



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo e caracterização de materiais compósitos para utilização como material de construção

Autor: Éric Grings da Silva

Orientador: Pedro Juarez Melo

Porto Alegre, outubro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pelos anos de apoio incondicional que me permitiram chegar ao final da graduação. Também agradeço ao meu pai por representar a Pultrusão do Brasil e fornecer todas as informações necessárias sobre o processo produtivo do pultrudado para que o presente trabalho fosse concluído.

Não poderia deixar de agradecer também ao meu grupo de amigos mais próximos da graduação, autointitulado “Ceva Sagu”, pelo apoio moral e por tornar essa caminhada final do curso tolerável.

Por fim, agradeço ao meu orientador, Prof. Pedro Melo pelo apoio, paciência e atenção ao longo desse trabalho.

RESUMO

Os perfis pultrudados de fibra de vidro apresentam propriedades mecânicas com um amplo espectro de resultados que dependem das características da resina utilizada como matriz, da fibra de vidro usada como reforço e também dos aditivos empregados. Além disso, as características do processo produtivo, como temperatura e tempo de cura são de extrema importância para o resultado final.

Aliado a isso, a literatura apresenta poucos estudos de referência, para as diversas composições, que permitam que os engenheiros façam cálculos iniciais utilizando este material. Por esse motivo, é importante que se entenda as variáveis que influenciam nas propriedades mecânicas do material e que sejam feitas análises para cada novo tipo de perfil desenvolvido pelos fabricantes.

Assim, o presente trabalho teve por finalidade estudar o processo produtivo de pultrusão na obtenção de materiais compósitos e avaliar as propriedades mecânicas de perfis pultrudados de resina poliéster insaturada do fabricante Pultrusão do Brasil e compará-las com os valores típicos encontrados na literatura. Foram comparados ensaios de tração, flexão, cisalhamento e compressão no sentido longitudinal e transversal às fibras.

Dentre os resultados obtidos, apenas o módulo de elasticidade na compressão transversal foi inferior aos valores típicos, sendo de 3,5 GPa frente à faixa esperada de 7 à 13 GPa. Os resultados de resistência à flexão transversal e resistência à tração longitudinal foram obtidos dentro das faixas típicas para os perfis pultrudados, enquanto todos os demais resultados superaram os valores esperados.

ABSTRACT

Fiberglass pultruded profiles have mechanical properties with a wide range of results that depend on the characteristics of the resin used as a matrix, the glass fiber used as reinforcement and also the additives used. In addition, the characteristics of the production process, such as temperature and curing time, are extremely important for the final result.

Allied to this, the literature presents few reference studies, for the different compositions, that allow the engineers to make initial calculations using this material. For this reason, it is important to understand the variables that influence the mechanical properties of the material and to carry out analyzes for each new type of profile developed by the manufacturers.

Thus, this study aimed to study the pultrusion production process in obtaining composite materials and evaluate the mechanical properties of pultruded profiles of unsaturated polyester resin from the manufacturer Pultrusão do Brasil and compare them with the typical values found in the literature. Tensile, bending, shear and compression tests were compared in the longitudinal and transversal direction to the fibers.

Among the results obtained, only the elastic modulus in the transverse compression was lower than the typical values, being 3.5 GPa compared to the expected range of 7 to 13 GPa. The results of transverse flexural strength and longitudinal tensile strength were obtained within the typical ranges for pultruded profiles, while all other results exceeded the expected values.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de processos produtivos de FRP. Fontes: Fórum NÁUTICA; PROTEMOLDE; Nextews; Ashirvad.....	13
Figura 2 – disposição normal de camadas de reforços em um material pultrudado. Adaptado de Sousa, (2011).....	14
Figura 3 – Classificação de compósitos baseados na forma da fase de reforço, adaptado de Sousa (2011).....	19
Figura 4 – Diferentes tipos de disposições de reforços unidirecionais e mantas....	19
Figura 5 – Processo de transformação dos materiais, adaptado de Sousa (2011).....	23
Figura 6 – Esquema de uma máquina de pultrusão. Fonte: Pultrusão do Brasil S.A.....	25
Figura 7 – Diferentes sessões transversais produzidas no processo de pultrusão. Fonte: Pultrusão do Brasil S.A.....	26
Figura 8 – Fotomicrografia obtida por MEV de sessão transversal de perfil pultrudado, com foco em defeito estrutural devido ao mal preenchimento de resina. Adaptado de Vieira (2008).....	27
Figura 9 – Fotomicrografia obtida por MEV das superfícies de ruptura por tração em perfis pultrudados.....	28
Figura 10 – Comparação do comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP com outros materiais estruturais.....	29
Figura 11 – Comparação das propriedades mecânicas de perfis GRFP com madeira, aço, alumínio e PVC. Adaptado de Martins (2011).....	30
Figura 12 – Comparação entre as propriedades físicas e térmicas dos perfis de GFRP com outros materiais (madeira, aço, alumínio e PVC). Adaptado de Martins (2011).....	31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparativo das vantagens e desvantagens de resinas estruturais típicas, adaptado de Albuquerque (2005).....	17
Quadro 2 – Classificação de processos produtivos de FRP, adaptado de Sousa (2011).....	24
Quadro 3 – Vantagens e limitações de perfis pultrudados GFRP. Adaptado de Sousa (2011).....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades dos polímeros termofixos usados como matriz FRP, adaptado de Sousa (2011).....	18
Tabela 2 – Propriedades mecânicas típicas de um perfil putrudado de FRP. Adaptado de Nunes (2012).....	29
Tabela 3 – Ranking da criticidade dos efeitos de umidade e soluções aquosas nos materiais compósitos. Adaptado de Karbhari et al (2003).....	34
Tabela 4 - Ranking da criticidade dos efeitos de soluções alcalinas nos materiais compósitos. Adaptado de Karbhari et al (2003).....	37
Tabela 5 – Resultados de resistência à tração da amostra no sentido longitudinal	44
Tabela 6 – Resultados de resistência à tração da amostra no sentido Transversal	44
Tabela 7 – Resultados obtidos nas avaliações da resistência à flexão.....	45
Tabela 8 – Avaliação da força de cisalhamento interlaminar.....	45
Tabela 9 - Resultados de resistência à compressão da amostra no sentido longitudinal.....	46
Tabela 10 - Resultados de resistência à compressão da amostra no sentido transversal.....	46

LISTA DE SIGLAS

FRP	Fiber Reinforced Polymer
PVC	Policloreto de vinila
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	poli(metacrilato de metila)
RTM	Resin Transfer Molding
SMC	Sheet Moulding Compound
BMC	Bulk Molding Composite
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Objetivos.....	12
3. Revisão bibliográfica.....	12
3.1. Definição de Materiais Compósito.....	12
3.2. Características gerais de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP).....	13
3.2.1. Constituição dos FRP.....	13
3.2.1.1. Matriz.....	14
3.2.1.2. Material de Reforço (Fibras).....	18
3.2.1.2.1. Fibras de Vidro.....	19
3.2.1.3. Cargas (fillers).....	21
3.2.1.4. Aditivos.....	21
3.2.2. Processos de produção de materiais compósitos reforçados com fibras.....	22
3.2.2.1. Pultrusão.....	25
3.3. Características gerais dos polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP).....	28
3.3.1. Propriedades típicas dos perfis pultrudados de GFRP.....	28
3.3.2. Vantagens e limitações.....	31
3.4. Durabilidade de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP).....	32
3.4.1. Soluções aquosas e umidade.....	33
3.4.2. Ambientes alcalinos.....	35
3.4.3. Efeitos térmicos.....	37
3.4.4. Radiação ultravioleta.....	38
3.4.5. Fogo.....	39
3.4.6. Fadiga.....	40
3.4.7. Fluência.....	40
4. Metodologia.....	41
4.1. Determinação da resistência à tração:.....	42
4.2. Determinação das propriedades de flexão:.....	42
4.3. Determinação da força de cisalhamento interlaminar:.....	43
4.4. Determinação da resistência à compressão:.....	43
5. Resultados e discussão.....	43
5.1. Determinação da resistência à tração:.....	43
5.2. Determinação das propriedades de flexão:.....	44
5.3. Determinação da força de cisalhamento interlaminar:.....	45

5.4. Determinação da resistência à compressão:.....	45
6. Conclusão.....	46
7. Referências Bibliográficas.....	48

1. Introdução

Com o desenvolvimento da indústria brasileira ao longo dos anos, vem se tornando cada vez mais importante a busca pela otimização da aplicação de materiais estruturais na indústria da construção civil, visto que estes produtos representam fração significativa e muitas vezes majoritária dos custos da maioria das obras.

Nesse aspecto, um dos grandes desafios dos engenheiros é o desenvolvimento de estruturas onde o produto final ficará exposto a ambientes agressivos, em contato com ácidos e bases, salinidade, ambiente marítimo ou em que a vida útil longa do produto é importante. Para sanar essas exigências, os materiais compósitos vêm se provando de grande utilidade, especialmente os perfis produzidos a partir da tecnologia de pultrusão.

O processo consiste no desenvolvimento de um plástico estrutural, o perfil pultrudado, que oferece diversas soluções inovadoras para a indústria. O material é composto por diferentes tipos de resinas termofixas ou termoplásticas que impregnam reforços mecânicos de fibras sintéticas. O resultado é um material plástico estrutural de longa durabilidade e baixo peso, que pode ser utilizado em aplicações que exigem alta resistência mecânica e química.

