caso.

Tabela 9 - Corpos de prova para caracterização do tubo e uniões

Formato	Tipo de Ensaio	Tipo de União	Nº de Corpos de Prova
Adequação ASTM D638 “I”	Tração experimental	Sem	5
Adequação ASTM D638 “I”	Tração experimental	Parafusadas	5
Adequação ASTM D638 “I”	Tração experimental	Coladas	5
Adequação ASTM D638 “I”	Tração experimental	Coladas parafusadas	5

Fonte: Autor, 2015.

Por fim, precisou-se analisar o comportamento do perfil em uma situação cotidiana, onde perfis são ligados em estruturas diversificadas ficando expostos aos esforços do trabalho. De posse de informações fornecidas por setor de engenharia de desenvolvimento que atua nessa área, optou-se por utilizar os formatos “T” e “L”. Isso, pois quando solicitados de forma adequada podem fornecer dados para aferição de cálculos estruturais, como também dar uma amostra da fratura do material quando o mesmo é sujeito a uma série de esforços ao mesmo tempo. Na Tabela 10, demonstra-se como os corpos de prova foram divididos, sendo que podem ser visualizados nas Figuras 38 a 43.

Tabela 10 - Corpos de prova para análise de juntas

Formato	Tipo de Ensaio	Tipo de União	Nº de Corpos de Prova
"T"	Experimental	parafusadas	5
"L"	Experimental	parafusadas	5
"T"	Experimental	Coladas	5
"L"	Experimental	Coladas	5
"T"	Experimental	Coladas parafusadas	5
"L"	Experimental	Coladas parafusadas	5

Fonte: Autor, 2015.

Figura 38 - Corpo de prova formato “T”, união, parafusada



Fonte: Autor, 2015.

Figura 39 - Corpo de prova formato “T”, união, colada



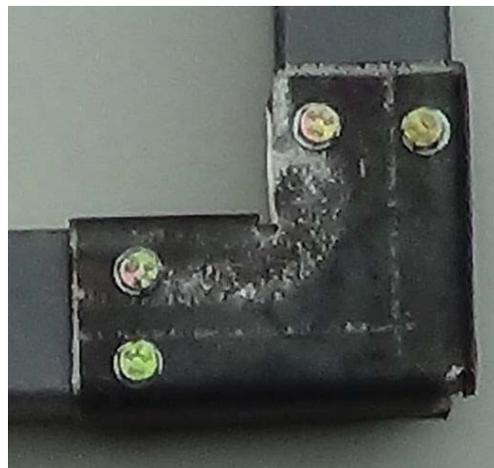
Fonte: Autor, 2015.

Figura 40 - Corpo de prova formato “T”, união, colada parafusada



Fonte: Autor, 2015.

Figura 41 - Corpo de prova formato “L”, união, parafusada



Fonte: Autor, 2015.

Figura 42 - Corpo de prova formato “L”, união, colada



Fonte: Autor, 2015.

Figura 43 - Corpo de prova formato “L”, união, colada parafusada.



Fonte: Autor, 2015.

O processo de fabricação e montagem das juntas e uniões foi muito preciso e meticuloso, com desenvolvimento de gabaritos para furação, entre outros dispositivos, pois, qualquer falha na repetibilidade do processo poderia acarretar em um resultado errado. Os cuidados com a saúde das pessoas envolvidas também foram de grande importância, tendo em vista que se tratam de materiais danosos.

Todos os corpos de prova acima citados ficaram sujeitos a análises macroscópicas, tendo como base análises encontradas na literatura. O descritivo de cada etapa comentada acima pode ser visto na sequência.

3.1.1.1.1 Corte

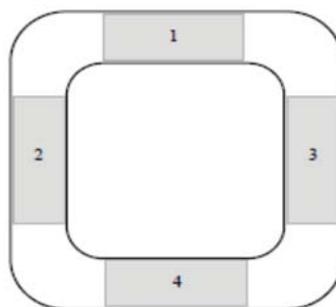
A confecção dos corpos de prova exigiu uma adequação do maquinário para alcançar as condições de excelência necessárias. Para todos os cortes transversais foi optado por uma serra-fita refrigerada à água com baixo avanço e fita de corte para cortes de materiais delicados, com a finalidade de evitar um possível "arranque" de fibras ou qualquer outro tipo de dano. Para todos os cortes versais e detalhes específicos dos corpos de prova, como os necessários para estar em conformidade com as normas ASTM (D638, D790 e D2344), foi optado pela utilização de um centro de usinagem do núcleo de usinagem da UPF. Utilizando sempre baixos avanços, altas rotações e ferramental em boas condições, conseguiu-se manter a integridade do material garantindo, assim, a inexistência de abalo às propriedades físico-mecânicas do material.

Antes da obtenção dos corpos de prova foram retirados cinco cm (centímetros) de material das extremidades dos tubos, com o intuito de eliminar possíveis discontinuidades, como por exemplo:

- a) danos causados à matriz e às fibras devido a impactos no transporte;
- b) possíveis problemas oriundos do processo de fabricação entre outros.

Para o corte dos corpos de prova que foram submetidos à tração e à flexão, surgiu a necessidade de uma esquemática de corte sugerida por Sousa (2011), utilizada nessa fase de processo final de corte. Isso, pois a secção quadrada apresenta características de produção cujo efeito na forma dos corpos de provas poderia ter consequências no resultado final, bem como alterar o aspecto dimensional dos corpos de provas obtidos. Analisando a Figura 44, conclui-se que os cortes na secção transversal apenas foram realizados nas áreas indicadas, excluindo os cantos.

Figura 44 - Esquema de corte dos diferentes tipos de corpos de provas retirados dos perfis quadrados



Fonte: Adaptado de Sousa (2011).

Após o processo de usinagem (Figura 45), procedeu-se o processo de corte transversal utilizando disco de corte diamantado e limpeza dos corpos de prova com álcool isopropílico (Figura 46).

Figura 45 - Perfil de GFRP sendo usinado, com dimensões segundo normas ASTM D638



Fonte: Autor, 2015.

Figura 46 - Perfil de GFRP após processo de usinagem, com dimensões segundo normas ASTM D638



Fonte: Autor, 2015.

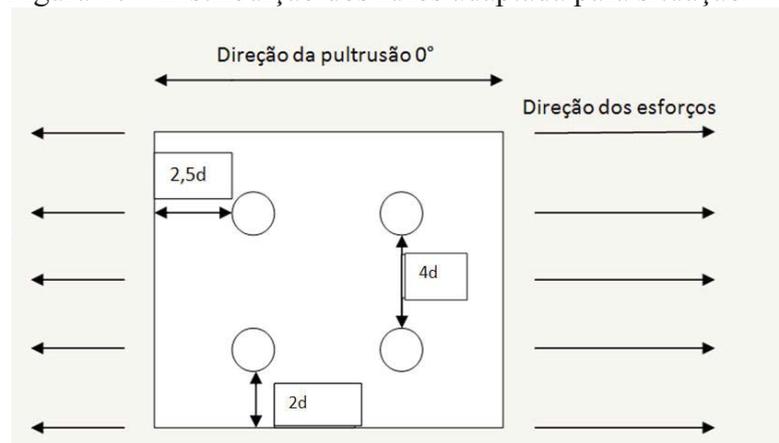
Em suma, é imperativo referir que o processo de corte foi um processo moroso, onde a exatidão, concentração e destreza do operador foi bastante significativa e refletiu-se no resultado final. Todos os fatores de segurança foram tidos em consideração, pelo que foi absolutamente necessário o recurso de luvas, avental, máscara de proteção facial e óculos, ainda, todo o trabalho foi supervisionado e elaborado na presença de um técnico devidamente qualificado.

3.1.1.1.2 Estudos de furação e torque

Para o processo de furação dos corpos de prova foram necessárias duas etapas de furação, a primeira consistiu na furação das luvas metálicas, onde se procurou garantir um perfeito alinhamento entre os furos. Na segunda etapa, efetuou-se furos no material pultrudado, o qual foi executado com o auxílio de broca de aço rápido sempre bem afiada, com a finalidade de garantir um corte limpo. O não cumprimento do mesmo poderia ocasionar danos na matriz e possível arranque das fibras, podendo gerar uma possível influência nos ensaios.

A definição do posicionamento dos furos e diâmetro dos mesmos foram definidos com base na literatura encontrada (SOUSA, 2011), logo, o arranjo dos mesmos pode ser visto na Figura 47 onde a variável “d” resulta no diâmetro do parafuso a ser utilizado.

Figura 47 - Distribuição dos furos adaptada para situação



Fonte: autor 2015.

Para a escolha do parafuso da união dos perfis às luvas de fixação, foi utilizado os dados do fabricante somados a dados obtidos de trabalhos já desenvolvidos e descritos nos capítulos anteriores listados nesse trabalho, os quais indicam a utilização de parafusos com seção transversal de 5 mm e comprimento de aproximadamente 50 mm, com corpo liso e graduação 12.9. As anilhas metálicas nas extremidades que possuíam diâmetro externo de 10 mm dão mais uniformidade ao esforço que o parafuso fará. Quanto à porca, foi utilizada uma porca comum, mas para a futura aplicação em equipamentos sugere-se a utilização de porca autotravante.

Um fator não considerado nesta pesquisa, mas que tem grande relevância, é o torque aplicado nos parafusos que unem os perfis. É sabido que se o torque for alto demais pode criar pontos de tensão e, conseqüentemente, auxiliar em possíveis trincas. De outro modo, se o mesmo for muito baixo não conseguirá distribuir o esforço ao resto do perfil, resultando, assim,

em uma falha antecipada do mesmo. Ainda, quando se tratarem de uniões parafusadas coladas tem-se que levar em consideração o filme adesivo que existirá entre o perfil e a luva de fixação. Logo, o aperto ou torque que será conferido às porcas deverá ser realizado sempre levando em conta a análise preliminar do material submetido a esse esforço, por analogia, o torque deve ser tão intenso quanto o material permitir.

Para se ter certeza do torque a ser utilizado, foi optado por confeccionar pequenos corpos de prova para teste, onde simulou-se a furação e o torque. De posse do torquímetro (Digital Torcotronic II - 10 - 350 Nm gedore), conferiu-se o torque de 10 Nm, em vários corpos de prova. Nos testes ficou evidente que a posição da furação é fundamental para garantir o torque, pois em corpos de prova que os furos não estavam na posição correta (desvios de posição, ocorrido por falhas do operador da furadeira) e aplicou-se o torque indicado, ocorreram estalos da matriz, entrando em colapso.

3.1.1.1.3 Colagem

O adesivo que fez a união dos componentes descritos anteriormente foi escolhido levando em consideração a tensão limite de ruptura do material. Como o interesse é um adesivo que consiga interagir com o material e distribuir a força igualmente sem entrar em colapso com o ensaio, entrou-se em contato com dois grandes fornecedores de adesivos estruturais, Sika e Lord.

Optou-se pelo adesivo do fabricante Lord, de denominação Lord 406. Um adesivo acrílico modificado, que adere em uma ampla variedade de metais e de plásticos de engenharia, inclusive plásticos difíceis de colar, como o policarbonato e o xenoy. Trata-se de um sistema de dois componentes, especificamente formulados para fornecer alta resistência ao impacto e à adesão, com cura à temperatura ambiente, o que auxiliou para diminuir a probabilidade de falha nos ensaios por erros na utilização.

Para a preparação dos corpos de prova que foram colados (Figura 48), utilizou-se uma lixa de granulometria 500, e a limpeza, executada tanto no material GFRP quanto nas luvas de aço, foi feita com álcool isopropílico. Sendo que as luvas de aço passaram por um processo de limpeza com escovas de aço antes do álcool, tendo por finalidade retirar qualquer oxidação ou outra substância que pudesse interferir no processo.

Figura 48 - Colagem da ligação de perfil GFRP



Fonte: Autor, 2015.

Durante o processo de colagem, alguns fatores foram levados em consideração para garantir a sua eficiência:

a) o cuidado de garantir a existência de adesivo suficiente para preencher toda a área de colagem bem como retirar o excesso de adesivo para facilitar a limpeza do corpo de prova após o endurecimento da resina;

b) em dificuldade de manter a espessura, utilizar de microesferas de uso laboratorial para garantir o espaçamento do mesmo, evitando, assim, uma diferença de espessura de cola;

c) manter o cuidado ao tentar eliminar possíveis bolhas em toda a zona de colagem, aplicando leves pancadas com a espátula ao longo de toda a área de colagem enquanto se fricciona a luva contra o perfil, para alcançar a espessura correta do adesivo;

d) no caso de perfis colados parafusados deve-se, primeiramente, colá-los e depois do tempo de cura efetuar o parafusamento;

e) no caso de adesivo de colagem instantânea, logo surge a necessidade de preparar pequenas porções para facilitar o manuseio e garantir o processo de adesão.

A quantidade de resina a ser retirada na hora do lixamento para garantir o ancoramento do adesivo ao perfil é um processo bastante impreciso, na primeira tentativa, foi retirada a matriz resinoide até o aparecimento das primeiras fibras. Porém, isso não foi o suficiente, não alcançando o ancoramento necessário com o adesivo na intensidade desejada. Logo, a superfície foi preparada até ser alcançada a fibra de reforço, retirando-se a matriz até obter-se o visual da fibra de reforço.

