

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

Giovani Carlos Vani

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
OBTIDOS PELOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO CONTÍNUA E
PULTRUSÃO.**

Passo Fundo

2014

Giovani Carlos Vani

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
OBTIDOS PELOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO CONTÍNUA E
PULTRUSÃO.**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

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

Passo Fundo
2014

Giovani Carlos Vani

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS
OBTIDOS PELOS PROCESSOS DE LAMINAÇÃO CONTÍNUA E
PULTRUSÃO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Projetos e Processos de Fabricação, sob a orientação do Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.

Data da aprovação: 08 de maio de 2014.

Os componentes da Banca Examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Dr. Charles Israel
Orientador

Professor Dra. Angela Dewes Moura
Universidade Feevale.

Professor Dr. Eduardo Radovanovic
Universidade Estadual de Maringá.

Professor Dr. Luiz Airton Consalter
Universidade de Passo Fundo.

DEDICATÓRIA

Aos meus amores Albanin e Raul.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Charles Leonardo Israel pelo tempo dispensado e por acreditar que no fim tudo acaba bem.

Ao programa de pós-graduação PPGPPF pelas oportunidades de aprendizado e crescimento.

Ao Prof. Dr Telmo Roberto Strohaecker, e ao aluno Jefferson Haag do LAMEF- UFRGS pelo auxílio nos ensaios de fadiga.

Ao Prof. Dr Eduardo Radovanovic /UEM e ao Eng. Luiz Eduardo da Silva (Técnico do laboratório de microscopia de varredura da UPF) pela ajuda na aquisição das imagens do MEV.

Ao meu inoxidável amigo André Cezário por me ajudar na análise dos resultados do ensaio de fadiga.

A empresa Pultrusão do Brasil pelos materiais para ensaio e pelas informações técnicas.

A Turma da Galinha Pintadinha por manter meu filho distraído enquanto eu trabalhava nesta dissertação.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados”.

Mahatma Gandhi

RESUMO

Nos últimos anos, os materiais compósitos polímeros reforçados com fibras (PRF) vêm sendo cada vez mais utilizados em diversos setores industriais, em especial na indústria aeronáutica, offshore e automobilística, devido ao fato de apresentarem vantagens competitivas em relação aos materiais tradicionais, como o aço, alumínio, e madeira. São características comuns destes compósitos a baixa densidade, a durabilidade em ambientes agressivos e a facilidade de moldagem. Porém ainda há poucos conhecimentos sobre as propriedades mecânicas deste grupo de materiais e, por isso, muitas vezes acabam sendo empregados equivocadamente em função do uso final. Desta maneira este estudo se propôs a investigar as propriedades mecânicas do material compósito plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) na forma comercial de placas planas obtidas por dois processos distintos: Laminação Contínua e Pultrusão, e assim caracterizá-los a fim de orientar o seu uso para diversas aplicações. Os materiais passaram inicialmente por uma análise de TGA para determinação da proporção em massa matriz/reforço. Após foram feitos ensaios mecânicos para determinação da resistência a tração, flexão e impacto izod e analisado os mecanismos de fratura resultantes do ensaio de tração e impacto.

Por fim, os materiais foram ensaiados em fadiga, onde se obteve a curva S-N para a razão de fadiga $R=0,1$. Com base no ensaio de fadiga foi calculado o coeficiente de fragilidade a fadiga por meio da construção da curva de fadiga, normalizada para cada um dos materiais. Os resultados mostraram que o material pultrudado apresenta superioridade em todas as propriedades estudadas, exceto quando se avalia o comportamento a fadiga levando-se em consideração a variação da fragilidade à fadiga do material em função da proporção matriz/reforço. Estes dados indicam que quanto maior o percentual de reforço no material compósito menor será sua resistência à fadiga.

Palavras-chave: Compósitos. Pultrusão. Laminação contínua. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In the recent years composite materials are being increasingly used in diverse industrial sectors, especially in the aerospace, automotive and offshore industry because they have competitive advantages over traditional materials such as steel, aluminum and wood. In general, composites show lightness, durability in aggressive environments and ease of molding. However, there is still little knowledge about the mechanical properties of these materials and therefore often end up being wrongly employed in relation to the end use. In these sense, the objective of this study was investigate the mechanical behavior of composite materials in the form of plane plates obtained by two distinct processes: Continuous lamination and Pultrusion, and so characterize them in order to guide its use for industrial applications. Initially, the materials were subjected to TGA analysis for determination of matrix/ reinforcement mass. After mechanical tests were made to determine the tensile strength, flexural and izod impact and analyzed the mechanisms of fracture resulting from tensile test and impact. Finally the materials were tested in relation to the fatigue behavior, in which was obtained SN curve for stress ratio $R = 0.1$. From the latter test, it was possible to build the equations that delineate the behavior of the materials as a function of the applied load and the number of cycles to which they are subject. The fatigue test also permitted calculates the fatigue fragility coefficient through the normalized fatigue curve for each analyzed material. The data showed that pultruded material exhibits superior performance in all studied properties, except when evaluating the fatigue behavior taking into account the variation of fragility to material fatigue in relation to the proportion matrix / reinforcement. The results indicate that the higher percentage of reinforcement in composite material will lower your resistance to fatigue.

Keywords: Composite. Pultrusion. Continuous lamination. Mechanical properties.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivo Geral	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Propriedades das fibras (reforços).....	21
3.1.1	<i>Principais tipos de fibras</i>	22
3.1.2	<i>Formas comerciais das fibras de vidro</i>	23
3.2	Propriedades das matrizes	24
3.2.1	<i>Resinas termofixas tipo poliéster</i>	26
3.3	Processo de fabricação por pultrusão	27
3.3.1	<i>Defeitos e imperfeições mais comuns em pultrudados com reforços de fibra de vidro</i>	31
3.4	Processo de fabricação por Laminação contínua (LC).....	32
3.4.1	<i>Defeitos e imperfeições mais comuns em compósitos obtidos por laminação contínua</i>	33
3.5	Comportamento mecânico dos materiais PRFV	33
3.6	Mecanismo de fratura em materiais PRFV quando submetidos a cargas estáticas.	34
3.7	Comportamento a fadiga dos materiais PRFV	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	Compósitos avaliados.....	41
4.2	Determinação da proporção de fibras nas chapas PRFV.....	42
4.3	Ensaio de tração, flexão e impacto	43
4.3.1	<i>Análise de fratura para o ensaio de tração</i>	45
4.3.2	<i>Análise de microscopia eletrônica para o ensaio de impacto</i>	45
4.4	Ensaio de fadiga dinâmico	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Ensaio de tração	48
5.2	Análise de fratura nos ensaios de tração	55
5.3	Ensaio de flexão	58
5.4	Ensaio de impacto Izod	60
5.5	Análise de microscopia eletrônica para o ensaio de impacto	61
5.6	Ensaio de fadiga dinâmico	67
6	CONCLUSÕES.....	73

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXOS I - RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS PARA CADA CP INDIVIDUAL	80
	ANEXOS II - FICHA TÉCNICA DAS PLACAS PRFV LAMINADAS AVALIADAS NESTE ESTUDO	85
	ANEXOS III - FICHA TÉCNICA DAS PLACAS PRFV PULTRUDADAS AVALIADAS NESTE ESTUDO	86

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição e processos de fabricação para compósitos termofixos.	16
Figura 2 – Classificação dos compósitos segundo o reforço.....	19
Figura 3 – Peças de aeronaves fabricadas com compósitos.	20
Figura 4 – Exemplo de cálculo de densidade linear em Tex.....	23
Figura 5 – Formação de matriz de poliéster.	26
Figura 6 – Representação esquemática do processo de pultrusão.	27
Figura 7 – Etapas do processo de pultrusão	28
Figura 8 – Representação característica de um perfil pultrudado.	29
Figura 9 – Comparação das propriedades mecânicas específicas do material pultrudado com o aço e o concreto.....	30
Figura 10 – Representação esquemática do processo de laminação contínua.....	32
Figura 11 – Curvas tensão versus deformação para materiais PRFV, em relação à tração.....	34
Figura 12 – Tipos de danos em compósitos PRFV ocasionados por carregamento estático.....	35
Figura 13 – Comparação entre as curvas S-N típica para materiais metálicos ferrosos (A) e materiais compósitos (B)	37
Figura 14 – Coeficiente de fragilidade (b) versus percentual de fibra para diferentes configurações de laminados de PRFV, utilizando R=0,1.....	39
Figura 15 – Organograma dos ensaios realizados.....	41
Figura 16 – Dimensional dos CP utilizados nos ensaios de tração, flexão e impacto.....	43
Figura 17 – Resultado da análise de TGA do material pultrudado.	46
Figura 18 – Resultado da análise de TGA do material laminado.....	48
Figura 19 - Ensaio de tração segundo a norma ASTM D3039.....	49
Figura 20 – Curva média tensão <i>versus</i> deformação para os compósitos avaliados neste estudo.	51
Figura 21 – Estágios da curva tensão x deformação para as chapas PRFV pultrudadas.....	53
Figura 22 – Análise macroscópica do material laminado após ensaio de tração.	55
Figura 23 - Imagens ampliadas do material laminado após ensaio de tração.	56
Figura 24 - Análise macroscópica do material pultrudado após ensaio de tração.....	56
Figura 25 - Imagens ampliadas do material pultrudado após ensaio de tração.	57
Figura 26 – Ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790.....	59
Figura 27 – Ensaio de resistência ao impacto segundo a norma ASTM D256.	60
Figura 28 - Visão geral do material PRFV laminado após ensaio de impacto.....	61
Figura 29 – Fratura adesiva entre fibra e matriz no material PRFV laminado.....	62
Figura 30 - Fratura coesiva da matriz no PRFV laminado.....	63
Figura 31 – Desaderência das fibras com a matriz no PRFV laminado.....	64
Figura 32 - Visão geral do material PRFV pultrudado após ensaio de impacto.	65
Figura 33 – Fraturas no material PRFV pultrudado.	66
Figura 34 – Curva S-N* obtida no ensaio de fadiga dinâmico segundo a norma ASTM D3479.	68
Figura 35 - Curva $\sigma_{m\acute{a}x}/\sigma_{ult} \times N^*$ obtida no ensaio de fadiga dinâmico segundo a norma ASTM D3479.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das fibras de vidro mais utilizadas na fabricação de compósitos.	23
Tabela 2 – Propriedades da matriz de poliéster polimerizada.	25
Tabela 3 - Comparação de material pultrudado de referência ¹ com outros tipos de materiais.	30
Tabela 4 - Normas base para realização da termogravimetria e ensaios mecânicos.	42
Tabela 5 – Acondicionamento dos CP para os ensaios de tração, flexão e impacto.	44
Tabela 6 – Dados do ensaio de tração longitudinal (Média ± Desvio Padrão)	50
Tabela 7 – Dados do ensaio de flexão longitudinal (Média ± Desvio Padrão)	58
Tabela 8 – Parâmetros do ensaio de fadiga dinâmico para o material laminado.....	69
Tabela 9 – Parâmetros do ensaio de fadiga dinâmico para o material pultrudado	69
Tabela 10 – Estimativas de resistência à fadiga (N = 10 ⁶).....	72

LISTA DE SIGLAS

ABMACO – Associação brasileira de materiais compósitos

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

BMC – *Bulk molding compound*

CP – Corpos de prova

EF – Enrolamento filamental

E-glass – *Eletrical glass*

FC – Fibra contínua

FP – Fibra picada

LAMEF – Laboratório de metalurgia física

LC - Laminação Contínua

LM – Laminação manual

LP – Laminação por projeção

LPOL – Laboratório de polímeros

LV – Laminação à vácuo

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

N – Número de ciclos

n – número de corpos de prova

NPG – Neo pentil glicol

p – índice estatístico

PRF - Polímeros reforçados com fibras

PRFV - Polímeros reforçados com fibra de vidro

R – Razão de fadiga

RC – *Roving* cortado

RD – *Roving* direto

RTM – *Resin molding compound*

S-glass – *Strenght glass*

SMC – *Sheet molding compound*

TC – Tecido costurado

TGA – Análise termogravimétrica

TT - Tecido tramado

UCS – Universidade de Caxias do Sul

UD – Unidirecional

UFRGS - Universidade federal do Rio Grande do Sul

UPF – Universidade de Passo Fundo

UV – Ultravioleta

VS – Vêu de superfície

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\varepsilon$ - Variação de deformação

$\Delta\sigma$ - Variação de tensão

σ_c - Limite de resistência do compósito

ε_f - Deformação da fibra

ε_m - Deformação da matriz

$\sigma_{\text{máx}}$ - Tensão máxima de fadiga

$\sigma_{\text{últ}}$ - Limite de resistência do material

$\mu\varepsilon$ - *microstrain*

a, b, p - Coeficientes de fadiga do compósito

S - *Stress*

E - Módulo elástico

1 INTRODUÇÃO

Durante os últimos anos têm crescido o interesse em desenvolvimento de compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras (PRF,) para a fabricação tanto de estruturas primárias quanto secundárias. Esse crescente interesse é guiado pela necessidade de redução de peso, de facilitar a manutenção, de aumentar a blindagem e principalmente de criar uma alternativa ao uso dos materiais metálicos em componentes de todas as finalidades com menor custo por ciclo de vida e maior vida útil (RAMESH et al., 2013).

Os compósitos apresentam excepcional inércia química, o que permite sua utilização em uma série de ambientes quimicamente agressivos (LESKO, 2004). Além disso, aditivos especiais e resinas específicas estão à disposição para solucionar aplicações que requeiram propriedades além das usuais, tais como proteção contra luz ultravioleta e proteção para minimizar o efeito de energia estática (RAMESH et al., 2013). De maneira geral, umidade, vento, sol, oscilações térmicas apresentam pouca ação prejudicial sobre os compósitos.

De acordo com as metas de redução de peso para indústria automotiva, estipuladas pelo Conselho Automotivo do Reino Unido para 2030, compósitos termofixos e termoplásticos são dois grupos de materiais que deverão ser utilizados na busca de componentes leves suficientes para atingir os objetivos propostos (REINFORCED PLASTICS, 2013). Sabendo-se que, os compósitos são obtidos pela combinação de materiais com diferentes características físico-químicas e mecânicas e pela utilização de diferentes processos de manufatura, necessitando esses desempenhar funções estruturais cada vez mais exigentes, os trabalhos de pesquisa e desenvolvimento nesta área são de suma importância.

Engenheiros e técnicos procuram cada vez mais os materiais compósitos como solução para seus projetos de engenharia. Isso porque, estes plásticos reforçados são sinônimos de produtos feitos “sob medida”. Decidir pela utilização de um compósito é ter à disposição a possibilidade de resolver problemas de engenharia com um produto fabricado na medida certa e exata de sua necessidade, esse fato é possível graças aos diversos processos de fabricação utilizados na confecção dos mais variados design de produtos (SAPUAN e MANSOR, 2014).

O processo de fabricação de materiais polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV) interfere nas características e na aplicabilidade do produto final obtido. Existem mais de dez processos usados para se obter este tipo de polímero, a saber: laminação manual, laminação por projeção, laminação assistida a vácuo, *Resin Transfer Molding* (RTM), *Sheet Molding Compound* (SMC), *Bulk Molding Compound* (BMC), laminação contínua, pultrusão, infusão e enrolamento filamental (FIBRALIT, 2009).

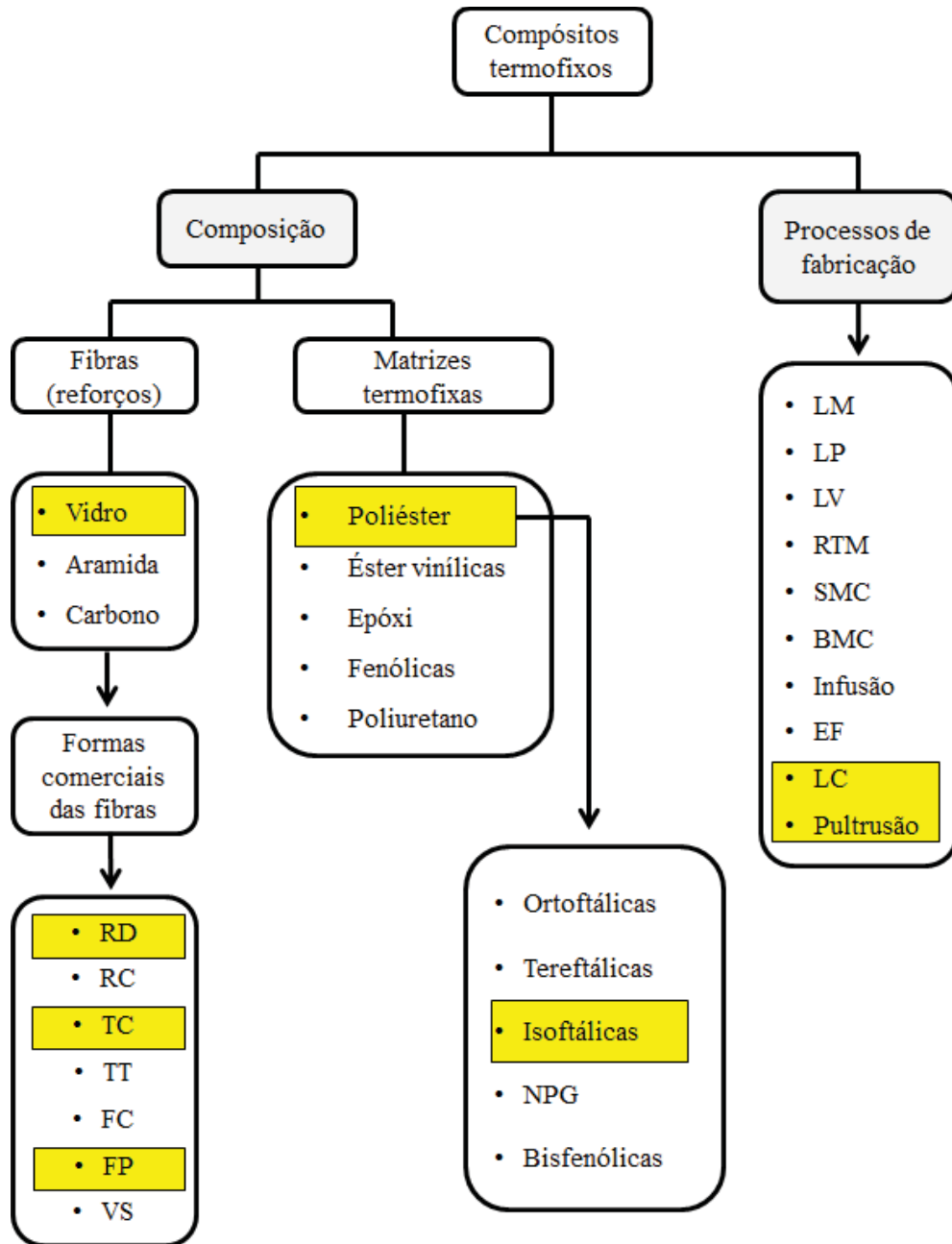
A promessa de resistência, baixo custo de manutenção e maior durabilidade, são argumentos que sustentam o uso de compósitos em aplicações industriais. Mas, apesar de reconhecidas e aceitas, atualmente não existe uma “quantificação” precisa destas características para grande parte dos compósitos utilizados industrialmente. A quantificação da vida útil dos materiais compósitos é o principal problema, pois depende de muitos fatores como, por exemplo, fatores ambientais e tipo de carga ao qual o material será submetido na composição de cada produto.

Nesse sentido, determinar, caracterizar, analisar e comparar as propriedades mecânicas de compósitos obtidos por diferentes combinações de matriz e fibras, bem como por processos de manufatura distintos, torna-se fundamental para viabilizar o desenvolvimento adequado e seguro de produtos que incorporam compósitos na sua estrutura. Este tipo de informação é fundamental para que diferentes segmentos industriais possam selecionar corretamente os materiais desta categoria e assim viabilizar técnica e economicamente o seu uso. Buscando colaborar neste cenário, este trabalho se propôs a investigar o comportamento mecânico do polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), quando fabricado em placas planas, por meio de dois processos de fabricação distintos: Laminação contínua e Pultrusão.

Estes processos têm em comum o fato de serem capazes de produzir peças de seção transversal constante, ou seja, perfis diversos, entre eles placas planas. A Laminação contínua é um processo muito utilizado para a confecção de telhas e chapas planas, e por ser contínuo teoricamente não apresenta limite de comprimento (FIBRALIT, 2009). O Processo de Pultrusão é destinado à produção de perfis estruturais, para aplicações que exigem resistências mecânicas muito intensas, suas principais virtudes são a elevada vida útil e a baixa necessidade de manutenção, fatores que justificam o uso deste processo apesar de seu custo mais elevado em relação a outros processos de fabricação de compósitos (REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL, 2009). Os compósitos fabricados por pultrusão são 75% mais leves que o aço e 33% mais leves que o alumínio, não sofrem influência de meios magnéticos e não propagam chamas. Além disso, apresentam um processo facilitado para instalação, geralmente com baixos custos e montagem simples, e dispensam pintura, uma vez que podem ser produzidos já na cor desejada (SHINO, 2007).

Um resumo das possíveis combinações entre tipos de matriz, tipos de reforços e processos de fabricação dos compósitos termofixos, é apresentado na figura 1.

Figura 1 – Composição e processos de fabricação para compósitos termofixos.



Em destaque a composição e os processos utilizados para a manufatura dos dois tipos de compósitos alvos deste estudo. Formas comerciais: RD (*roving* direto), RC (*roving* de corte), TC (tecido costurado), TT (tecido tramado), FC (fibra contínua), FP (fibra picada), VS (véu de superfície). Processos de fabricação: LM (laminação manual), LP (laminação por projeção), LV (laminação à vácuo), RTM (*Resin Transfer Molding*), SMC (*Sheet Molding Compound*), BMC (*Bulk Molding Compound*), EF (enrolamento filamental), LM (laminação contínua). Fonte: Produzido pelo autor.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar e avaliar placas planas de PRFV (Polímero reforçado com fibra de vidro), obtidas por dois processos de fabricação distintos (pultrusão e laminação contínua), por meio da análise de suas propriedades mecânicas.

2.2 Objetivos específicos

- Quantificar a proporção de fibras (em massa) para placas PRFV obtidas pelos processos de pultrusão e laminação contínua, por meio de análise termogravimétrica (TGA).
- Comparar as propriedades mecânicas (tração, flexão, energia de absorção de impacto) das chapas PRFV obtidas por pultrusão e laminação contínua.
- Comparar o comportamento à vida útil em fadiga nos chapas PRFV mencionadas acima e a influência do aumento do reforço (percentual de fibras) no índice de fragilidade do material.
- Investigar o padrão de fratura das placas PRFV obtidas por pultrusão e laminação contínua.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Materiais têm sido classificados em quatro categorias básicas: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos, nele estando incluído o concreto armado (ASHBY, 2002). Compósitos termofixos (também chamados de compostos) são materiais de moldagem estrutural, formados por uma fase polimérica contínua (matriz) reforçada por uma fase de fibras descontínua (reforço), as quais se agregam físico-quimicamente após um processo de crosslinking polimérico (cura) (LEVY NETO e PARDINI, 2006). O comportamento dos compósitos depende da natureza e do arranjo estrutural dos constituintes da matriz e do reforço, sendo que a interação destes elementos resulta num novo grupo de propriedades derivadas da combinação das propriedades gerais de cada um (LESKO, 2004; KU et al., 2011).