As propriedades do pultrudado não são obtidas por nenhum outro material de maneira isolada. É imune à corrosão; resistente a ataques químicos e a altas temperaturas; é bom isolante elétrico, térmico e acústico; é impermeável e também muito mais leve que os materiais convencionais. Por esse motivo, vem sendo amplamente utilizado nos Estados Unidos, Europa e Ásia para substituir materiais como o aço, alumínio, madeira e concreto em sistemas estruturais. No Brasil, graças a algumas empresas que buscam diferenciação através de produtos especializados, o material pultrudado vem ganhando mercado e se tornando cada vez mais importante.

2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar o processo produtivo de pultrusão na obtenção de materiais compósitos, e como objetivos específicos:

- Identificar os principais constituintes do material pultrudado;
- Descrever as características e propriedades típicas do material;
- Identificar a forma geral que diversas intempéries impactam os perfis pultrudados;
- Avaliar as propriedades mecânicas de perfis pultrudados de resina poliéster insaturada do fabricante Pultrusão do Brasil e compará-las com os valores típicos encontrados na literatura.

3. Revisão bibliográfica

3.1. Definição de Materiais Compósito

De acordo com Camatta et al, (2012), os materiais compósitos são definidos como materiais estruturais com duas ou mais fases macroscópicas e que têm propriedades mecânicas melhores que as de cada fase considerada isoladamente. Pelo menos uma dessas fases físicas deve apresentar característica filamentar, fibrosa ou particulada, estando dispersa e envolta em uma fase contínua denominada matriz (ligante). Pode-se encontrar na natureza diversos exemplos desses materiais, como a madeira, que é composta por fibras de celulose e hemicelulose envolvidas por uma resina natural chamada lignina. Outro exemplo, desenvolvido pelo ser humano, é o concreto armado, cujas propriedades são decorrentes de cada um de seus componentes: Cimento, areia e brita elevam a resistência à compressão e intempéries, porém reduzem a resistência à tração e flexão. A incorporação do aço na forma de barras armadas e treliças aumenta a resistência à tração e flexão do concreto.

3.2. Características gerais de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP)

Encontram-se disponíveis no mercado diversas tecnologias referentes aos materiais compósitos, como visto na figura 1. O foco do presente trabalho será nos materiais poliméricos reforçados com fibras e também conhecidos por FRP (Fiber Reinforced Polymer), em especial o material pultrudado, produzido a partir da técnica de pultrusão. Para um maior entendimento do assunto, se faz necessária uma abordagem mais aprofundada sobre o processo de fabricação dos FRP e do pultrudado.



Laminação manual (hand lay-up)



RTM – Injeção a frio



Laminação por infusão à vácuo



SMC – Sheet Moulding Compound



SMC – Sheet Moulding Compound

Figura 1 – Exemplos de processos produtivos de FRP. Fontes: Fórum NÁUTICA; PROTEMOLDE; Nextews; Ashirvad.

3.2.1. Constituição dos FRP

De acordo com Sousa (2011), nos FRP as propriedades físico-químicas dos polímeros que são utilizados como matriz são associadas com as elevadas propriedades mecânicas das fibras de reforço para gerar um novo produto com novas características desejadas. Segundo ele, além da matriz e das fibras, ainda são

incorporados aditivos à formulação do produto, com o objetivo de melhorar as suas propriedades. Entre esses aditivos pode-se citar os aceleradores, fillers ou mesmo agentes desmoldantes. Um esquema da disposição geral dos reforços que são envoltos pela matriz em materiais pultrudados pode ser visto na figura 2.

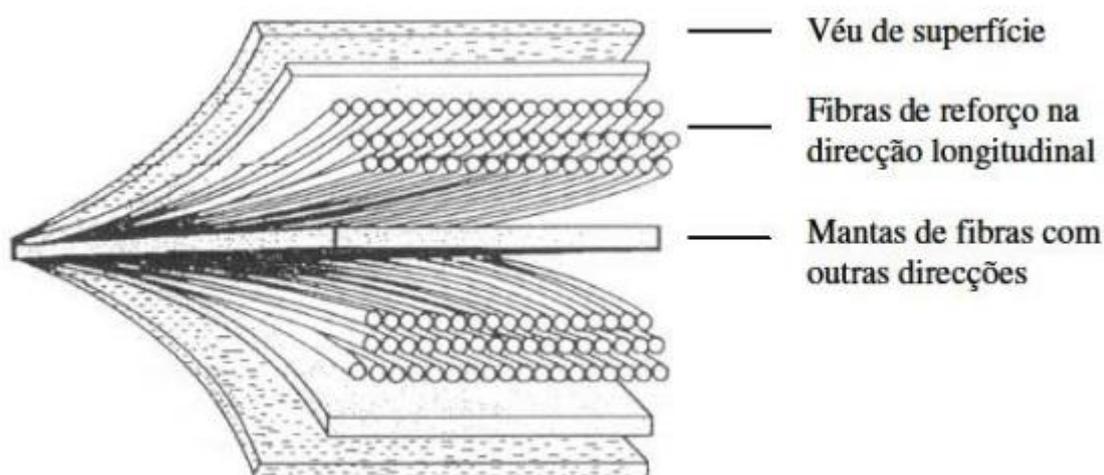


Figura 2 – disposição normal de camadas de reforços em um material pultrudado. Adaptado de Sousa, (2011).

3.2.1.1. Matriz

Para Teixeira (2010), as matrizes poliméricas utilizadas nos materiais reforçados com fibras têm como objetivo manter as fibras na posição desejada, garantir a transferência e distribuição dos esforços pelas fibras, evitar que as fibras sofram flexão quando solicitadas por compressão e proteger as mesmas de agentes externos que possam gerar degradação.

Sousa (2011), salienta que, apesar da matriz ser a fase contínua em um material compósito que contenha uma outra fase dispersa e descontínua como as fibras ou partículas de filler, a matriz desempenha várias funções e não serve apenas como ligação da fase de reforço. Segundo ele, as funções gerais da matriz são:

- Assegurar a posição e orientação das fibras, através de uma impregnação eficaz durante o processo de produção;

- Distribuir pelas fibras as tensões resultantes dos esforços externos aplicados sobre o material;
- Absorver a energia e reduzir a concentração de tensões, contribuindo para a detenção da propagação de fissuras;
- Proteger as fibras da abrasão e das agressões do meio ambiente.

Dentre os diversos materiais poliméricos utilizados como matriz nos FRP, pode-se dividi-los em dois grupos: os polímeros termoplásticos e os polímeros termofixos ou termoendurecíveis.

Segundo Camatta et al, (2012), polímeros denominados termoplásticos podem ser moldados a partir da aplicação de temperatura e pressão e, após o resfriamento, readquirem a rigidez inicial. Esse comportamento viabiliza a produção em larga escala de artefatos através de processos como a extrusão e a moldagem por injeção. Os rejeitos e refugos também podem ser reciclados, já que são facilmente remodelados com aplicação de temperatura e pressão. Entre os polímeros termoplásticos utilizados como material de construção em diversos setores industriais, destacam-se os commodities como o polietileno, polipropileno, PVC, PET e os plásticos de engenharia como PMMA [poli(metacrilato de metila)].

Ainda para Camatta et al, (2012), Esses polímeros são caracterizados por ligações químicas fracas (Van der Waals) entre as cadeias. Quando aquecidos, as ligações de Van der Waals são quebradas, permitindo que haja maior facilidade para movimentação das cadeias umas em relação às outras. Essa capacidade de fluir com a aplicação de temperatura garante a esses materiais suas características fundamentais de fácil reprocessabilidade. Outra característica importante que pode ser explicada pelo tipo de interação entre as cadeias é o comportamento frente à ação de solventes. Para os polímeros termoplásticos, a solubilização por um determinado solvente é possível quando as interações entre as moléculas do solvente e as cadeias poliméricas apresentam uma magnitude superior à magnitude de interação entre as cadeias poliméricas. Nesse caso, as moléculas de solvente rompem as ligações mais fracas que unem as cadeias e as substituem por ligações Van der Waals um pouco mais fortes solvente-polímero. Assim, com a redução de interação entre as cadeias

de polímero, elas ganham maior liberdade para se mover, gerando a solubilização do material.

Segundo Camatta et al, (2012), os polímeros termofixos são aqueles que não amolecem com o aumento da temperatura, e portanto, uma vez produzidos não podem ser reprocessados. Uma elevação contínua da temperatura irá levar à degradação do material antes que ocorra qualquer alteração em suas propriedades mecânicas. Alguns exemplos englobam as borrachas vulcanizadas, os hidrogéis, as resinas epoxídicas, de poliéster insaturado, éster-vinílicas e fenólicas.

Esses polímeros apresentam cadeias conectadas entre si por ramificações compartilhadas. Assim, ligações químicas primárias (covalentes) são responsáveis pelas ligações cruzadas entre cadeias, as quais são rompidas com a introdução de elevada quantidade de energia. De maneira geral, essa energia também rompe as ligações que constituem as próprias cadeias poliméricas, levando o material a se degradar. Dessa forma, as ligações químicas entre as cadeias são as responsáveis pela característica termofixa do material. Em relação ao comportamento dos polímeros frente à ação de solventes, não há possibilidade de rompimento das ligações pela ação de solventes, uma vez que as mesmas são primárias, de alta energia. Com a introdução de solventes quimicamente compatíveis com o polímero, ocorre o chamado “inchamento”, onde há inserção do fluido entre as cadeias poliméricas sem, no entanto, romper qualquer ligação cruzada.