3.1.2 Procedimento de montagem dos corpos de prova tubulares

Após o processo de corte e furação dos corpos de prova empíricos, o próximo passo foi a montagem dos mesmos, para isso foi desenvolvido procedimentos de montagem específicos para cada tipo de união.

3.1.2.1 União parafusada

De posse dos tubos de GFRP devidamente cortados e das luvas metálicas já furadas, foi utilizado de uma morsa padrão para segurar tanto a luva quanto o material, unidos e na posição correta. Assim, utilizou-se uma furadeira manual munida de broca de aço rápida bem afiada para se executar os furos. Após, foram colocados os parafusos, porcas e anilhas metálicas de fixação para, somente posteriormente, ser fornecido o torque com o torquímetro mencionado anteriormente.

3.1.2.2 União colada

Para a união colada procedeu-se da seguinte forma:

a) primeiramente realizou-se o lixamento dos perfis de GFRP de acordo com o listado anteriormente;

b) após procedeu-se à limpeza com escova de aço das luvas metálicas;

c) por fim fez-se a limpeza dos perfis e luvas com álcool isopropílico e flanela.

Aplicando-se o adesivo em um dos lados das luvas, colocou-se as esferas de vidro com diâmetro de 1 mm para garantir o espaçamento necessário. Após isso encaixou-se a luva com o adesivo no perfil, e preparou-se os mesmos para descansar, sempre levando em conta a superfície de descanso, com a finalidade de que não desalinhe o perfil em relação a luva. Após 20 min da execução dessa etapa, seguiu-se o mesmo padrão listado acima para a outra metade da luva. O tempo de cura foi de 24 h.

3.1.2.3 União colada parafusada

Para a união colada parafusada, procedeu-se da seguinte forma:

a) primeiramente realizou-se o lixamento dos perfis de GFRP de acordo com o procedimento listado acima;

b) após efetuou-se a limpeza com escova de aço das luvas metálicas previamente furadas;

c) por fim operou-se a limpeza dos perfis e luvas com álcool isopropílico e flanela.

Aplicando o adesivo em um dos lados das luvas e colocando as esferas de vidro com diâmetro de 1 mm para garantir o espaçamento necessário, procedeu-se ao encaixe da luva com o adesivo no perfil, preparado os mesmos para descansar. Isso, sempre levando em conta a superfície de descanso, com a finalidade de não desalinhar o perfil em relação a luva. Após 20 min da execução dessa etapa, seguiu-se o mesmo padrão listado acima para a outra metade da luva. O tempo de cura foi de 24 h.

Com o término do período de cura do adesivo, deu-se sequência no procedimento de fixação, com o auxílio de uma morsa padrão para fixação do corpo de prova e em seguida com o auxílio de uma furadeira manual padrão, munida de broca de aço rápido, bem afiada para executar-se os furos. Após a inserção dos parafusos, porcas e anilhas metálicas de fixação, forneceu-se o torque com o torquímetro descrito anteriormente, conseguindo-se, por fim, o procedimento de união aparafusado.

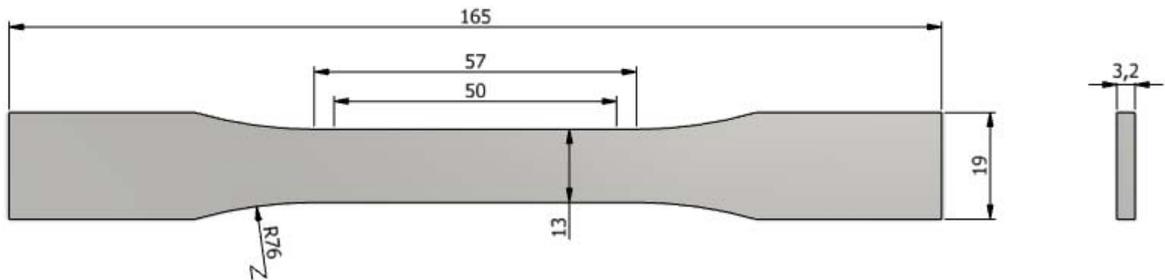
3.2 ENSAIOS

O formato dos corpos de prova foi determinado de acordo com as normas ASTM D638, sendo que, para cada teste que compõe a caracterização do material, a referida norma forneceu as dimensões regulamentadas.

3.2.1 Ensaio de tração

O objetivo do ensaio de tração foi determinar a tensão de escoamento, tensão de ruptura, e o módulo de elasticidade. O ensaio de resistência à tração foi conduzido segundo a norma ASTM D638 (2010), utilizando uma célula de carga de 2000 kgf e extensômetro embutido de 785 mm. A velocidade de ensaio foi de 50 mm/min (Figura 49).

Figura 49 - Corpo de prova de tração de perfis GFRP segundo norma ASTM D638



Fonte: Autor, 2015.

$$\sigma_{tu, x} = \frac{F_u}{b \times h} \quad (01)$$

onde,

$\sigma_{tu, x}$: tensão de ruptura do corpo de prova, MPa;

F_u : força aplicada pela máquina de tração, N;

b : largura da seção transversal do corpo de prova, mm;

h : espessura da seção transversal do corpo de prova, mm.

$$\epsilon_{tu, x} = \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (02)$$

onde,

$\epsilon_{tu, x}$: extensão na ruptura, (-);

ΔL : variação do comprimento do corpo de prova, (mm);

L_0 : comprimento inicial do corpo de prova, (mm).

$$E_{t, x} = \left(\frac{\Delta \sigma_{,x}}{\Delta \epsilon_{,x}} \right) \quad (03)$$

onde,

$E_{t, x}$: Módulo de elasticidade, (MPa);

$\left(\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\varepsilon_x}\right)$: Declive da curva extensão longitudinal e extensão transversal, (MPa).

O material possui a característica anisotrópica, logo, segundo a norma, deve-se executar a confecção de cinco corpos de prova na orientação normal, e cinco na orientação paralela ao eixo principal de anisotropia. No entanto, a seção paralela à anisotropia não possui área suficiente para se poder analisar o comportamento, logo se optou por uma análise única na direção normal.

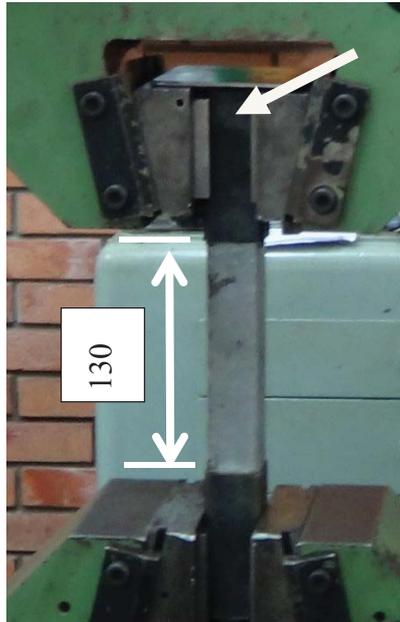
3.2.2 Ensaio de tração dos tubos

Como o intuito de caracterizar o material optou-se por executar, também, testes de tração, não somente em corpos de prova, segundo a norma. Buscou-se descobrir qual a resistência do tubo no sentido longitudinal às fibras de reforço, para isso optou-se por criar corpos de prova que seguiram quase que totalmente o método descrito na norma ASTM D638.

Pretendeu-se encontrar com essa alteração a real resistência ao esforço do material, para isso foi feita a distribuição de esforço ao longo de uma área, somente presa pelas pontas e devidamente colada. Com isso, pode-se não somente analisar o material como também a influência da área colada na resistência mecânica do mesmo.

A velocidade do ensaio foi determinada em função da normativa ASTM D638 referente ao ensaio de tração, com um deslocamento de 5 mm/min. Os ensaios foram realizados no dia 20 de dezembro de 2013, e as condições laboratoriais encontravam-se satisfatórias, contudo, apesar de o laboratório ser climatizado, não foram checadas as condições de temperatura e umidade.

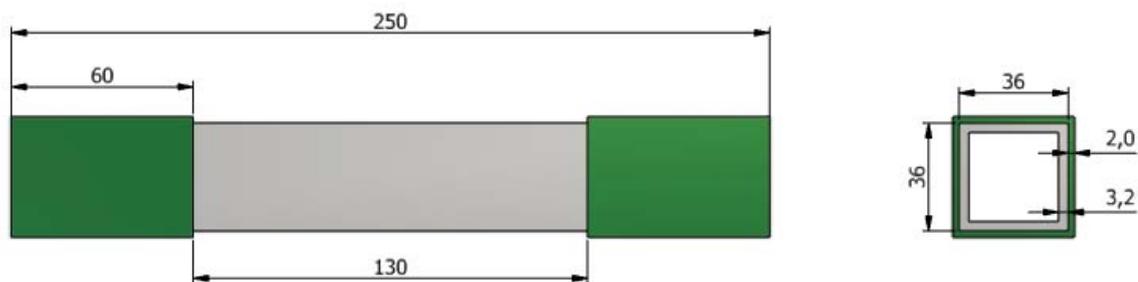
Figura 50 - Corpo de prova em tração simulando condições de ensaio indicados pela ASTM D638



Fonte: Autor, 2015.

Como pode ser visto na Figura 50, foi mantido grande parte dos requisitos da norma ASTM D638, acrescentando-se, no entanto, luvas metálicas nas extremidades unidas ao perfil por meio de adesivo para facilitar o ancoramento da máquina de ensaio.

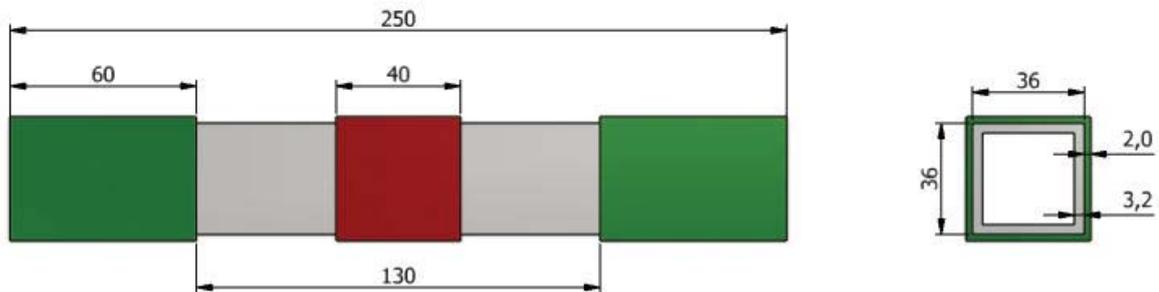
Figura 51 - Corpos de prova para teste de tração sem união



Fonte: Autor, 2015.

Os corpos de prova foram ensaiados sem uniões para atribuir ao tubo de GFRP a resistência à tração, logo em seguida ensaiou-se as uniões e suas variações. Ou seja, iniciou-se os ensaios dos corpos de prova sem uniões e, posteriormente, seguiu-se para o ensaio das uniões, mantendo sempre o mesmo padrão de ensaio e o procedimento sem alterações, garantindo, assim, a homogeneidade do processo. Todos os corpos de prova de tração dos perfis de formato quadrado de GFRP possuem as mesmas proporções, como indicado na Figura 51. Por sua vez, a Figura 52 demonstra os corpos de prova de tração com a união das luvas.

Figura 52 - Corpos de prova para teste de tração de uniões



Fonte: Autor, 2015.

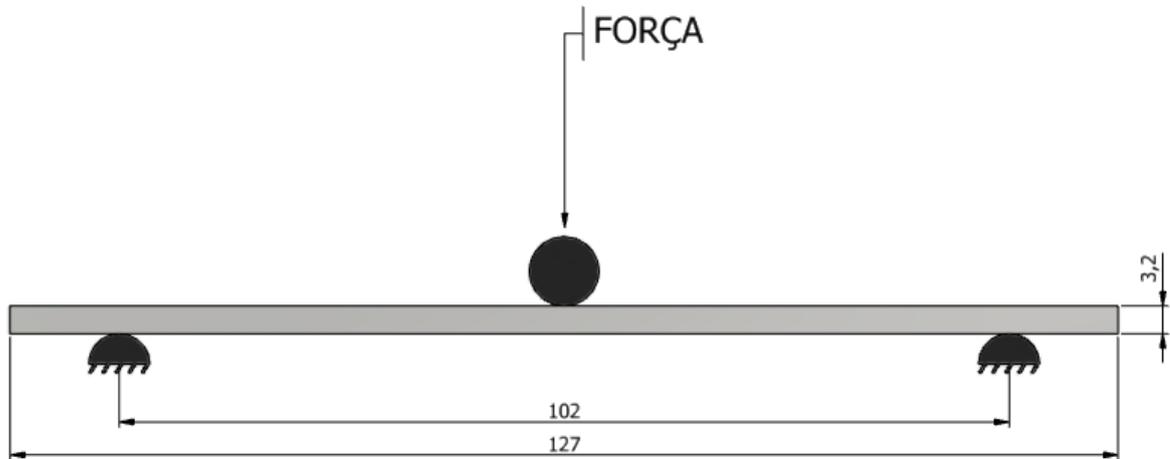
Como pode ser visto pela análise das Figuras 51 e 52, os corpos de prova do ensaio experimental de tração possuem todas as mesmas proporcionalidades de medidas. Ainda, a luva de união é a mesma para todos os tipos de corpos de prova, logo, além de garantir um procedimento isento de falhas, auxilia a mensurar qual a percentualidade de perda de resistência mecânica que a união implica ao perfil, podendo, assim, dar mais confiabilidade aos resultados.