Normalmente a fase descontínua é formada por fibra de vidro, aramida ou de carbono dependendo da aplicação final. A fase polimérica é geralmente composta por uma resina termofixa do tipo poliéster insaturada (ortoftálica, tereftálica, isoftálica ou bisfenólica), dissolvida em solvente reativo como estireno ou ainda uma resina éster vinílica ou epóxi. Resinas como as fenólicas, de poliuretano e de silicone são utilizadas em aplicações especiais (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

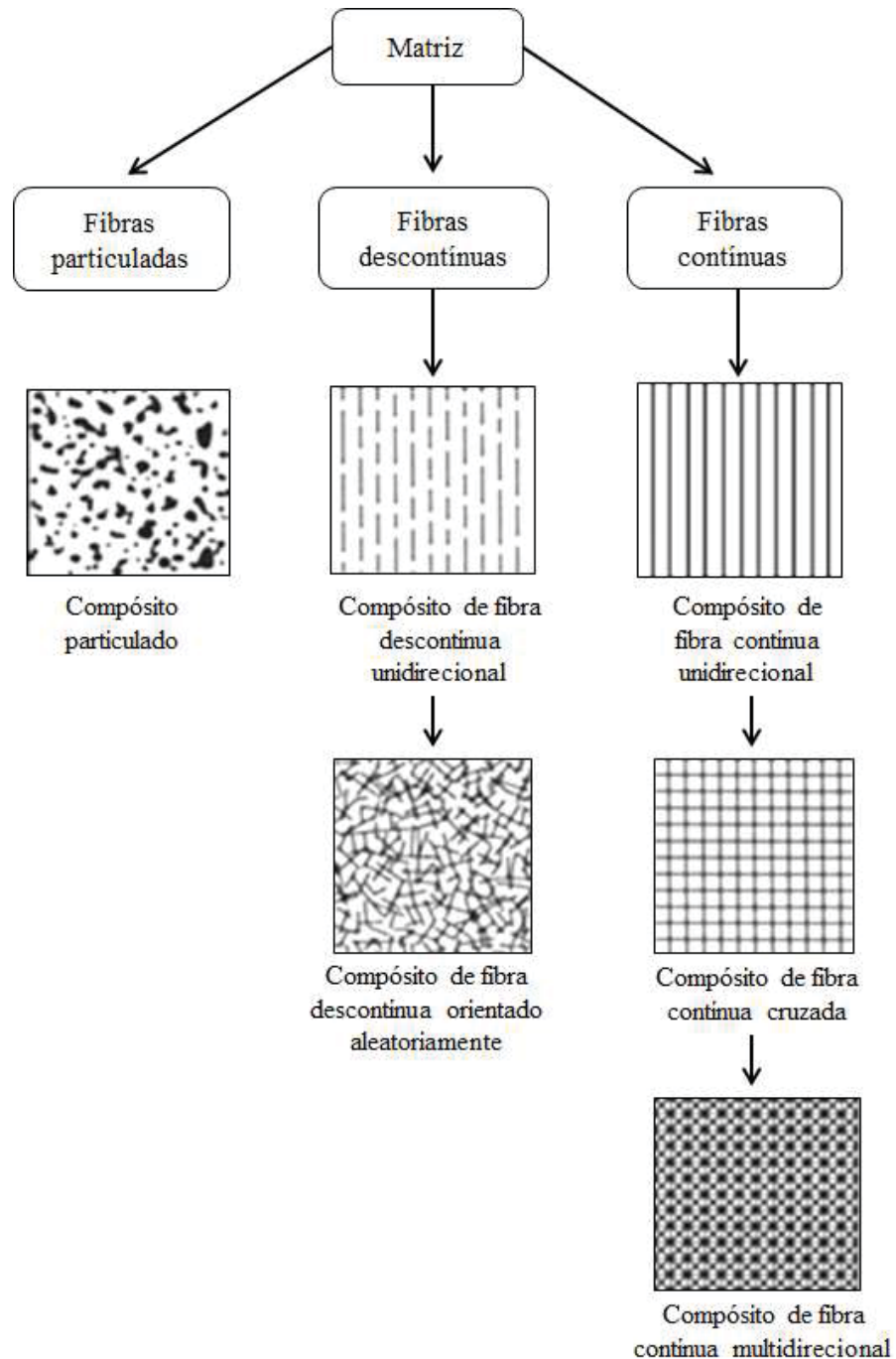
Em resumo, os compósitos são uma combinação macroscópica de dois elementos principais: uma matriz e um material de reforço constituído por fibras. As fibras suportam a maior parte da carga mecânica. A matriz assegura a distribuição das cargas pelas fibras, permitindo que fiquem na orientação apropriada e que se mantenham ligadas de forma a evitar a propagação de fendas (SHACKELFORD, 2008).

A matriz orgânica é uma resina polimérica que pode ser termoplástica ou termofixa e que na estrutura do compósito é responsável por: **i)** unir fisicamente os filamentos de reforços, as partículas de cargas minerais, pigmentos e outros aditivos, transferindo cargas mecânicas para o reforço; **ii)** conferir rigidez e forma; **iii)** envolver e isolar cada filamento, de maneira que possam atuar separadamente, diminuindo trincas e fissuras; **iv)** permitir a obtenção de elevada qualidade de acabamento superficial e garantir impermeabilidade, resistência química e proteção contra abrasão ou desgaste e **v)** possibilitar a obtenção de propriedades específicas (ductibilidade, resistência ao impacto, rigidez, etc) (TSERPES et al.,2004).

A matriz pode ser combinada com diferentes tipos de reforços (Figura 2), os quais são materiais na forma filamentar, particulado ou laminar, que na estrutura dos compósitos são responsáveis por: **i)** absorver as cargas mecânicas aplicadas (70 a 90% em compósitos

estruturais); **ii)** garantir a rigidez e propriedades mecânicas como tração, flexão, compressão, impacto, térmica, entre outras; **iii)** permitir isolamento ou condutividade elétrica (DE MOURA, 2005).

Figura 2 – Classificação dos compósitos segundo o reforço.



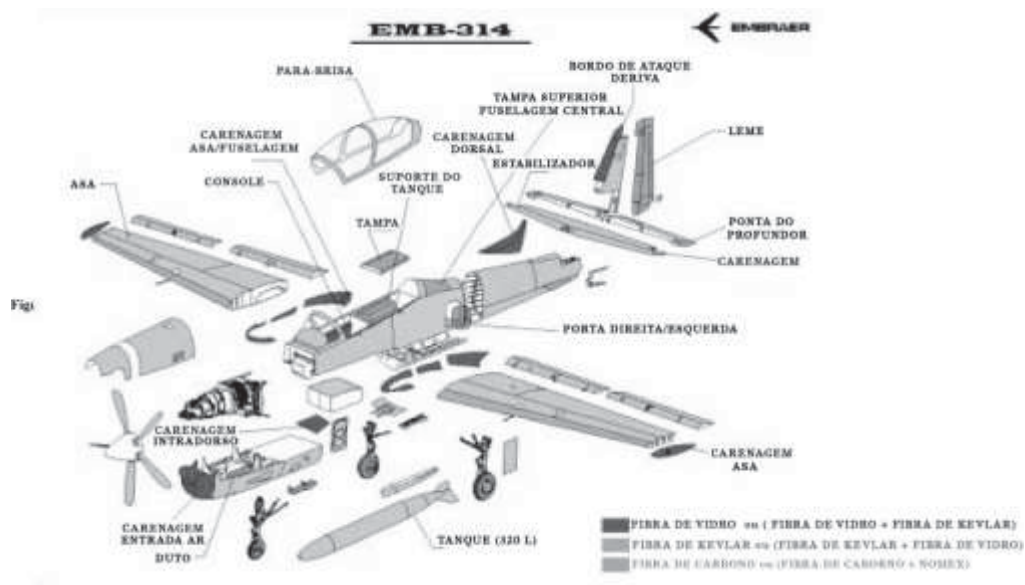
Fonte: Adaptado de DANIEL e ISHAI (1994).

O interesse pelos compósitos está ligado a dois fatores: econômico e desempenho. A redução de massa total de um produto pode chegar a cerca de 30% ou mais em função da aplicação dada ao material compósito, mantendo-se ainda boas propriedades de resistência mecânica. Além disso, o custo de fabricação de algumas peças em material compósito pode ser também sensivelmente menor se comparado aos materiais metálicos (REINFORCED PLASTICS, 2013).

O fator desempenho está ligado à procura por uma melhor performance de componentes estruturais, sobretudo no que diz respeito às características mecânicas (resistência máxima, resistência às intempéries e à ambientes agressivos). O caráter anisotrópico dos materiais compósitos é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas faz com que os materiais compósitos sejam cada vez mais utilizados dentro das diversas áreas de engenharia (RAMESH et al., 2013).

A aplicação dos compósitos surgiu inicialmente na indústria aeronáutica devido à necessidade de redução de peso, preservando a robustez dos componentes estruturais (Figura 3). Uma grande variedade de peças fabricadas em materiais compósitos pode ser encontrada nos aviões em substituições aos materiais metálicos como, por exemplo, fuselagem, *spoilers*, portas de trem de aterrissagem, acabamentos internos, entre outros (ALMEIDA, 2003).

Figura 3 – Peças de aeronaves fabricadas com compósitos.



Fonte: REZENDE e BOTELHO (2000).

A utilização dos compósitos na indústria automobilística e de caminhões é bem mais recente do que na área aeronáutica. Inicialmente, eram produzidos somente para-choques e tetos de automóveis. Atualmente, o material é utilizado para a fabricação de capôs, carters de óleo, colunas de direção, árvores de transmissão, molas laminadas, painéis, etc. (REZENDE e BOTELHO, 2000).

3.1 Propriedades das fibras (reforços)

A capacidade de suportar carga mecânica dos compósitos termofixos é dada, sobretudo, pelas fibras (reforços) empregadas em sua fabricação. Materiais que são classificados como fibras têm diâmetros pequenos e podem ser poliméricos ou cerâmicos como, por exemplo, os polímeros de aramida, vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carboneto de silicone (REINFORCED PLASTICS, 2013).

Uma característica importante na maioria dos materiais, especialmente os materiais frágeis, é que a adição de fibras de pequeno diâmetro torna esse material muito mais resistente que o material principal, que é chamado de matriz. Com isto, a probabilidade da presença de uma falha crítica que pode conduzir a fratura, diminui com o volume decrescente da matriz. Esta característica é usada como vantagem nos compósitos reforçados com fibra, os quais em geral têm alta resistência à tração (KU et al.,2011).

Visto que um material compósito combina uma resina polimérica com fibras de reforço, as propriedades serão obtidas em função das características desses componentes. As fibras exibem suas propriedades mecânicas principalmente na direção do seu comprimento, as características do compósito serão altamente dependentes da orientação das fibras e, por conta disso, altamente anisotrópicas na maioria dos casos (AHMADI, 2009). Um exemplo dessa dependência é o laminado predominantemente unidirecional (UD), como o obtido pelo processo de Pultrusão. Acredita-se que, neste caso, as propriedades mecânicas do laminado no sentido das fibras podem ser obtidas desconsiderando a contribuição da matriz, que é muito pequena em relação à participação das fibras. Assim as propriedades mecânicas de tração na direção das fibras podem ser obtidas com alguma precisão, multiplicando-se as suas propriedades mecânicas pelo teor volumétrico que elas ocupam no laminado. No sentido transversal, essa regra não se aplica, visto que a resistência do laminado nesse caso é muito em função da aderência das fibras à matriz polimérica (AHMADI, 2009).

Em resumo, as propriedades dos compósitos vão depender das propriedades das fibras e da resina (matriz); do teor de fibra no compósito (expresso em teor volumétrico) e da orientação ou geometria das fibras no compósito.

3.1.1 Principais tipos de fibras

Uma grande variedade de fibras é usada como reforço para compósitos. As características desejáveis para as fibras de reforço são: alta resistência, alta dureza e massa específica relativamente baixa. Cada tipo de fibra tem suas próprias vantagens e desvantagens. Os reforços mais utilizados para a produção de compósitos termofixos são as fibras de aramida, de carbono ou de vidro. As fibras de aramida são altamente resistentes, possuem baixo peso e apresentam boas resistências química, térmica e à abrasão, porém, podem degradar-se vagorosamente quando expostas às radiações UV (MENEGHETTI et al.,2010). As fibras de carbono são ainda mais resistentes do que as de aramida e tem como característica marcante o fato de não sofrerem corrosão, o que torna seu uso muito vantajoso em relação aos metais (SHYNO, 2007).

As fibras de vidro, quando comparadas às de carbono e aramida, apresentam menor resistência. Apesar disso, estão entre as mais utilizadas em compósitos de baixo a médio desempenho por apresentarem como vantagens: **i)** a facilidade de obtenção de fibras de alta-resistência a partir do estado fundido; **ii)** facilidade de obtenção da matéria prima e possibilidade de manufatura por diversos processos industriais; **iii)** produção de compósitos com resistência específica relativamente alta e **iv)** inércia química que resulta em compósitos resistentes a vários ambientes corrosivos (CALLISTER, 2008; ZURSTRASSEN et al.,2008).

Os dois tipos de fibra de vidro mais usados são as chamadas *E-glass* (*eletrical glass*) e a *S-glass* (*strength glass*). Essas fibras têm como vantagem alta resistência e baixo custo e, como desvantagem, baixa dureza, baixa resistência à fadiga, baixa resistência às altas temperaturas e alta degradação quando submetidas à exposição em severas condições de umidade (FREIRE, 2001). A tabela 1 apresenta algumas propriedades referentes aos dois tipos mais usados de fibra de vidro.

O processo de fabricação das fibras de vidro inclui uma etapa de tratamento superficial (*sizing*) que auxilia na proteção contra abrasão, forma cabos mais coesos, reduz o coeficiente de atrito e gera uma interface química para cada tipo de matriz (ZURSTRASSEN et al.,2008).

Tabela 1 – Propriedades das fibras de vidro mais utilizadas na fabricação de compósitos.

Tipo	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Massa específica (g/cm ³)
<i>E-glass</i>	3.450	72,5	2,54
<i>S-glass</i>	4.480	85,6	2,49

Fonte: Adaptado de MENEGHETTI et al., 2010

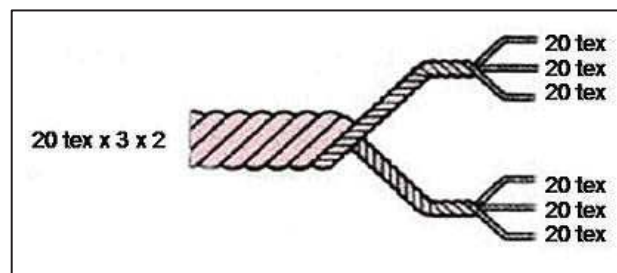
3.1.2 Formas comerciais das fibras de vidro

As fibras de vidro estão disponíveis em uma grande variedade de formas comerciais. Na forma de fios, podem ser confeccionadas por *roving direto* ou por *roving de corte*. No primeiro caso são obtidos fios que, dentre outros usos, são aplicados na obtenção de compósitos por pultrusão. No segundo caso, são obtidos fios que podem ser utilizados na manufatura de compósitos pelo processo de laminação contínua (Da SILVA, 2012).

O *roving* direto é um filamento constituído por uma mecha única (um cabo único) enrolada numa bobina cilíndrica. O número de filamentos contidos na mecha, a sua densidade linear (expressa em tex, 1 tex = 1 gr/1000 metros; figura 4) e o *sizing* (tratamento superficial) definem o produto tecnicamente (ZURSTRASSEN et al., 2008). O número de filamentos de um *roving* direto de fibra de vidro tipicamente é 2.000 ou 4.000 filamentos para os *rovings* de tex alto, em torno de 750 tex e em torno de 1000 filamentos para os de tex abaixo de 600. As densidades lineares disponíveis no mercado vão de 100 tex até 4.800 tex (ZURSTRASSEN et al., 2008).

Os *rovings* de corte podem variar entre 2.400 e 4.400 tex e, de uma maneira geral, apresentam facilidade de corte, baixa geração de penugens e de eletricidade estática, boa dispersão (não ter tendência de aglomeração quando picados) e boa compatibilidade (ou molhabilidade) com a matriz polimérica considerada (ZURSTRASSEN et al., 2008).

Figura 4 – Exemplo de cálculo de densidade linear em Tex.



Fonte: ZURSTRASSEN et al. (2008)

Para o processo de pultrusão, os reforços de fibra de vidro devem combinar uma forma filamentar (obtida por *roving*) com um revestimento que pode ser na forma de manta ou de tecido. Mantas ou tecidos são também formas comerciais das fibras de vidro. Os tecidos podem ser apresentados na forma costurada ou tramada (Figuras 1 e 2). No primeiro caso as fibras são orientadas no mesmo sentido e unificadas por meio de linhas de costura. No segundo, os tecidos são fabricados em teares, entrelaçando os fios de ardume (sentido da máquina) com os fios da trama (sentido transversal) (DE MOURA, 2005).

As mantas podem ser de fibras de vidro picadas ou de filamentos contínuos. Na pultrusão, só podem ser utilizadas mantas de filamentos contínuos, que são imprescindíveis para este processo de fabricação, pois aumentam a resistência transversal dos perfilados, que se fossem fabricados somente com *rovings* direto, apresentariam uma resistência transversal baixa. Elas sempre são colocadas nas duas superfícies do perfilado para, junto com um véu de superfície, protegerem o laminado das intempéries e garantirem um melhor acabamento (ZURSTRASSEN et al., 2008). O véu de superfície assegura um laminado com alto teor de resina e é indicado como barreira química interna e externa, com o objetivo de reduzir o efeito de marcação dos desenhos das fibras (LESKO, 2004).

3.2 Propriedades das matrizes

A matriz nos compósitos desempenha três funções muito importantes. Primeiro, liga as fibras, sendo o meio pelo qual uma tensão externa aplicada é transmitida e distribuída às fibras. Só uma porção muito pequena da carga aplicada é absorvida pela matriz. Segundo, protege as fibras individuais de danos de superfície provocados por abrasão mecânica ou ambientes agressivos, evitando a ocorrência de falhas capazes de formar fissuras que podem conduzir a ruptura mesmo em baixos níveis de tensão de tração. Finalmente, a matriz separa as fibras e, em virtude de sua relativa plasticidade, previne a propagação de fraturas frágeis de fibra para fibra que poderiam resultar em ruptura catastrófica. Em outras palavras, a matriz serve como barreira para propagação de fissuras, pois uma fratura completa só ocorre se um grande número de fibras adjacentes tiver falhas e formar um grupamento de falha de tamanho crítico (GIBSON, 2010).

Quatro tipos de matrizes são usadas em compósitos: polimérica, metálica, cerâmica e de carbono. As matrizes metálicas são recomendadas para aplicações sujeitas a altas temperaturas, aproximadamente 800°C. Para aplicações que precisam resistir a altíssimas

temperaturas, acima de 1000°C, são usadas matrizes cerâmicas. Metais e polímeros são usados como materiais de matriz porque é desejável que se tenha alguma ductilidade (DE MOURA, 2005).

Os polímeros estão entre as matrizes mais utilizadas, devido às suas características favoráveis e também à facilidade que conferem na fabricação de diferentes compósitos. Existem duas principais matrizes poliméricas: epóxi e poliéster. As matrizes epóxi podem ser formuladas com alta dureza e se subdividem em: grupo de cura a baixa temperatura (120°C), usadas em componentes expostos à baixa ou moderada variação de temperatura e grupo de cura a alta temperatura (175°C), usadas em componentes de alto desempenho e expostos a temperaturas mais elevadas e grandes variações de umidade (CALLISTER, 2008).

As matrizes de poliéster são extensamente usadas para aplicações em regiões marítimas e indústrias químicas. Suas vantagens são baixo custo e flexibilidade na formulação, devido à suas características físicas e mecânicas (Tabela 2).

Tabela 2 – Propriedades da matriz de poliéster polimerizada.

Propriedade	Valores
Resistência à tração (MPa)	55
Alongamento (%)	2,10
Resistência à flexão (MPa)	100
Módulo de flexão (GPa)	4
Temperatura de distorção térmica (°C)	90
Massa específica (g/cm ³)	1,2

Fonte: Adaptado de MENEGHETTI et al. (2010).

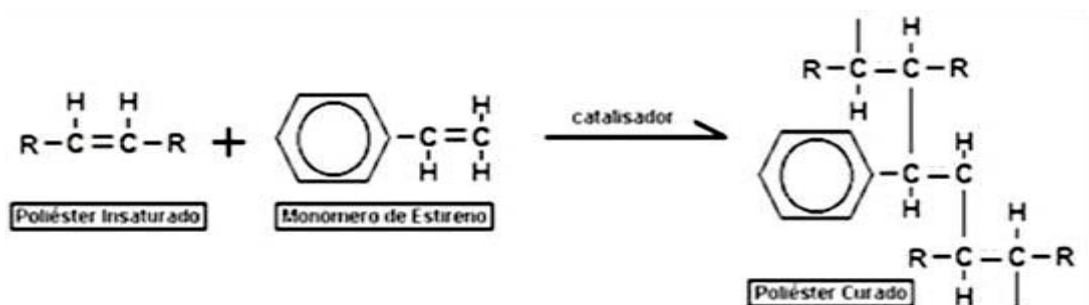
O principal uso de resinas poliésteres é em compósitos reforçados com fibra de vidro. Uma quantidade enorme de resinas poliéster pode ser produzida variando-se as proporções de seus componentes. Estudos de (WIEBECK e HARADA, 2005) indicam que, poliésteres reforçados com fibras de vidro são usados desde início dos anos 60 na fabricação de barcos. Na indústria da construção se tornaram extensamente utilizados em painéis pré-fabricados para forros e banheiras.

3.2.1 Resinas termofixas tipo poliéster

Os poliésteres insaturados são ésteres complexos formados pela reação de um diálcool (glicol) e um anidrido ou ácido dibásico (diácido) com liberação de uma molécula de água. Em virtude de a reação ocorrer nas duas extremidades da cadeia, é possível ter moléculas muito compridas e obter-se uma multiplicidade de grupos éster. São produzidos quando qualquer dos reagentes contém insaturações fornecidas geralmente pelo ácido maleico, assim como por seu isômero, ácido fumárico (MOREIRA et al., 2008).

A formação dos poliésteres insaturados se processa em duas etapas. Primeiro ocorre condensação do ácido e do álcool, para formar uma resina solúvel e, depois, a adição de um agente de interligação, para formar uma resina termoestável que são os filmes de poliéster ou fibras têxteis (MOREIRA et al., 2004). Para formar a matriz do compósito, o poliéster insaturado na sua fase solúvel reage com o monômero de estireno, que também possui insaturações (Figura 5). Assim se formam sistemas de resinas líquidas catalisáveis a temperatura ambiente ou com pequena elevação para torna-los termoestáveis sem a necessidade de sistemas complexos de catalisação e transformação como nos filmes de poliéster (MOREIRA et al., 2008). As duplas ligações são quebradas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), para reagirem novamente entre si, dando origem a um polímero tridimensional de características termoestáveis, e, portanto infusíveis e irreversíveis.

Figura 5 – Formação de matriz de poliéster.



Fonte: ZURSTRASSEN et, al., 2008.

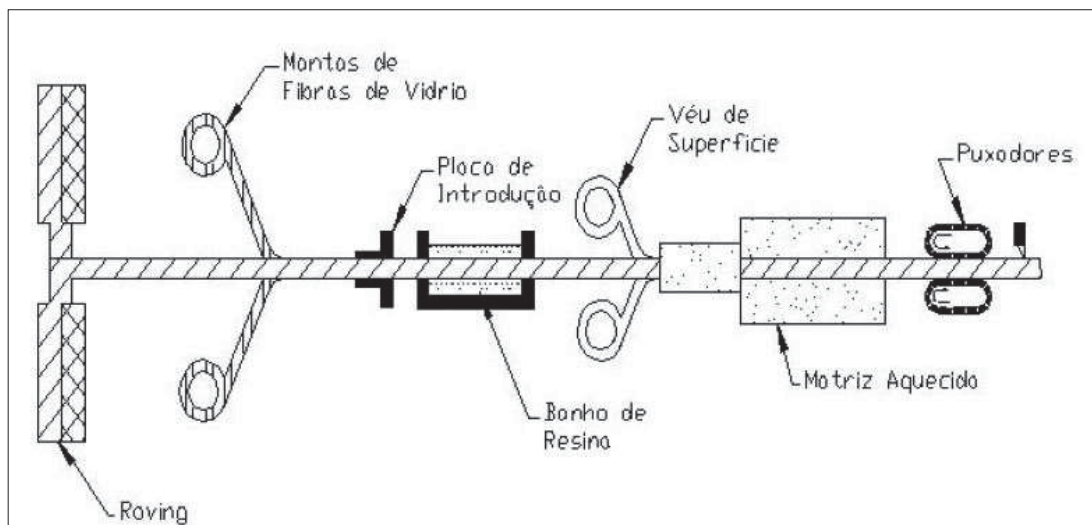
Existem vários tipos de resinas de poliéster, as quais se diferenciam nas reações de síntese e nas propriedades que apresentam. Dentre estas está incluída a resina isoftálica que durante o processo de síntese gera poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias

mais longas em relação às outras matrizes do grupo. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor impactos. Consequentemente tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica (MOREIRA et al., 2008).

3.3 Processo de fabricação por pultrusão

O processo de pultrusão (Figuras 6) é um processo contínuo, que consiste em impregnar com resina o reforço (fibras de vidro provenientes de *rovings* ou mantas), tracionando o material (fibra e resina) para dentro de moldes aquecidos. A mistura fibra/resina tomará a geometria do molde, sendo que a temperatura do molde ativará o iniciador da reação presente na mistura, ocorrendo desta forma o *crosslink* (ligações cruzadas) polimérico conforme o perfil. O perfil curado é então cortado no comprimento desejado (Figura 7) (AHMADI et al., 2009).

Figura 6 – Representação esquemática do processo de pultrusão.