Conforme Sousa (2011), registra-se um interesse crescente em novas formas de fabricação e aplicações inovadoras para os FRP de matriz termoplástica mas, devido as propriedades de ambos os tipos de polímero, as resinas termofixas ainda são mais utilizadas para as aplicações estruturais e são utilizadas em quase todos os materiais de FRP disponíveis no mercado.

Ainda, segundo Albuquerque (2005), dentre as resinas utilizadas como matrizes reforçadas com fibras de vidro, que é o tema do presente trabalho, temos as poliésteres, epóxi, vinil éster, fenólicas, acrílicas e algumas resinas termoplásticas, nylon, policarbonato e poliestireno. Dessas, as mais utilizadas para aplicações estruturais são as termofixas, como também mencionado por Sousa (2011). Dentre essas resinas, as poliéster, vinil éster e epóxi respondem por cerca de 90% dos sistemas poliméricos de resinas termofixas usados em compósitos estruturais. O

quadro 1 exibe um comparativo das vantagens e desvantagens desses três tipos de resinas.

Além das três resinas mencionadas no parágrafo anterior, Sousa (2011) trás a importância também das resinas fenólicas. Nessa aplicação, as quatro resinas podem ser consideradas como materiais isotrópicos e viscoelásticos. A tabela 1 apresenta propriedades típicas desses quatro polímeros utilizados como matriz de FRP.

Quadro 1: Comparativo das vantagens e desvantagens de resinas estruturais típicas, adaptado de Albuquerque (2005).

Poliéster	
Vantagens: - Fácil de usar; - Custo mais baixo.	Desvantagens: - Propriedades mecânicas moderadas; - Alta contração durante a cura; - Temperaturas de trabalho limitadas; - Apresenta compatibilidade apenas com fibras de vidro.
Vinil Éster	
Vantagens: - Alta Resistência química; - Propriedades mecânicas superiores às da resina poliéster; - Boa adesão a fibras de vidro.	Desvantagens: - Geralmente, é requerida pós-cura para que altos valores de propriedades sejam alcançados; - Alta concentração de estireno; - Custo superior ao da resina poliéster; - Alta contração durante a cura; - Fraca adesão a fibras de carbono e Kevlar.
Epóxi	
Vantagens: - Altas propriedades térmicas e mecânicas; - Alta resistência à água; - Disponibilidade de trabalho por tempos mais longos; - Baixa contração durante a cura; - Boa adesão.	Desvantagens: - Custo superior ao da resina vinil éster; - Mistura crítica.

Tabela 1: Propriedades dos polímeros termofixos usados como matriz FRP, adaptado de Sousa (2011).

Propriedade	Poliéster insaturado	Viniléster	Epoxídicas	Fenólicas
Resistência à tração [Mpa]	20-70	68-82	60-80	30-50
Módulo de elasticidade [Gpa]	2,0-3,0	3,5	2,0-4,0	3,6
Extensão na ruptura [%]	1,0-5,0	3,0-4,0	1,0-8,0	1,8-2,5
Massa específica [g/cm ³]	1,20-1,30	1,12-1,16	1,20-1,30	1,00-1,25
Temperatura de transição vítrea [°C]	70-120	102-150	100-270	260

3.2.1.2. Material de Reforço (Fibras)

Segundo Correia (2008), os materiais de reforço conferem ao compósito excelentes propriedades mecânicas. Existe uma sinergia entre as propriedades da matriz e as do reforço que resulta, no material compósito final, em propriedades que não existiam nos materiais originais. Ele ainda ressalta que os materiais de reforço podem apresentar-se sob diferentes formas, como:

- Bobinas de fibras contínuas, conhecidas como “Rovings”.
- Mantas - formadas por pedaços de fios dispostos sobre um plano segundo direções aleatórias e unidos por aglutinante fraco.
- Tecidos 2D e 3D - constituídos pelo cruzamento de fios ou cordões segundo duas direções, em geral, perpendiculares.
- Malhas.
- Entrançados.
- Pré-formas.

Sousa (2011) ainda salienta a extrema importância desses reforços nos materiais compósitos, mostrando como se pode classificá-los baseado na forma de reforço utilizado, como visto na Figura 1.

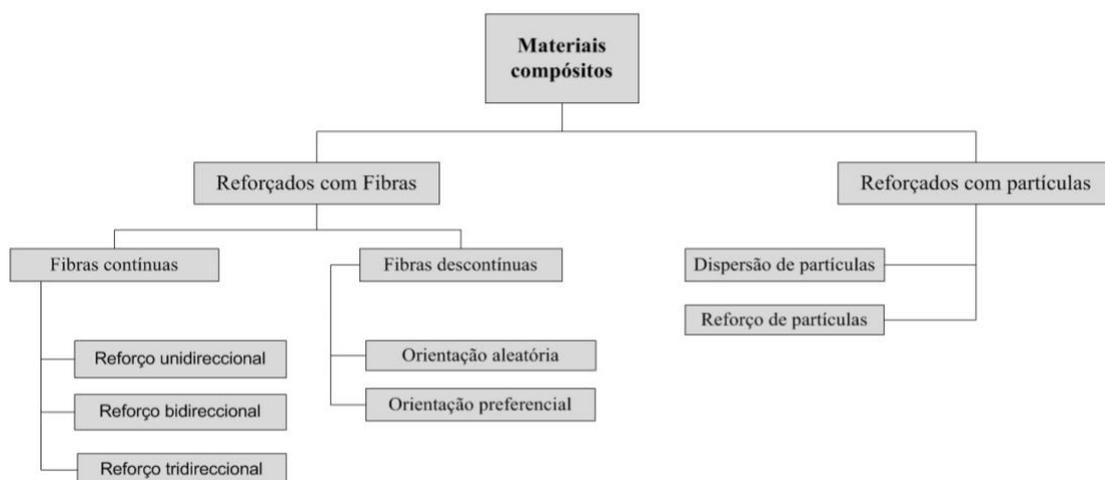


Figura 3 – Classificação de compósitos baseados na forma da fase de reforço, adaptado de Sousa (2011).

3.2.1.2.1. Fibras de Vidro

Conforme citado por Tortelli (2013), a fibra de vidro é o reforço mais utilizado em compósitos de matriz polimérica por diversas razões: é facilmente produzida, pode ser industrializada através do emprego de diversas técnicas de fabricação, produz materiais com alta resistência específica, e quando associada com diferentes resinas, possui uma inércia química que torna um compósito útil para aplicações em ambientes corrosivos. Pode ser produzida também em diferentes configurações, como visto na figura 4.

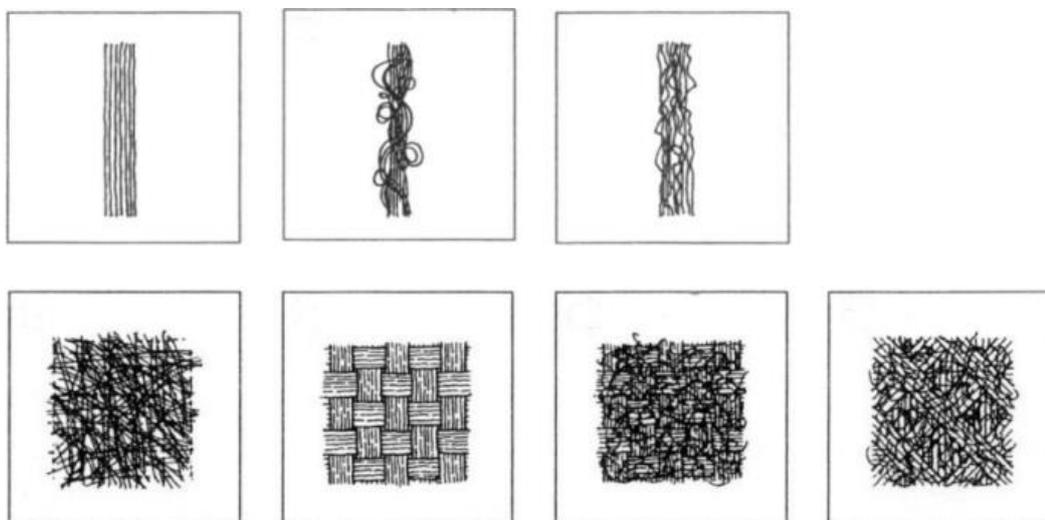


Figura 4 – Diferentes tipos de disposições de reforços unidirecionais e mantas.

As fibras de vidro podem ser classificadas de acordo com a composição química dos vidros a partir dos quais são fabricadas. Assim, têm-se fibras do tipo A, C, E, R e S, sendo constituídas por concentrações variantes entre 50 a 60% de SiO₂, juntamente com outros óxidos. Essas designações originam-se devido a propriedades dos vidros que foram utilizados para produzi-las. A fibra de vidro tipo E tem esse nome devido ao vidro tipo E que é um bom isolante elétrico com boa resistência mecânica. A fibra tipo C origina-se do vidro tipo C, que apresenta boa resistência à corrosão química. Já a tipo S deve-se ao alto índice de sílica, que gera resistência a temperaturas superiores a outros tipos de vidros.