3.2.3 Ensaio de flexão

O objetivo do ensaio de flexão foi o de avaliar o comportamento em flexão de laminados extraídos de um tubo trefilado do GFRP utilizado em estudo, determinando-se, em particular, as curvas de tensão-flexão (σ_{fu}) e, a partir dessas, o módulo de elasticidade (E_{fu}) e a extensão última (ϵ_{fu}) em flexão.

Para os testes de flexão, utilizou-se a norma ASTM D790. De acordo com o equipamento disponível, foi utilizado um sistema de flexão de três pontos (Figura 53). Da mesma forma que o processo de fabricação influenciou nos corpos de tração, no processo de ensaio por flexão não foi diferente. Os corpos de prova extraídos dos perfis de GFRP também foram no sentido das fibras de reforço e o espaçamento entre os narizes de apoio corresponde a 102 mm, conforme a referida norma.

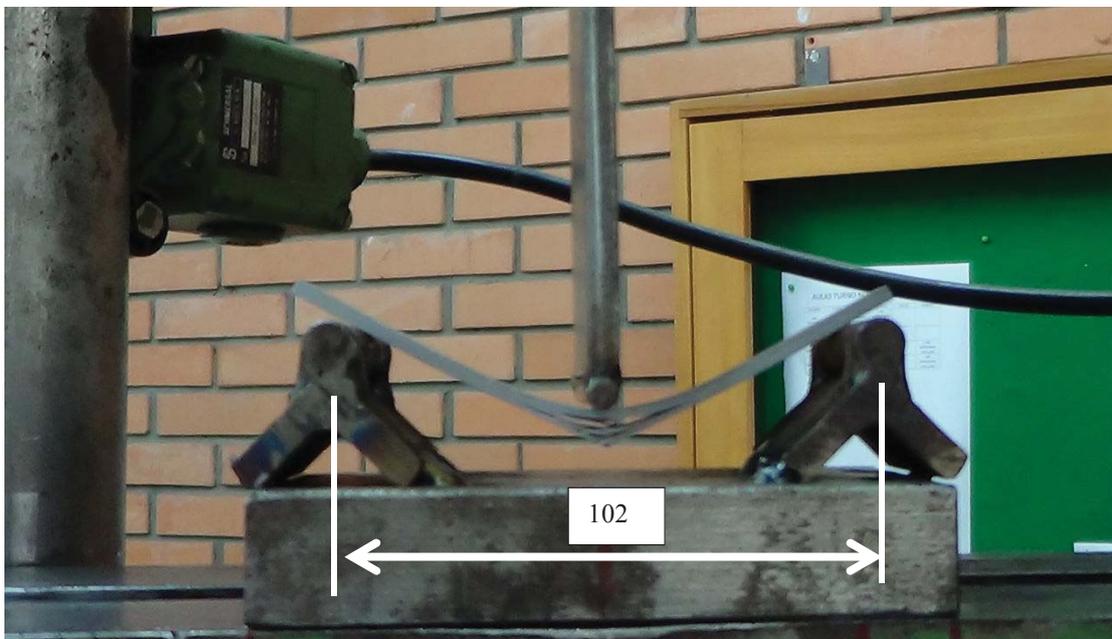
Figura 53 - Corpo de prova ensaio de flexão segundo norma ASTM D790



Fonte: Autor, 2015.

Como o laboratório utilizado não estava preparado para executar o teste em questão, desenvolveu-se os apoios e regulou-se a máquina universal de ensaios para que houvesse uma aproximação dos valores de avanço exigidos pela norma de maneira suficiente para que o teste fosse validado. As adequações podem ser vistas na Figura 54.

Figura 54 - Ensaio de flexão ASTM D790



Fonte: Autor, 2015.

Para esse sistema foram utilizados corpos de prova teste com dimensões nominais de $127 \text{ mm} \times 12,7 \text{ mm}$ ($l \times b$), com $3,2 \text{ mm}$ (e) de espessura. Foram considerados cinco corpos de

provas para o ensaio. Antes de iniciar o ensaio de flexão, mediu-se a secção da totalidade dos corpos de prova a ensaiar. Para isso, utilizou-se um paquímetro analógico, com uma precisão de 0,05 mm, da marca *Mitutoyo*, devidamente auditado e verificado. As medições da secção consistiram na recolha de três valores para cada dimensão (largura, espessura e comprimento).

Após a medição da área da secção dos corpos de prova, esses foram centrados nos apoios de acordo com a direção principal a ensaiar e levados até a ruptura. Tentou-se controlar a velocidade de carregamento de modo a obter a velocidade exigida na norma, que é de 5,2 mm/min. Para se obter os valores de cada ensaio foi utilizado o equacionamento abaixo:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (04)$$

onde,

σ = tensão nas fibras exteriores no ponto médio, MPa;

P = força do carregamento no corpo de prova, N;

L = espaçamento entre apoios, mm;

b = largura de feixe testado, mm;

d = altura da viga testada, mm;

$$\epsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (05)$$

onde,

ϵ_f = deformação em flexão;

D = deformação máxima do centro do feixe, mm;

d = altura da viga testada, mm;

L = espaçamento entre apoios, mm.

$$EB = \frac{L^3m}{4bd^3} \quad (06)$$

onde,

EB = módulo de elasticidade, MPa;

L = espaçamento entre apoios, mm;

b = largura de feixe testado, mm;

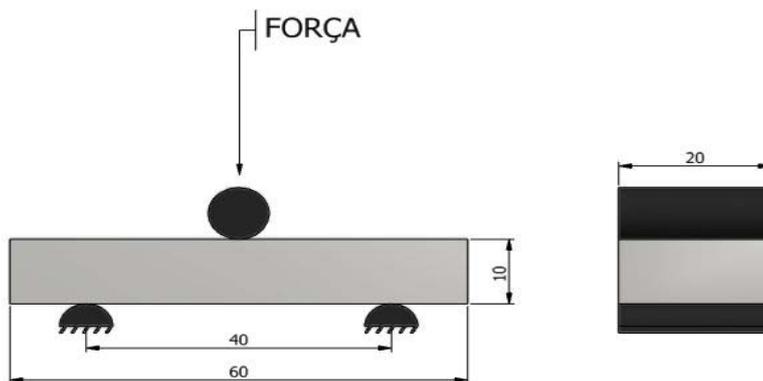
d = altura da viga testada, mm;

m = inclinação da tangente à porção linear inicial da curva de carga-deflexão, N / mm de deflexão.

3.2.4 Ensaio de corte interlaminar

Outro método de determinação de propriedades de natureza mecânica considerado foi o ensaio de corte interlaminar. Esse, com o objetivo de determinar as propriedades resistentes do material ao corte interlaminar, utilizando-se, para tanto, a norma ASTM D2344, conforme mostra a Figura 55.

Figura 55 - Ensaio de corte interlaminar descritivo



Fonte: Autor, 2015.

O sistema utilizado no presente ensaio, bem como a leitura dos deslocamentos, foi executado segundo definição da norma ASTM D2344. Ainda, utilizou-se um suporte fabricado a partir de chapas metálicas soldadas e reforçadas a uma base para apoiar os corpos de prova, fixando o vão a ensaiar. O comprimento do vão foi de 40 mm que, somado às características do corpo de prova, tornou propício que a ruptura ocorresse por corte interlaminar e não por flexão.

O sistema de ensaio de corte interlaminar constituiu-se da aplicação monotônica de uma carga pontual a meio vão, levando o corpo de prova (simplesmente apoiado) à ruptura por corte. Na Figura 55 pode-se visualizar o esquema de carregamento utilizado nesse ensaio. A velocidade de carregamento, de acordo com a norma ASTM D2344, foi de aproximadamente 1,0 mm/min. Logicamente, a velocidade sofreu pequenas alterações de caráter infinitesimal, nada além da tolerância permitida pela norma.

Foram preparados 16 corpos de prova e, como pode ser visto na Figura 56, os mesmos foram sobrepostos em grupos de três unidades com a finalidade de alcançar a medida descrita pela norma em questão.

Figura 56 - Corte interlaminar antes e durante o teste



Fonte: Autor, 2015.

Conforme já exposto, a intenção do teste foi a de avaliar a resistência ao corte interlaminar. Nesse sentido, a norma ASTM D2344 declara que o cálculo da resistência ao corte interlaminar se realize através da seguinte equação:

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad (07)$$

onde,

τ = é a tensão de cisalhamento interlaminar (MPa);

F = é a carga última aplicada (N);

b = é a largura do corpo de prova (mm);

h = é a espessura do corpo de prova (mm).

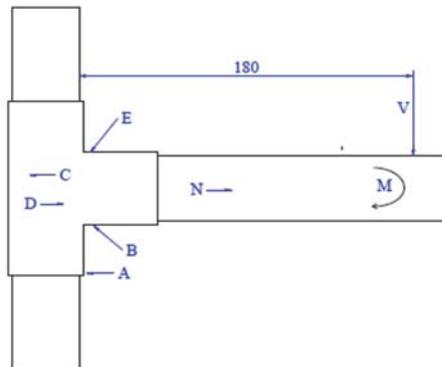
Logo, de posse dessa equação deve-se atentar ao fato de que a carga declarada na equação como F, possui a designação da carga última aplicada. Assim, a partir dos valores obtidos nos ensaios deve-se procurar o valor máximo de força aplicada e, dessa forma, se conhecerá o real valor da tensão de cisalhamento interlaminar.

3.2.5 Ensaio experimental de união dos tubos

Analisou-se o comportamento das uniões quando submetidas a situações do dia a dia. Aplicou-se um carregamento estático simulando algumas das condições mais básicas que o mesmo iria encontrar no ambiente de sua usual aplicação. A velocidade do teste ficou na ordem de 10 mm/min.

O procedimento dos testes foi seguido rigorosamente, bem como os posicionamentos, com a finalidade de alcançar a confiabilidade desejada e seguir o esquema de distribuição de esforços, visto anteriormente e lembrado nas Figuras 57 e 68 e Tabelas 11 e 12.

Figura 57 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “T”



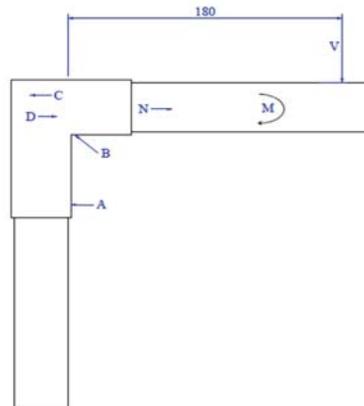
Fonte: Autor, 2015.

Tabela 11 - Descrição dos esforços formato “T”

Região	Verificação
A	Pressão de contato
B	Compressão na luva
C	Tração
D	Compressão
E	Tração na luva
N	Força normal
M	Momento gerado pela força
V	Ponto de aplicação da força

Fonte: Autor, 2015.

Figura 58 - Distribuições de esforços corpo de prova formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 12 - Descrição dos esforços formato “L”

Região	Verificação
A	Pressão de contato
B	Compressão na luva
C	Tração
D	Compressão
N	Força normal
M	Momento gerado pela força
V	Ponto de aplicação da força

Fonte: Autor, 2015.

Nas Figuras 57 e 58 e nas Tabelas 11 e 12, pode-se representar um esquema dos esforços sofridos no formato das ligações, esses podendo variar de intensidade de acordo com a capacidade que cada forma de união tem de distribuir os esforços e aumentar a resistência em situações diferentes.

Na Figura 59 pode-se visualizar como os corpos de prova ficaram devidamente ancorados na máquina de ensaio. O gabarito de fixação seguiu o esquema do teste de tração indicado na norma ASTM D638 - inserindo na parte interna do tubo “plugs metálicos” que auxiliam na geração de esforços somente no ponto a ser testado.

Figura 59 - Fixador de corpos de prova empíricos



Fonte: Autor, 2015.