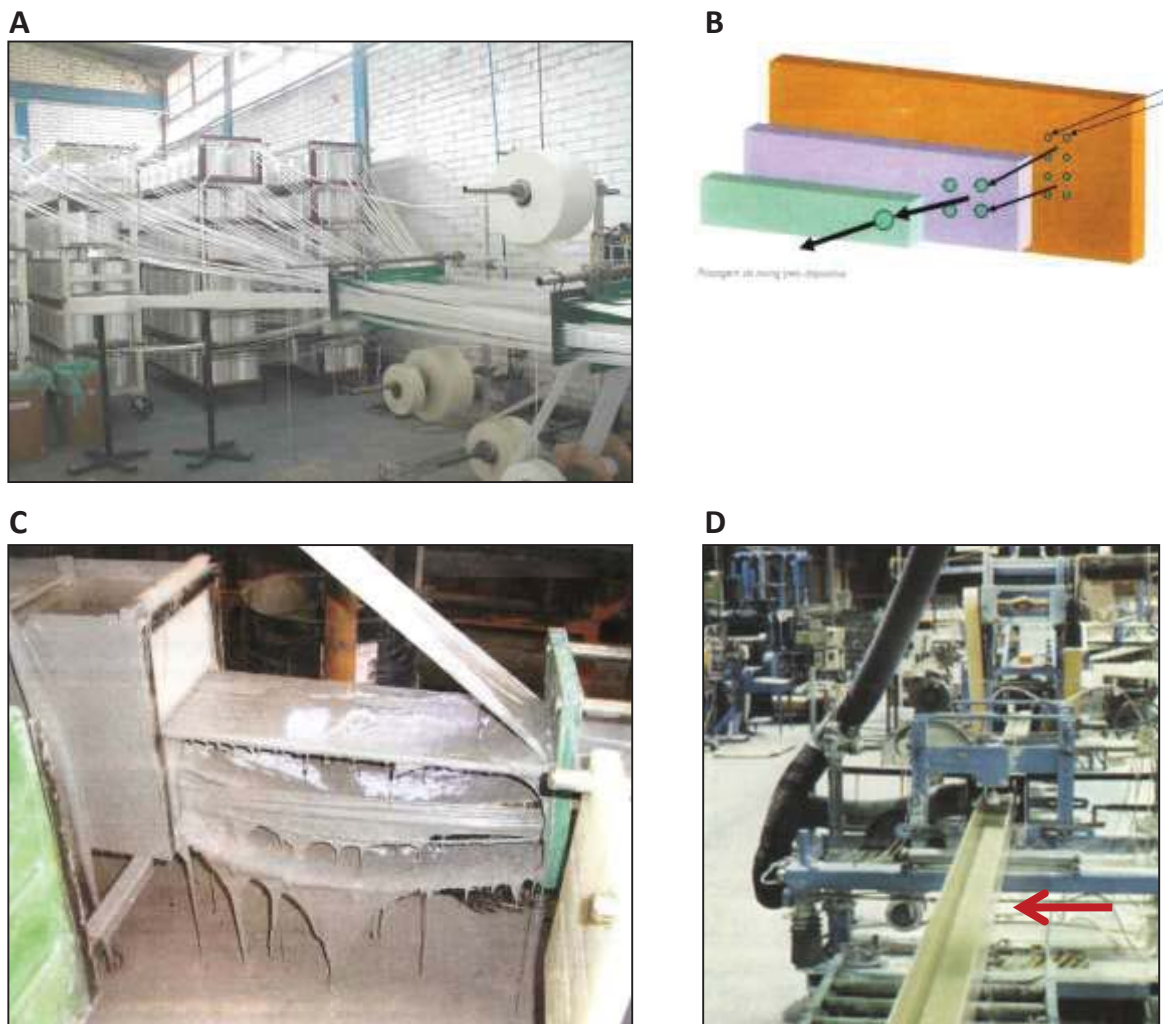
Fonte: ALMEIDA (2004).

A impregnação pode ser por imersão em cubas de impregnação contendo resina aditivada com iniciador e desmoldante ou por processo de injeção da mistura resina/aditivos diretamente no molde, sendo o primeiro mais usual. Os reforços são baseados principalmente nos *rovings* diretos dispostos de maneira a proporcionarem um reforço longitudinal. Outros tipos de reforços são mantas de fios contínuos ou tecidos que proporcionam o reforço transversal e também os véus de acabamento superficial. O molde para conformação de perfis

pultrudados deve ser construído em metal, sendo que o mesmo pode ser ainda cromado para aumentar sua vida útil e facilitar a retirada do molde (SANTOS et al., 2009).

O ponto crítico da pultrusão é o controle das variáveis temperatura e velocidade. Em velocidades baixas é necessária pouca energia para a cura do material, reduzindo a produção, enquanto altos valores de velocidade podem resultar em uma cura incompleta. Por outro lado, uma velocidade elevada requer maior taxa de calor para o molde, o que pode resultar em um superaquecimento. Uma configuração inadequada dessas variáveis pode resultar em produto defeituoso, com formação de bolhas, trincas, fissuras ou cura insuficiente (ZHU et al., 2003).

Figura 7 – Etapas do processo de pultrusão

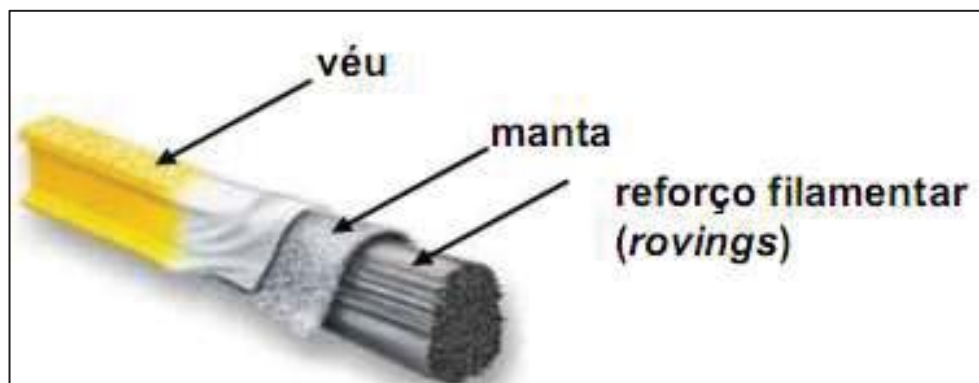


A) Preparação dos reforços no processo de Pultrusão; B) Detalhe da passagem do roving pelas pré-formas; C) Banho de resina; D) Perfil curado (seta). Fonte: REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL (2009).

A pultrusão pode produzir perfis, ocos ou maciços, de diferentes formatos. Dependendo do desenho e do formato, a fração de vidro utilizada varia de 30% a 70% do peso. A pultrusão é utilizada para a produção de compósitos poliméricos de geometria contínua. Algumas propriedades desses compósitos como resistência e rigidez, vão depender do tipo de fibra utilizada, sendo comum o uso de fibras de vidro, carbono ou poliéster (AUTER e VEIGA, 2008). A elevada resistência mecânica, resistência a meios agressivos e o isolamento térmico são algumas das características dos produtos pultrudados que os tornam indicados especialmente para ambientes expostos à corrosão, como plataformas marítimas, indústrias químicas, estações de tratamento de água e esgoto, entre outras (DISPENZA et, al., 2006).

De um modo geral os perfis pultrudados apresentam uma configuração característica (Figura 8), onde as fibras em *roving* são alinhadas conferindo resistência na direção longitudinal. As mantas são utilizadas para aumentar a resistência e a rigidez transversal do material e, adicionalmente, têm como função proteger as fibras de danos em sua superfície e auxiliar a adesão com a matriz polimérica. O véu é usado para aumentar a qualidade superficial do perfil pultrudado, conferindo uma região rica em resina (KERSTING, 2004).

Figura 8 – Representação característica de um perfil pultrudado.



Fonte: KERSTING (2004).

Na literatura encontram-se referenciados valores de desempenho mecânico e físico de perfis pultrudados de matriz polimérica reforçados com fibra de vidro, sendo que alguns desses valores podem ser comparados com o desempenho do aço e do concreto armado. Para exemplificar, pode-se utilizar como referência um material fabricado pela empresa Pultrusão do Brasil, sendo este um compósito de matriz polimérica poliéster termofixa, com 55% em peso de fibra de vidro, cujas propriedades são apresentadas na tabela 3.

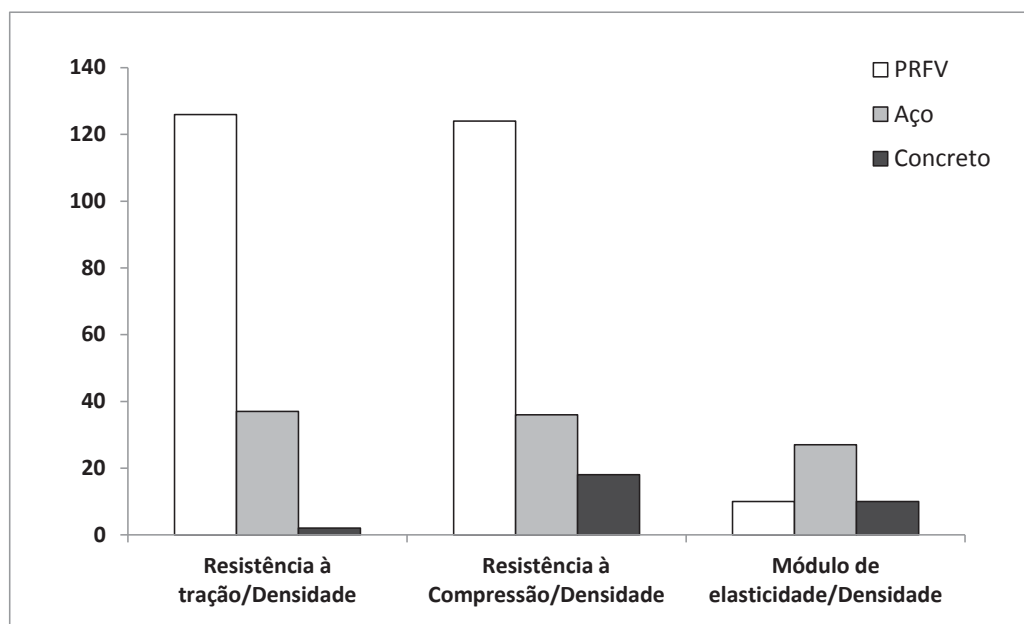
Tabela 3 - Comparação de material pultrudado de referência¹ com outros tipos de materiais.

Propriedades mecânicas	Orientação	Compósito pultrudado	Aço	Concreto
Resistência à tração (MPa)	Longitudinal	210	280 escoam.	2 a 5
Módulo de Elasticidade à tração (GPa)	Longitudinal	17,5	205	---
Resistência à compressão (MPa)	Longitudinal	210	280 escoam.	25 a 36
Massa específica (g/cm ³)		1,7 - 1,8	7,84	2,4

¹ Matriz poliéster + fibra de vidro 55%. Fonte: REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL (2009).

A comparação entre os diferentes materiais é facilmente visualizada na Figura 9, onde são apresentadas algumas das mais importantes propriedades mecânicas em relação à densidade de cada material. Uma das propriedades mais relevantes é a densidade. Este parâmetro faz dos pultrudados elementos muito competitivos na área da engenharia civil. A elevada relação resistência/densidade que estes elementos são capazes de fornecer tem sido a causa de sua abertura às mais diversas aplicações (ALMEIDA, 2004).

Figura 9 – Comparação das propriedades mecânicas específicas do material pultrudado com o aço e o concreto.



Fonte: Adaptado de PACIORNIK (2003).

3.3.1 Defeitos e imperfeições mais comuns em pultrudados com reforços de fibra de vidro

Segundo LACOVARA (2001), quando o projetista e o fabricante trabalham juntos em um projeto, os defeitos são menos prováveis de acontecer. Usando o “co-design” desde o princípio de um projeto, todos os elementos necessários podem ser resolvidos antes que surjam defeitos e imperfeições irreversíveis. Alguns desses defeitos interferem no desempenho do compósito alterando suas propriedades. No caso dos pultrudados, os defeitos mais relevantes são: as bolhas, trincas, fissuras, delaminação e a cura insuficiente.

As bolhas são elevações arredondadas que podem ser superficiais ou internas. Essas bolhas podem existir dentro do pultrudado como área de delaminação oca (normalmente cheia de gás) debaixo de uma elevada camada superficial. Se essas bolhas forem de pequeno diâmetro são chamadas de poros, se forem de diâmetro maior são chamados de vazios. Regiões com bolhas quando submetidas a uma força de impacto, podem se romper mais facilmente do que as regiões uniformes do material pultrudado (REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL, 2009; BATISTA, 2004).

As trincas são separações visuais que acontecem internamente ou penetrando abaixo da superfície de pultrudados, e também podem provocar ruptura (REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL, 2009). As fissuras são geradas por trincas múltiplas, podem ser finas como fios de cabelo e normalmente tem formato estrelado. Essas fissuras são da região de concentração de tensões, e podem ser superficiais ou penetrar no reforço, por isso este defeito é bastante nocivo porque impedirá a matriz de transmitir normalmente os esforços à fibra (VIEIRA, 2008). Desta forma, as regiões de fissura podem diminuir a resistência a esforços mecânicos (tensão, tração, fadiga) ao longo do ciclo de vida do material pultrudado (VIEIRA, 2008).

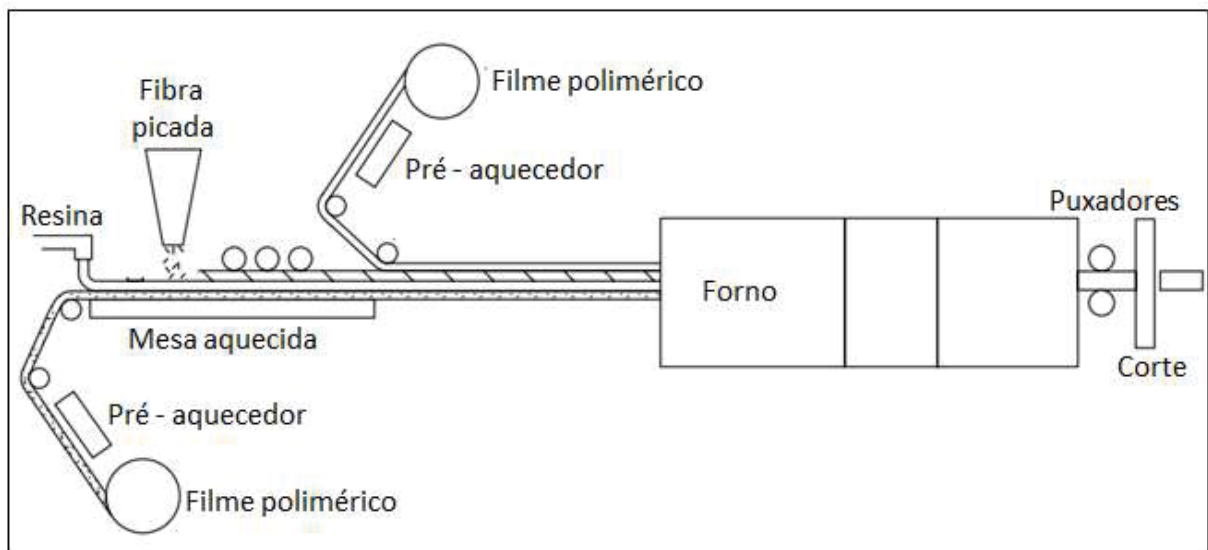
A delaminação corresponde à separação de duas ou mais camadas de materiais ou planos de reforço dentro de um pultrudado. Por fim, a cura insuficiente é uma anormalidade por falta de cura, ou cura incompleta em uma seção da resina. Esta condição normalmente provoca redução na dureza e nas propriedades físicas. Seções espessas, curadas de fora para dentro, podem revelar cura insuficiente no centro da seção, embora completamente curadas na superfície. Esta condição pode ser causada por temperatura de cura insuficiente, catalisador impróprio, ou deslizamento muito rápido para a temperatura de cura (REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL, 2009).

Todas estas falhas, que são provenientes do próprio processo de fabricação, podem diminuir a resistência do material pultrudado a esforços mecânicos de tensão, tração, impacto e fadiga ao longo de seu ciclo de vida. Isso porque, as falhas interferem com a organização estrutural do material e/ ou com a interação das fibras com a matriz, que são dois aspectos importantes para a resistência do compósito (VIERA, 2008).

3.4 Processo de fabricação por Laminação contínua (LC)

No processo de laminação contínua (Figura 10) é utilizado um equipamento formado por uma mesa longa sobre a qual deslizam dois filmes antiaderentes entre os quais é produzido o compósito na espessura desejada. Neste sistema de filmes entram primeiro a resina e o catalisador que, em seguida, recebem as fibras de reforço (normalmente vidro picado). Os constituintes dos compósitos seguem deslizando por entre os filmes, num sistema tipo “sanduíche”, que resulta na formação de uma lâmina. Os filmes impregnados com resina e fibra passam por estufas onde a temperatura é controlada rigorosamente para evitar problemas como má cura, sub-cura, empenamentos, entre outros (AUTER e VEIGA, 2008). Com o aquecimento, a resina cura em tempo hábil para já na saída estar sólida o suficiente para o corte no comprimento desejado, sendo disposta posteriormente em berços para que a cura se complete. Este processo é muito utilizado para a fabricação de compósitos utilizados em telhas e chapas planas (FIBRALIT, 2009).

Figura 10 – Representação esquemática do processo de laminação contínua.



Fonte: Adaptado de Du Pont (2010).

Embora a laminação contínua seja um processo de fabricação bastante utilizado para a fabricação de compósitos, são escassos na literatura científica trabalhos que avaliem propriedades e/ ou características de materiais obtidos por este processo.

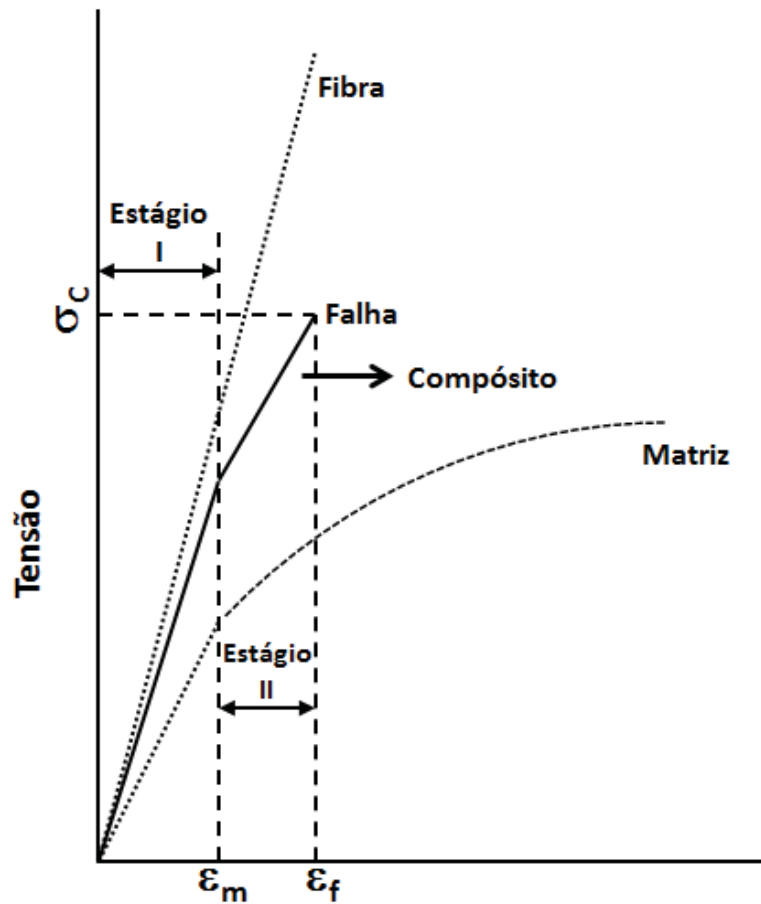
3.4.1 Defeitos e imperfeições mais comuns em compósitos obtidos por laminação contínua

Da mesma forma como ocorrem com os compósitos pultrudados, os compósitos obtidos por laminação contínua também podem apresentar defeitos que são inerentes ao processo de fabricação. Dentre estes, incluem-se a presença de bolhas e delaminação, que são comuns aos materiais pultrudados e laminados e que já foram descritos no item 3.3.1. Outros defeitos específicos da laminação contínua que podem interferir com as propriedades do compósito são: **i)** presença de buracos, geralmente relacionados com impregnação desigual do reforço; **ii)** presença de corpos estranhos, que podem ser oriundos de sujeiras no equipamento ou de impurezas da resina (FIBRALIT, 2009).

3.5 Comportamento mecânico dos materiais PRFV

O comportamento mecânico (tensão *versus* deformação longitudinal) em tração para compósitos termofixos PRFV é ilustrado na Figura 8. No estágio I, linear elástico para ambos os constituintes, o compósito se deforma linearmente em uma região intermediária entre os valores dos componentes. Ao entrar no estágio II, a matriz começa a apresentar escoamento, enquanto as fibras, de resistência muito maior, mantem seu comportamento elástico. Nesta região, a proporção de carga suportada pelas fibras aumenta. O compósito irá falhar, quando suas fibras falham, embora a falha não seja necessariamente catastrófica. Isso porque as fibras não falham todas simultaneamente e a matriz mantém-se integra por mais algum tempo, contendo as partes das fibras que ainda não falharam. Logo, são capazes de suportar algum carregamento, porém menor, até a falha total do material (ZURSTRASSEN et, al., 2008).

Figura 11 – Curvas tensão versus deformação para materiais PRFV, em relação à tração.



Fonte: Adaptado de ZURSTRASSEN et al., (2008).

3.6 Mecanismo de fratura em materiais PRFV quando submetidos a cargas estáticas.

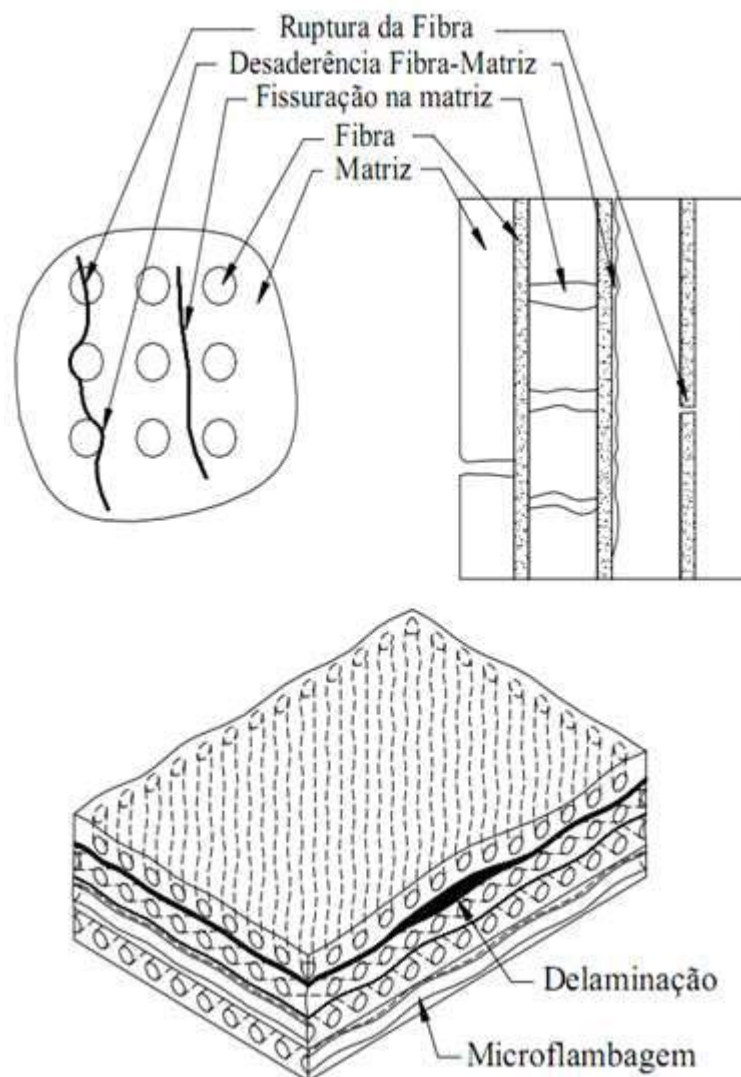
Durante a vida útil dos materiais compósitos PRFV, os mesmos poderão estar sujeitos a variados tipos de tensões que podem dar origem ao mecanismo de fratura definido como “dano”, ocasionado por um prejuízo ocorrido nas propriedades mecânicas durante o carregamento (PELED et al., 2009). O tipo e forma de dano podem ser influenciados por diversos fatores, como a intensidade e o sentido da carga aplicada, as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material compósito, percentual de matriz e vazios no compósito, umidade absorvida e temperatura de trabalho (PACIORNIK et al., 2003).

Devido ao conjunto de fatores envolvidos, torna-se difícil fazer previsões de como e aonde um dano se formará e como ele irá se propagar no material, mesmo quando se varia

apenas um dos fatores supracitados, haverá significativas variações na formação e propagação do dano (PACIORNIK et al., 2003).

Os principais tipos de danos encontrados em materiais compósitos laminados são a fissuração da matriz (fratura coesiva da matriz), ruptura do reforço (fratura coesiva na fibra), desaderência reforço-matriz (fratura adesiva), microflambagem e delaminação (PELED et al., 2009). Estes danos são representados na figura 12.

Figura 12 – Tipos de danos em compósitos PRFV ocasionados por carregamento estático.



Fonte: Adaptado de FREIRE (2001).

A fissuração da matriz (fratura coesiva da matriz) se refere a uma ou mais fissuras na matriz do compósito. A ruptura do reforço (fratura coesiva na fibra) é a ocorrência de rompimento transversal ou longitudinal das fibras. A desaderência reforço-matriz (fratura adesiva) corresponde ao descolamento na interface entre a fibra e a matriz. A microflambagem é uma deformação ocasionada nas fibras do laminado quando submetido a esforços de compressão e que leva à formação de pequenas desaderências na interface reforço-matriz. Por fim, a delaminação é o termo usado para descrever a desaderência entre as camadas de um compósito laminado (PELED et al., 2009).