Ainda, segundo Correia (2008), a fibra de vidro possui elevada resistência à tração e um bom módulo de elasticidade quando comparada a outros materiais. Por ser de fácil aquisição no mercado, com preços inferiores comparados aos outros tipos de reforços, esse reforço torna-se o principal tipo para as aplicações no mercados de grande consumo. Segundo ele, algumas vantagens das fibras de vidro relativamente aos outros materiais de engenharia são:

- Resistência mecânica: Resistência específica (resistência à tração/densidade) superior à do aço;
- Condutibilidade elétrica: baixa (excelente isolante elétrico mesmo em espessuras reduzidas);
- Combustibilidade: incombustível (não propaga a chama nem origina fumaça com o calor);
- Estabilidade dimensional: baixo coeficiente de dilatação térmica (pouco sensível às variações de temperatura e umidade);
- Compatibilidade com materiais orgânicos: Apta a receber diferentes matrizes, o que permite associar diferentes resinas sintéticas e mesmo matrizes minerais como o cimento;
- Condutibilidade térmica: baixa (para aplicações que requeiram reduzidas perdas térmicas);
- Permeabilidade dielétrica: Ótima (radares, torres telefônicas, etc);
- Resistência a agentes químicos: Elevada quando em conjunto com resinas apropriadas.

3.2.1.3. Cargas (fillers)

Segundo Martins (2011), os materiais de enchimentos inorgânicos, também chamados de fillers, são utilizados na composição da matriz para reduzir os custos do produto final e melhorar o seu desempenho, garantindo certas propriedades que não são obtidas apenas com as resinas e fibras.

Em geral, esses materiais são quimicamente inertes e tem a função de conferir à estrutura um melhor comportamento, como por exemplo em situações de incêndio, reduzindo o conteúdo orgânico do compósito. Outro aspecto importante é que eles contribuem para a redução da contração da matriz durante a cura ou mudanças de temperatura, prevenindo o desenvolvimento de fissuras em zonas de descontinuidade ou em locais com um teor excessivo de resina.

Assim, a utilização dessas cargas causa redução da resistência mecânica e um aumento da rigidez do compósito. Podem-se reduzir esses efeitos utilizando micro esferas de vidro, compactas ou ocas, com diâmetros entre 10 µm e 1,5mm. Materiais como alumina e sulfato de cálcio são utilizados para melhorar o comportamento do material compósito em caso de incêndio, reduzindo a inflamabilidade e a produção de fumaça. Além desses materiais, também se usa caulino e carbonato de cálcio.

3.2.1.4. Aditivos

Ainda segundo Martins (2011), pode-se utilizar uma grande variedade de aditivos incorporados à matriz com a finalidade de melhorar o desempenho do compósito, do processamento ou simplesmente modificar algumas propriedades. Alguns dos objetivos da utilização de aditivos são:

- Diminuição da retração;
- Diminuição da inflamabilidade e da produção de fumaças tóxicas em situação de incêndio;
- Diminuição do teor de vazios;

- Aumento da condutibilidade elétrica (Através da adição de partículas metálicas) e da interferência eletromagnética (através da adição de materiais condutores);
- Aumento da dureza (adição de borracha ou outros elastômeros);
- Diminuição ou inibição da oxidação dos polímeros (adição de antioxidantes);
- Redução da tendência de atração de cargas elétricas, que podem provocar choques, incêndios ou atrair poeira (adição de agentes anti-estáticos);
- Diminuição da densidade (aditivos precursores de espumas). Estes aditivos promovem ainda o aumento do isolamento térmico e a diminuição da retração;
- Prevenção da perda de brilho, descoloração e desintegração devido à radiação ultra-violeta (adição de estabilizadores ultra-violeta);
- Alteração da cor (adição de corantes).

3.2.2. Processos de produção de materiais compósitos reforçados com fibras

Segundo Camatta et al (2012), existe uma grande variedade de metodologias de produção de materiais FRP. Entre elas, podem-se citar os métodos mais simples e manuais como os processos de laminação *hand lay-up* (laminação manual) e *spray-up* (laminação à pistola ou por aspersão). Esses dois métodos são processos simples que surgiram no pós-guerra, nos anos 40, sendo geralmente utilizados com reforços de fibra de vidro. Além desses métodos manuais, existem diversos métodos industriais, como o RTM (*Resin Transfer Molding*), processos de infusão e de infusão a vácuo, SMC (*Sheet Moulding Compound*), BMC (*Bulk Molding Composite*), Centrifugação, Laminação contínua, Enrolamento filamentar e Pultrusão.

Considerando a existência dessa variedade de métodos de produção dos FRP, Sousa (2011) salienta que a escolha do método de produção de compósitos é, em geral, mais crítica para os compósitos do que para a maioria dos materiais convencionais. Isso se deve ao fato de que cada processo é limitado pelas formas e microestruturas que pode ser produzidas, além dos materiais que podem ser

utilizados. Mesmo assim, os processos produtivos ainda permitem boa versatilidade. Os processos típicos para materiais compósitos consistem numa série de passos, como mostra a figura 2. Dentro de cada etapa, existem variáveis que são opcionais, podendo-se também excluir algumas dessas etapas.

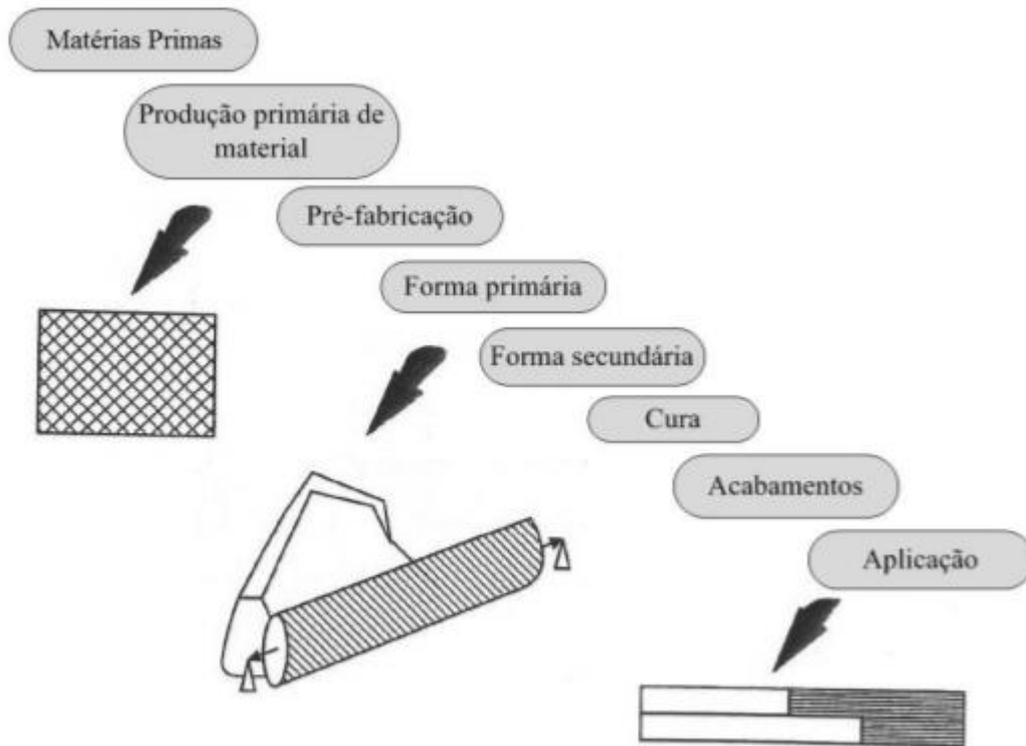


Figura 5 – Processo de transformação dos materiais, adaptado de Sousa (2011).

Em um cenário ideal, com elevada produtividade, se minimizam os custos de conversão das matérias primas e dos acabamentos, maximizando-se a flexibilidade geométrica e capacidade de customização das propriedades, tudo isso suportado por um bom sistema de controle da qualidade na linha de montagem que não cause mudanças significativas ao processo. Partindo-se desses objetivos, o esquema de produção de estruturas ou materiais compósitos pode ser descrito utilizando-se oito etapas genéricas:

- I. Projeto – Definição da forma geométrica e tensões esperadas;
- II. Escolha das matérias primas;

- III. Esquema (orientação e configuração) dos reforços;
- IV. Montagem do reforço e do sistema de resina;
- V. Exposição do conjunto matriz-reforços-aditivos a temperatura e pressão apropriada de modo a concretizar o processo de cura da resina;
- VI. Processo de acabamento;
- VII. Controle de qualidade e inspeção através de métodos não destrutivos.

Ainda segundo Sousa (2011), esses processos de produção podem ser divididos de forma genérica em dois grandes grupos: Métodos diretos e métodos indiretos. Os métodos diretos não utilizam nenhuma forma de pré-tratamento ou pré-processamento dos reforços ou da resina. Já os métodos indiretos necessitam que as suas matérias primas sejam pré-processadas para que obtenham formas adequadas para o processo. Exemplos desses materiais pré-processados são os prepreps (materiais pré-impregnados porém ainda sem carga) e suportes para moldagem de folhas.

Existem processos que pertencem às duas categorias, pois permitem a produção tanto com reforços na forma de mechas de fios contínuos, cordões e tecidos (modo direto) quanto com reforços já previamente moldados (modo indireto). A pultrusão e o enrolamento filamental são exemplos desses processos. O quadro 2 apresenta os processos mais comuns para produção de FRP, classificando-os dentro dessa divisão geral. Em geral, a qualidade dos métodos indiretos é superior, porém os custos associados a ele são significativamente maiores. Além disso, eles produzem características técnicas muitas vezes superiores às necessárias para a aplicação estrutural. Por isso muitas vezes prefere-se os métodos diretos para o mercado de ampla aplicação.