Como pode ser visto na Figura 59, todos os corpos de prova foram marcados no ponto onde a punção da máquina universal de ensaios deveria apoiar, garantido, assim, um resultado homogêneo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do conjunto de ações e procedimentos descritos no capítulo anterior, obteve-se uma série de resultados que são apresentados na sequência.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

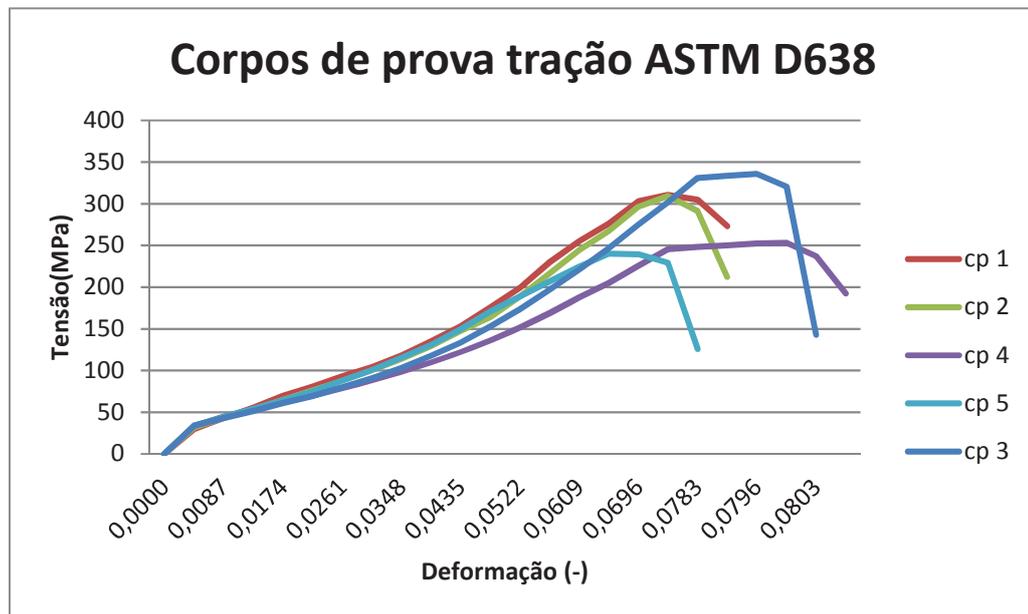
Os resultados foram divididos em duas etapas, os corpos de prova ASTM D638 e os corpos de prova experimentais.

4.1.1 Corpos de prova ASTM D638

Para os corpos de prova ASTM D638, todos os ensaios foram considerados válidos, uma vez que a ruptura dos corpos de prova ocorreu claramente por tração das fibras, em sua maioria, nas regiões próximas às garras. O processo de ruptura ocorreu das camadas interiores para a fibra externa ou vice-versa, condição que, segundo Mendes Correia (2012), torna o ensaio válido.

O que se nota no gráfico da Figura 60, é um aumento no deslocamento que ocorre em todos os corpos de prova à medida em que o teste avança. Tal direcionamento se deve ao fenômeno da delaminação das camadas do material (interface fibra-matriz) somados a velocidade do ensaio. Tem-se, assim, que, provavelmente, se a velocidade do ensaio for reduzida a tendência é obter um módulo de elasticidade mais alto, contudo, a delaminação somada ao escorregamento dos planos, mostrou-se como o principal causador do deslocamento excessivo.

Figura 60 - Gráfico tensão deformação corpos de prova de tração padrão ASTM D638



Fonte: Autor, 2015.

Acredita-se, portanto, que a delaminação das camadas possa ter ocorrido por alguma falha no processo de fabricação, onde a resina não conseguiu garantir a completa união das camadas de manta de fibra com os fios, gerando, assim, o deslocamento. Contudo, o valor alcançado no ponto de ruptura do material ainda se encontra dentro da faixa indicada na Tabela 2, validando o ensaio e o material, de acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de tração

Ensaio de tração C.P. ASTM D638				
	Tensão de ruptura σ_{fu} (Mpa)	Extensão de ruptura ϵ_{tu} (-)	Módulo de elasticidade E_{tx} (Mpa)	Área medida (mm ²)
Média	271,2432	0,0732	3731,12	39,84
Desvio padrão	49,3790	0,0054	476,72	
Coefficiente de variação	18,20%	7,33%	12,78%	

Fonte: Autor, 2015.

Os valores obtidos encontram-se dentro da faixa indicada na literatura (SOUSA, 2011), salvo que, para materiais de natureza estrutural, autores como Martins (2011) destacam que

alguns perfis de GFRP alcançam valores na ordem de 400 MPa de ruptura. Tal fato torna-se muito interessante no ponto de vista do dimensionamento estrutural, contudo, não desvaloriza o resultado obtido, pois segundo consta na Tabela 3 (Propriedades mecânicas na direção normal de perfis pultrudados GFRP disponíveis comercialmente), o valor encontra-se dentro do oferecido pelos fabricantes descritos.

Como o material foco deste estudo teve sua composição ocultada pelo fabricante devido ao sigilo industrial, e como não é foco do trabalho encontrá-las, não se sabe as proporções de cada componente para criar alguma analogia. Sabe-se, no entanto, que a mescla dos componentes que fazem parte do perfil conseguem alcançar as mais variadas propriedades. Com isso fica a critério das empresas entrarem em contato com seus fornecedores e desenvolver os produtos que fiquem de acordo com suas necessidades.

4.1.2 Corpos de prova experimentais em tração

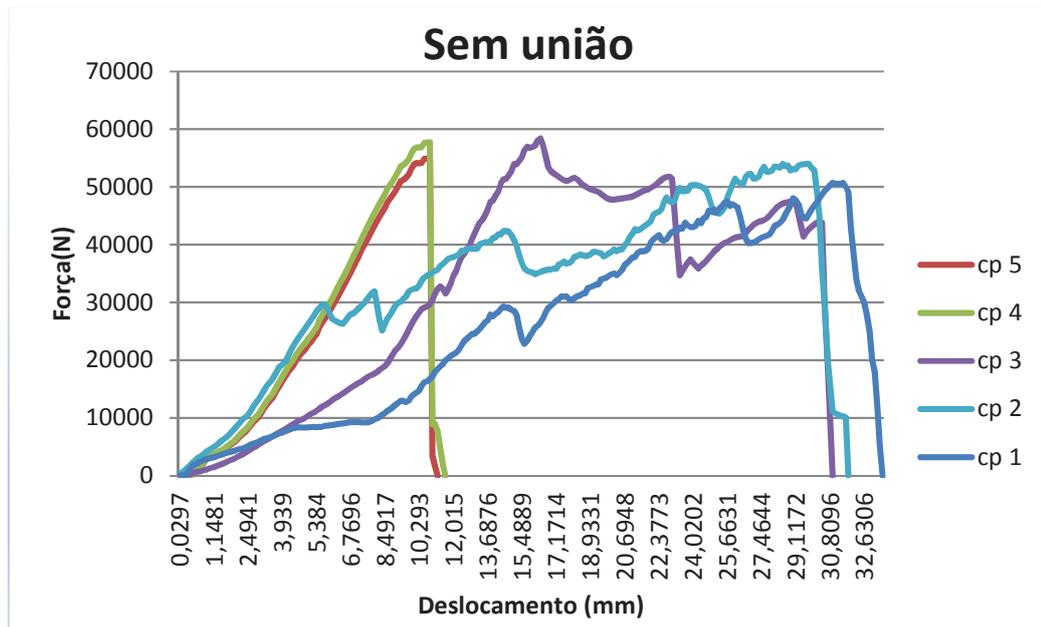
Para os corpos de prova experimentais não se teve problemas em validar o ensaio, pois a intensão do mesmo era comparar as características mecânicas do material GFRP quando submetido a diferentes fixações. Com base nas ilustrações apresentadas na sequência (Figura 61, 62, 63, 64, e, ainda, Tabela 14, 15, 16, 17), pode-se visualizar o comportamento de cada tipo de união e seus padrões.

O grande desafio dos ensaios de tração envolvendo materiais compósitos é a fixação. Assim, pode-se notar em todos os gráficos que o comportamento dos corpos de prova não é uniforme. Porém, os ensaios foram considerados válidos, pois o comportamento em ensaio do material já é de conhecimento comum e o que interessa, para o presente estudo, é o ponto de ruptura do mesmo. A literatura atesta que desvios de comportamento (não de tensão de ruptura) ocasionado por escorregamento das garras é comum nos ensaios de tração envolvendo GFRP.

4.1.2.5 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração sem união

Com base na Figura 61 e Tabela 14 se pode visualizar o comportamento dos corpos de prova experimentais de GFRP em um ensaio de tração. Em suma, os corpos de prova 4 e 5 apresentaram um comportamento satisfatório. Os demais possuem um comportamento diferenciado com um deslocamento maior e uma oscilação do esforço, tudo ocasionado pelo escorregamento das garras que prendiam o corpo de prova à máquina de ensaios, mas como o interesse se encontra no valor de sua tensão de ruptura, o mesmo mostra-se válido.

Figura 61 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração sem união



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 14 - Resultados dos corpos de prova experimentais de tração sem união

Ensaio de tração sem união	
Média (N)	55193,49
Desvio padrão	3098,847733
Coefficiente de variação	5,61%

Fonte: Autor, 2015.

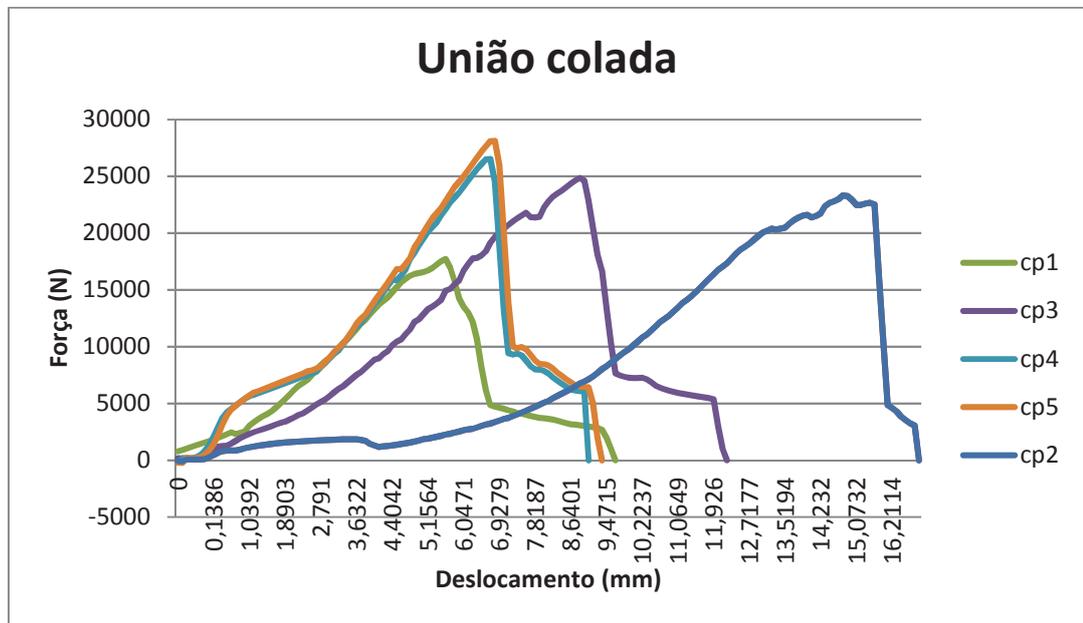
As rupturas dos corpos de prova foram, de certa forma, satisfatórias, pois a fratura ocorreu na área próxima às luvas, e houve a delaminação das camadas. Como na região de proximidade das luvas encontra-se o ponto de maior fragilidade, pois faz a junção de esforço da garra com a fragilização do lixamento executado para o ancoramento do adesivo, tal comportamento era esperado.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a forma como a máquina universal de ensaios se comportou em relação ao teste. Isso, pois como a mesma possui o sistema de agarre por fricção (quanto mais força de tração ela impõe, mais forte é o aperto das garras), pode-se notar que a máquina acabou por esmagar os corpos de prova contra a luva interna, o que, se acredita, não deva ter afetado o resultado, pois o rompimento das fibras ocorreu perto, mas não na luva interna.

4.1.2.2 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada

O ensaio dos corpos de prova colados demonstrou-se satisfatório, pois a maioria dos corpos de prova apresentaram a ruptura de forma subita gerando o descolamento da camada da extremidade do perfil (*fiber-tear failure*). A exceção foi o corpo de prova número 1, que apresentou uma falha no processo de lixamento, o que diminuiu o ancoramento e acabou por gerar uma diminuição de sua resistência mecânica, como pode ser visto no gráfico da Figura 62, o que acabou jogando para baixo os níveis médios de esforço encontrados na Tabela 18.

Figura 62 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 15 - Resultados dos corpos de prova experimentais de tração união colada

Ensaio de tração com união colada	
Média (N)	24115,07
Desvio padrão	3998,973
Coefficiente de variação	16,58%

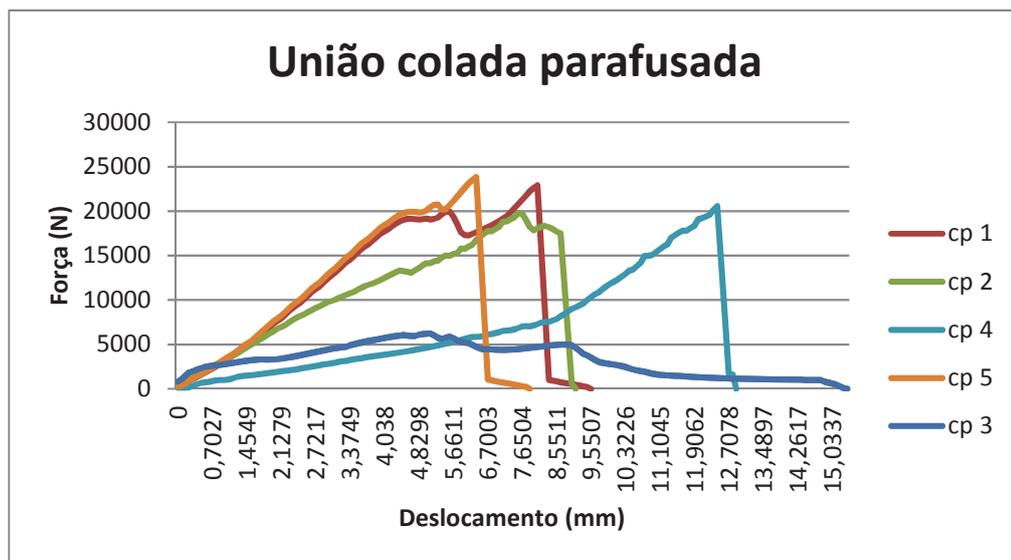
Fonte: Autor, 2015.