A fissuração na matriz, a ruptura do reforço e a desaderência reforço-matriz são tipos de danos que podem ocorrer em qualquer material compósito fibroso. Por outro lado, a delaminação só ocorre em materiais compósitos laminados. Todas as falhas descritas são comuns, independentes do tipo de carga aplicada, e o seu aumento progressivo prejudica as propriedades mecânicas do compósito (RAMESH et al., 2013).

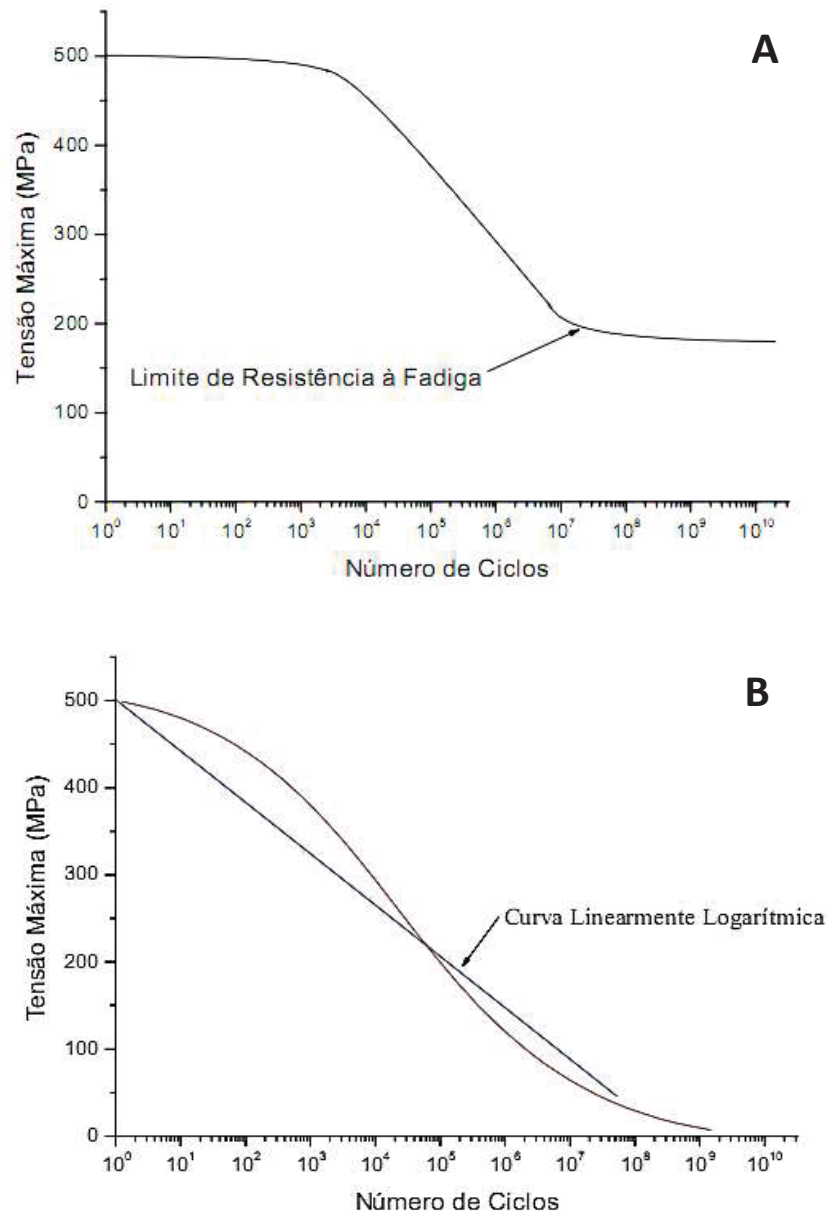
3.7 Comportamento a fadiga dos materiais PRFV

A forma mais comum de análise da vida útil de um material que sofre carregamento cíclico é através do diagrama de tensão máxima (σ_{\max}) *versus* o número de ciclos de ruptura (N), também conhecido como curva **S-N**. A partir desse diagrama tem-se uma curva que demonstra o número de ciclos que o material suportará antes de romper para cada valor de tensão máxima aplicada. Para materiais ferrosos, uma curva S-N típica (Figura 13-A) apresenta um primeiro estágio no qual o valor de tensão máxima se mantém estável por um determinado número de ciclo, ou seja, nesta região o material não possui perda de resistência mecânica (fadiga de baixo ciclo). Num segundo estágio ocorre um decréscimo linear na resistência do material até um determinado valor de tensão máxima, a partir do qual o material não rompe mais por fadiga, indiferente do número de ciclos aplicado (fadiga de alto ciclo) (SOUZA, 1995).

Os compósitos PRFV na forma laminada apresentam uma curva S-N com comportamento distinto dos materiais metálicos (Figura 13-B). A maioria dos laminados não possui limite de resistência à fadiga, ou seja, o material sempre romperá depois de um determinado número de ciclos. Outra diferença é que o material compósito não mantém o mesmo valor de tensão máxima na fadiga de baixo ciclo, como é o caso dos materiais ferrosos. Este fato ocorre devido a uma diminuição progressiva da resistência mecânica do

laminado em consequência da formação de danos no mesmo (PHILIPPIDIS et al., GAMSTED et al., 1999; WHITWORTH, 1998; DING et al., 1995).

Figura 13 – Comparação entre as curvas S-N típica para materiais metálicos ferrosos (A) e materiais compósitos (B)



Fonte: **A)** SOUZA (1995); **B)** GASSAN et al. (2001).

Diversos autores (DIAO et al., 1995; FAWAZ et al., 1995; GASSAN et al.; 2001) criaram vários modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos para definir as curvas S-N de compósitos, envolvendo variantes como: sistemas fibra-matriz, configurações dos laminados, influência do dano do material, decréscimo do limite de resistência e do módulo de elasticidade, critério da energia, entre outros. Todos estes normalmente são aplicáveis a materiais com características específicas, não podendo ser aplicados de forma generalizada para qualquer compósito.

Uma fórmula generalizada da curva S-N para compósitos é dada pela equação 1, onde **a**, **b** e **p** são os coeficientes de fadiga do material, σ_{ult} é o limite de resistência do material, $\sigma_{máx}$ é a tensão máxima aplicada ao material durante o ensaio de fadiga e **N** é o número de ciclos suportado pelo material até a sua ruptura final (SUBRAMANIAN et al., 1995; LAVOIR et al., 2000).

$$\sigma_{máx} / \sigma_{ult} = a - b \cdot \log(N)^p \quad (1)$$

É importante ressaltar que o valor da razão de fadiga (**R**), a frequência utilizada durante o ensaio, o tipo e o percentual de fibra e a matriz no laminado, a variação da sua configuração, influenciam diretamente nos valores dos coeficientes para **a**, **b** e **p**.

A equação 1 pode ser simplificada considerando-se que **a** e **p** são iguais a 1, obtendo-se deste modo a equação 2 (MANDELL, 1999; SUTHERLAND, 1999):

$$\sigma_{máx} / \sigma_{ult} = 1 - b \cdot \log(N) \quad (2)$$

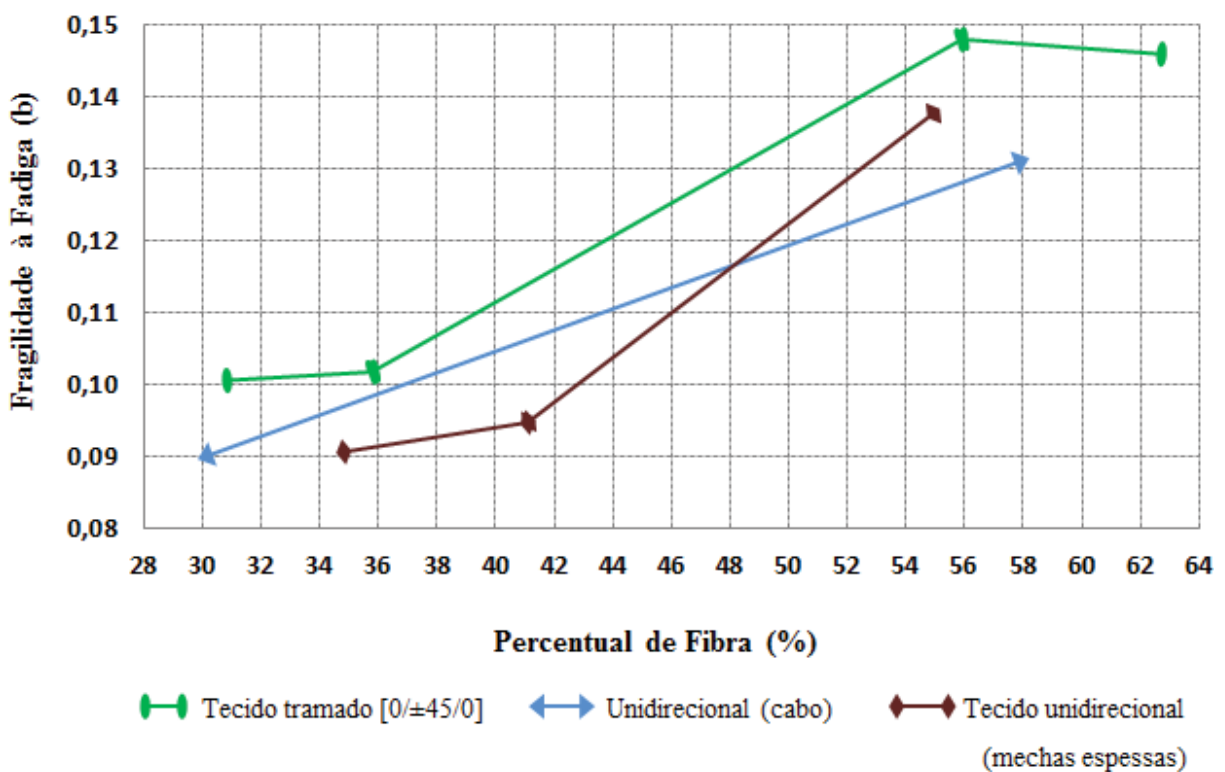
A equação acima tem um comportamento linearmente logarítmico descrevendo uma reta quando analisada em um gráfico semilogarítmico (Figura 13-B). Deve-se observar que **b** é um valor que demonstra a fragilidade à fadiga do material, ou seja, quanto maior for o valor de **b** menor será sua resistência à fadiga. As equações acima são aproximações dos resultados experimentais obtidos em laboratório, porém quando se muda o valor de **R** se faz necessária a realização de novos ensaios para obtenção de novos coeficientes de fadiga.

DEMERS (1998) realizou estudos de fadiga em plásticos reforçados com fibra de vidro e publicou como resultado uma equação (3) normalizada genérica para estes materiais e que serve como uma estimativa conservadora para o comportamento à fadiga de materiais PRFV, tal equação está descrita a seguir:

$$\sigma_{máx} / \sigma_{ult} = 0,790 - 0,078 \cdot \log(N) \quad (3)$$

Apesar de os modelos matemáticos demonstrados anteriormente definirem bem a resposta média dos laminados quando submetidos à fadiga, não se pode garantir com precisão que todos os materiais ensaiados romperão sempre depois de um determinado número de ciclos, ou seja, existe uma variação estatística a ser considerada. Esta variação dependerá de alguns fatores como o sistema fibra/matriz utilizado, o processo de fabricação, entre outros. Um ponto muito importante é a variação da fragilidade à fadiga do laminado, o coeficiente **b**, em função do percentual de fibra para várias configurações de plástico reforçado com fibra de vidro, utilizando-se $R=0,1$. A figura 14 mostra que para todas as configurações de laminado, a fragilidade à fadiga aumenta com o aumento do percentual de fibra, demonstrando que altos percentuais de fibra no compósito laminado podem ser prejudiciais para o comportamento de fadiga (MANDELL et al., 1999; SUTHERLAND, 1999).

Figura 14 – Coeficiente de fragilidade (b) versus percentual de fibra para diferentes configurações de laminados de PRFV, utilizando $R=0,1$.



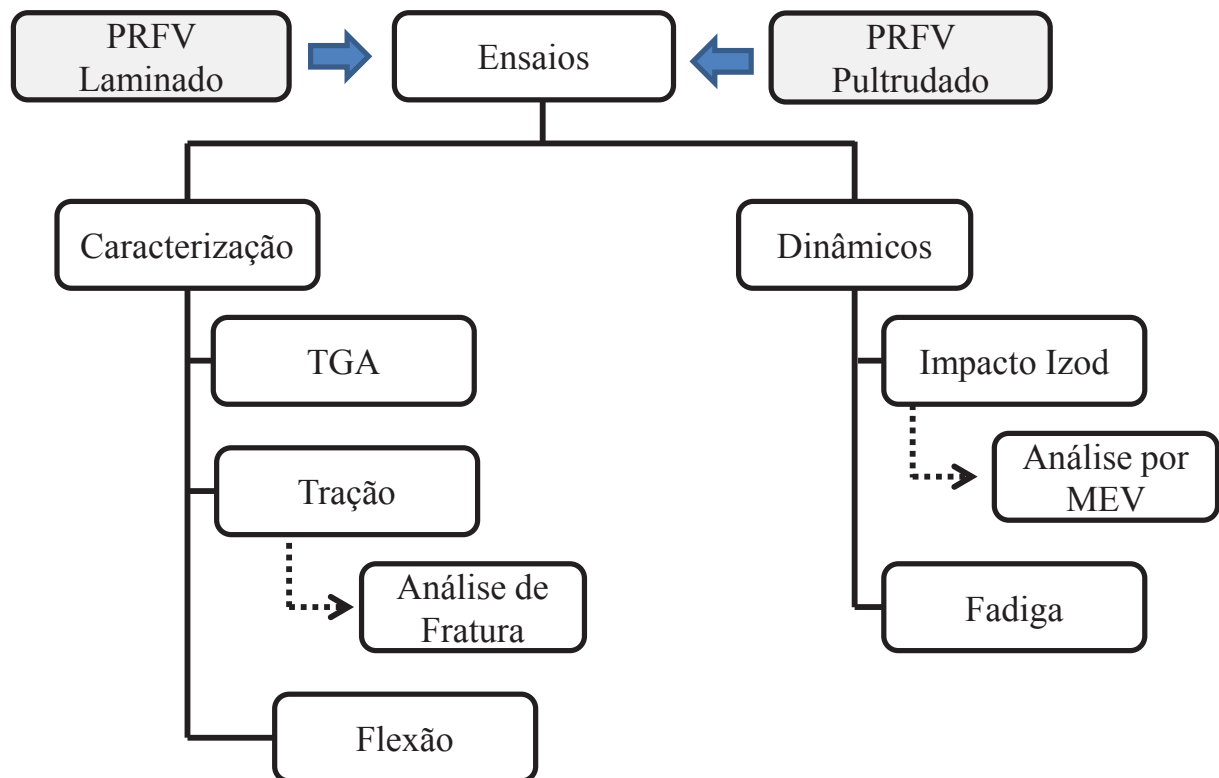
Fonte: Adaptado de MANDELL et al. (1999).

ANTAQUERA et al. (1991), encontraram resultados parecidos utilizando outras configurações de plásticos reforçados com fibra de vidro. A partir destes resultados pode-se concluir que o aumento do percentual de fibra no composto laminado diminui sua resistência à fadiga destes. MANDELL et al. (1999), explicaram este fenômeno através de análise detalhada por elementos finitos da distribuição interna de tensões destes materiais e demonstraram que a diminuição do percentual de fibra do laminado, diminui significativamente as tensões internas, e por consequência a concentração de tensões dificultando a formação e propagação de danos no laminado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 15 representa um organograma com o delineamento experimental e ensaios realizados para os dois materiais compósitos avaliados neste trabalho. Na sequência são descritos os procedimentos e a metodologia utilizada para a análise dos resultados.

Figura 15 – Organograma dos ensaios realizados



Fonte: Autor.

4.1 Compósitos avaliados

Neste trabalho foram avaliadas duas placas planas de PRFV, sendo uma obtida por processo de laminação contínua com espessura de 3,7 mm e outra por Pultrusão com espessura de 3,4 mm. A chapa de laminação contínua foi obtida numa empresa de implementos rodoviários, onde é utilizada comumente para produção de perfis laterais de caminhões do tipo graneleiros. A chapa pultrudada foi modelada especificamente para este trabalho, utilizando ferramental pré-existente utilizado para aplicações *offshore*. Para a obtenção desta placa foi combinado um tecido de fibra de vidro tramado com gramatura de 450g/m², costurado com uma manta de fibra de vidro de 350 g/m² de gramatura. O fio *roving*

utilizado foi de 4000 filamentos e densidade linear 4400 Tex (1 Tex = 1g/1000m). Foi empregada resina isoftálica, num percentual médio de 50% de fibras e 50% de resina. A chapa foi manufaturada pela empresa Pultrusão do Brasil. Nesta modelagem foi reduzida a quantidade de fibras (fio roving direto) do material em relação à quantidade de resina, (comparando com a peça original para uso offshore), também utilizou-se resina poliéster isoftálica ao invés da resina específica para usos offshore, visando diminuir o custo da mesma e assim torna-la viável economicamente para uso proposto.

4.2 Determinação da proporção de fibras nas chapas PRFV

Para comprovação da proporção fibras/resina na chapa pultrudada e na chapa laminada por laminação contínua, foi utilizada a análise termogravimétrica. Esta análise foi realizada no laboratório de polímeros (LPOL) da Universidade de Caxias do sul (UCS) conforme a norma ASTM E1131-08 (Tabela 4), para caracterizar as variações mássicas das amostras através do aumento controlado da temperatura. O ensaio foi realizado desde a temperatura ambiente até 910°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min, utilizando atmosfera inerte de nitrogênio de alta pureza com vazão de 50 ml/min até 800°C, após foi utilizado atmosfera oxidante com vazão de 63 ml/min. A incerteza de medição em relação à massa é de 0,1% e a incerteza em relação a temperatura é de 2,0%, utilizando carta controle das massas padrões e oxalato de cálcio (CaC₂O₄.H₂O) como material de referência.

Tabela 4 - Normas base para realização da termogravimetria e ensaios mecânicos.

Norma	Propriedades medidas
<i>ASTM D3039 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.</i>	Resistência tração/ módulo de tração
<i>ASTM D790 – Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.</i>	Resistência à flexão/ módulo de flexão/ resposta tensão-deformação de flexão
<i>ASTM D256 - Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.</i>	Energia de impacto de ruptura
<i>ASTM D3479 - Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials</i>	Comportamento da vida útil do material em fadiga.
<i>ASTM E1131-08 - Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry</i>	Determinação do teor de sólidos de cada material.
<i>ASTM D618 - Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing</i>	Acondicionamento de amostras para testes em materiais plásticos

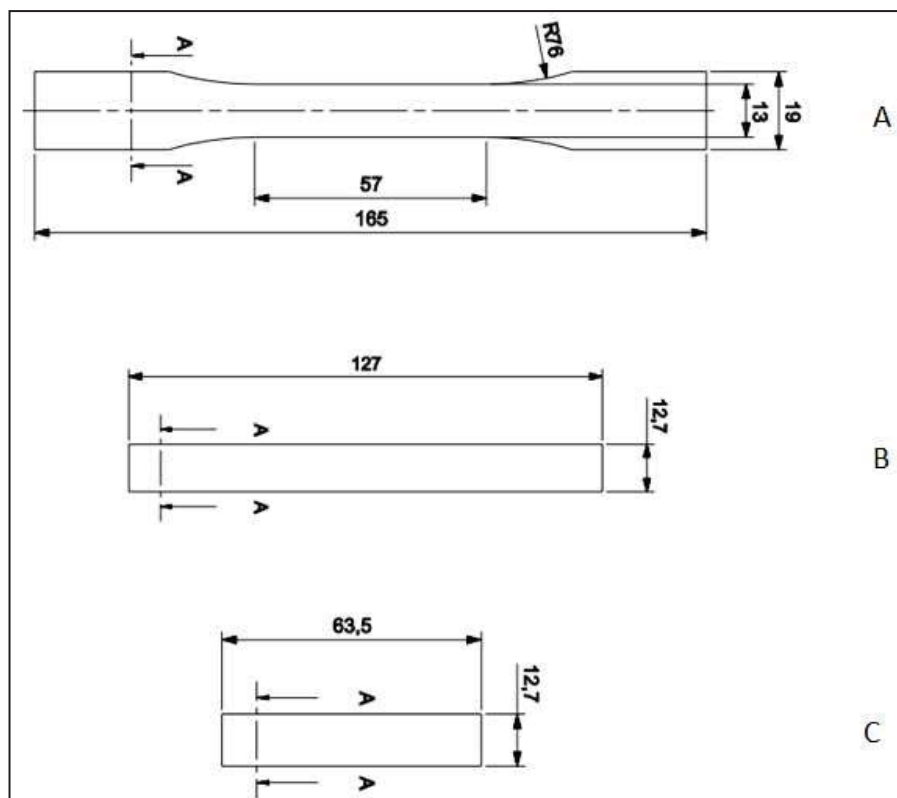
Fonte: Autor.

4.3 Ensaio de tração, flexão e impacto

A avaliação comparativa das propriedades mecânicas dos dois materiais foi realizada no laboratório de polímeros (LPOL) da Universidade de Caxias do sul (UCS). Todos os ensaios foram realizados segundo as normas descritas na tabela 4.

Os corpos de prova (CP) foram confeccionados através do processo de usinagem por jato de água e não passaram por nenhum processo posterior para tratamento da superfície usinada. As dimensões dos corpos de prova seguiram as normas citadas na tabela 4. A figura 16 apresenta o esquema dos CP usados em cada ensaio. O acondicionamento dos mesmos está descrito na tabela 5.

Figura 16 – Dimensional dos CP utilizados nos ensaios de tração, flexão e impacto.



A) CP ensaio de tração; B) CP ensaio de flexão; C) CP ensaio de impacto. Fonte: Produzido pelo autor, com base nas normas descritas na Tabela 4.

Tabela 5 – Acondicionamento dos CP para os ensaios de tração, flexão e impacto.

Ensaio	Acondicionamento dos CP		Condições do ensaio	
	Temperatura (°C)	Umidade (%UR)	Temperatura (°C)	Umidade (%UR)
Tensão	23.0 ±2.0	50.0 ±10.0	23.6	47.0
Flexão	23.0 ±2.0	50.0 ±10.0	23.5	40.0
Impacto	23.0 ±2.0	50.0 ±10.0	23.6	47.0

Fonte: Autor.

O ensaio de determinação da resistência por tração foi realizado numa máquina eletromecânica marca EMIC – modelo DL3000, utilizando CP's do tipo I, célula de carga de 200 kgf e extensômetro embutido de 785 mm. A velocidade de ensaio foi de 5 mm/min. Os CP's foram condicionados segundo a norma ASTM D618 por 49 horas.

O ensaio de resistência à flexão foi realizado segundo a norma ASTM D790 de 2010, com deformação das fibras externas de 0.001 mm/mm/min; utilizando a célula de carga de 100 kgf e extensômetro embutido de 765 mm. O ensaio foi realizado utilizando equipamento eletromecânico da marca EMIC modelo DL 3000, calibrada pelo laboratório Certi com certificado número 6829/11 segundo a norma ASTM D638 de 2008. A velocidade utilizada para o ensaio foi de 1,47 mm/min. As dimensões básicas dos CP's foram 127 mm de comprimento e 12,7 mm de largura e espessura de 3,81 para o material laminado e 3,45 para o material pultrudado, sendo que os mesmos foram condicionados segundo a norma ASTM D618 por 166 horas.

O ensaio de resistência ao impacto izod foi realizado segundo a norma ASTM D256 de 2010 (método A), utilizando-se um martelo de 7.5 J, correção da energia de impacto de 0.003 J (já descontados) e velocidade de 3,46 m/s. Os CP's obtidos por corte com jato de água passaram por entalhe com entalhador mecânico marca EMIC-PME cujo raio foi de 0.25 mm, sendo condicionados por 49 horas.

Os resultados destes testes foram analisados estatisticamente por test-t não pareado, utilizando-se o programa GraphPad Prism. Valores de $p < 0,05$ foram considerados significativos.

4.3.1 Análise de fratura para o ensaio de tração

A análise de fratura dos corpos ensaiados em tração foi realizada em microscópio stereoscópico (Zeiss) acoplado a uma câmera modelo Axiocam ERC 5s. O software utilizado pelo equipamento é o Axiovision LE 64.

4.3.2 Análise de microscopia eletrônica para o ensaio de impacto

A análise de fratura dos corpos ensaiados para impacto foram realizados no laboratório de microscopia de varredura da Universidade de Passo Fundo (UPF), utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Tescan modelo Vega 3 SEM com aumento máximo de 300000x e resolução de 3 nm. As imagens foram captadas em diferentes aumentos, conforme descrito em cada figura dos resultados. As amostras foram metalizadas com Ouro durante 8 minutos utilizando o metalizador da marca Quoron modelo Q150R ES.