Quadro 2 – Classificação de processos produtivos de FRP, adaptado de Sousa (2011).

Métodos diretos	Métodos indiretos
Moldagem por contato	Moldagem por compressão
Projeção simultânea	Autoclave
Pultrusão	Pultrusão
Enrolamento filamental	Enrolamento filamental
Moldagem por injeção	Moldagem por transferência

3.2.2.1. Pultrusão

De acordo com Chawla (2012), pultrusão é um processo que gera perfis compósitos de matriz polimérica com reforço de fibras orientadas principalmente na direção axial e com seção transversal contínua. Nesse processo utilizam-se diversas bobinas de fibras contínuas e mantas ou tecidos. Esses reforços de fibras passam através de um banho de resina contendo um catalisador. Após isso, as fibras impregnadas com resina passam através de uma série de limpadores para remover o excesso de polímero e através de alinhadores antes de entrar em um molde aquecido. Nesse sentido, a remoção adequada do excesso de resina é importantíssima para a correta produção do material. A resina não impregnada é removida e retorna para o banho de resina.

O molde deve ter o formato exato do perfil a ser produzido, e as dimensões devem levar em conta as retrações que a resina sofrerá durante a cura. Passando através desse molde aquecido a resina sofre o processo de cura e o compósito é puxado para fora do molde pelo outro lado através de tracionadores. Ao final da linha de produção, as peças são cortadas em tamanhos pré-definidos por uma serra. Um esquema da máquina de pultrusão pode ser visto na figura 6.

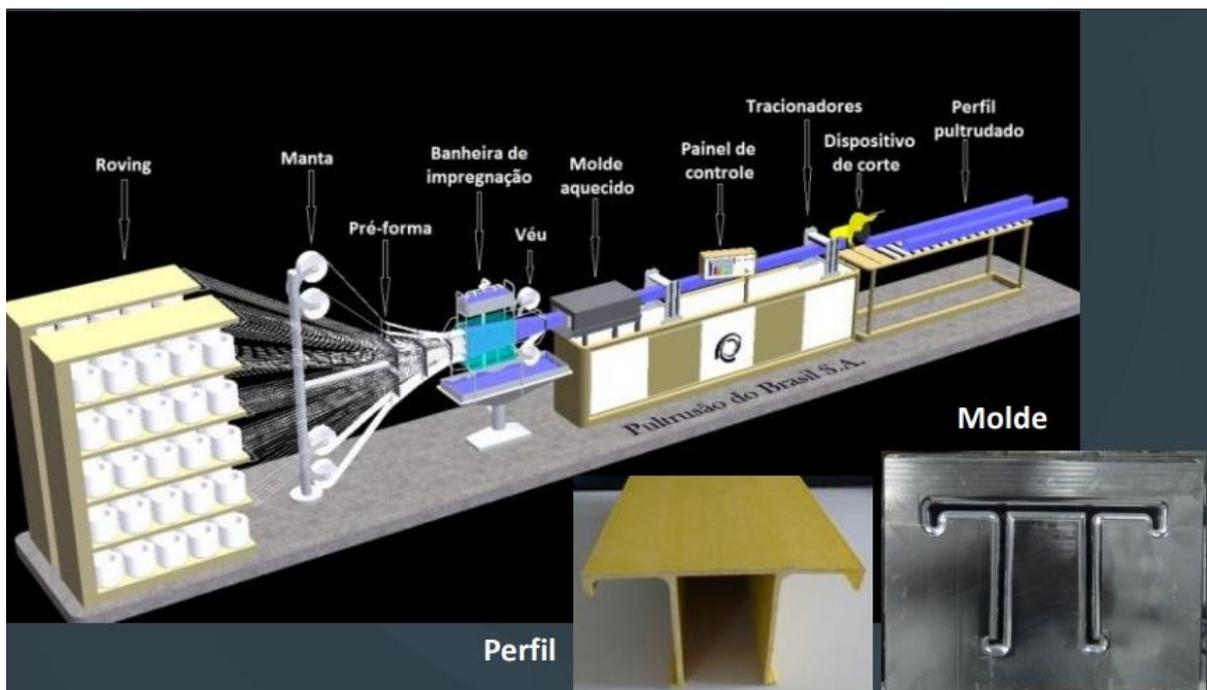


Figura 6 – Esquema de uma máquina de pultrusão. Fonte: Pultrusão do Brasil S.A.

Esse processo é normalmente utilizado para produção contínua de perfil compósito, sendo que a velocidade pode variar entre 10-200 cm/min, dependendo do tipo de resina e dimensões do produto final. Através desse processo podem-se fazer perfis compósitos de larguras que chegam a 1,25 m e com mais de 60% de volume de fibras. Sendo assim, há produtividade maior desse método em relação aos demais devido ao fato de ser um processo contínuo, com boa velocidade de produção e baixas perdas.

Por se tratar de um processo contínuo, é necessário o suprimento contínuo da fibra utilizada, bem como que as dimensões do perfil que esteja sendo produzido sejam constantes. Assim, as principais vantagens desse processo são o baixo custo de mão de obra e a consistência dimensional do produto obtido, onde formatos de hastes, canais, ângulos e planos são facilmente produzidos, como visto na figura 7.



Figura 7 – Diferentes sessões transversais produzidas no processo de pultrusão.
Fonte: Pultrusão do Brasil S.A.

Os tipos de reforços mais utilizados são os *rovings*, ou seja, feixes contínuos de fibra. Estes feixes são utilizados por serem facilmente saturado de resina no momento da impregnação. Outro reforço comumente utilizado são as mantas

constituídas de fibras contínuas distribuídas em orientações aleatórias. Esse segundo tipo de reforço é utilizado para se obter resistência na direção transversal ao perfil. Outros tipos de reforços que podem ser utilizados, apesar de não tão comuns, são as mantas contínuas de fios descontínuos ordenados em direções aleatórias unidos por um aglutinante, os tecidos e as fitas trançadas. Em geral, esses reforços são utilizados para reforçar o perfil em ângulos de 0° , 90° ou um ângulo arbitrário em relação ao ângulo de carregamento do perfil. Nesse processo, as resinas mais comuns a serem utilizadas são as de poliéster, viniléster e epoxy. A estrutura final obtida a partir do processo de pultrusão pode ser vista nas imagens de microscopia eletrônica abaixo:

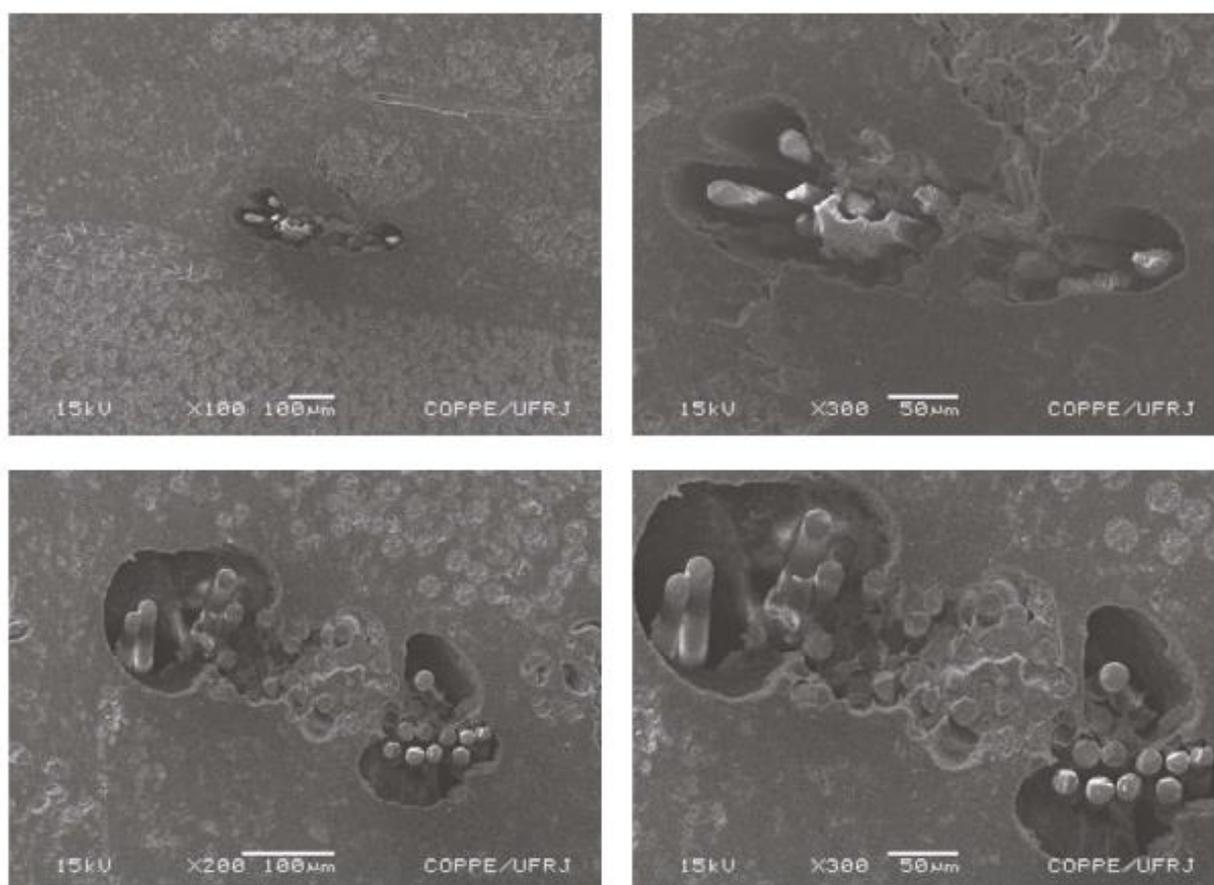


Figura 8 – Fotomicrografia obtida por MEV de sessão transversal de perfil pultrudado, com foco em defeito estrutural devido ao mal preenchimento de resina. Adaptado de Vieira (2008).