4.1.2.3 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada parafusada

No ensaio dos corpos de prova colados parafusados, notou-se uma diminuição das propriedades mecânicas se comparados aos somente colados. Observou-se que a ruptura ocorreu de forma súbita, gerando o descolamento da camada da extremidade do perfil (*fiber-tear failure*), seguido de trincas e arranque do material de reforço na região dos parafusos, o que caracteriza falha por corte local.

Quanto ao comportamento dos corpos de prova, pode-se constatar que todos os corpos de prova apresentaram comportamento adequado, com exceção do corpo de prova número 3, que teve uma drástica redução de suas propriedades mecânicas ocasionadas por uma falha no processo de colagem do mesmo, como vê-se à Figura 63 e Tabela 16.

Figura 63 - Comportamento dos corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união colada parafusada



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 16 - Resultados dos corpos de prova experimentais de tração com união colada parafusada

Ensaio de tração com união colada parafusada	
Média (N)	18800,18
Desvio padrão	6892,997
Coefficiente de variação	36,66%

Fonte: Autor, 2015.

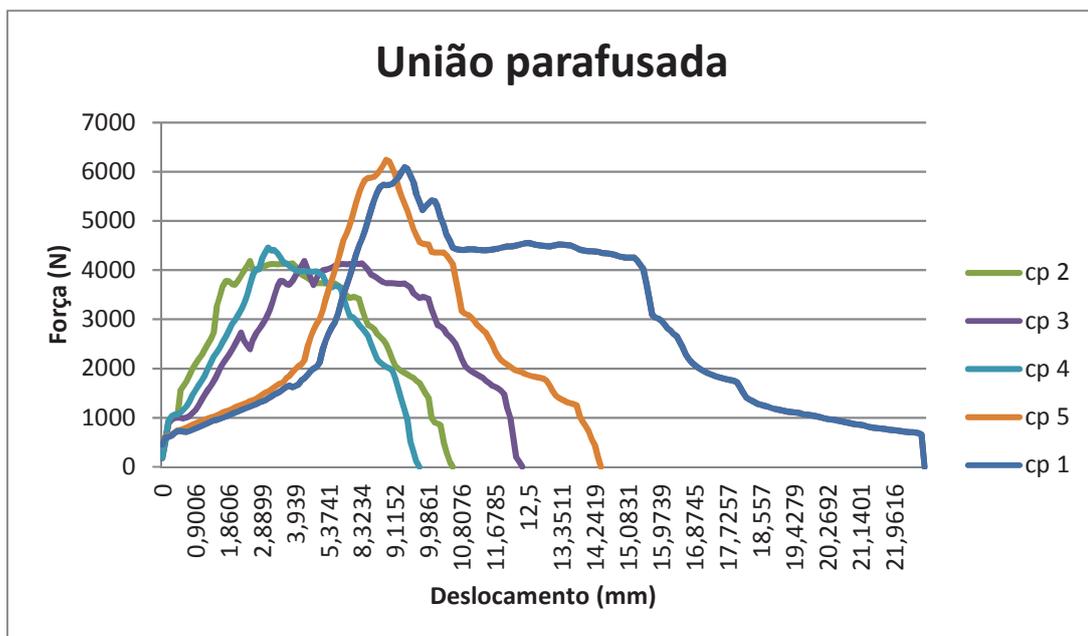
Como visto em estudos de uniões (Martins (2011) Mendes Correia (2012) e outros), quando se executa furos em um material que está sendo unido, cria-se uma zona com menor ancoramento e, conseqüentemente, diminuição na capacidade mecânica do mesmo. No caso do GFRP, além disso, pode-se criar fissuras nas uniões devido ao processo de furação mal executado ou, até mesmo, a fragilidade do material. Logo, o resultado mais provável é a diminuição de capacidade mecânica de uma união quando a mesma recebe um furo.

Contudo, segundo trabalhos já estudados (ASTM D5573, 1999; RIBEIRO, 2006; MARINHO, 2012; MENDES-CORREIA, 2012, entre outros), os corpos de prova colados parafusados obtiveram um limite de ruptura com valores de força maior do que somente os colados. Desse modo, pode-se presumir que o causador mais provável do comportamento seja os diferentes adesivos utilizados nos testes ou, até mesmo, uma provável falha no processo de colagem, o que remete à satisfação do procedimento de união anteriormente citado.

4.1.2.4 Corpos de prova experimentais em ensaio de tração com união parafusada

Os ensaios relacionados aos corpos de prova somente parafusados foram satisfatórios e procederam dentro do esperado, conforme resta demonstrado à Figura 64 e Tabela 17.

Figura 64 - Corpos de prova experimentais em ensaio de tração união parafusada



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 17 - Resultado ensaio de tração colado parafusado

Ensaio de tração com união colada parafusada	
Média (N)	5017,444
Desvio padrão	1041,399
Coefficiente de variação	20,76%

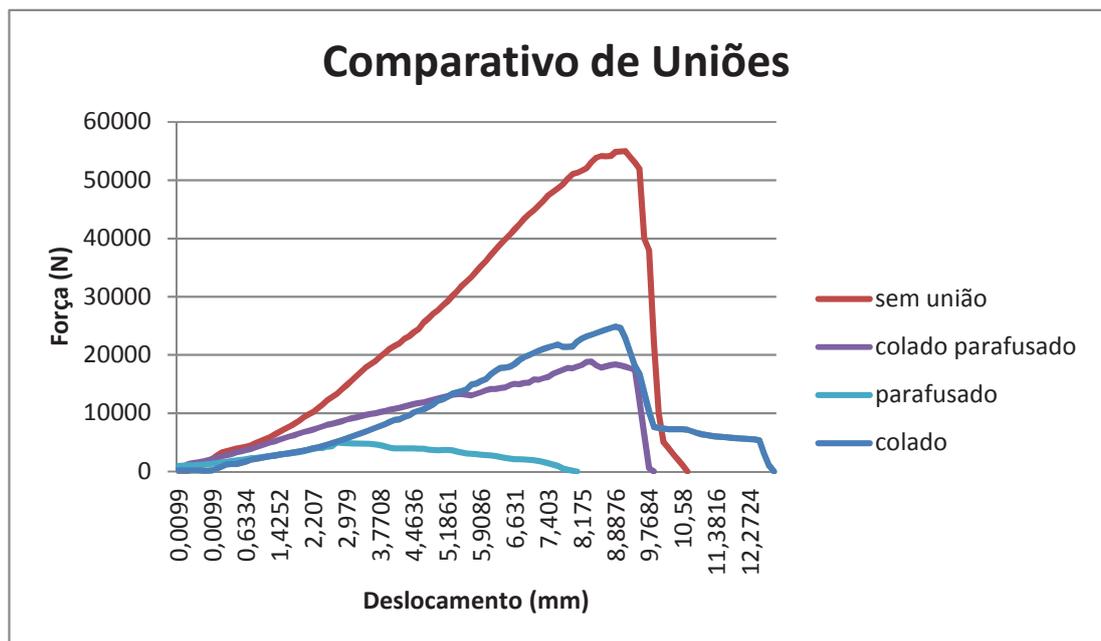
Fonte: Autor, 2015.

Apesar da satisfação nos resultados, nota-se nos corpos de prova 2, 3 e 4, uma diferença de resistência mecânica em relação aos demais. Analisando tais corpos de prova, observa-se uma variação na posição do parafuso utilizado, gerada por uma falha do operador na hora da execução dos furos, deixando-os mais perto da extremidade lateral. Quanto à “fratura”, todas ocorreram por corte local, gerada, provavelmente, por subdimensionamento dos parafusos, dimensionamento o qual foi visto na literatura (MARTINS, 2011) como indicado.

4.1.2.6 Comparativo entre uniões submetidas à tração

Com base nos gráficos ilustrados nas Figuras 61, 62, 63, 64, e nas Tabelas 14, 15, 16, 17, apresenta-se, respectivamente, a Figura 65 e a Tabela 18, que nada mais são do que a ilustração da média dos esforços gerados por cada união.

Figura 65 - Comparativo entre os diversos tipos de uniões de perfis de GFRP



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 18 - Comparativo entre os diversos tipos de uniões

Comparativo entre uniões		
	F. Média (N)	Eficiência
Sem união	55193,49	100,00%
Colada	24115,07	43,69%
Colada parafusada	18800,18	34,06%
Parafusada	5017,444	9,09%

Fonte: Autor, 2015.

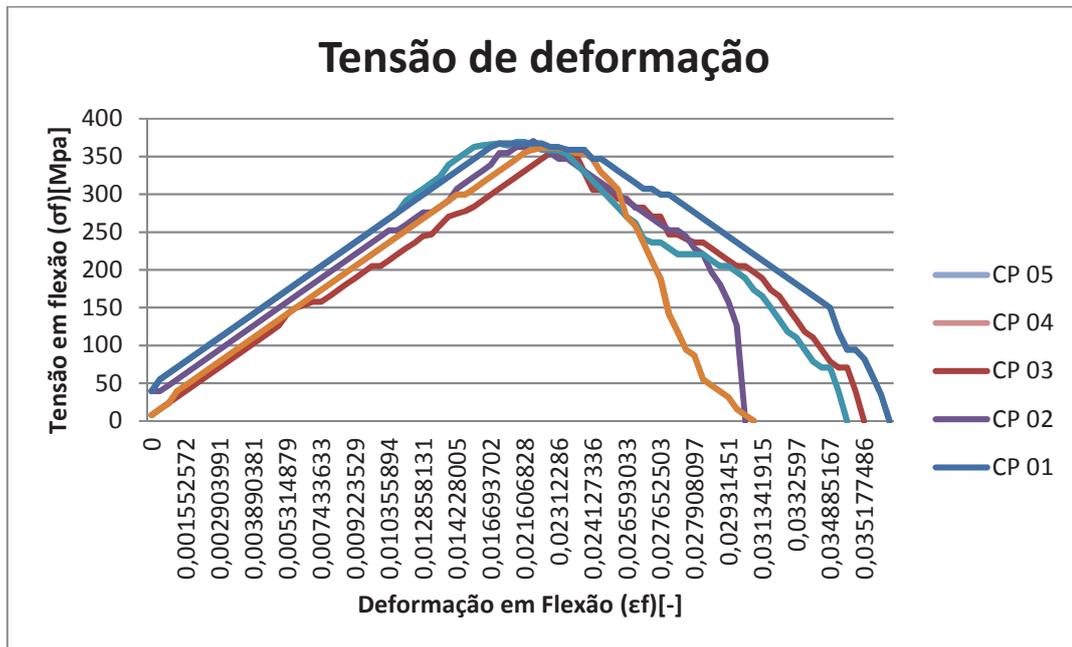
Como pode ser visto na Figura 65 e na Tabela 18, o melhor resultado alcançado foi com a união colada, onde se alcançou uma eficácia de 43,69% na união. Logicamente, atrelando valores para as uniões anteriormente citadas.

4.1.3 Ensaio de flexão

Nos ensaios de flexão realizados notou-se um comportamento semelhante para todos os corpos de prova. Como mostra da Figura 66, esse inicia-se por um comportamento elástico linear, onde a tensão e a deformação evoluem proporcionalmente, até o declive corresponde ao módulo de elasticidade. Na sequência, nota-se a primeira descontinuidade referente à ruptura das primeiras fibras, após a qual ainda ocorre uma ligeira recuperação da força aplicada, mas com um comportamento progressivamente não linear.

Numa fase final, o aumento da deformação ocorre com a redução da força aplicada, correspondendo à ruptura de fibras mais interiores do material. Considerando dois pontos da reta inicial do gráfico exposto na Figura 66, onde se constata o comportamento elástico linear foi, possível determinar o módulo de elasticidade do material.

Figura 66 - Curvas tensão deformação do ensaio de flexão dos corpos de prova ASTM D790



Fonte: Autor, 2015.

Na Tabela 19, estão apresentados os valores médios, desvios padrão e coeficiente de variação da tensão de flexão, da extensão associada à tensão última e o módulo de elasticidade.