4.4 Ensaio de fadiga dinâmico

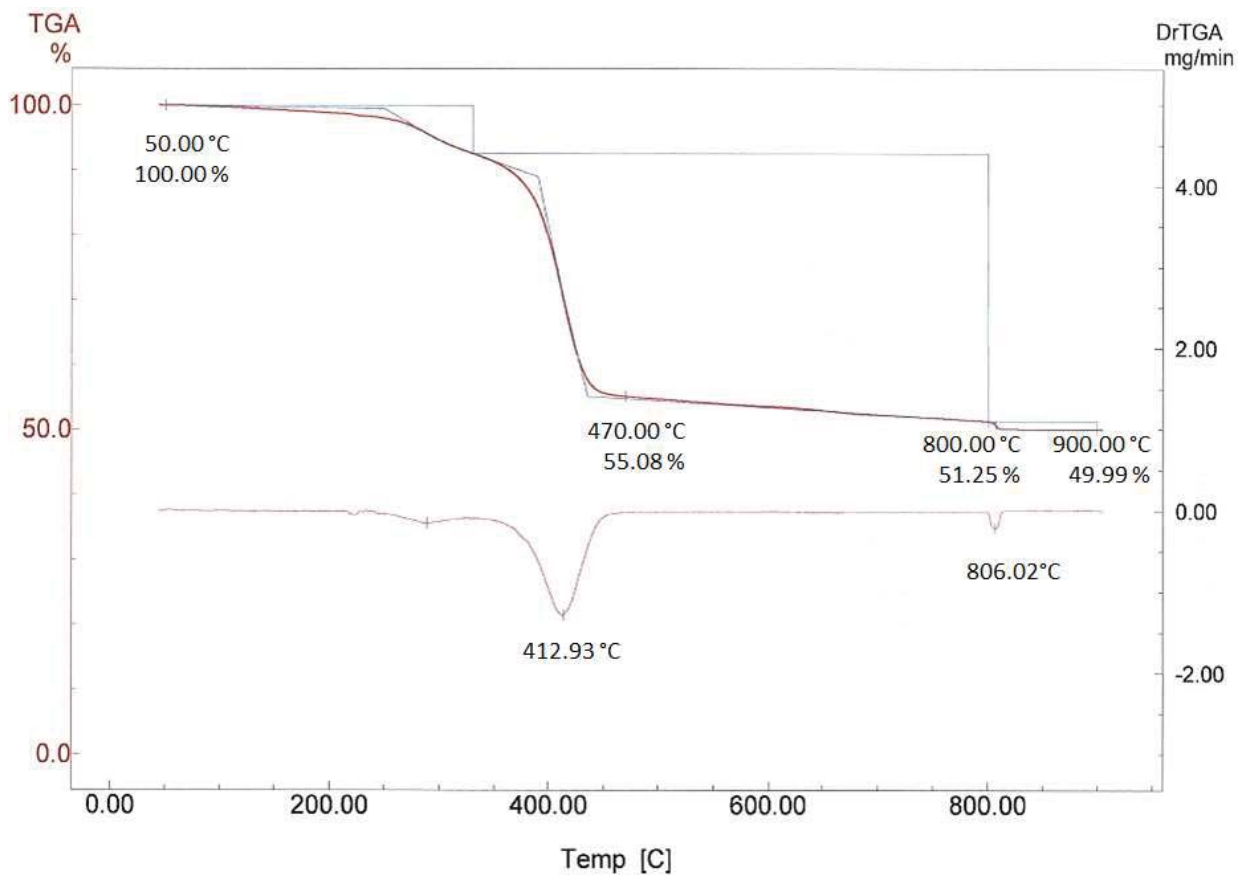
Os testes de fadiga dos materiais pultrudado e laminado foram realizados no laboratório de metalurgia física (LAMEF), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), conforme a norma ASTM D3479 (Tabela 4), no modo tração-tração (variação entre as tensões máximas e mínimas positivas), com carga aplicada no sentido da laminação das fibras. A frequência adotada foi 8 Hz, pois com este valor os efeitos do aumento da temperatura da matriz polimérica tornam-se desprezíveis ao longo da aplicação dos ciclos. A carga máxima aplicada variou na faixa de 80% à 30% da tensão última de tração obtida no ensaio de tração direta estática, mantendo a razão $R=0,1$ (razão entre força mínima e máxima).

Os dados foram analisados comparativamente levantando-se as curvas de S-N para cada material. Além da Curva S-N, foi analisado o comportamento a fadiga dos materiais de modo normalizado, isto é, em vez de se utilizar somente o valor da tensão máxima, utiliza-se o valor da tensão máxima dividida pelo limite de resistência do material, determinada no ensaio de tração uniaxial. Este tipo de gráfico é bastante útil quando se deseja comparar a resistência à fadiga de dois ou mais materiais e definido pela equação 2 seção 3.7.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Compósitos são materiais extremamente versáteis que podem ser “modelados” para diferentes aplicações industriais, a partir de variações na sua composição (fibras e resina) e/ou no seu processo de fabricação. Desta forma, é possível a obtenção de um número infinito de materiais, os quais irão apresentar custo de produção e propriedades mecânicas diferenciadas. Neste trabalho foi feita a modelagem de uma placa plana de PRFV, manufaturada por Pultrusão e composta pela combinação de fibra de vidro tramado com resina isoftálica, visando compará-la com uma chapa manufaturada por laminação contínua. A comprovação da proporção fibras/resina na chapa pultrudada e da chapa laminada foi feita por análise termogravimétrica e é apresentada nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Resultado da análise de TGA do material pultrudado.



Na figura 17 se observa a perda mássica em função da temperatura, correspondentes a temperatura de degradação térmica dos materiais que constituem o compósito, ou seja, a resina (matriz), a fibra de vidro (reforço) e a carga de material inorgânico que não sofrem a decomposição térmica. Por esta análise, é possível concluir que a placa plana pultrudada

apresenta um teor de fibra em massa de aproximadamente 50%. O pico de perda mássica apresentado logo acima dos 400°C representa a temperatura de degradação da resina poliéster Isoftálica e corresponde a 45,08% em massa do material analisado. A perda mássica total, apresentada a 900 °C corresponde à degradação térmica da matriz e demais componentes do material compósito como pigmentos orgânicos, *gel coat*, entre outros.

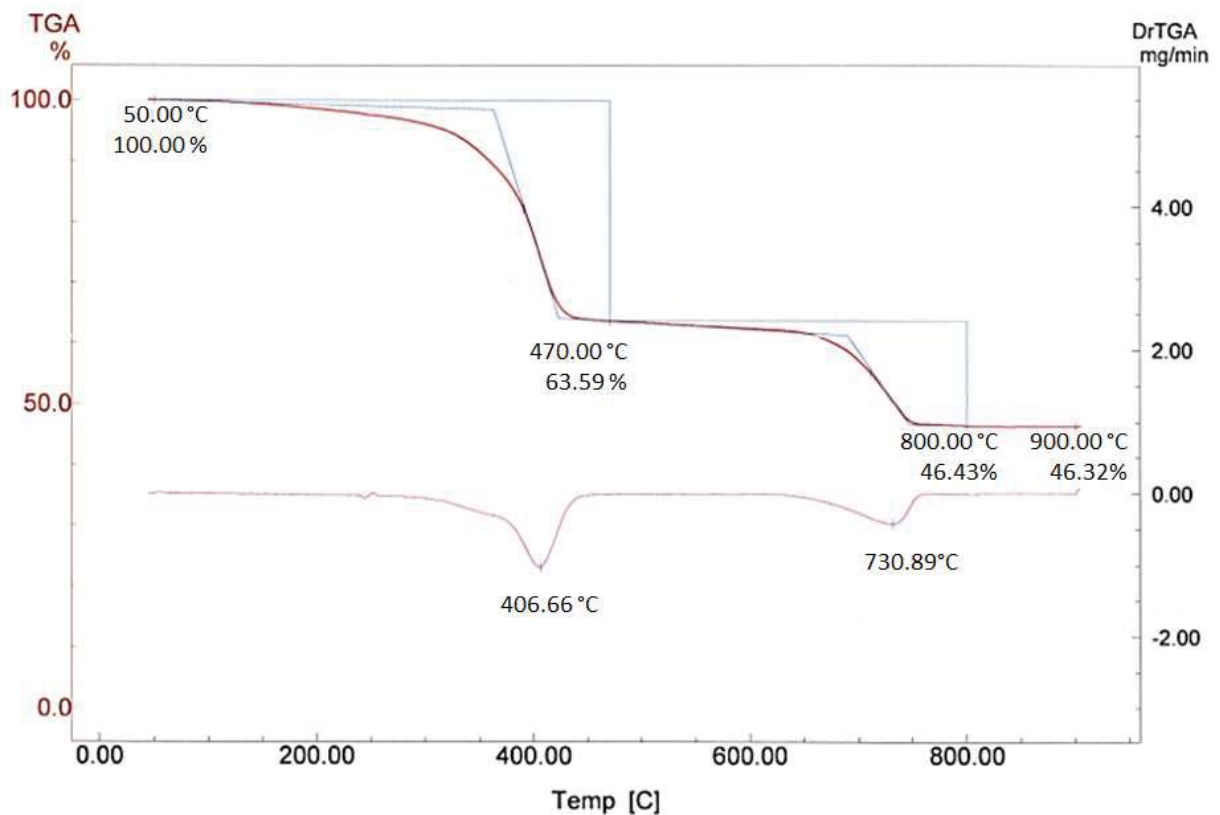
Produtos obtidos através do processo de Pultrusão devem ser encarados como materiais estruturais para aplicações que exijam resistências mecânicas muito intensas, tal desempenho é conseguido por causa do alto teor de reforço (fibras) capaz de ser introduzido no material, o qual pode chegar até 80% de toda matéria prima usada na fabricação da peça. O material em estudo foi modelado com teor de 50% de fibras de vidro. Este percentual é adequado para fins de comparação com a chapa plana obtida por laminação contínua, além de ser mais viável em termos econômicos.

No caso da placa de Laminação contínua, o resultado do ensaio de TGA demonstra que há um percentual de aproximadamente 46% de fibra de vidro em massa, ou seja, muito próxima da proporção apresentada pelo material pultrudado (Figura 18). O valor de teor de reforço em massa encontrado para este laminado, não é um valor usual para este processo, que normalmente é fabricado com teores de reforço de cerca 25% e utilizado como painéis de revestimento externo de caminhões frigoríficos (FIBRALIT, 2009).

Levando-se em conta somente as matérias-primas empregadas, nos dois tipos de produtos (resina poliéster e fibra de vidro), e desprezando os processos produtivos, e as formas comerciais das matérias-primas empregadas em cada processo, podemos fazer uma aproximação em termos de custo final das duas placas planas e assim torna-las economicamente compatíveis.

As fibras são responsáveis pela formação estrutural dos compósitos. Por este motivo, embora a redução no teor de fibras seja vantajosa em termos do custo de produção, é importante determinar se as propriedades mecânicas do material ainda são adequadas para a finalidade desejada. Visando avaliar se a chapa modelada neste trabalho pode ser aplicada para a produção de perfis na indústria metal mecânica, as propriedades mecânicas desta chapa pultrudada foram comparadas com as de uma chapa de laminação contínua utilizada comumente para produção de perfis laterais de caminhões do tipo graneleiros. Os resultados desta comparação são apresentados e discutidos nas seções seguintes.

Figura 18 – Resultado da análise de TGA do material laminado.



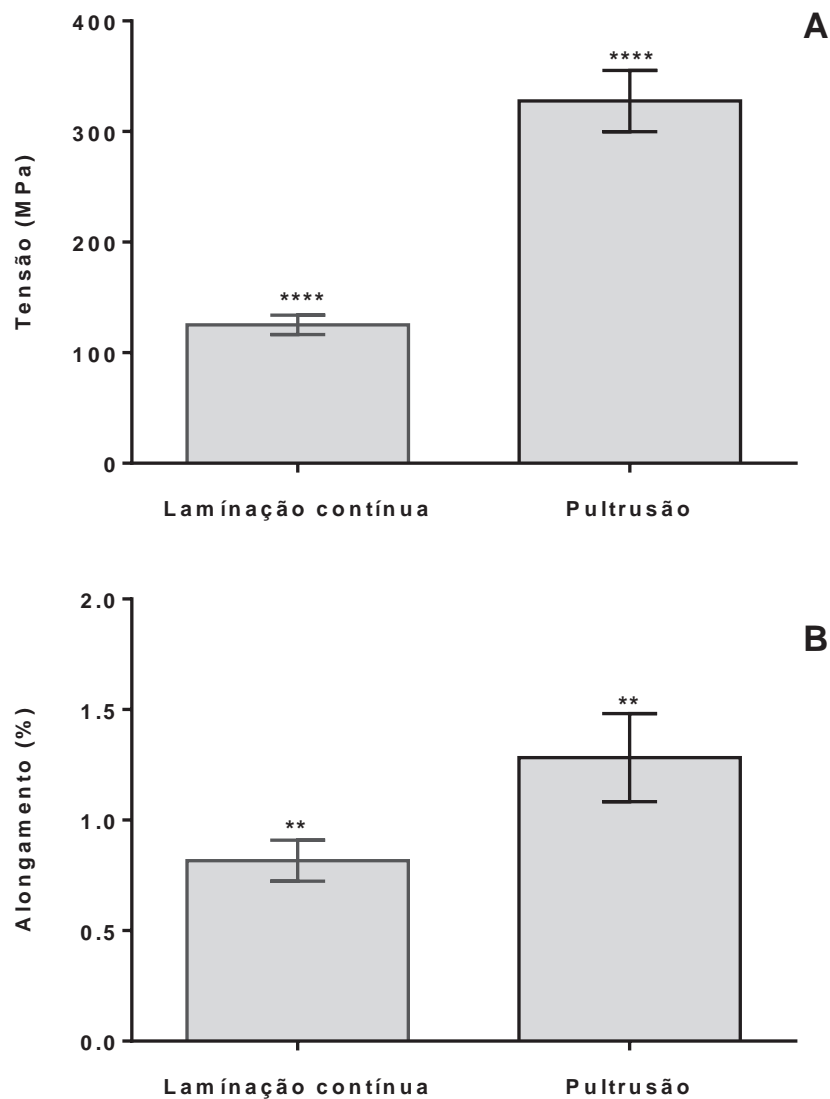
5.1 Ensaio de tração

Os resultados comparativos com os valores médios do ensaio de tração estão resumidos na figura 19, onde é possível observar que as amostras laminadas se rompem com uma tensão máxima 2,5 vezes menor que as amostras pultrudadas. Este ensaio também mostrou que praticamente não há fase plástica, característica típica dos materiais compósitos, ou seja, a tensão máxima e a tensão de ruptura não apresentam diferenças significativas entre si (Tabela 6). A partir destes dados, é possível concluir que o material pultrudado apresenta maior resistência à tração do que o material laminado.

O alongamento na ruptura apresentou-se, em média, 50% maior para o material pultrudado em relação ao material laminado (Tabela 6). Devido às características axiais oriundas do processo de Pultrusão e as suas principais aplicações o ensaio de tração se torna um dos principais ensaios para avaliação mecânica dos compósitos produzidos por este processo. Os resultados superiores de resistência à tração do material pultrudado se devem aos

fios *roving* (cabos com finíssimos filamentos de vidro) responsáveis pela resistência longitudinal do produto, diferente do produto laminado que utiliza fios de fibra picados distribuídos de maneira aleatória sobre a extensão do produto (Reichhold e Pultrusão do Brasil, 2009).

Figura 19 - Ensaio de tração segundo a norma ASTM D3039.



A) Tensão máxima; **B)** Alongamento. Os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n = 7$) e foram analisados estatisticamente com *student-t test*. ** $p < 0,001$; **** $p < 0.0001$ comparando-se os dois processos de fabricação. Fonte: Autor.

Tabela 6 – Dados do ensaio de tração longitudinal (Média ± Desvio Padrão)

	Laminação	Pultrusão
Tensão máxima (MPa)	126,15 ± 8,68	328,50 ± 27,61
Tensão ruptura (MPa)	124,50 ± 0,09	298,35 ± 0,19
Alongamento (%)	0,816 ± 0,09	1,282 ± 0,19

Fonte: Autor.

O módulo de elasticidade é uma das propriedades fundamentais para a caracterização de materiais anisotrópicos, tais como compósitos pultrudados. Para materiais compósitos PRFV, o tratamento a ser feito é diferente ao dos ensaios para materiais isotrópicos, pois estes possuem módulos de tração e compressão iguais, já os compósitos PRFV não possuem o mesmo comportamento, dependendo do posicionamento das fibras (MENEGETTI et al., 2010).

Para o cálculo do módulo de elasticidade é necessário construir um gráfico cartesiano que correlacione tensão e deformação do material avaliado ao longo do tempo total de ensaio. Segundo a norma ASTM D 3039 o módulo de elasticidade é calculado pelo coeficiente angular da reta gerada neste gráfico, levando em conta a porção elástica da curva que é compreendida entre $1 \times 10^3 \mu\epsilon$ e $3 \times 10^3 \mu\epsilon$ para materiais que não falham abaixo de $6 \times 10^3 \mu\epsilon$, conforme equação abaixo 4:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (4)$$

Onde

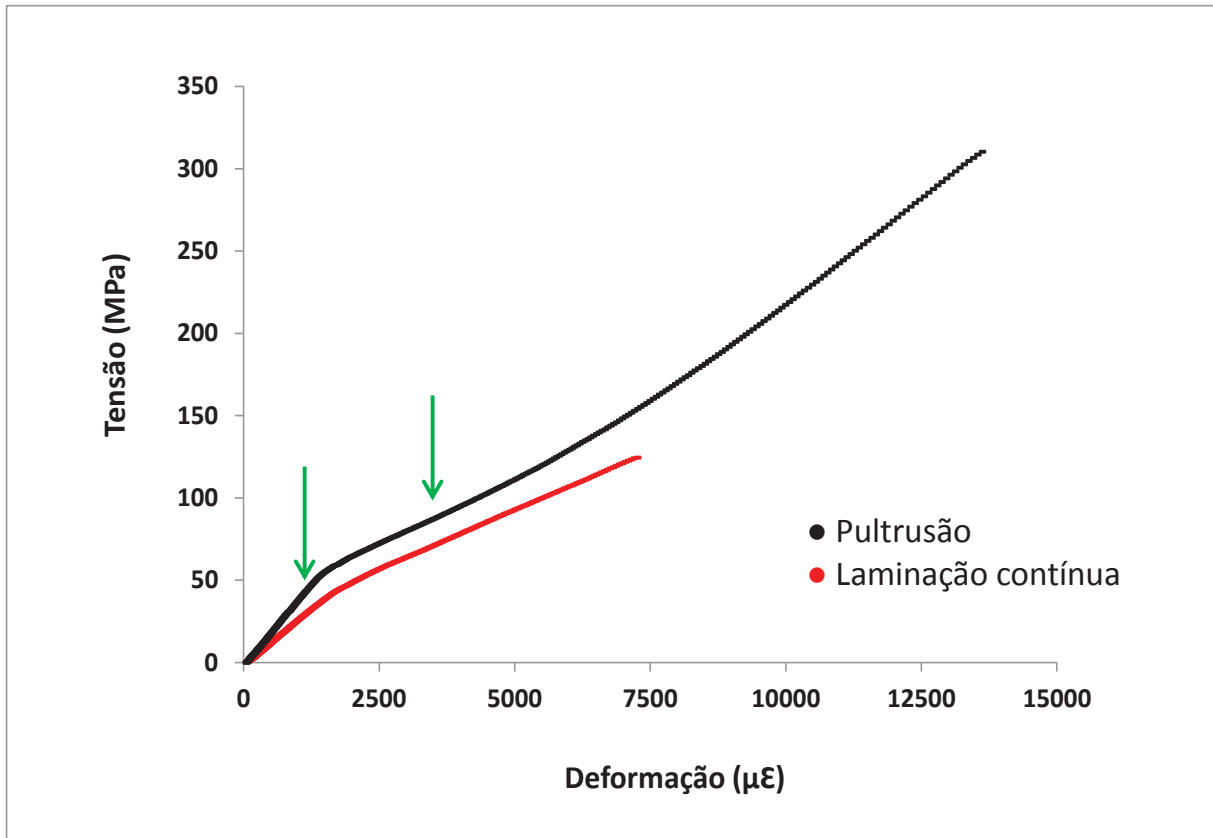
E = módulo de elasticidade, (Gpa);

$\Delta\sigma$ = Variação da tensão de tração, (Mpa);

$\Delta\epsilon$ = Variação da deformação (adimensional);

A figura 20 representa as curvas de tensão x deformação para os materiais compósitos avaliados neste estudo. Para a obtenção destas curvas, foi utilizado um CP do material pultrudado e um CP do material laminado, os quais foram selecionados por apresentarem tensão máxima individual mais próxima do valor médio de tensão obtido a partir de todos os CP para cada um dos materiais (Anexo 1 – Tabelas A.1 e A.2).

Figura 20 – Curva média tensão *versus* deformação para os compósitos avaliados neste estudo.



As setas indicam precisamente os pontos de $1 \times 10^3 \mu\epsilon$ e $3 \times 10^3 \mu\epsilon$. Fonte: Autor.

Calculando o módulo elástico de cada material, seguindo a determinação da norma ASTM D 3039, temos:

1 – Material Pultrudado

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

$$E = (80,81\text{MPa} - 40,01\text{MPa}) / (3026,20\mu\epsilon - 1017,94\mu\epsilon)$$

$$E = 20,316 \text{ GPa.}$$

2 – Material Laminação Contínua

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

$$E = (64,91\text{MPa} - 27,26\text{MPa}) / (3029,00\mu\epsilon - 1012,42\mu\epsilon)$$

$$E = 18,67 \text{ GPa.}$$

Na figura 20 (setas) é possível observar que os pontos determinados pela norma ASTM D 3039 para o cálculo do módulo elástico compreendem a zona de inflexão da curva para os dois materiais e tal fato pode gerar distorções nos resultados. Segundo ZURSTRASSEN et al. (2009), a curva de tensão deformação para compósitos apresenta dois estágios distintos, que são:

- Estágio I: Linear elástico para ambos os constituintes do compósito (fibra e matriz), o compósito se deforma linearmente em uma região intermediária entre os valores dos componentes (Figura 11, seção 3.5);
- Estágio II: A matriz começa a apresentar escoamento, enquanto as fibras, de resistência muito maior, mantem seu comportamento elástico (Figura 11, seção 3.5).

A avaliação criteriosa do gráfico apresentado na figura 20 mostra que, tanto o material pultrudado quanto o laminado, apresentam curvas com uma clara inflexão na região logo acima de $1000 \mu\epsilon$, o que pode caracterizar a presença dos dois estágios descritos acima. Desta forma, o módulo elástico dos materiais em estudo foi recalculado levando-se em conta o segundo estágio da curva, conforme descrito abaixo:

1 – Material Pultrudado (estágio II – considerado até o final da reta)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

$$E = (310\text{MPa} - 60\text{MPa}) / (13500\mu\epsilon - 1500\mu\epsilon)$$

$$E = 20,83 \text{ GPa.}$$

2 – Material Laminação Contínua (estágio II)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$$

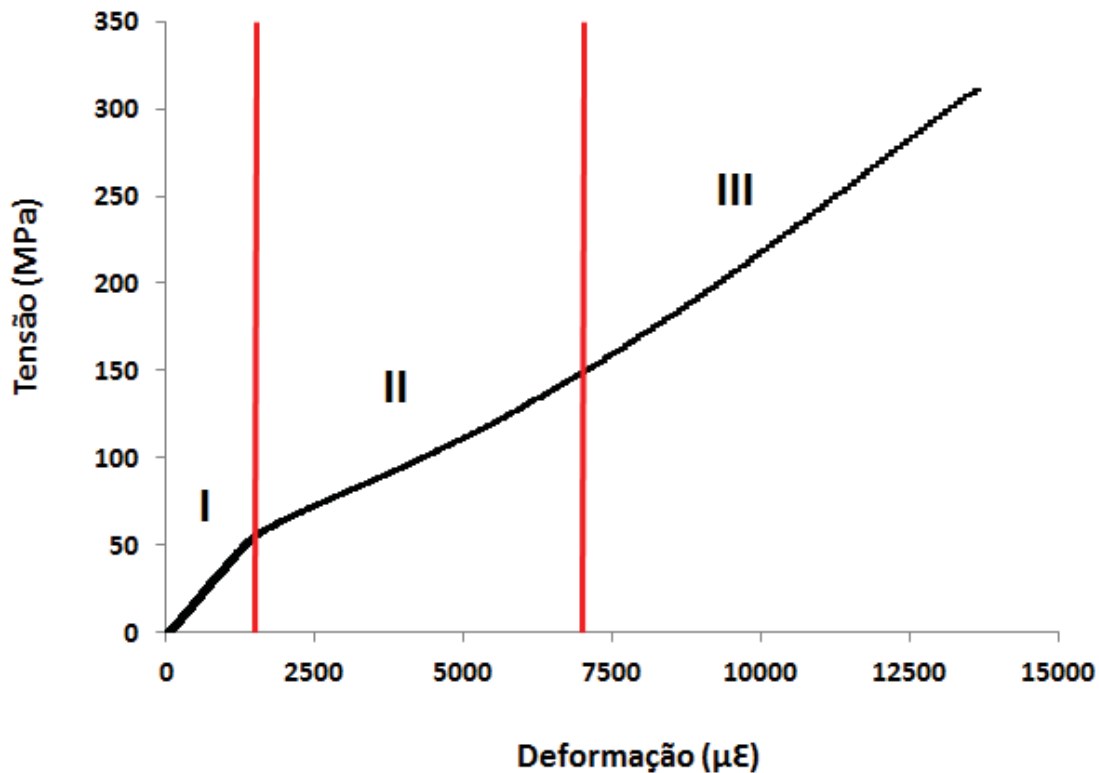
$$E = (120\text{MPa} - 50\text{MPa}) / (7400\mu\epsilon - 2400\mu\epsilon)$$

$$E = 14 \text{ GPa.}$$

O valor do módulo elástico para o material pultrudado não apresentou diferença significativa para esta metodologia de cálculo, entretanto para o material laminado, o módulo de elasticidade sofreu redução em torno de 20%. Este último resultado demonstra como a escolha dos pontos e/ou regiões da curva tensão x deformação podem influenciar os valores finais do módulo elástico. O novo valor do módulo elástico do material laminado é próximo do valor informado pelo fabricante do material $E = 12,9$ GPa (Anexo 2). O valor de módulo elástico para o material pultrudado informado pelo fabricante também foi condizente com o valor encontrado ($E = 21$ GPa) (Anexo 3). FREIRE (2001), em seu trabalho com perfis pultrudados de PRFV também calculou o módulo de elasticidade levando em consideração o segundo estágio da curva e obteve resultados similares aos apresentados neste trabalho.