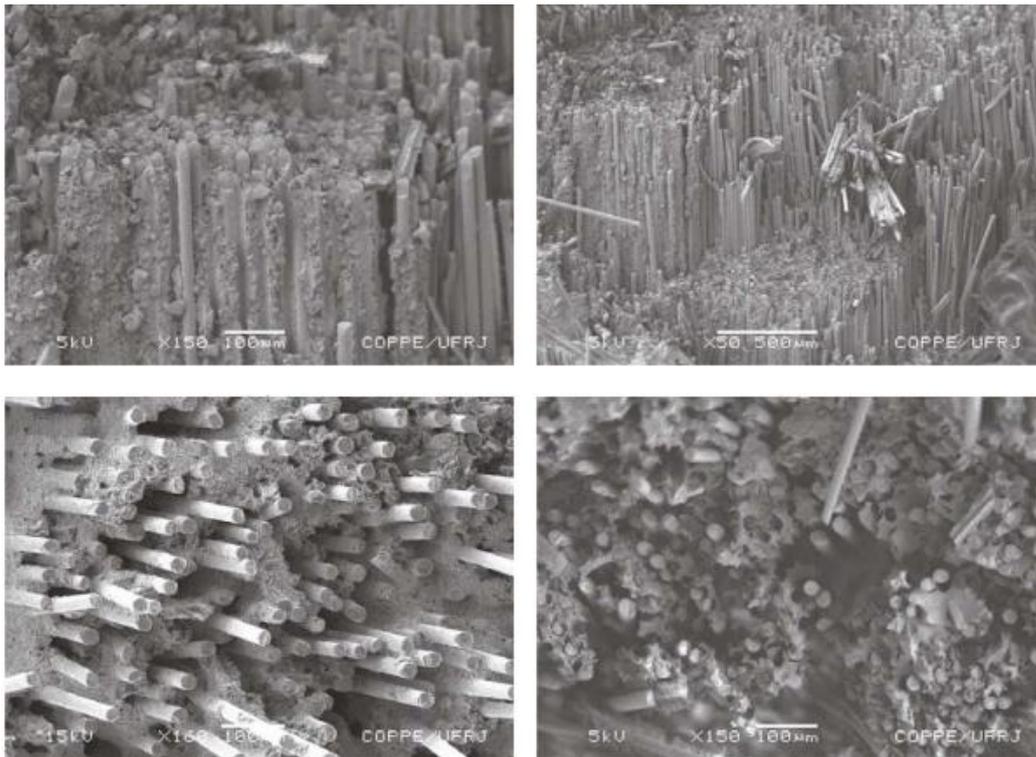


Figura 9 – Fotomicrografia obtida por MEV das superfícies de ruptura por tração em perfis pultrudados.

3.3. Características gerais dos polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP)

3.3.1. Propriedades típicas dos perfis pultrudados de GFRP

Segundo Nunes (2012), os perfis pultrudados normalmente são constituídos de placas ortotrópicas onde as fibras estão orientadas unidirecionalmente e as mantas de fibras estão orientadas em outras direções. Por esse motivo, esses materiais possuem resistências diferentes quando testados na direção longitudinal (paralela às fibras) ou transversal (perpendicular às fibras). Na Tabela 2 podem ser vistas as propriedades mecânicas típicas de perfis pultrudados de GFRP com teor de fibras entre 25 e 40% das empresas europeias Strongwell e Creative Pultrusions.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas típicas de um perfil putrudado de FRP. Adaptado de Nunes (2012).

Métodos diretos	Resistência (Mpa)	Módulo elástico (Gpa)
Tração longitudinal	207 - 317	18 - 28
Tração transversal	48 - 83	6 - 10
Compressão longitudinal	207 - 359	18 - 26
Compressão transversal	110 - 138	7 - 13
Corte no plano	31 - 48	3 - 3,4
Corte interlaminar	27 - 31	-
Flexão longitudinal	207 - 338	11 - 14
Flexão transversal	69 - 131	6 - 12 -
Coefficiente de Poisson	0,33 - 0,35	

Segundo Martins (2011), comparam os perfis pultrudados com outros materiais utilizados como perfis estruturais, o pultrudado de GFRP se destaca por possuir uma resistência igual ou superior à do aço e comportamento praticamente elástico linear até a ruptura. Essa análise comparativa pode ser vista na figura 3. A mesma comparação pode ser feita para tenção última de tração e para o módulo de elasticidade em flexão, como visto na figura 4

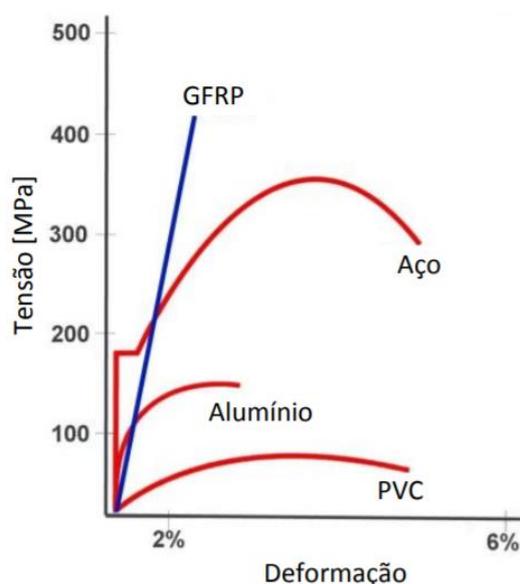
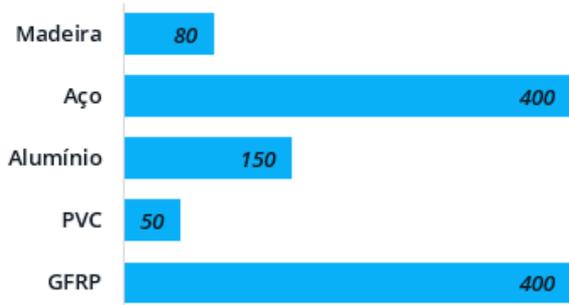


Figura 10 – Comparação do comportamento estrutural de perfis pultrudados de GFRP com outros materiais estruturais.

Tensão Última de tração (MPa)



Módulo de elasticidade em flexão (GPa)

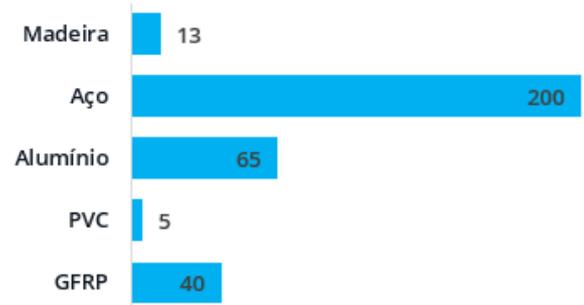


Figura 11 – Comparação das propriedades mecânicas de perfis GRFP com madeira, aço, alumínio e PVC. Adaptado de Martins (2011).

Na análise das figuras 3 e 4 se percebem as diferenças nas propriedades mecânicas de GFRP em relação ao aço, que é o principal material concorrente em aplicações estruturais:

- Relação tensão-deformação elástica-linear até a ruptura, o que contrasta com o comportamento dúctil do aço;
- Tensão última superior a da maioria dos aços estruturais;
- Módulo de elasticidade reduzido, variando entre 10% a 20% do módulo de elasticidade do aço.

Outros aspectos importantes quando considerada a compra de perfis pultrudados são a densidade, o coeficiente de dilatação térmica e o coeficiente de condutividade térmica dos perfis GFRP. A figura 5 mostra a comparação dessas propriedades do perfil fabricado pela Fiberline em comparação com outros materiais (aço, alumínio, madeira e PVC).