Tabela 19 - Resultado ensaio de flexão

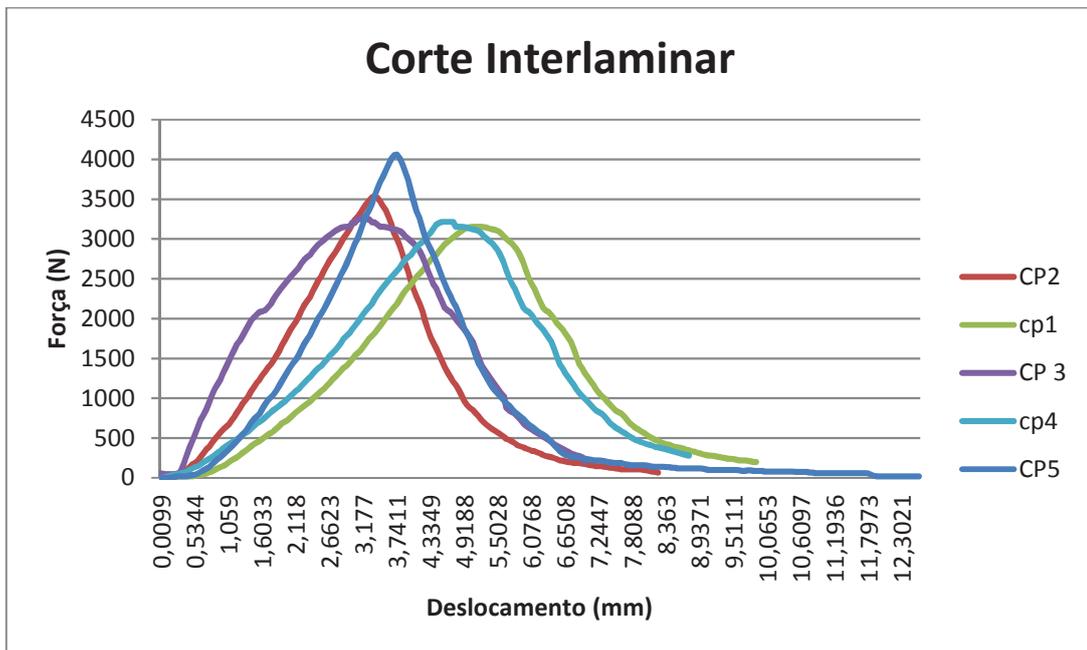
	σ_f (Mpa)	ϵ_f (-)	Ef (Gpa)
Média	364,65	0,020	9,3
Desvio padrão	6,59	0,002	0,82
Coeficiente de variação	1,80%	9,94%	8,89%

Fonte: Autor, 2015.

4.1.4 Corte interlaminar

Todos os corpos de prova foram levados à ruptura, tendo essa ocorrido por corte interlaminar (delaminação das camadas) em todos eles. Com isso, a totalidade dos ensaios foi considerada válida. A evolução do comportamento dos corpos de prova no ensaio de corte interlaminar está descrito pelo gráfico apresentado na Figura 67.

Figura 67 - Curva força-deslocamento dos corpos de prova para o ensaio de corte interlaminar



Fonte: Autor, 2015.

Analisando-se a Figura 67, nota-se um comportamento semelhante em todos os corpos de prova no começo - por terem um comportamento elástico (maioritariamente) e linear até se dar a ruptura por delaminação das primeiras camadas interiores. Em seguida, com o aumento dos deslocamentos, ocorre a redução da força aplicada, verificando-se ligeiras recuperações de carga correspondendo à progressiva delaminação das camadas cada vez mais para o exterior do corpo de prova, até se dar a ruptura da camada superficial, a partir da qual já não existe recuperação de carga. O ensaio termina com a descarga do corpo de prova.

Das curvas determinadas, obteve-se o valor da força associada à ruptura por corte interlaminar aplicada para cada corpo de prova (F), permitindo posteriormente o cálculo da resistência de corte interlaminar (τ).

Na Tabela 20 são apresentados os valores médios e respectivos desvios padrão e coeficientes de variação dos valores obtidos no gráfico (Figura 67), devidamente calculados segundo orientação das normas ASTM D2344. O desvio padrão é aceitável, tomando por base a singularidade do material e do equipamento utilizado.

Tabela 20 - Resultado ensaio de corte interlamelar

	F (N)	τ(MPa)
Média	3450,15	12,9381
Desvio padrão	370,86	1,39072
Coefficiente de variação	10,75%	10,75%

Fonte: Autor, 2015.

4.1.5 Corpos de prova experimentais

Conforme exposto anteriormente, os corpos de prova experimentais têm o intuito de comparar o desempenho entre as uniões. Neste ensaio, está se propondo uma situação que contempla vários esforços em um só corpo de prova, com isso se pretende fornecer mais dados para o dimensionamento de produtos. Com base nos gráficos que serão expostos a seguir (Figura 68, 69, 70, 71, 72, 73 e, ainda, nas Tabelas 21, 22, 23, 24, 25, 26), pode-se visualizar o comportamento de cada tipo de união e como cada uma delas reage à situação.

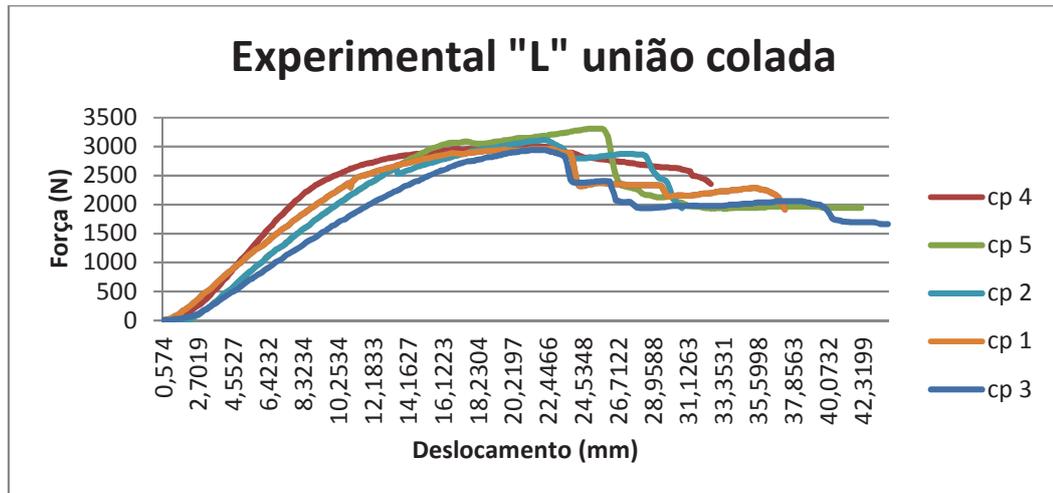
4.1.5.1 Ensaio experimental de juntas “L”

Os ensaios experimentais de juntas “L” foram realizados com uniões coladas, coladas parafusadas e parafusadas, como de destaca e descreve na sequência.

4.1.5.1.1 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões coladas

Para as juntas em formato de “L” com uniões coladas encontrou-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 68 e à Tabela 21.

Figura 68 - Comportamento ensaio experimental de união colada formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 21 - Resultado do ensaio experimental união formato “L”

Ensaio experimental "L" união colada	
Média (N)	3067,37162
Desvio padrão	151,4185557
Coefficiente de variação	4,94%

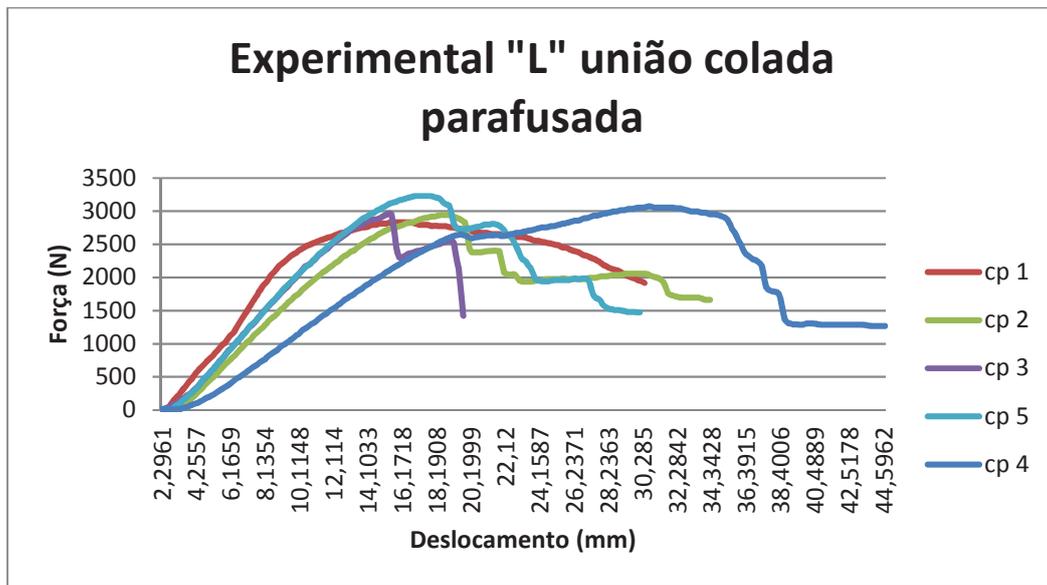
Fonte: Autor, 2015.

Todos os ensaios foram considerados válidos, pois o comportamento ocorreu segundo o esperado. Os corpos de prova apresentaram no início do teste um comportamento elástico linear seguido de algumas perturbações. Essas, devido a pequenos rompimentos da estrutura do compósito, e em seguida, à falha do mesmo com posteriores pré-carregamentos devidos a estruturas remanescentes, terminando o ensaio com a descarga da força.

4.1.5.1.2 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões coladas parafusadas

Para as juntas em formato de “L” coladas parafusadas encontrou-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 69 e à Tabela 22.

Figura 69 - Comportamento do ensaio experimental de união colada parafusada formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 22 - Resultados do ensaio experimental de união colada parafusada formato “L”

Experimental "L" união colada parafusada	
Média (N)	3009,75126
Desvio padrão	134,0316607
Coefficiente de variação	4,45%

Fonte: Autor, 2015.

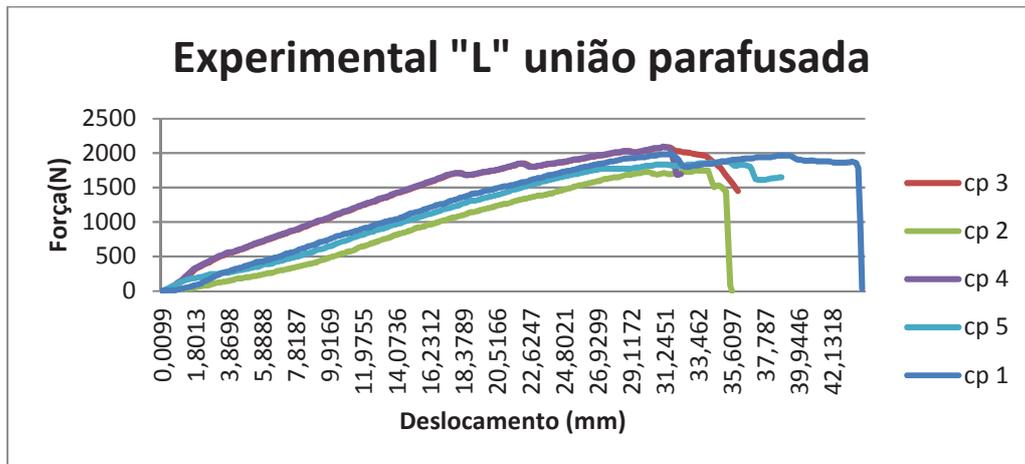
Todos os ensaios das uniões do formato “L” colado parafusado foram considerados válidos, pois o comportamento foi segundo o esperado. Os corpos de prova apresentaram, no início do teste, um comportamento elástico linear, seguido da falha do corpo de prova com posteriores pré-carregamentos, devido a estruturas remanescentes e terminando o ensaio com a descarga da força.

Contudo, o corpo de prova número 4 apresentou um deslocamento maior em seu ensaio. Esse, possivelmente, atrelado a algum problema de ancoramento da junta ao material, contudo, na análise visual do corpo de prova nada foi encontrado. Suas características se mantiveram preservadas. Logo, como o interesse é no ponto de falha do mesmo, opta-se por validar o teste.

4.1.5.1.3 Ensaio experimental de juntas “L” com uniões parafusadas

Para as juntas em formato de “L” parafusadas encontrou-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 70 e à Tabela 23.

Figura 70 - Comportamento do ensaio experimental de uniões parafusadas formato “L”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 23 - Resultado do ensaio experimental de união parafusada formato “L”

Experimental "L" união parafusada	
Média (N)	1958,8347
Desvio padrão	147,9935128
Coefficiente de variação	7,56%

Fonte: Autor, 2015.

Todos os ensaios das uniões do formato “L” parafusado foram considerados válidos, pois o comportamento foi segundo o esperado. Os corpos de prova apresentaram no início do teste um comportamento elástico linear seguido da falha do corpo de prova com posteriores pré-carregamentos, devidos a estruturas remanescentes e terminando o ensaio com a descarga da força. O que é visto nesse caso é o excesso de deslocamento proporcionado pela forma de união, como não há o adesivo para enrijecê-la, pode-se ver que o corpo de prova ao decorrer do ensaio tende a ter um deslocamento maior até alcançar a sua ruptura final.