Avaliando separadamente a curva de tensão x deformação do material pultrudado, é possível ainda observar a existência de um terceiro estágio, conforme apresentado na figura 21.

Figura 21 – Estágios da curva tensão x deformação para as chapas PRFV pultrudadas.



Fonte: Produzida pelo Autor.

Uma explicação possível para a ocorrência destes três estágios pode ser a configuração do material pultrudado (Seção 4, materiais e métodos), o qual é composto de uma matriz de poliéster isoftálica, combinada com uma manta de fibra de vidro e reforçado com fios *rovings* contínuos. Assim, o primeiro estágio pode corresponder à deformação elástica da matriz, num segundo estágio aparece a deformação da manta de fibra de vidro e por fim, no terceiro estágio a deformação elástica dos fios *rovings* contínuos, responsáveis pela maior resistência à tração longitudinal em perfis pultrudados.

Considerando o exposto acima, foram calculados e comparados os valores de módulos elásticos para as regiões II e III da curva de tensão x deformação:

1 – Material Pultrudado (estágio II – considerado até o início do estágio III)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

$$E = (142,76\text{MPa} - 65,55\text{MPa}) / (6670,8\mu\varepsilon - 2020\mu\varepsilon)$$

$$E = 16,60 \text{ GPa.}$$

2 – Material Pultrudado (estágio III)

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

$$E = (296,18\text{MPa} - 154,085\text{MPa}) / (1300,8\mu\varepsilon - 7220,6\mu\varepsilon)$$

$$E = 24,58 \text{ GPa.}$$

Os resultados acima indicam que, de fato, existem diferenças na inclinação da reta do material pultrudado, configurando a presença de um terceiro estágio que é distinto do segundo no valor do módulo elástico. O maior valor de E apresentado pelo estágio III possivelmente corresponde ao limite de resistência dos cabos *rovings* utilizados na constituição do material. Estes dados estão de acordo com ZURSTRASSEN et al. (2008) que afirma que a resistência do material pultrudado depende essencialmente das fibras dispostas longitudinalmente. Por outro lado, o valor de E obtido considerando-se o estágio II como sendo contínuo até o final da curva (20,83 GPa), é aproximadamente a média dos valores dos estágios II e III (20,59 GPa), considerando a existência de um terceiro estágio. Em termos práticos, a avaliação do material a partir da divisão da curva em apenas dois estágios é adequada, pois mesmo que os fios *roving* tenham uma resistência superior em relação à manta de fios picados, quando esta última começar a se romper a vida útil do material já estará comprometida.

5.2 Análise de fratura nos ensaios de tração

A análise do mecanismo de dano dos compósitos baseia-se em exames macroscópicos e microscópicos dos CP fraturados. Na análise macroscópica faz-se uma identificação da propagação da fratura mecânica ao longo de todo o comprimento do CP resultante do ensaio de tração. Características do dano como a delaminação (desaderência entre as camadas do laminado) e rupturas total ou parcial das fibras na região de “fratura final”, podem ser observadas. No caso do exame microscópico da fratura, características como a presença de microfissuras, fendas e qualidade das interfaces, seja fibra/matriz ou entre as camadas do laminado, podem ser observada. Este ensaio foi realizado nos CPs resultantes do ensaio de impacto izod e são apresentados adiante (Seção 5.5).

Os CP utilizados no ensaio de tração foram analisados macroscopicamente após a ruptura final. No caso do material laminado, foi possível observar a ocorrência de intensa delaminação, chegando-se ao ponto da fibra de vidro desprender-se do laminado (Figura 22-A). Na vista de planta, observa-se que houve uma fissuração da matriz do corpo de prova na região da fratura final (Figura 22-B).

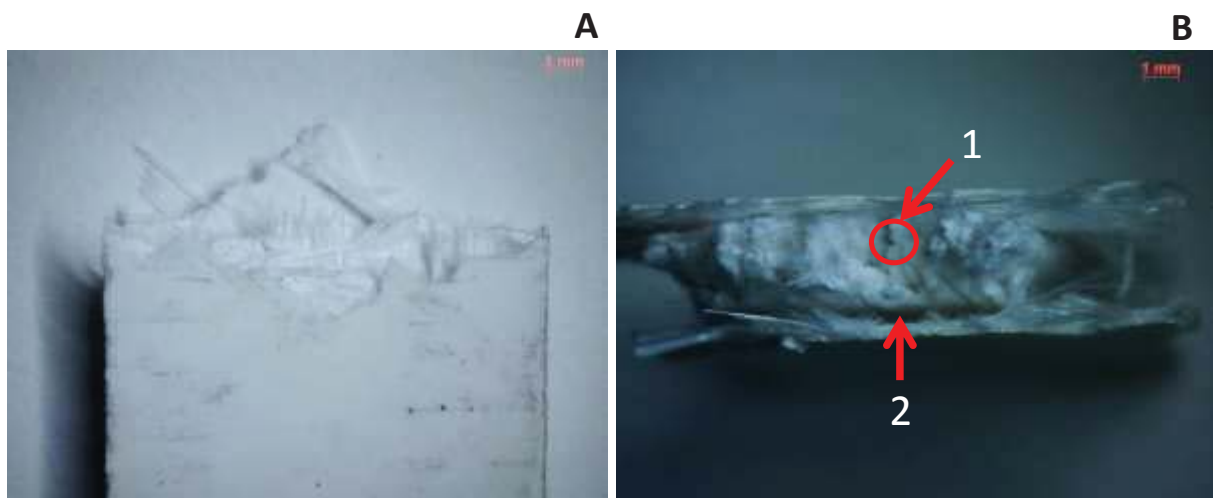
Figura 22 – Análise macroscópica do material laminado após ensaio de tração.



A) Vista lateral; B) Vista de planta. Imagens em escala natural. Fonte: Autor.

Numa imagem ampliada, fica mais evidente a região da fratura do material laminado, sendo possível observar o rompimento total do reforço e da matriz (Figura 23-A). Na análise de topo também se constata a presença de regiões que aparentemente correspondem a vazios ou bolhas oriundas do processo produtivo (Figura 23-B). Tais regiões podem ter contribuído para a fratura do material.

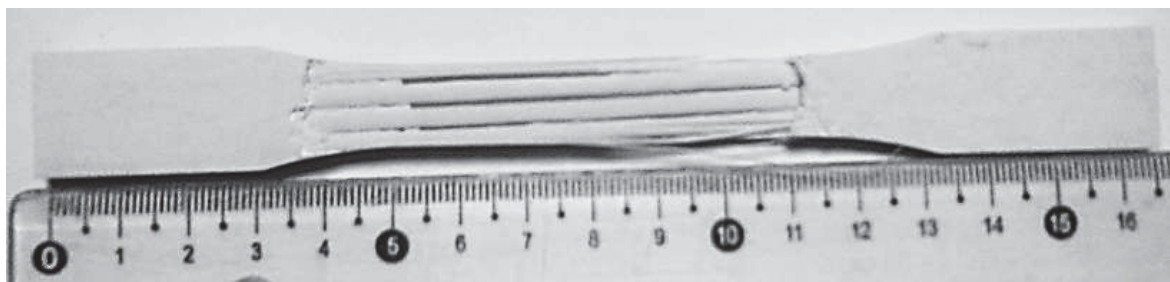
Figura 23 - Imagens ampliadas do material laminado após ensaio de tração.



A) Vista lateral; B) Vista de topo (1-detalhe de possíveis bolhas, 2-detalhe da delaminação). Ampliação 6,5 vezes. Fonte: Autor.

A avaliação macroscópica do material pultrudado evidencia que houve um rompimento total da matriz e da manta de tecido tramado, permanecendo certa quantidade de fios rovings sustentando o laminado (Figura 24).

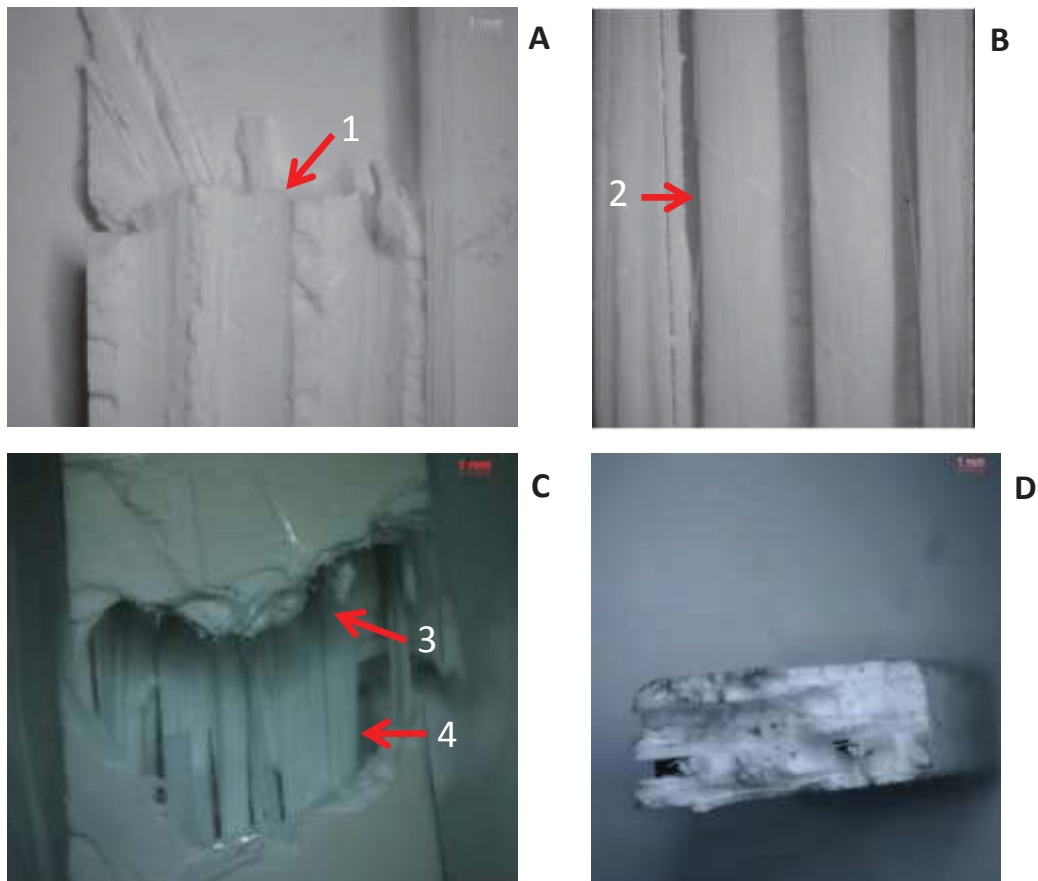
Figura 24 - Análise macroscópica do material pultrudado após ensaio de tração.



Vista de planta. Imagens em escala natural. Fonte: Autor.

A imagem ampliada da fratura no CP pultrudado, mostra a separação do reforço (fio *roving*) do resto do material que se apresenta totalmente rompido (Figura 25-A a C). Esse resultado pode explicar o aparecimento de um terceiro estágio na curva de tensão x deformação deste material (Figura 21), resultante do estiramento isolado dos fios longitudinais do pultrudado, conforme discutido na seção anterior. De fato, as imagens mostram que quando a matriz (resina) e o tecido tramado já estão totalmente rompidos, os fios *rovings* (internos) no sentido longitudinal ainda não se romperam e podem continuar sendo tracionados, de forma a proporcionar um novo patamar de deformação elástica. Este dado também justifica o fato do material pultrudado apresentar uma deformação percentual cerca de 50% maior em relação ao material obtido por laminação contínua (Figura 19, Tabela 6).

Figura 25 - Imagens ampliadas do material pultrudado após ensaio de tração.



A) Vista lateral (1- detalhe interno de reforço totalmente rompido); **B)** Vista lateral (2- fibras íntegras retiradas da matriz apresentada em A); **C)** Vista lateral (3- visão externa da matriz rompida, 4-fibras não rompidas); **D)** Vista de topo. Ampliação 6,5 vezes. Fonte: Autor.

Observando a fratura do material pultrudado pela vista de topo percebe-se ainda que este processo compacta melhor os materiais constituintes do que o material obtido pelo processo de laminação contínua (Figura 25-D).

5.3 Ensaio de flexão

Os resultados do ensaio de flexão estão resumidos na Tabela 7 e Figura 26. Nesta análise o material pultrudado apresentou uma tensão máxima aproximadamente 50% superior ao laminado (Figura 26-A). Outro dado que pode ser observado é o alongamento percentual na tensão máxima, para o qual o material pultrudado apresentou valores médios 30% maiores do que o material laminado (Figura 26-B). Ainda no ensaio de flexão foi feita a determinação do módulo elástico dos materiais. Este parâmetro mostra que quando ensaiados em flexão os materiais não apresentaram diferenças significativas para o módulo de elasticidade (Figura 26-C).

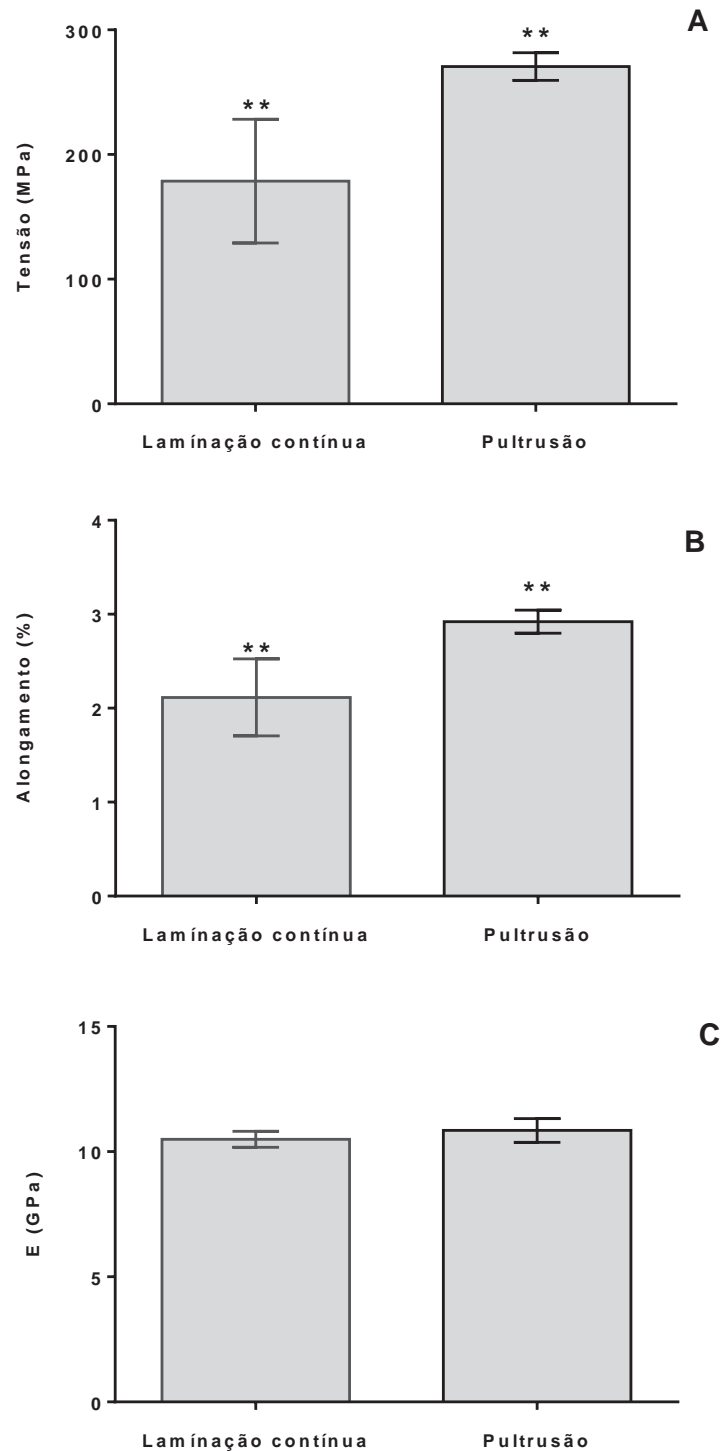
A tabela 7 mostra que a resistência à flexão do material laminado teve um incremento de 40% em relação à resistência tração (Tabela 6), enquanto que o material pultrudado apresentou um decréscimo de 17% na resistência à flexão comparando com a resistência à tração, mostrando o caráter anisotrópico destes materiais, sendo este mais expressivo na laminação contínua.

Tabela 7 – Dados do ensaio de flexão longitudinal (Média ± Desvio Padrão)

	Laminação	Pultrusão
Tensão máxima (MPa)	179,30 ± 49,63	271,50 ± 11,07
Módulo elástico E (GPa)	10,492 ± 0,32	10,846 ± 0,47
Alongamento (%)	2,12 ± 0,37	2,92 ± 0,11

Fonte: Autor.

Figura 26 – Ensaio de flexão segundo a norma ASTM D790.

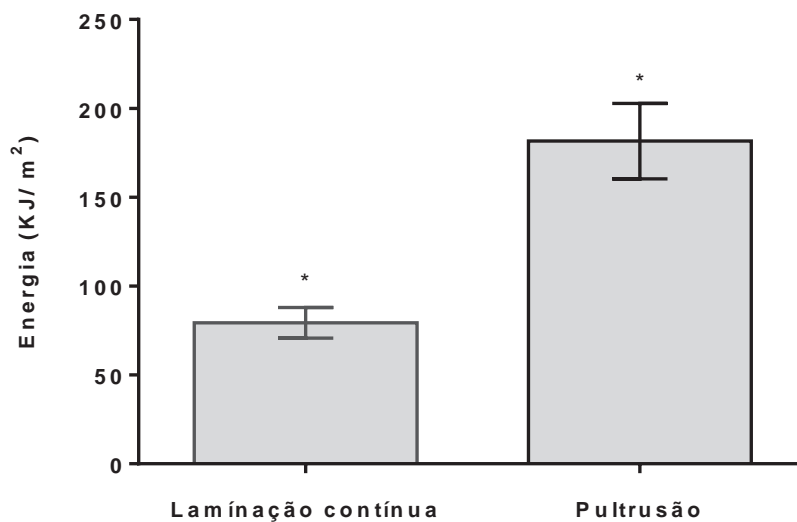


A) Tensão máxima; **B)** Percentual de alongamento e **C)** Módulo elástico. Os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n = 7$) e foram analisados estatisticamente com *student-t test*. $**p < 0.01$ comparando-se os dois processos de fabricação. Fonte: Autor.

5.4 Ensaio de impacto Izod

A comparação feita no ensaio de impacto mostrou que o material pultrudado apresenta uma resistência ao impacto Izod duas vezes maior que o valor obtido para o material laminado (Figura 27).

Figura 27 – Ensaio de resistência ao impacto segundo a norma ASTM D256.



Os dados são apresentados como média \pm desvio padrão ($n = 12$) e foram analisados estatisticamente com *student-t test*. $*p < 0.0001$ comparando-se os dois processos de fabricação. Fonte: Autor.

A tabela 8 mostra a resistência ao impacto dos materiais ensaiados e a energia absorvida no impacto. Para este parâmetro o material pultrudado também foi superior ao laminado. Isso possivelmente se deve ao comportamento unidirecional do pultrudado, que apresenta fios contínuos no sentido longitudinal, os quais absorvem muito mais energia antes de romperem, enquanto que na laminação contínua os reforços são compostos por fibras de vidro cortadas normalmente entre 38 e 50 mm, ou seja, são reforços descontínuos e apresentam baixa capacidade de absorção de energia quando submetidas a cargas de impacto (Auter e Veiga, 2008). Estes resultados estão de acordo com o observado no ensaio de tração (Figura 19), comprovando que o material obtido pelo processo de pultrusão é mais tenaz que o material laminado, ou seja, absorve mais energia antes de romper.

Tabela 8 – Dada do ensaio de impacto Izod (Média ± Desvio Padrão)

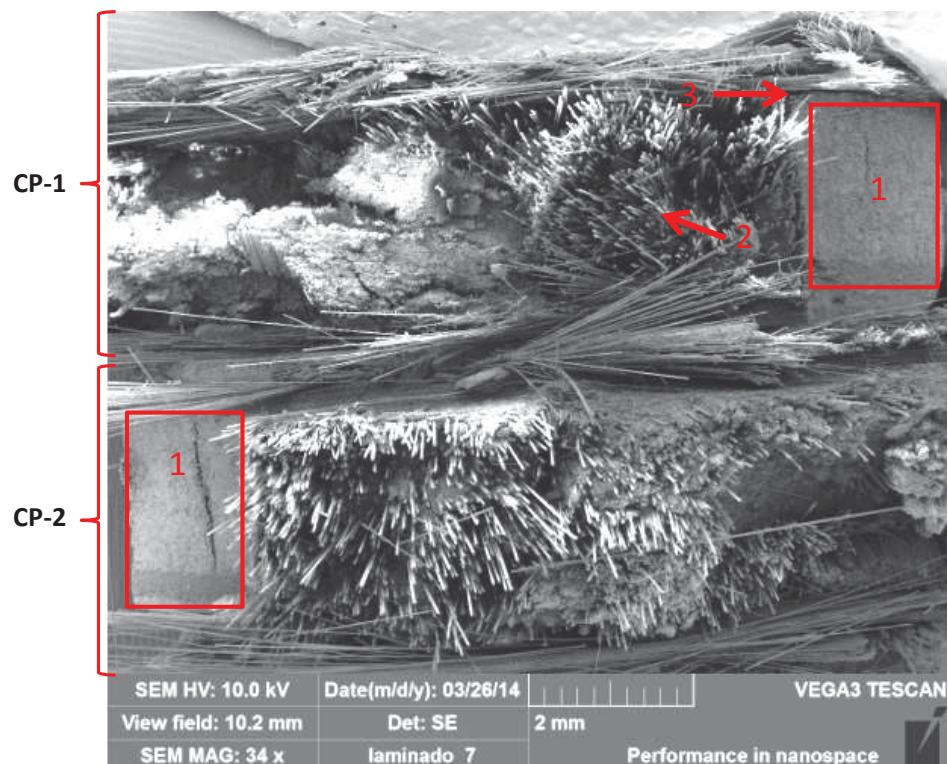
	Laminação	Pultrusão
Resistência ao impacto (KJ/m ²)	82,2 ± 8,63	181,6 ± 21,29
Energia absorvida (%)	39,86 ± 4,23	84,77 ± 9,95

Fonte: Produzida Autor.

5.5 Análise de microscopia eletrônica para o ensaio de impacto

A análise de fratura para impacto Izod foi realizada por MEV. A figura 28 apresenta dois CP do PRFV laminado, nos quais se observa uma boa orientação dos fios picados no sentido longitudinal de cada CP e a delaminação da camada externa do material, conforme já observado anteriormente (Figura 23).