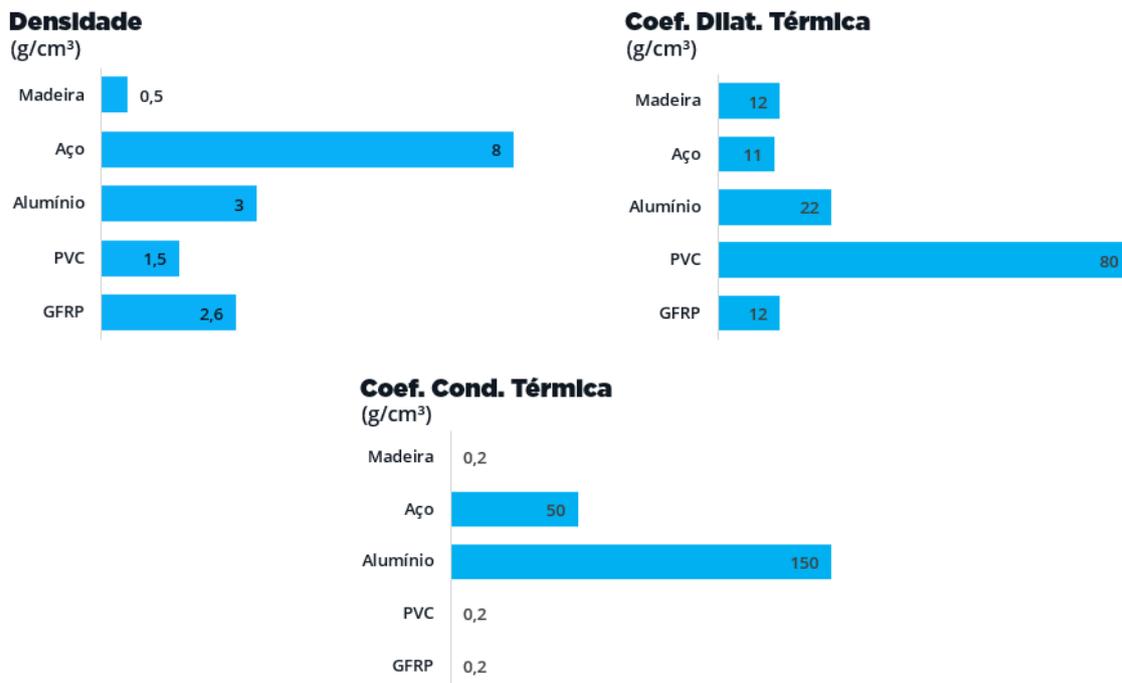


Figura 12 – Comparação entre as propriedades físicas e térmicas dos perfis de GFRP com outros materiais (madeira, aço, alumínio e PVC). Adaptado de Martins (2011).

Da análise da figura 5, podem-se verificar as seguintes propriedades dos perfis GFRP e relação ao aço:

- O pultrudado é um material extremamente leve, com uma densidade cerca de 4 a 5 vezes inferior à do aço;
- O coeficiente de dilatação térmica é semelhante ao do aço;
- O coeficiente de condutividade térmica é muito reduzido e significativamente inferior ao do aço.

3.3.2. Vantagens e limitações

Assim, de forma a resumir as vantagens e limitações do material pultrudado com base em suas características gerais, Sousa (2011) apresenta o quadro abaixo.

Quadro 3 – Vantagens e limitações de perfis pultrudados GFRP. Adaptado de Sousa (2011).

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> • Baixo peso específico • Elevada relação entre resistência mecânica e peso próprio • Possibilidade de produção de qualquer forma estrutural • Elevada resistência à fadiga • Elevada resistência à corrosão • Transparência eletromagnética • Facilidade no transporte e instalação em obras • Baixo custo de manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> • Reduzido módulo de elasticidade • Comportamento frágil • Necessidade de desenvolvimento de novas formas estruturais para materiais inteiramente compósitos e soluções híbridas • Necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias de processamento ao nível das ligações • Ausência de regulamentação específica • Custos iniciais ainda pouco competitivos na maioria das aplicações

3.4. Durabilidade de polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP)

Segundo Karbhari et al (2003), foram identificados seis formas de aplicação de FRP que são de máxima relevância para o curto prazo: barras de reforço, reforço externo para estruturas de concreto, revestimentos e invólucros para construção de colunas de resistência a abalos sísmicos, *piers*, paredes de alvenaria, pontes, e perfis estruturais. Nessas condições de aplicação, existem diversos aspectos ambientais que afetam o desempenho e durabilidade do pultrudado a curto e longo prazo. Essas condições devem ser consideradas não apenas individualmente, mas também em conjunto, uma vez que sabe-se que a sinergia entre efeitos resultantes da combinação de múltiplos agentes ambientais potencializa o efeito ambiental individual, tanto na presença ou na ausência de esforços mecânicos (tensões) sobre os perfis pultrudados.

Por esse motivo, foram identificadas algumas condições ambientais que individualmente tem a capacidade de afetar a durabilidade dos perfis FRP. São elas:

- Soluções aquosas e umidade;
- Ambientes alcalinos;
- Efeitos térmicos;
- Radiação ultravioleta;
- Fogo;
- Fadiga;
- Fluência;

Descreve-se a seguir de forma mais detalhada as condições ambientais mencionadas acima.

3.4.1. Soluções aquosas e umidade

Segundo Karbhari et al (2003), a umidade difunde em todos os polímeros orgânicos, gerando mudanças nas características termofísicas, mecânicas e químicas. O principal efeito dessa absorção de umidade está na própria resina, que pode sofrer hidrólise, plastificação, saponificação ou outros mecanismos que causam mudanças reversíveis e irreversíveis na estrutura do polímero.

Em alguns casos, a umidade pode interferir na interface entre matriz e fibra reduzindo a ligação entre elas, causando perda na integridade do material nessas regiões. Esse impacto pode não só acontecer na matriz e sua interface com as fibras, mas também na própria fibra. A umidade inicia a degradação da fibra extraindo íons da mesma, gerando assim mudança em sua estrutura.

Entretanto, pode-se facilmente proteger as fibras de maneira significativa através de uma boa seleção do tipo de resina, das condições do processo e com a aplicação de recobrimentos de gel ou tinta. Como a maioria dos perfis pultrudados

utilizados na construção civil entrarão em contato com umidade ou soluções aquosas, é de extrema importância que se leve em consideração os efeitos dessas soluções a curto e longo prazo quando o material for produzido.

A criticidade desses efeitos e do cuidado que deve ser tomado no projeto do produto pode variar com o tipo de aplicação e se o tipo de contato é contínuo, intermitente ou possui interações sinérgicas com outras intempéries. Um resumo dessa criticidade pode ser visto na tabela 3.

Tabela 3 – Ranking da criticidade dos efeitos de umidade e soluções aquosas nos materiais compósitos. Adaptado de Karbhari et al (2003).

Área de aplicação	Exposição contínua		Exposição intermitente		Efeitos sinérgicos	
	A ^a	B ^b	A	B	A	B
<i>Reforços internos</i>						
Rebar	6	-	6	-	8	-
<i>Reforços externos</i>						
Placas	10	10	10	8	10	10
Colunas	10	10	10	10	10	10
Vigas	10	10	10	10	10	10
<i>Rotofit sísmicos</i>						
Colunas	8	8	6	6	8	8
Muros	8	10	6	8	10	10
<i>Sistemas de docas</i>						
Vigas convencionais	10	8	6	6	10	8
Vigas compósitas	10	10	6	8	10	10
<i>Elementos estruturais</i>						
Painéis de parede/perfis	6	-	6	-	8	-

Nota: Ranqueamento 1 indica criticidade baixa, enquanto ranqueamento 10 representa alta criticidade.

A^a: Efeitos no nível do polímero.

B^b: Efeitos no nível da interface/ligação/adesivo.

Com base nos conhecimentos atuais dessa interação, deve-se enfatizar alguns aspectos quanto ao efeito da umidade e de soluções aquosas no pultrudado:

- Para que se reduza a possibilidade de uma movimentação rápida da umidade ou de produtos químicos da solução para dentro da estrutura do pultrudado, é importantíssimo que exista uma camada de espessura apropriada de perfil rico em resina na parte externa do material. Essa camada deve permanecer sem rachaduras durante o tempo de utilização do perfil;
- A cura realizada em níveis abaixo do adequado aumenta a suscetibilidade da resina e do pultrudado como um todo à ação da umidade. Portanto, é importante que a cura seja feita de maneira completa antes de aplicação em campo do material;
- Ao se projetar o material para uma determinada aplicação, os efeitos conjuntos das soluções aquosas com a aplicação de tensão e temperatura devem ser estudados no nível da fibra, da interface, da matriz e do compósito como um todo;
- Devido ao efeito da umidade na temperatura de transição do vidro, os compostos devem ser curados de forma que a temperatura nas fibras atinja uma temperatura de ao menos 30° F acima da temperatura que o material será submetido durante sua utilização;
- Devido a todos os fatores citados até aqui relacionados à degradação dos materiais compósitos, os níveis de tensão na aplicação do material devem estar 25% abaixo do limite garantido no projeto da estrutura.

3.4.2. Ambientes alcalinos

Ainda segundo Karbhari et al (2003), as materiais compósitos de fibra de vidro podem entrar em contato com ambientes alcalinos através de diversas situações, como produtos químicos alcalinos, contato com o solo ou soluções que difundiram através do mesmo e contato com concreto. Uma grande preocupação nesse aspecto é o contato com água de poros de concreto devido a alta concentração de hidróxido, que podem levar à pHs de até 13.5. Estudos mostram que a degradação da fibra de vidro pura em contato com soluções alcalinas acontece através de diversos mecanismos, como por exemplo, corrosão, hidroxilação, hidrólise e lixiviação.

Apesar da presença de resina envolvendo os filamentos de fibra de vidro proteger esse reforço, o contato do perfil com soluções básicas pode acelerar a degradação da ligação matriz-reforço e até mesmo da própria resina, principalmente se o perfil não estiver completamente curado. Através do estudo dessa interação do perfil com soluções alcalinas a tabela 4 pode ser elaborada, e os seguintes aspectos podem ser salientados:

- Como a resina polimérica possui um papel crítico na proteção do perfil à degradação alcalina, deve-se dar preferência para as resinas epóxi e viniléster apropriadas no caso de aplicações onde esse contato pode acontecer. Não se recomenda o uso de resinas poliésteres.
- Para que se reduza a possibilidade de uma movimentação rápida da solução alcalina para dentro da estrutura do pultrudado, é importantíssimo que exista uma camada de espessura apropriada de perfil rico em resina na parte externa do material. Essa camada deve permanecer sem rachaduras durante o tempo de utilização do perfil;
- A cura realizada em níveis abaixo do adequado aumenta a suscetibilidade da resina e do pultrudado como um todo à ação dessas soluções. Portanto, é importante que a cura seja feita de maneira completa antes de aplicação em campo do material;
- Da mesma maneira que o observado devido à ação da umidade, os níveis de tensão na aplicação do material devem estar abaixo do limite garantido no projeto da estrutura. A recomendação para umidade foi de 25%, porém para o caso de soluções alcalinas recomenda-se 30%.