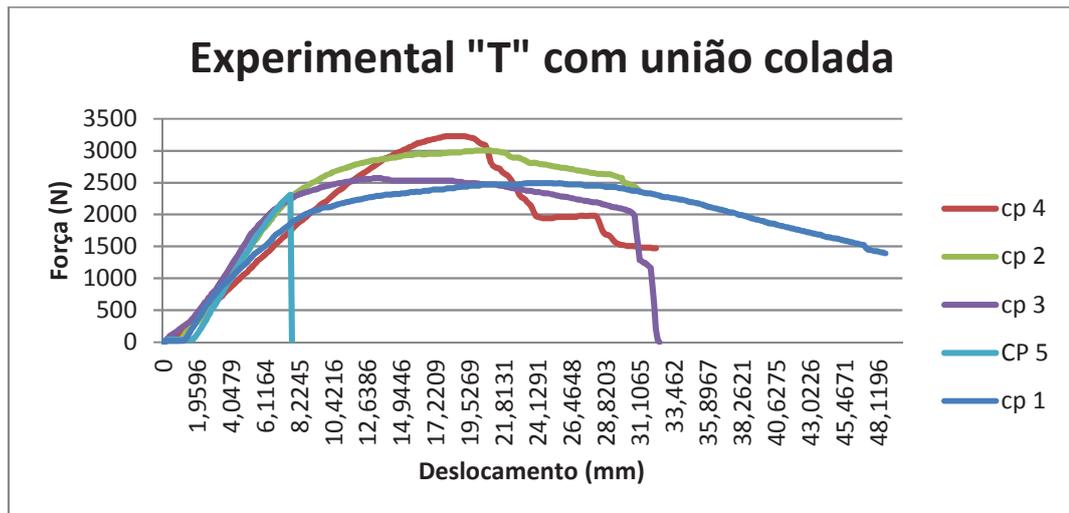
4.1.5.2 Ensaios experimentais de juntas “T”

Os ensaios experimentais de juntas “T” foram realizados com uniões coladas, coladas parafusadas e parafusadas, como de destaca e descreve na sequência.

4.1.5.2.1 Ensaio experimental de juntas “T” com uniões coladas

Para as juntas em formato de “T” com uniões coladas, encontra-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 71:

Figura 71 - Comportamento de união experimental colada formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 24 - Resultado do ensaio experimental de união colada formato “T”

Experimental "T" união colada	
Média (N)	2722,98054
Desvio padrão	381,7552624
Coefficiente de variação	14,02%

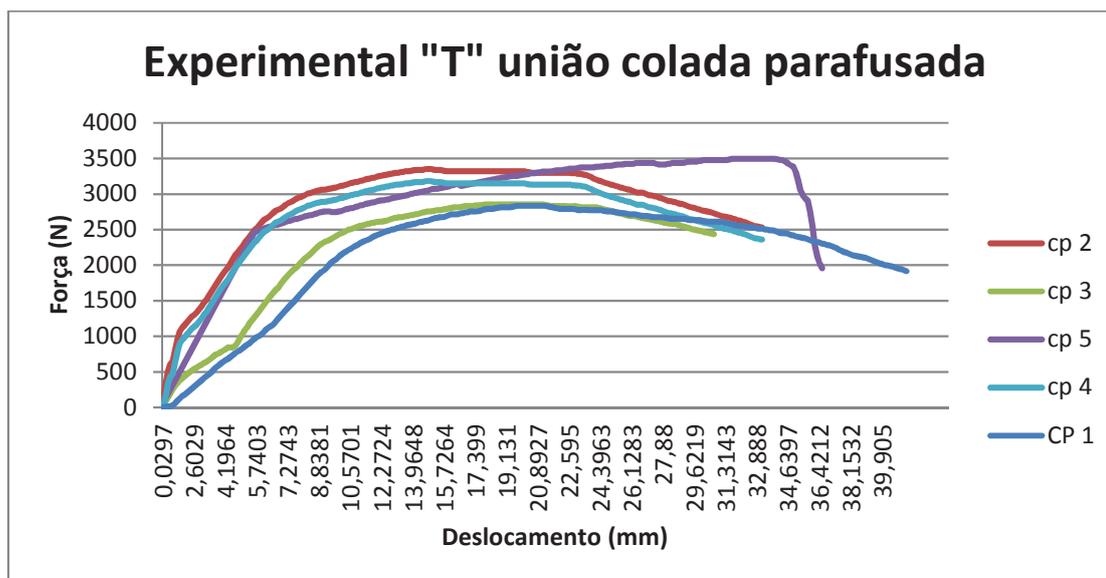
Fonte: Autor, 2015.

Todos os ensaios foram considerados válidos, pois o comportamento foi segundo o esperado. Os corpos de prova apresentaram no início do teste um comportamento elástico linear, em seguida, a falha do mesmo com posteriores pré-carregamentos devido a estruturas remanescentes, terminando o ensaio com a descarga da força. O corpo de prova número 5 apresentou uma redução nas suas características mecânicas devido a um problema no procedimento de colagem, que diminuiu o ancoramento das placas metálicas e, conseqüentemente, precipitou a fratura, diminuindo também a média do ensaio.

4.1.5.2.2 Ensaio experimental de juntas “T” com uniões coladas parafusadas

Para as juntas em formato de “T” coladas parafusadas encontra-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 72:

Figura 72 - Comportamento da união experimental colada parafusada formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 25 - Resultado do ensaio experimental união colada parafusada formato “T”

Experimental "T" união colada e parafusada	
Média (N)	3144,94872
Desvio padrão	296,1211438
Coefficiente de variação	9,42%

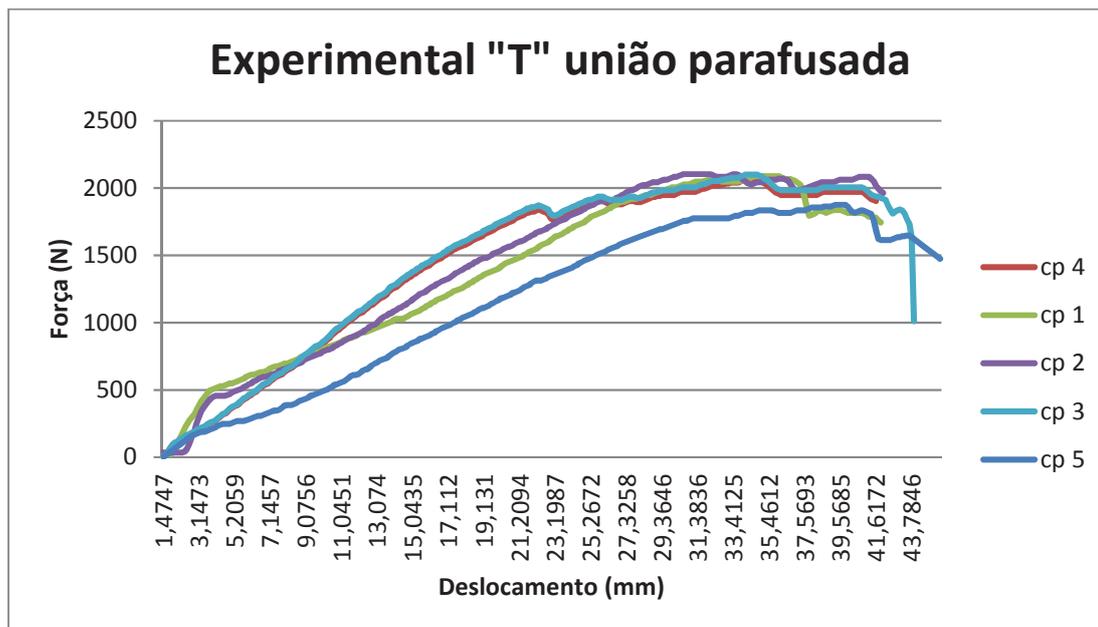
Fonte: Autor, 2015.

Todos os ensaios das uniões do formato “L” colado parafusado foram considerados válidos, pois o comportamento foi segundo o esperado. Os corpos de prova apresentaram no início do teste um comportamento elástico linear, seguido da falha do corpo de prova com posteriores pré-carregamentos devido a estruturas remanescentes, terminando o ensaio com a descarga da força.

4.1.5.2.3 Ensaios experimentais de juntas “T” com uniões parafusadas

Para as juntas em formato de “T” parafusadas encontra-se o comportamento determinado no gráfico apresentado na Figura 73:

Figura 73 - Comportamento da união experimental parafusada formato “T”



Fonte: Autor, 2015.

Tabela 26 - Resultado do ensaio experimental da união parafusada formato “T”

Experimental "T" união parafusada	
Média (N)	2047,07402
Desvio padrão	96,81116559
Coefficiente de variação	4,73%

Fonte: Autor, 2015.

Todos os ensaios das uniões do formato “T” parafusado foram considerados válidos, pois o comportamento foi segundo o esperado. Os corpos de prova apresentam no início do teste um comportamento elástico linear seguido da falha do corpo de prova com posteriores pré-carregamentos, devido a estruturas remanescentes, terminando o ensaio com a descarga da força. O comportamento visto neste caso é parecido com o da união parafusada em formato “L”, o deslocamento é superior ao encontrado nas uniões com adesivo.

4.1.5.3 Análise comparativa de resultados

Os resultados encontrados foram confrontados para melhor se validar os processos de união executados. Com base em estudos publicados em revistas da área (CORREIA; BRANCO; FERREIRA, 2006), foi visualizado como estudiosos vem procedendo com a mensuração e análise dos resultados, com isso pode-se criar uma forma de comparação que possibilitou avaliar a viabilidade dos processos.

Assim, de acordo com Correia, Branco e Ferreira (2006), em seus experimentos de caracterização do GFRP, os perfis desses materiais possuem as propriedades expressas na Tabela 27. De outro modo, a Tabela 28 expressa as características expressas na condução deste trabalho.

Tabela 27 - Resultado da caracterização do material GFRP encontrada na literatura

Tipo de Ensaio	Propriedades Mecânicas de Perfis de GFRP (Alma)		
	σ_{fu} (MPa)	ϵ_{fu} (1E-3)	Ef (GPa)
Tração	469.6 ± 12.0	14.4 ± 0.6	33.0 ± 0.7
Flexão	623.8 ± 27.1	25.1 ± 1.7	25.4 ± 1.4
	Fsbs (MPa)		
Corte Interlaminar	33.1 ± 4.7		

Fonte: Correia, Branco e Ferreira (2006).

Tabela 28 - Resultado da caracterização do material GFRP na execução deste trabalho

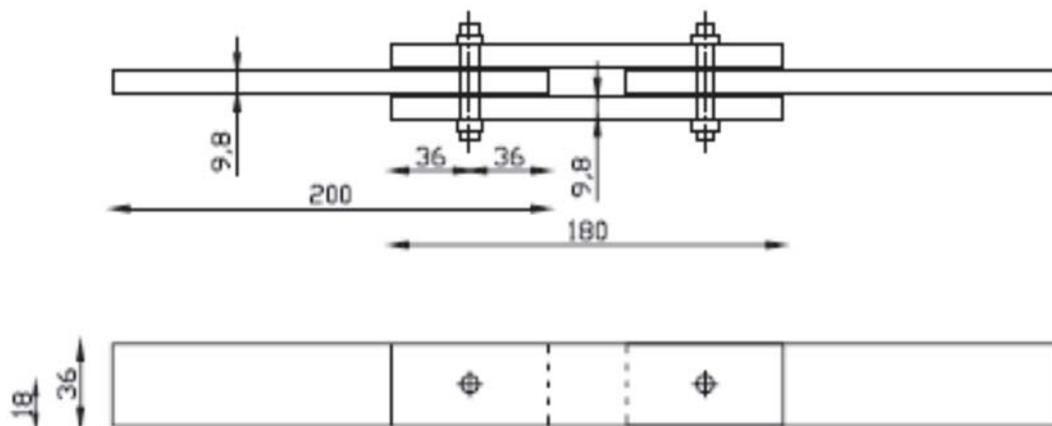
Tipo de Ensaio	Propriedades Mecânicas de Perfis de GFRP		
	σ_{fu} (MPa)	ϵ_{fu} (1E-3)	Ef (GPa)
Tração	239,89 +- 71,94	16,48 +- 5,7	2,8 +- 0,9
Flexão	364,65 +-6,6	20,15 +- 2,0	9,3+- 0,82
	Fsbs (MPa)		
Corte Interlaminar	12,94 +-1,4		

Fonte: Autor, 2015.

Como se pode observar pela análise das Tabelas 27 e 28, o material utilizado neste trabalho apresenta características mecânicas de tensão de ruptura com valores inferiores ao encontrado na literatura. Contudo, o foco do estudo encontra-se nas uniões e o quão eficiente elas podem se tornar na transmissão de esforço, quando unidas de diferentes formas.

O material declarado na Tabela 27, alvo do estudo de Correia, Branco e Ferreira (2006), foi submetido a alguns tipos de uniões, porém, no formato de tiras, oscilando somente o método de união, como pode ser visto na Figura 88.

Figura 88 - Perfis de GFRP com união parafusada segundo a literatura



Fonte: Correia, Branco e Ferreira (2006).

Correia, Branco e Ferreira (2006) utilizaram esse formato exposto na Figura 74 para testar como os tipos de uniões influenciam no desempenho mecânico do material GFRP. Em seu trabalho ele manteve o formato declarado acima e somente substituiu os parafusos por adesivo e, posteriormente, utilizou os dois simultaneamente, obtendo, assim, as uniões: colada, colada parafusada e parafusada.