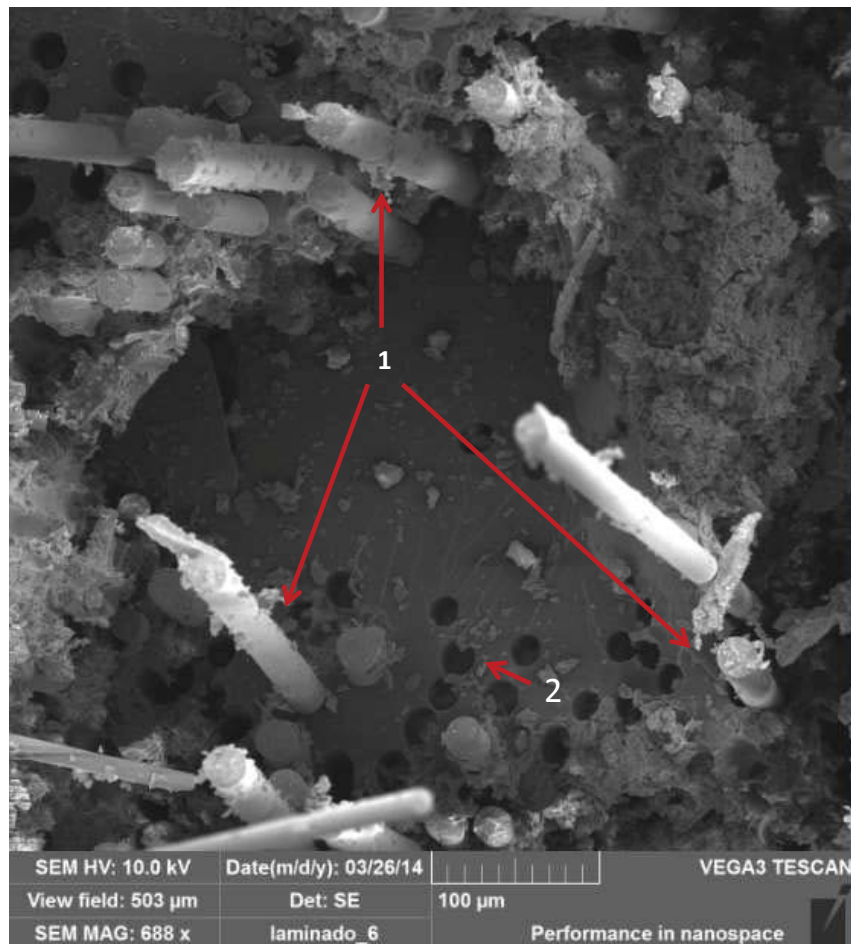
Figura 28 - Visão geral do material PRFV laminado após ensaio de impacto.



1- Região do entalhe; 2- Orientação das fibras no sentido longitudinal do CP; 3- Delaminação. Ampliação 34 vezes. Fonte: Autor.

Numa ampliação maior, é possível verificar que o material laminado apresenta orifícios na região da matriz (espaços vazios), resultantes da extração das fibras, ou seja, há uma fratura adesiva entre matriz e reforço (Figura 29). A presença de fibras descoladas da matriz também foi observada, este fenômeno é comum em materiais compósitos PRFV e é conhecido como "*pull-out*", onde ocorre uma desaderência da matriz com o reforço. As fibras apresentam forma predominantemente cilíndrica e extremidades com modos de falha (fratura) simples, sem desfibrilamento. Além da fratura adesiva, a matriz também sofreu fissuração (fratura coesiva), as quais não foram observadas no reforço (Figura 30).

Figura 29 – Fratura adesiva entre fibra e matriz no material PRFV laminado.



1- Efeito *pull-out* nas fibras; 2- Orifícios vazios na matriz. Ampliação 688 vezes. Fonte: Autor.

Figura 30 - Fratura coesiva da matriz no PRFV laminado



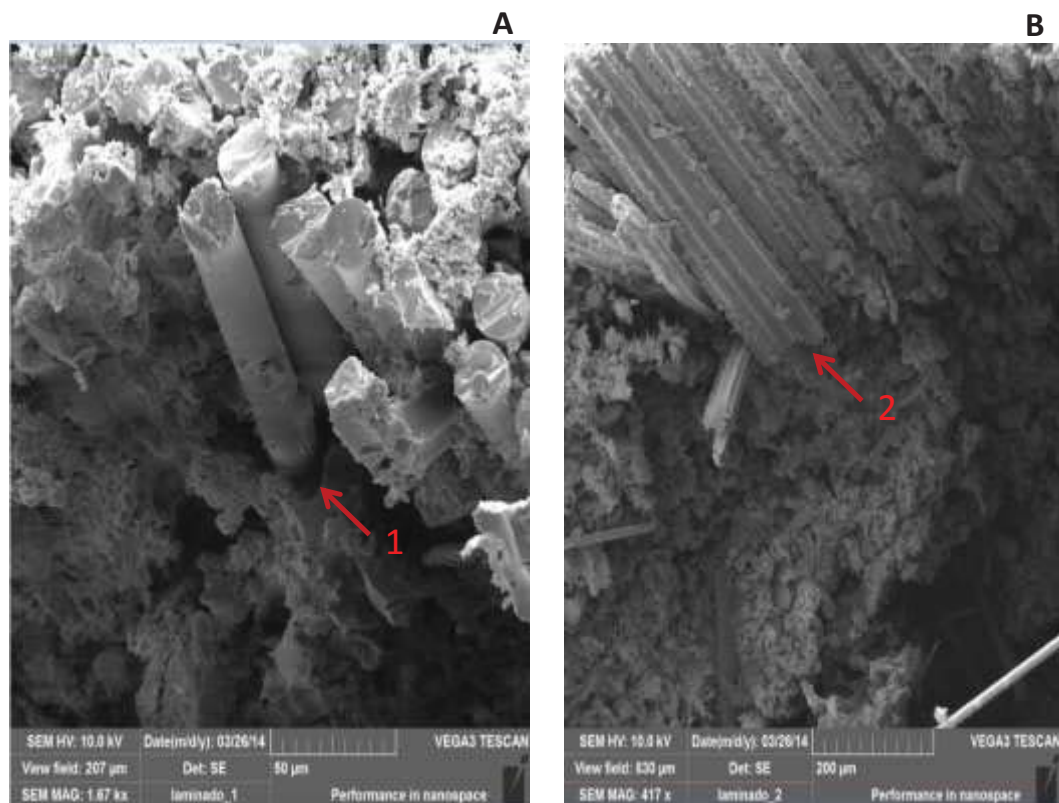
1- Detalhes de fratura coesiva da matriz. Ampliação 333 vezes. Fonte: Autor.

Diferentemente dos materiais metálicos que apresentam padrões específicos de fratura, os materiais compósitos apresentam fraturas aleatórias (PELED et al., 2009). Isso pode ser observado na figura 31-A, que mostra uma matriz totalmente fraturada sem nenhum mecanismo preferencial de fratura.

A matriz desempenha algumas funções básicas no compósito, incluindo a função de transmitir e distribuir tensões externas aplicadas ao material, cabendo a ela uma pequena capacidade de absorção de carga. Além disso, a matriz preenche os espaços entre os reforços e assim também serve de barreira na propagação de fraturas frágeis de fibra para fibra. Quanto maior a aderência entre a matriz e os reforços, maior é a resistência a fratura, uma vez que uma fratura completa só ocorre se um grande número de fibras adjacentes falharem e formarem um grupamento de falha de tamanho crítico (GIBSON, 2010).

Na figura 31 se observa que no material laminado em estudo há regiões de desaderência entre a matriz e o reforço ocasionados pelo esforço ao qual o CP foi submetido, no caso, resistência ao impacto. Em outras palavras, neste material não existe uma adesão forte entre matriz e reforço. Segundo (KORONIS et al., 2013), existe grande diferença entre as resistências mecânicas suportadas pelos constituintes de um compósito, de maneira que apenas uma pequena parcela da carga é suportada pela resina (que se rompe facilmente). A partir do rompimento da matriz, o esforço é totalmente direcionado para as fibras que são relativamente mais dúcteis que a resina e, por consequência, sofrem maior deformação antes de romper. Ao se alongarem, as fibras quebram a aderência com a matriz e aceleram o processo de dano no material compósito (GADAM et al., 2004).

Figura 31 – Desaderência das fibras com a matriz no PRFV laminado.



1- Detalhe da desaderência em aumento de 1670 vezes; 2- Detalhe da desaderência em aumento de 417 vezes.

Fonte: Autor.

Para as chapas de PRFV pultrudadas, a análise de MEV permite visualizar o tecido tramado de fibra na região externa dos CP e os fios de *roving* contínuos no centro do material (Figura 32).

Figura 32 - Visão geral do material PRFV pultrudado após ensaio de impacto.

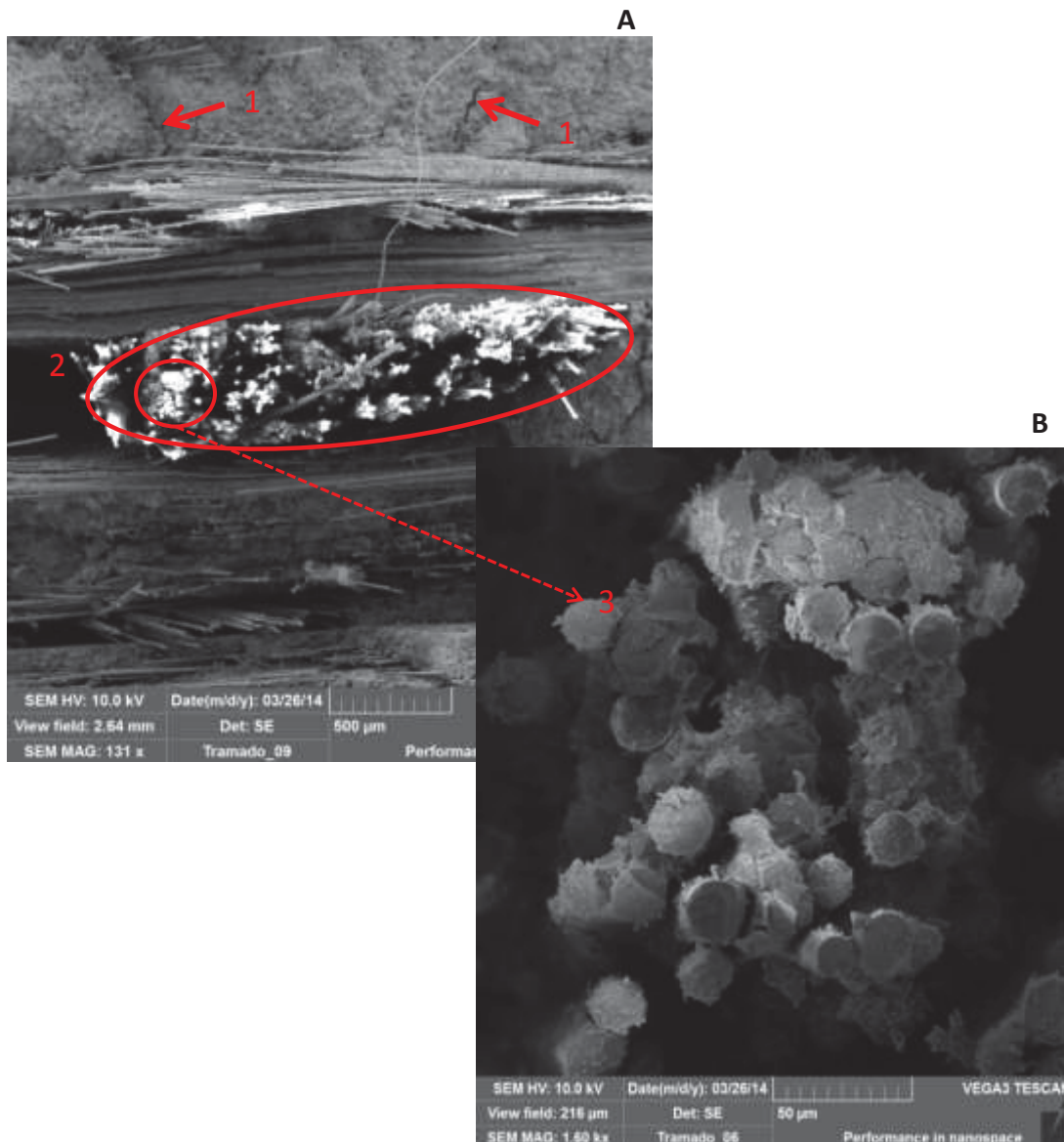


1- Região do entalhe; 2- Tecido tramado externo; 3- Fios *roving* na região interna do CP. Ampliação de 43 vezes. Fonte: Autor.

Na figura 33-A, são observadas regiões de fraturas coesivas da matriz no material pultrudado. Além disso, é possível notar uma nítida separação da matriz na região que contorna um dos cabos de *roving*, o que caracteriza uma fratura adesiva da fibra-matriz. Na figura 33-B é apresentado um detalhe, em maior aumento, do *roving* direto que, para o material em estudo, é constituído por um cabo único composto por 4000 filamentos (conforme apresentado em 33-A). Conforme apresentado na análise de fratura do ensaio de tração, a matriz e o tecido tramado rompem antes do reforço (Figura 25-C), de forma que a carga passa a atuar diretamente nos fios *roving* que, para este ensaio, absorveram em média

85% da energia aplicada antes de se romperem (Tabela 8). Contudo, observando mais detalhadamente regiões internas da mecha (Figura 33-B), vê-se que a resina cumpriu sua função de manter separados os filamentos de fibra, servindo de barreira para a propagação de fraturas frágeis de fibra para fibra (GIBSON, 2010), o que pode ter contribuído significativamente na resistência ao impacto.

Figura 33 – Fraturas no material PRFV pultrudado.



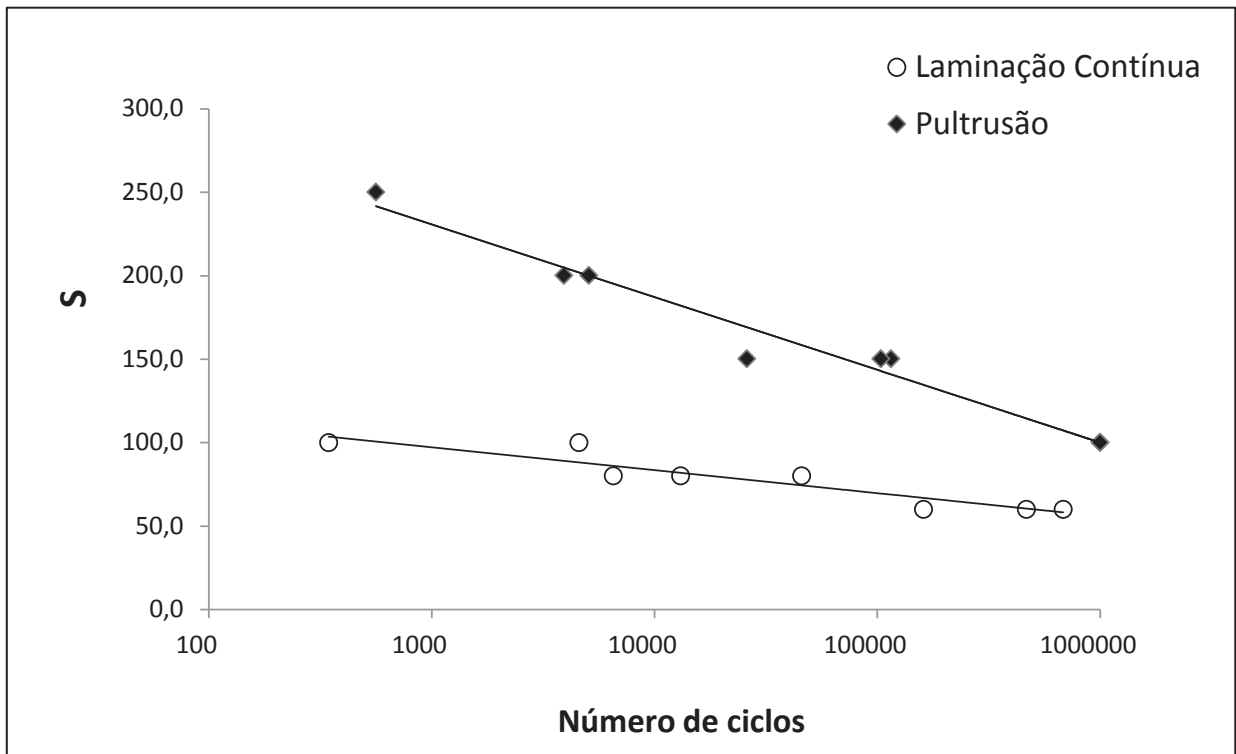
1- Fraturas coesivas da matriz; 2- Fratura adesiva fibra-matriz, ao redor de um fio *roving* de 4000 filamentos; 3- Detalhe de grupo de filamentos do fio *roving*. A) Ampliação de 131 vezes; B) Ampliação de 1600 vezes. Fonte: Autor.

A análise do mecanismo de dano desenvolvido nos ensaios de tração e impacto demonstrou que as duas configurações de materiais (laminado e pultrudado) apresentaram praticamente as mesmas características de dano (fraturas coesivas da matriz e fraturas adesivas matriz-reforço). Nas regiões avaliadas para os dois materiais não foram evidenciados danos do tipo fratura coesiva do reforço. De um modo geral, dentro da comparação do mecanismo de dano pode-se ressaltar a fraca adesão interfacial entre fibra e resina, tanto para pultrusão quanto para laminação contínua. Considerando as similaridades dos dois materiais avaliados em termos de fratura, é possível inferir que os resultados de resistência mecânica obtidos podem estar mais fortemente relacionados com a configuração do material compósito e seu processo de fabricação do que com o mecanismo de fratura em si.

5.6 Ensaio de fadiga dinâmico

Em conjunto, a análise das propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto mostram que o compósito pultrudado modelado neste trabalho apresenta maior resistência em relação ao material laminado, mesmo após a redução na proporção fibras/resina. Entretanto, pensando na possibilidade de substituição do material laminado por pultrudado na constituição do perfil de produtos automobilísticos, rodoviários, etc., é importante também conhecer o comportamento do compósito frente a uma agressão mecânica cíclica e dinâmica. Neste sentido, os materiais pultrudado e laminado foram comparados num ensaio de fadiga dinâmico. Os resultados obtidos neste teste em termos do número de ciclos até a ruptura mostram uma grande dispersão, o que é comum nos testes de fadiga em materiais desta natureza (Santos, 2009). As comparações nas curvas **S-N** para os dois materiais mostram o comportamento dos mesmos à fadiga. A tensão máxima aplicada no ensaio variou de 80% a 30% da resistência máxima obtida no ensaio de tração uniaxial (Figura 34).

Figura 34 – Curva S-N* obtida no ensaio de fadiga dinâmico segundo a norma ASTM D3479.



*As curvas seguem o modelo linearmente logarítmico. Fonte: Autor.

A regressão dos dados experimentais para cada tipo de compósito resulta em equações que mostram a tendência de resistência à fadiga. As formulações matemáticas obtidas por regressão para o material Pultrudado e o material Laminado são mostradas nas equações 5 e 6, respectivamente:

$$\log(N) = 25,27 - 9,39775 \log(S) \quad (5)$$

$$\log(N) = 25,34 - 11,1172 \log(S) \quad (6)$$

As equações apresentadas podem ser utilizadas para estimativa da resistência à fadiga para os materiais avaliados. Considerando-se uma vida de até um milhão de ciclos e projetando-se as retas obtidas no ensaio até este ponto podemos encontrar a tensão limite de fadiga, sendo esta de aproximadamente 112 MPa para o material pultrudado e de cerca de 55 MPa para o material laminado.

As curva S-N foram normalizadas para a obtenção dos coeficientes de fadiga (**b**) dos compósitos laminado e pultrudado utilizando-se a equação 2 (Demers, 1998), apresentada na seção 3.7. Os parâmetros desta normalização estão resumidos nas tabelas 8 e 9. Segundo esta

modelagem matemática, é possível calcular a tensão máxima de fadiga ($\sigma_{\text{máx}}$) para determinado número de ciclos sem que haja rompimento do material. Desta forma, foi estimada a tensão máxima de ruptura dos compósitos avaliados neste estudo, considerando-se $N =$ um milhão de ciclos. Os dados obtidos permitiram a obtenção das curvas $(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}) \times N$ (Figura 35), as quais se enquadram no modelo linearmente logarítmico descrito na seção 3.7.

Tabela 8 – Parâmetros do ensaio de fadiga dinâmico para o material laminado

CP	σ_{ult} (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}})$	N	Log (N)	b
1	126,15	100	0,792707	4577	3,660581	0,056628
2	126,15	80	0,634166	45765	4,660533	0,078496
3	126,15	60	0,475624	682942	5,834384	0,089877
4	126,15	80	0,634166	6541	3,815644	0,095877
5	126,15	60	0,475624	467122	5,66943	0,092492
6	126,15	80	0,634166	13121	4,117967	0,088839
7	126,15	60	0,475624	161084	5,207052	0,100705
8	126,15	100	0,792707	345	2,537819	0,081682
Média						0,0945

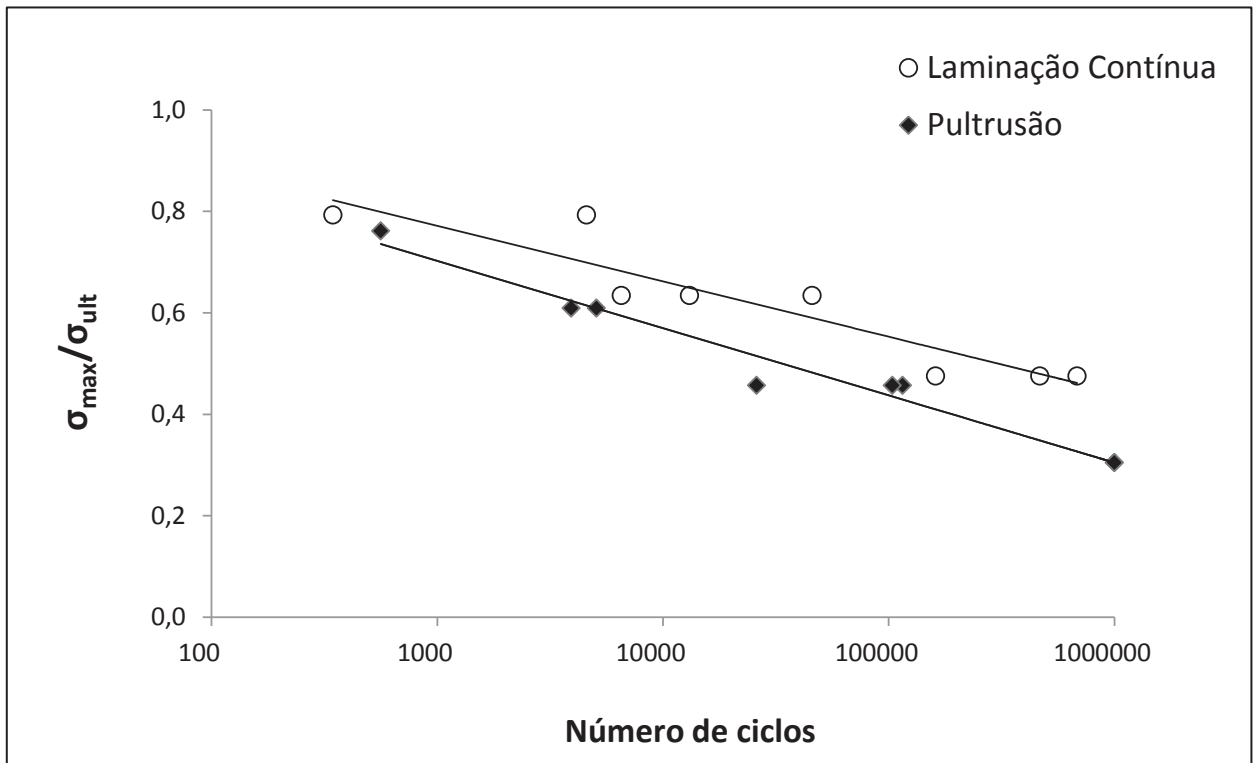
Fonte: Autor.

Tabela 9 – Parâmetros do ensaio de fadiga dinâmico para o material pultrudado

CP	σ_{ult} (MPa)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}})$	N	Log (N)	b
1	328,5	250	0,761035	562	2,749736	0,086905
2	328,5	200	0,608828	5071	3,705094	0,105577
3	328,5	100	0,304414	1000000	6	0,115931
4	328,5	200	0,608828	3919	3,593175	0,108865
5	328,5	150	0,456621	25944	4,414037	0,123103
6	328,5	150	0,456621	115009	5,060732	0,107372
7	328,5	150	0,456621	103686	5,01572	0,108335
8	328,5	100	0,304414	1000000	6	0,115931
Média						0,110335

Fonte: Autor.

Figura 35 - Curva $\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}} \times N^*$ obtida no ensaio de fadiga dinâmico segundo a norma ASTM D3479.



*As curvas seguem o modelo linearmente logarítmico. Fonte: produzido pelo autor.

O valor do coeficiente de fadiga (**b**) foi utilizado para a resolução da equação 2 (seção 3.7), conforme apresentado abaixo:

1 - Cálculo da relação de fadiga ($\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}$) para o material laminado:

$$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}) = 1 - b \cdot \log(N),$$

Onde:

$$b = 0,0945 \text{ (valor médio da tabela 8)}$$

$$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}) = 0,4331$$

2 - Cálculo da tensão máxima para o material laminado:

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_{\text{ult}} \times 0,4331$$

Onde:

σ_{ult} = Limite de resistência do material extraído do ensaio de tração uniaxial.

Logo;

$$\sigma_{\text{máx}} = 126,15 \text{ MPa} \times 0,4331$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 54,6395 \text{ MPa}$$

3 - Cálculo da relação de fadiga ($\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}$) para o material pultrudado.

$$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}) = 1 - b \cdot \log(N),$$

Onde:

$$b = 0,110335 \text{ (valor médio da tabela 9)}$$

$$(\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}) = 0,337989$$

4 – Cálculo da tensão máxima para o material pultrudado:

$$\sigma_{\text{máx}} = \sigma_{\text{ult}} \times 0,337989$$

Onde:

σ_{ult} = Limite de resistência do material extraído do ensaio de tração uniaxial.