O autor em pauta utilizou, para as ligações parafusada e colada parafusada, parafusos em aço inox da classe A4 ($\tau_u = 480$ MPa) com 8 mm de diâmetro colocados em furos com 8,5 mm de diâmetro. O aperto foi realizado manualmente e foram aplicadas anilhas metálicas com 24 mm de diâmetro, quanto ao torque o mesmo não declarou qualquer tipo de informação que permitisse quantificar a força que o mesmo utilizou no aperto. Nas ligações coladas e coladas parafusadas utilizou uma cola estrutural bicomponente, à base de resina epóxi, da marca Bostik, modelo 7201 A+B. Como resultado, Correia, Branco e Ferreira (2006) obtiveram diferentes áreas de união, como podem ser vistas na Tabela 29, onde se faz uma comparação com as áreas de união desenvolvidas neste trabalho, para com isso visualizar a eficiência do método aqui descrito.

Tabela 29 - Comparativo entre áreas de uniões: foco do estudo x literatura

Cálculo da área de união		
	Foco do estudo	Literatura Correia, Branco e Ferreira (2006)
Parafusada	2880 mm ²	10368 mm ²
Colada Parafusada	5760mm ²	10368 mm ²
Colada	5760mm ²	10368 mm ²

Fonte: Autor, 2015.

Na Tabela 29 se procurou calcular as áreas de influência de cada união. Para poder-se analisar a área colada e colada-parafusada optou-se por analisar toda a área de atuação do adesivo, já na área parafusada foi feito uma análise da área de compressão criada pelas anilhas de aperto, e em função dessas confrontamos o resultado. O que se nota na Tabela 29 é a diferença de área existente entre o estudo descrito aqui e o encontrado na bibliografia, onde a união colada e colada parafusada desse estudo corresponde a 55% da área encontrada na bibliografia e a parafusada corresponde a 37,7%. Logo, pode-se visualizar nas Tabelas 30 e 31 os valores encontrados em cada um dos casos.

Tabela 30 - Comparativo de força e eficiência de ligação entre uniões segundo Correia, Branco e Ferreira (2006)

Comparativo entre uniões	
	F. Média (kN)
Colada	41.7+- 6
Colada Parafusada	39.0 +-12.1
Parafusada	24.3 +-3,5

Fonte: Correia, Branco e Ferreira (2006).

Tabela 31 - Comparativo de força e eficiência de ligação entre uniões no caso estudado

Comparativo entre uniões	
	F. Média (kN)
Colada	24,1 +- 4
Colada Parafusada	18,8 +- 6.89
Parafusada	5.7 +- 1,4

Fonte: Autor, 2015.

Fracionando os esforços em função das áreas coladas, pode-se chegar a conclusões diversas em função do tipo de união: colada, colada parafusada e parafusada.

4.1.5.3.1 Análise do resultado da união colada

Analisando-se os valores encontrados por meio dos ensaios de tração, conclui-se que o método de união colado demonstrou-se 4% mais eficiente que o comparativo bibliográfico escolhido para quantificação do resultado. Tendo em vista o fato de que o material declarado na bibliografia tem qualidades mecânicas superiores ao usado no teste, acredita-se que para um material equivalente, o procedimento poderia ter se mostrado ainda melhor.

Assim, comparando-se os dois procedimentos de união pode-se concluir que o fator determinante para o bom resultado encontrado foi o procedimento de preparação dos corpos de prova, onde alterou-se a granulometria da lixa utilizada para se obter uma maior eficiência de ancoramento do material.

4.1.5.3.2 Análise do resultado da união colada parafusada

Analisando os valores encontrados por meio dos ensaios de tração, conclui-se que o método de união colado parafusado ficou 15% abaixo dos valores encontrados na literatura. Os fatores que contribuíram para tal resultado são:

a) primeiramente, o fato que culminou com esse resultado foi a falha no processo de colagem do corpo de prova número 3, por conta de o operador não ter efetuado a limpeza correta do mesmo. Com a exclusão do resultado do corpo de prova em questão se teria conseguido alcançar um valor acima da média encontrada na literatura;

b) ainda corrobora com tal resultado a espessura do material em análise, que possui uma espessura de 3,2 mm enquanto a material escolhido para comparação na literatura possui uma espessura de 9,8 mm, o que proporcionaria maior rigidez e, possivelmente, um valor mais elevado;

c) também concorre como motivo para os resultados alcançados o método de fixação. O teste realizado trabalhou com o formato tubular, com direta influência no sistema de fixação, pois com o aumento do torque aplicado no parafuso fez-se notar a falta de apoio o que faz com que o mesmo ceda e comece a colapsar a estrutura da matriz criando trincas e oportunizando a falha. Problema esse que Correia, Branco e Ferreira (2006) não enfrentou com seu método de união por meio de lâminas de material.

d) a área de abrangência da união também é significativa para tal resultado, pois a área a que o presente trabalho se refere constitui somente 55% da área encontrada no estudo comparativo de Correia, Branco e Ferreira (2006).

e) por fim, também influenciaram as características mecânicas. Conforme já demonstrado no caso da união parafusada, as características mecânicas do material têm impacto pois a resistência do mesmo demonstra, em caso de comparativo, qual irá aguentar a maior carga no caso de uma união parafusada. Na situação atual, o material utilizado no experimento apresenta somente 51% da resistência ao escoamento em relação ao material comparativo. Assim, com base nas análises apresentadas, justifica-se a diferença de eficiência apresentada na união colada parafusada entre este trabalho e o apresentado por Correia, Branco e Ferreira (2006).

4.1.5.3.3 Análise do resultado da união parafusada

As diferenças nos resultados entre o testado por este estudo e o apresentado por Correia, Branco e Ferreira (2006) quanto à união parafusada fundamenta-se em vários fatores:

a) primeiramente, na espessura do material em análise – diferindo de uma espessura de 3,2 mm do material escolhido para teste em comparação com uma espessura de 9,8 mm do material utilizado na pesquisa de Correia, Branco e Ferreira (2006);

b) ainda, há divergências quanto ao método de fixação utilizado no material foco deste trabalho, com direta influência no resultado. Isso, pois com o aumento do torque aplicado no parafuso fez-se notar a falta de apoio do tubo, o que faz com que o mesmo ceda e comece a colapsar a estrutura da matriz, criando trincas e oportunizando a falha. Problema esse que Correia, Branco e Ferreira (2006) não enfrentam com seu método de união, pois, como a base é totalmente rígida o torque pode ser aplicado a valores muito mais altos, gerando, assim, uma carga de atrito maior entre a superfície do material unido, alcançando os valores que foram apresentados;

c) o diâmetro do parafuso pode não ter gerado grande influência no estudo em foco em comparativo com o caso estudado. Porém, o diâmetro das anilhas gerou uma diferença no mínimo interessante do ponto de vista de distribuição de esforços, pois, na situação de estudo apresenta somente 55% da área encontrada no artigo de Correia, Branco e Ferreira (2006), o que auxilia no aumento do atrito conforme declarado acima;

d) a área de abrangência da união também é significativa para os resultados de união parafusada, pois a área a que o presente trabalho se refere constitui somente 55% da área encontrada no estudo comparativo;

e) as características mecânicas, conforme já demonstrado no caso da união parafusada, impactam fortemente os resultados, pois a resistência do material demonstra, em caso

comparativo, qual irá aguentar maior carga no caso de uma união parafusada. Na situação em estudo o material apresenta somente 51% da resistência ao escoamento em relação do material comparativo apresentado por Correia, Branco e Ferreira (2006). Com base nas análises realizadas justifica-se a diferença de eficiência apresentada na união parafusada.

5 CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento do presente trabalho foi possível obter as seguintes conclusões:

a) o material foco do estudo demonstrou ter boas propriedades mecânicas equiparando-se ao aço em vários aspectos e mostrando-se superior no quesito peso. Contudo, o comportamento frágil do mesmo sinaliza que em situações que remetem a impacto há necessidade de maiores cuidados com sua utilização.

b) a caracterização do material se mostrou satisfatória, alcançando bons valores, abrindo grandes possibilidades de utilização em vários ramos, como no caso de empresas do ramo agrícola, frigorífico e de estruturas treliçadas;

c) o método de união demonstrou-se bastante eficaz, apresentando valores que se equiparam ao estudo encontrado, mesmo com o material apresentando características mecânicas abaixo dos dados encontrados por Correia, Branco e Ferreira (2006);

d) o procedimento adaptado para ensaiar os perfis tubulares demonstrou-se eficiente, mesmo com a máquina universal de ensaios não sendo a mais adequada para compósitos. Os resultados obtidos mostram, de forma satisfatória, o comportamento do material, e poderão ser utilizados no futuro para confrontar dados de softwares de dimensionamento;

e) o processo de colagem superou as expectativas e demonstrou-se superior aos apresentados na literatura;

f) quanto à utilização do GFRP em implementos rodoviários, o material se mostra promissor, contudo deve-se considerar a limitação que o mesmo possui em relação aos impactos e à baixa produtividade quando comparado ao aço. Isso, devido à sua manipulação, o que permite inferir que sua utilização na implementação ainda tem muito a ser melhorada. Ainda importa considerar que o valor que o mesmo agregará com a redução de peso, justifica o aprofundamento da pesquisa na direção da busca de sua viabilidade econômica, ficando a cargo de seu utilizador mensurar, também, outras variáveis de produção.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o findar deste estudo de caráter experimental, permite-se recomendar, para trabalhos futuros, a pesquisa:

- a) da influência da posição e do diâmetro dos parafusos na resistência das uniões em GFRP;
- b) da influência dos efeitos do ambiente nas uniões;
- c) dos processos de qualidade no processo de fabricação do GFRP;
- d) da viabilidade econômica em comparação à durabilidade;
- e) da influência da fadiga nas propriedades mecânicas dos perfis de GFRP e suas uniões;
- f) via software, de elementos finitos das uniões de GFRP.

REFERÊNCIAS

- ASTM D2344. *Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates*. American Society for Testing and Materials, 2010.
- ASTM D5573. *Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. American Society for Testing and Materials, 2012.
- ASTM D638. *Standard test method for tensile properties of plastics*. American Society for Testing and Materials, 2010.
- ASTM D790. *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. American Society for Testing and Materials, 2010.
- CHIAVERINNI, Vicente. *Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos*. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998.
- CORREIA, João Ramôa. *Utilização de perfis pultrudidos de fibras de vidros (GFRP) na construção*. Porto-Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 2006. [Folhas de Apoio às Disciplinas de “Construção de Novos Materiais” e “Reabilitação e Reforço De Estruturas”]. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Desktop/Apontamentos_Perfis_GFRP-2006__ver_02_%20(1).pdf>. Acesso em: 12 mar. 2013.
- CORREIA, João Ribeiro; BRANCO, Fernando, FERREIRA, João. Comportamento mecânico de perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) e das suas ligações. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Lisboa-Portugal, p. 59-70, 2006. Disponível em: <http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_12_A7.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2013.
- CORREIA, Sônia Marisa Maciel Leitão. *Estudo da tolerância ao dano de tubagens em Prfv*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto-Portugal, 2008.
- CUNHA, Josiel; FOLTÊTE, Emmanuel; BOUHADDI, Noureddine. Aplicação da técnica de ajuste de modelos em estática para identificação da rigidez de ligações parafusadas de perfis pultrudados. *Revista Ciência & Engenharia*, Uberlândia, v. 15, n. 1/2, p. 27-35, jan./dez. 2006. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/download/527/487>. Acesso em: 12 jan. 2015.
- FREIRE JÚNIOR, Raimundo Carlos Silverio. *Estudo da prevenção de falha por fadiga em laminados de plástico reforçado com fibra de vidro*. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia em Engenharia Mecânica, Natal-RN, 2001.
- GERDAU. *Informações técnicas*. Disponível em: <https://www.comercialgerdau.com.br/produtos/download/2_AcosPlanos.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2015.
- GUIMARÃES, Alexandre José de Athay de. Estudo dos perfis compostos em fibra de vidro pelo processo de fabricação por pultrusão combinando as vantagens do plástico com a madeira

e o aço. *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, a. 2, n. 5, dez. 2007. Disponível em: <<http://www.unifoa.edu.br/pesquisa/caderno/edicao/05/22.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

LIMA SOBRINHO, Ledjane. *Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço*. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Rio de Janeiro, 2005.

MARINHO, Ana Carolina Magalhães. *Durabilidade de ligações coladas com adesivo epoxídico entre perfis de GFRP utilizados em reabilitação*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2012.

MARTINS, João Luís Martins e Belo. *Manual de controle de qualidade e durabilidade de estruturas em GFRP*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2011.

MENDES CORREIA, Manuel. *Comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP: caracterização experimental e modelação numérica*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2012.

NUNES, Francisco Felício. *Comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP reforçados com mantas de CFRP Caracterização experimental e modelação numérica*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2012.

RIBEIRO, A. S.; DE JESUS, A. M. P; FERREIRA, J. A. M. Comportamento estático e à fadiga de juntas coladas com perfis pultrudidos. *Revista Mecânica Experimental*, Lisboa, v. 16, p. 81-87, 2006. Disponível em: <http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_16_A10.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2015.

SOUSA, João Pedro Girão Meireles de. *Durabilidade de perfis pultrudados de viniléster reforçado com fibras de vidro (Gfrp)*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2011.

TEIXEIRA, Pedro Manuel Veiga. *Análise e dimensionamento de perfis pultrudados de GFRP*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, 2010.

VALLÉ, Till; KELLER, Thomas. Strength prediction of adhesively bonded joints of pultruded GFRP. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 3, Lyon, France, 2005.