Logo;

$$\sigma_{\text{máx}} = 328,5 \text{ MPa} \times 0,337989$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 111,03 \text{ MPa}$$

Quando comparamos os valores teóricos de tensão máxima calculada para os dois materiais com a curva S-N obtida no ensaio de fadiga, podemos comprovar que para o material pultrudado há uma excelente aproximação, uma vez que para o ensaio à tensão de 100 MPa, ou seja, aproximadamente 30% do valor da tensão máxima resistida pelo material obtida no ensaio de tração uniaxial, não houve rompimento dos corpos de prova com 1 milhão de ciclos.

Para o material laminado não foi possível comprovar essa relação, uma vez que o ensaio de fadiga foi realizado utilizando como variação de tensão valores entre 80% a 47% do valor máximo de tensão resistido pelo material no ensaio de tração uniaxial e o valor calculado foi de 43,33% da carga máxima, ou seja, 54,6395 MPa. Por outro lado, quando foram comparados os valores obtidos pelas equações 5 e 6 (curva S-N) e os valores de tensão calculados pela equação descrita por Demers (1998), para 1 milhão de ciclos, foi possível verificar que existe uma aproximação muito boa entre eles (Tabela 10).

Tabela 10 – Estimativas de resistência à fadiga ($N = 10^6$)

	Laminação	Pultrusão
Equações S-N	Log(N)=	Log(N) =
	25,34-11,1172 log(S)	2,27-9,39775 log (S)
Valor calculado (MPa)	55,00	112,00
Equações ($\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}}$) x N	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}} =$	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}} =$
	1-b log(N)	1-b log(N)
Valor calculado (MPa)	54,64	111,03
Equação segundo	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}} =$	$\sigma_{\text{máx}}/\sigma_{\text{ult}} =$
Demers (1998)	0,79-0,078 log(N)	0,79-0,078 log(N)
Valor calculado (MPa)	40,62	105,45

Fonte: Autor.

Estes dados mostram que o desempenho à fadiga dos materiais pultrudado e laminado foram distintos, sendo que o compósito obtido por pultrusão apresentou maior resistência à fadiga direta, embora seu desempenho caia mais rapidamente com o aumento da variação de tensão aplicada, enquanto o compósito obtido por laminação contínua se mostrou mais suscetível a esse fenômeno, contudo, quando se comparam as curvas normalizadas à fadiga, verifica-se que o desempenho do material laminado é melhor, e este fato está diretamente relacionado ao menor teor de fibras presente nesse material.

6 CONCLUSÕES

As propriedades elásticas dos polímeros reforçados com fibras de vidro (PRFV) dependem de um grande número de fatores relativos à composição e ao processo de manufatura dos compósitos. Dentre esses fatores alguns dos mais importantes são: formulação da resina, condições de cura, tipo e quantidade de fibras e processo de fabricação. Este estudo visou comparar dois materiais compósitos em forma de placas planas, formados pelo mesmo tipo de resina e reforço, porém em proporções ligeiramente diferentes e obtidos por processos distintos, com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica da substituição do material laminado pelo material pultrudado.

Como resultado deste estudo pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Os compósitos pultrudados podem apresentar até 70% de fibras em sua constituição. Este trabalho demonstrou que a redução no teor de fibras do pultrudado para aproximadamente 50%, pode diminuir o custo de manufatura, mantendo-se ainda boas propriedades mecânicas. Uma chapa pultrudada, mesmo com redução nas fibras, ainda tem maior resistência mecânica do que uma chapa laminada.
- Os materiais investigados apresentaram comportamento elástico linear até a sua ruptura, passando por estágios de deformação, que estão relacionados aos seus constituintes e ao processo de fabricação.
- O cálculo do módulo elástico dos materiais estudados, utilizando a prescrição da norma ASTM D 3039, coincidiu com a região de inflexão das curvas de tensão x deformação acarretando distorções com relação aos valores apresentados na literatura.
- Considerando as similaridades dos dois materiais avaliados em termos de fratura, é possível inferir que os resultados de resistência mecânica obtidos podem estar mais fortemente relacionados com a configuração do material compósito e seu processo de fabricação do que com o mecanismo de fratura em si.
- A análise de fratura do material pultrudado evidenciou que houve um dano inicial entre a matriz e a manta de reforço que recobrem externamente o material e que ocorreu por último o rompimento dos cabos longitudinais internos, o que explica a maior resistência à tração e maior alongamento do material, provocando uma terceira inclinação na curva de tensão x deformação deste material.
- Os materiais estudados apresentaram comportamentos antagônicos quando comparados os comportamentos de resistência à tração e flexão, ou seja, para o material pultrudado a resistência à flexão é menor do que à tração e para o material

laminado ocorre uma situação contrária, onde o comportamento a flexão é melhor do que a tração, característica comum para materiais anisotrópicos fortemente influenciados pelo processo de fabricação através do qual são obtidos.

- Os módulos elásticos para o ensaio de flexão não apresentaram diferenças estatísticas significantes, evidenciando o caráter anisotrópico dos materiais estudados.
- A partir do ensaio de impacto, pode-se concluir que o material pultrudado apresenta uma capacidade de absorção de energia duas vezes maior que o material laminado, o que possivelmente está relacionado aos fios longitudinais contínuos em toda a extensão do material.
- Para materiais compósitos não existe um limite de fadiga definido, o material irá romper conforme for aumentando o dano causado pelo esforço aplicado. Quanto maior for o teor de fibras no laminado, há um acréscimo na resistência à tração, flexão e impacto, porém há uma redução no seu comportamento à fadiga. Desta forma, o processo de pultrusão é mais vantajoso do que o de laminação contínua em situações onde os materiais estarão sendo solicitados à esforços mecânicos estáticos. Entretanto, quando os materiais estiverem sujeitos à esforços mecânicos dinâmicos, é necessário avaliar a curva normalizada de fadiga para poder selecionar o material mais adequado ao uso proposto.
- Através dos modelos matemáticos gerados, foi possível estimar a vida útil de cada material à fadiga para 1 milhão de ciclos. No entanto, em função do pequeno número de corpos de provas testados e pela dispersão dos resultados apresentados, testes adicionais com diferentes razões entre tensões mínimas e máximas são necessários para estabelecer com maior refinamento o comportamento à fadiga destes materiais PRFV.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, M.S., JOHARI, M.S., SADIGHI, M. SFANDEH, M. An experimental study on mechanical properties of GFRP braid-pultruded composite rods. **Express polymers letters**, Tehran, v.9, p.560-568, 2009.

ALMEIDA S.P.S. *Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro*. Dissertação de mestrado (Engenharia civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2004.

ALMEIDA, S.F.M. Teoria Estruturas de Materiais Compostos. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2003.

ANTAQUERA, P., JIMENEZ, L., MIRAVETE, A. Los materiales compuestos de fibra de vidrio. Ed. Secretariado de publicaciones, p.181, 1991.

ASHBY M. and JOHNSON K. Materials and Design, The art and science of material, 2002.

ASTM D256 - *Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics*.

ASTM D3039 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*.

ASTM D3479 – *Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials*.

ASTM D618 – *Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing*.

ASTM D790 – *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*.

ASTM E1131-08 – *Standard Test Methods for Compositional analysis by Thermogravimetry*.

AUTER, G. e VEIGA, C. Equipamento para Fabricação de Compósitos. Cap. 08 Equipamentos. In. Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências. ABMACO (Associação Brasileira dos Materiais Compósitos), 2008.

CALISTER, W.D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté, 2008.

DA SILVA, V.Q.C.P. *Avaliação Experimental dos Deslocamentos e das Cargas Críticas de Bending-Buckling em Placas Compósitas*. Dissertação de Mestrado. (Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, 2012.

DANIEL, I.M. e ISHAI, O. *Engineering Mechanics of Composite Material*. New York, Oxford University Press, 1994.

DE MOURA, M.F., MORAIS, A.B., MAGALHÃES, A.G. *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindústria, Produção de Comunicação, Ltda, 2005.

DEMERS C. E. Tension-tension axial fatigue of E-glass fiber reinforced polymeric composites: Fatigue life diagram. **Construction and building materials**, v.12, p.303-310, 1998.

DIAO, X., YE, L., MAI, Y. A statistical model of residual strength and fatigue life of composite laminates. **Composites science and technology**, v.54, p.329-336, 1995.

DING, Y.Q., YAN, Y. McLLAGGER, R., BROWN, D., Comparison of the fatigue behavior of 2-D and 3-D woven fabric reinforced composites. **Journal of materials processing technology**, v.55, p.171-177, 1995.

DISPENZA C., PISANO A.A., FUSCHI, P. Numerical simulations of mechanical characteristics of glass fiber reinforced C-profiles. **Composite Science and Technology**, v. 68, n. 2, p. 47-56, 2006.

FAWAZ, Z. ELLYIN, F. A new methodology for the prediction of fatigue failure in multidirectional fiber-reinforced laminates. **Composite science and technology**, v.53, p.47-55, 1995.

FIBRALIT. Laminação contínua. Cap. 07. In. *Compósitos II: Tecnologia de Processos*. ABMACO (Associação Brasileira dos Materiais Compósitos), 2009.

FREIRE, R.C.S. *Estudo da prevenção de falha por fadiga em laminados de plástico reforçado com fibra de vidro*. Dissertação de Mestrado. (Engenharia Mecânica). Centro de tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2001.

GADAM, S.U.K, ROUX, J.A., McCARTY, T.A., VAUGHAN, J.G. The impact of pultrusion on resin pressure rise inside a tapered cylindrical die for glass-fibre/epoxy composites. **Composite science and technology**, Mississippi, v.60, p.945-958, 2000.

GAMSTEDT, E.K., BERGLUND, L. A., PEJIS, T. Fatigue mechanisms in unidirectional glass-fibre-reinforced polypropylene. **Composites science and technology**, v.59, p.759-768, 1999.

GASSAN, J., DIETZ, T. Fatigue behavior of cross-ply glass-fiber composites based on epoxy resins of different toughnesses. **Composites science and technology**, v.61, p.157-163, 2001.

GIBSON, R.F. *Principles of Composite Material Mechanics*. Ed. Mc Graw-Hill, New York, 1994.

GIBSON, RONALD F. A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures. **Composite Structures**, Nevada, v.92, p.2793-2810, 2010.

KERSTING, D.F. *Avaliação de Resinas epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão*. Dissertação de Mestrado. (Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

KORONIS, G., SILVA, A., FONTUL, M. Green composites: A review of adequate materials for automotive applications. **Composites: Part B**, Lisboa, v.44, p.120-127, 2013.

KU, H.; WANG, H.; PATTARACHAIYAKOOP, N.; TRADA, M. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. **Composites: Parte B**, v. 42, p. 856-873, 2011.

LACOVARA, B., “What Every Engineer Should Know About Composites”, CFA,2011.

LAVOIR, J.A., REIFSNIDER, K.L., RENSHAW, A.J., MITTEN, W.A. Prediction os stress-rupture life of glass/epoxy laminates. **International journal of fatigue**, v.22, p.467-480, 2000.

LESKO, J. Design Industrial. **Materiais e Processos de Fabricação**. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2004.

LEVY NETO, F; PARDINI, L. C. Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia. 1ª edição. Ed. Edgard Blucher. São Paulo, 2006.

MANDELL, J.F., REED R.M., SAMBORSKY, D.D. Fatigue of fiberglass Wind turbine blade materials. Sand92-7005, p.61, 1999.

MENEGHETTI, L.C., GARCEZ, M.R., FILHO, L.C.P.S. Resistência à fadiga de polímeros reforçados com fibra de vidro, aramida e carbono. **Engenharia estudo e pesquisa**, Santa Maria, v.10, p.15-22, 2010.

MOREIRA, W. Resinas Termofixas. Cap. 02 Materiais. In. Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências. ABMACO (Associação Brasileira dos Materiais Compósitos), 2008.

PACIORNIK, S., MARTINHO, F.M., MAURICIO, M.H.P., D’ALMEIDA, J.R.M. Analysis of the mechanical behavior and characterization of pultruded glass fiber-resin matrix composites. **Composites science and technology**, v.63, p.295-304, 2003.

PELED, A., MOBASHER, B., COHEN, Z. Mechanical properties of hybrid fabrics in pultruded cement composites. **Cement e Concrete Composites**, v.31, p.647-657, 2009.

PHILIPPIDIS, T.P. VASSILOPOULOS, A. P. Fatigue of composites laminates under off-axis loading. **International journal of fatigue**, v.21, p.253-262, 1999.

RAMESH, M., PALANIKUMAR, K., REDDY, K.H. Comparative evaluation on properties of hybrid glass fiber-sisal/jute reinforced epoxy composites. **Procedia engineering**, v.51, p.745-750, 2013.

REICHHOLD e PULTRUSÃO DO BRASIL. Pultrusão. Cap. 09. In. *Compósitos II: Tecnologia de Processos*. ABMACO (Associação Brasileira dos Materiais Compósitos), 2009.

Revista Reinforced Plastic, March/April, p.20-24, 2013.

REZENDE, Mirabel C. and BOTELHO, Edson C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. *Polímeros* [online]. 2000, vol.10, n.2, pp. e4-e10. ISSN 0104-1428.

SANTOS, G. M. *Análise da Propriedade Mecânica de Tração e Compressão em Perfis Estruturais Pultrudados em Fibra de Vidro e Resina Termofixa*. Trabalho de Graduação. (Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo). Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, 2009.

SAPUAN, S.M., MANSOR, M.R. Concurrent engineering approach in the development of composite products: A review. **Materials e Design**, v.58, p.161-167, 2014.

SHACKELFORD, J.F. *Ciência dos Materiais*, 6ª ed. Editora Pearson, São Paulo, 2008.

SHINO M.Y. *Caracterização de Compósitos NC2/RTM6 Produzidos por RTM para Aplicações Aeroespaciais*, 2007.

SOUZA, S. A. *Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos*, p. 172-200, 1995.

SUBRAMANIAN, S., REIFSNIDER, K.L., STINCHCOMB, W.W. A cumulative damage model predict the fatigue life of composite laminates including the effect of a fiber-matrix interphase. **International Journal of fatigue**, v.17, p.343-251, 1995.

SUTHERLAND, H. J. On the fatigue analysis of wind turbines. Sand99-0089, Sandia national laboratories, Albuquerque, p.133, 1999. Technical Co. (2001).

TSERPES, K.I., PAPANIKOS, P., LABEAS, G., PANTELAKIS, SP., Fatigue damage and residual strength assessment of CFRP laminates. **Composite Structures**, V.63, p.219-230, 2004.

WHITWORTH, A. H. A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading. **Composite structures**, v.40, p.95-101, 1998.

WIEBECK, H e HARADA, J. *Plásticos de Engenharia: Tecnologias e Aplicações*. Ed. Arteliber, 2005.

VIEIRA, C. J.D. *Estudo do comportamento estrutural de perfis pultrudados sob efeito de alta temperatura*. Tese de doutorado (Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ZHU, J., CHANDRASHEKHARA, K. FLANIGAN, V., KAPILA, S. Manufacturing and mechanical properties of soy-based composites using pultrusion. **Composites: Part A**, v.35, p.95-101, 2004.

ZURSTRASSEN, E. Reforços. Cap. 03 Materiais. in Compósitos I: Materiais, Processos, Aplicações, Desempenhos e Tendências. ABMACO (Associação Brasileira dos Materiais Compósitos), 2008.

ANEXOS I - RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS PARA CADA CP INDIVIDUAL

Tabela A.1 – Ensaio de tração material pultrudado

Corpo de prova	Área (mm ²)	Alongamento força máx. (%)	Tensão máx. (Mpa)	Alongamento ruptura (%)	Tensão ruptura (Mpa)
CP 1	40,95	1,592	310,46	1,601	300,55
CP 2*	40,88	1,358	310,25	1,366	305,95
CP 3	42,70	1,432	296,20	1,438	282,19
CP 4	42,60	1,311	367,23	1,327	312,68
CP 5	42,44	1,149	308,50	1,161	273,19
CP 6	41,34	1,034	353,99	1,047	293,71
CP 7	42,07	1,100	346,62	1,120	313,81
Média	41,86	1,282	327,60	1,294	297,40
Desv. Padrão	0,7853	1,988	27,61	1,960	15,37
Coef. Var. (%)	1,876	15,50	8,428	15,14	5,166

* CP utilizado para construção da curva tensão x deformação (Seção 5.1). Fonte: Autor.

Tabela A.2 – Ensaio de tração material laminado

Corpo de prova	Área (mm ²)	Alongamento força máx. (%)	Tensão máx. (Mpa)	Alongamento ruptura (%)	Tensão ruptura (Mpa)
CP 1	45,02	0,948	135,30	0,948	135,30
CP 2*	45,23	0,722	124,43	0,716	124,03
CP 3	46,64	0,720	114,63	0,731	110,25
CP 4	45,27	0,832	129,49	0,833	124,98
CP 5	41,84	0,793	132,17	0,798	130,82
CP 6	46,09	0,768	112,38	0,780	112,23
CP 7	43,56	0,932	127,83	0,939	127,11
Média	44,81	0,816	125,20	0,820	123,50
Desv. Padrão	1,622	0,930	8,684	0,925	9,22
Coef. Var. (%)	3,621	11,39	6,938	11,28	7,47

* CP utilizado para construção da curva tensão x deformação (Seção 5.1). Fonte: Autor.

Tabela A.3 – Ensaio de flexão material pultrudado

Corpo de prova	Alongamento máx. (%)	Tensão máx. (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)
CP 1	3,13	283,53	10,945
CP 2	2,88	273,59	10,916
CP 3	2,97	265,33	10,695
CP 4	2,98	282,02	11,765
CP 5	2,91	273,37	10,171
CP 6	2,74	251,77	10,405
CP 7	2,84	264,35	10,699
Média	2,921	270,6	10,850
Desv. Padrão	0,1229	11,07	474,80
Coef. Var. (%)	4,208	4,093	4,378

Fonte: Autor.

Tabela A.4 – Ensaio de flexão material laminado

Corpo de prova	Alongamento máx. (%)	Tensão máx. (Mpa)	Módulo de elasticidade (GPa)
CP 1	1,88	146,13	11,115
CP 2	1,57	110,93	10,196
CP 3	1,82	134,53	10,322
CP 4	2,57	208,53	10,256
CP 5	2,46	206,26	10,572
CP 6	3,53	251,86	10,335
CP 7	2,39	191,93	10,646
Média	2,316	178,60	10,490
Desv. Padrão	0,6546	49,63	320,0
Coef. Var. (%)	28,27	27,79	3,050

Fonte: Autor.

Tabela A.5 – Ensaio de impacto Izod material pultrudado

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resistencia ao impacto (KJ/m²)	Absorção de energia (%)	Fratura
CP 1	10,21	3,43	156,68	73,16	Completa
CP 2	10,15	3,45	158,69	74,09	Completa
CP 3	10,15	3,45	179,82	83,96	Completa
CP 4	10,18	3,46	212,85	99,96	Completa
CP 5	10,17	3,45	186,31	87,16	Completa
CP 6	10,16	3,44	214,50	99,96	Completa
CP 7	10,16	3,44	179,60	83,69	Completa
CP 8	10,13	3,45	206,22	96,09	Completa
CP 9	10,12	3,46	186,69	87,16	Completa
CP 10	10,21	3,43	164,68	76,89	Completa
CP 11	10,16	3,43	179,83	83,56	Completa
CP 12	10,18	3,45	152,81	71,56	Completa
Média	10,16	3,45	181,56	84,77	NA
Desv. Padrão	0,03	0,01	21,29	9,95	NA
Coef. Var. (%)	0,27	0,32	11,72	11,74	NA

Fonte: Autor.

Tabela A.6 – Ensaio de impacto Izod material laminado

Corpo de prova	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resistencia ao impacto (KJ/m²)	Absorção de energia (%)	Fratura
CP 1	10,20	3,71	79,99	40,36	Completa
CP 2	10,18	3,72	80,72	40,76	Completa
CP 3	10,16	3,70	83,98	42,09	Completa
CP 4	10,18	3,75	76,15	38,76	Completa
CP 5	10,16	3,71	83,75	42,09	Completa
CP 6	10,12	3,69	93,91	46,76	Completa
CP 7	10,16	3,68	70,80	35,29	Completa
CP 8	10,19	3,72	79,89	40,36	Completa
CP 9	10,21	3,71	75,95	38,36	Completa
CP 10	10,19	3,72	59,54	30,09	Completa
CP 11	10,13	3,69	78,84	39,29	Completa
CP 12	10,18	3,69	88,04	44,09	Completa
Média	10,17	3,71	79,29	39,86	NA
Desv. Padrão	0,03	0,02	8,63	4,23	NA
Coef. Var. (%)	0,26	0,52	10,88	10,61	NA

Fonte: Autor.

Tabela A.7 – Ensaio de fadiga material pultrudado

Corpo de prova	% da Resistência	Tensão máx. (Mpa)	Tensão mín. (Mpa)	Área (mm²)	Carga máx.(N)	Carga mín.(N)	Nº ciclos p/fratura
CP 1	79,27	100	10	44,40	4440	444	4577
CP 2	63,42	80	8	46,50	3721	372	45765
CP 3	47,56	60	6	45,25	2715	272	682942
CP 4	63,42	80	8	43,03	3442	344	6541
CP 5	47,56	60	6	45,11	2707	271	467122
CP 6	63,42	80	8	45,75	3660	366	13121
CP 7	47,56	60	6	44,95	2697	270	161084
CP 8	79,27	100	10	45,66	4566	457	345

Fonte: Autor.

Tabela A.8 – Ensaio de fadiga material laminado

Corpo de prova	% da Resistência	Tensão máx. (Mpa)	Tensão mín. (Mpa)	Área (mm²)	Carga máx.(N)	Carga mín.(N)	Nº ciclos p/fratura
CP 1	76,10	250	25	42,76	10690	1069	562
CP 2	60,88	200	20	41,51	8303	830	5071
CP 3	30,44	100	10	42,04	4205	420	1000000
CP 4	60,88	200	20	42,04	8409	841	3919
CP 5	45,66	150	15	41,76	6265	626	25944
CP 6	45,66	150	15	42,65	6398	640	115009
CP 7	45,66	150	15	41,60	6241	624	103686
CP 8	30,44	100	10	41,82	4182	418	1000000

Fonte: Autor.

ANEXOS II - FICHA TÉCNICA DAS PLACAS PRFV LAMINADAS AVALIADAS NESTE ESTUDO

Data: 23/10/2012

Objetivo: Avaliar propriedades mecânicas em chapas da Guerra nas seguintes situações:

- * Chapa atual com espessura de 3,7 mm;
- * Chapa protótipo com espessura de 3,0 mm.

Equipamento: Os ensaios de tração e flexão foram realizados no equipamento de ensaio EMIC DL-2000, e o ensaio de Impacto Izod foi realizado no equipamento EMIC AIC -1.

Ensaio:

Testes		Normas	3,7 mm	3,0 mm
Tração	Espessura (mm)	ASTM D638	3,71	2,94
	Tensão na força (MPa)		132,9	135,9
	Along na ruptura (%)		1,56	1,59
	Mod. de Elasticidade (MPa)		12180	12940
Flexão	Espessura (mm)	ASTM D256	3,55	2,95
	Tensão máxima (MPa)		196,3	290,4
	Along na ruptura (%)		3,63	4,63
	Mod. de Elasticidade (MPa)		8004	9610
Impacto	Espessura (mm)	ASTM D710	3,58	2,96
	Tensão máxima (J/m)		986,82	1040,56

Observação: A identificação da empresa fornecedora foi omitida por questões éticas.

ANEXOS III - FICHA TÉCNICA DAS PLACAS PRFV PULTRUDADAS AVALIADAS NESTE ESTUDO

PROPRIEDADES DOS PERFIS PULTRUDADOS				
MECÂNICAS	PERFIS (MANTA + ROVING)		BARRAS SÓLIDAS (ROVING)	
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
RESISTÊNCIA MÁXIMA À TRAÇÃO - kgf/cm ²	2.100	490	7.000	N.A.
MÓDULO DE ELASTICIDADE NA TRAÇÃO - kgf/cm ²	175.000	56.000	420.000	N.A.
RESISTÊNCIA MÁXIMA À COMPRESSÃO - kgf/cm ²	2.100	1.050	4.200	N.A.
MÓDULO DE ELASTICIDADE NA COMPRESSÃO - kgf/cm ²	175.000	70.000	N.T.	N.A.
RESISTÊNCIA MÁXIMA À FLEXÃO - kgf/cm ²	2.100	700	7.000	N.A.
MÓDULO DE ELASTICIDADE NA FLEXÃO - kgf/cm ²	112.000	56.000	420.000	N.A.
RESISTÊNCIA AO IMPACTO IZOD - kgf.m/cm	1,4	0,2	2,2	N.A.
MÓDULO DE ELASTICIDADE, SEÇÃO PLENA - kgf/cm ²	189.000	N.A.	420.000	N.A.

N.T. - não testado - **N.A.** - não se aplica

Observação: A identificação da empresa fornecedora foi omitida por questões éticas.