Tabela 4 - Ranking da criticidade dos efeitos de soluções alcalinas nos materiais compósitos. Adaptado de Karbhari et al (2003).

Área de aplicação	Condições secas e tensão aplicada		Condições úmidas e sem tensão aplicada		Condições úmidas e tensão aplicada		Condições úmidas e tensão e/ou temperatura elevada	
	Aa	Bb	A	B	A	B	A	B
<i>Reforços internos</i>								
Rebar	8	8	6	6	10	10	10	10
<i>Reforços externos</i>								
Placas	8	8	6	6	10	10	10	10
Colunas	8	8	6	6	10	10	10	10
Vigas	8	8	6	6	10	10	10	10
<i>Rotrofit sísmicos</i>								
Colunas	8	8	6	6	10	10	10	10
Muros	8	8	6	6	10	10	10	10
<i>Sistemas de docas</i>								
Vigas convencionais	8	8	6	6	10	10	10	10
Vigas compósitas	8	8	6	6	10	10	10	10
<i>Elementos estruturais</i>								
Painéis de parede/perfís	8	8	6	6	10	10	10	10

Nota: Ranqueamento 1 indica criticidade baixa, enquanto ranqueamento 10 representa alta criticidade.

A^a: Efeitos no nível do polímero.

B^b: Efeitos no nível da interace/ligação/adesivo.

3.4.3. Efeitos térmicos

Para Sousa (2011), a temperatura pode causar alterações nas propriedades dos materiais FPR, incidindo direta e indiretamente na durabilidade dos mesmos. Segundo ele, isso ocorre principalmente em temperaturas extremas, como: Temperaturas acima da temperatura de cura, ciclos de gelo e degelo, variações da temperatura e ciclos térmicos. Para o caso de resinas que não estejam completamente curadas, os efeitos da elevação da temperatura podem ser benéficos. Entretanto, para a maioria dos casos, o efeito é negativo.

A maioria dos materiais se expande com a elevação da temperatura. No caso do pultrudado, o coeficiente de expansão térmica da matriz é de uma ordem de grandeza superior ao das fibras. Assim, os materiais que integram o compósito apresentam comportamentos diferentes com a elevação da temperatura, podendo gerar tensões residuais na interface entre fibra e matriz. Essas tensões são diretamente proporcionais à diferença de temperatura observada.

Para temperaturas muito baixas, o efeito das tensões residuais é de maior importância pois existe uma contração da matriz que não é acompanhada pelas fibras. Dessa forma, as tensões podem ser suficientes para gerar fissuras na matriz. Isso gera endurecimento da mesma, perda de resistência e aumento da permeabilidade do material à umidade.

3.4.4. Radiação ultravioleta

Segundo Martins (2011), a radiação emitida pelo sol chega à terra em um conjunto de comprimentos de onda que podem romper as ligações nos materiais poliméricos. Esse mecanismo chama-se fotodegradação, e afeta apenas a camada superficial do material, na ordem dos 50 µm a 100 µm iniciais. Apesar disso, esse efeito pode gerar tensões localizadas nos perfis GFRP que causam prejuízos ao material.

O pultrudado que não for preparado para resistir à radiação UV através de um revestimento ou tinta protetora irá sofrer degradação superficial a longo prazo que poderá deixar fibras expostas ao ambiente. Quando isso acontece os perfis perdem a forma estética, reduzindo o brilho e conferindo um aspecto amarelado. Também pode afetar quem utiliza as estruturas pultrudadas, provocando irritações na pele devido ao contato com a fibra de vidro.

Ao se realizar ensaios de flexão em corpos de prova de pultrudado de poliéster que foram envelhecidos por 1000 horas em uma câmara de teste de intemperismo acelerado e comparar com os resultados obtidos para corpos de prova envelhecidos naturalmente durante 1 e 2 anos, conclui-se que a perda de resistência e de módulo de elasticidade não é significativa. Entretanto, quando a fotodegradação gerar

microfissuras ou exposição dos reforços, esse dano pode acelerar a degradação devido ao efeito de outras variáveis, como umidade e produtos químicos.

3.4.5. Fogo

Ainda segundo Martins (2011), a resistência ao fogo é uma das grandes preocupações da aplicação de pultrudado de forma estrutural. Essa preocupação é originada no fato da matriz ser composta por resinas orgânicas, em que o controle de propagação das chamas pode ser difícil, além de liberar gases tóxicos durante a queima. Dessa forma, existem duas grandes preocupações na aplicação desse material:

- Caso sejam utilizados em espaços confinados, é necessário avaliar o nível de toxicidade dos gases liberados em situação de incêndio, projetando o produto de forma a evitar que isso ocorra;
- Caso sejam utilizados como elementos estruturais, é necessário saber se a redução da resistência gerada pela exposição ao fogo é significativa para causar um possível colapso.

Essa segunda preocupação é elevada para muitos tipos de materiais pultrudados. As resinas poliéster, por exemplo, começam a perder resistência a temperaturas próximas dos 100° C. Esse valor é consideravelmente abaixo da temperatura em que o aço perde resistência. Apesar disso, como o coeficiente de condutibilidade térmica do pultrudado é inferior ao aço, a propagação de calor é reduzida, fazendo com que a temperatura do pultrudado aumente de forma mais lenta que estruturas metálicas. Assim, ao se projetar uma estrutura pultrudada, devem-se considerar três aspectos referentes ao fogo:

- Efeito de temperaturas elevadas próximas ou superiores à temperatura de transição vítrea;
- Efeito da combustibilidade do material;
- Efeito da toxicidade dos gases liberados.

A fim de reduzir os impactos da ação do fogo, algumas medidas preventivas podem ser tomadas. Existem pinturas e proteções especiais que postergam esses efeitos. Além disso, existem aditivos que atuam como retardadores de chama, removendo calor da combustão, reduzindo a concentração de gases combustíveis e impedindo a geração de gases tóxicos. Conforme o projeto do produto, os materiais compósitos podem inclusive ser classificados como auto-extinguíveis.

3.4.6. Fadiga

Segundo Sousa (2011), a fadiga é definida como o fenômeno físico que causa danos ou ruptura de um material ou componente estrutural após aplicação de cargas cíclicas, mesmo que o nível dessas cargas não seja suficientemente elevado para produzir efeitos negativos nos primeiros ciclos. Esse efeito pode ser gerado a partir de ciclos alternados de solicitações mecânicas, térmicas ou mesmo químico.

Para as solicitações mecânicas, a ruptura do material ocorre geralmente em ligações ou descontinuidades geométricas. Ela inicia-se através de microfissuras na matriz e degradação das ligações na interface entre fibras e matriz.

3.4.7. Fluência

Ainda para Sousa (2011), a fluência consiste na deformação sob tensão constante, ao longo do tempo. Ela é normalmente um efeito indesejado e muitas vezes é o fator limitante da vida útil do material pultrudado. Devido à natureza viscoelástica das resinas e aditivos utilizados durante sua produção, os FRP são mais suscetíveis à fluência do que o aço.

Esse comportamento depende da orientação das fibras, da taxa de fibras no compósito e da própria estrutura do material. Mesmo assim, a predominância desse efeito no pultrudado se dá devido a fluência do material da matriz polimérica. Ao se deformar o perfil pultrudado, o processo de fluência ocorre devido à combinação do surgimento de microfissuras na matriz e da perda da ligação na interface matriz-

reforço. O surgimento dessas microfissuras pode ser originado devido a fatores como a fadiga ou mesmo condições ambientais. Portanto, ao se projetar os perfis, é necessário que se estude os efeitos cruzados das diversas intempéries e efeitos que o material irá sofrer para se estudar os efeitos da fluência.

Nota-se assim que os GFRP são mais suscetíveis à ruptura devido a fluência mesmo em tensões relativamente reduzidas. Segundo Sousa (2011), alguns autores demonstram que existe uma probabilidade de ruptura das fibras de 10% após 75 anos de exposição às condições ambientais, para um nível de tensão de cerca de 5% da tensão última do material.

4. Metodologia

Os novos materiais compósitos produzidos pela Pultrusão do Brasil Tecnologia S/A são caracterizados em quatro ensaios visando a obtenção de suas propriedades. São eles:

1. Resistência a tração: O ensaio consiste na aplicação de uma carga axial alongando o material. Nesse ensaio, cria-se uma curva de tensão vs deformação do material, onde a tenção limite para a ruptura é capturada.
2. Resistência a flexão: O ensaio consiste na aplicação de uma carga perpendicularmente ao eixo do corpo de forma a curva-lo. Mede-se a tensão máxima em que há a ruptura nessas condições.
3. Força de cisalhamento interlaminar: Consiste na aplicação de forças opostas em três pontos conforme mostrado na figura 12. A resistência interlaminar medida é uma medida aparente da resistência da adesão entre as várias camadas existentes no compósito.
4. Resistência à compressão: Consiste em aplicar uma carga axial comprimindo o material. Nesse ensaio, mede-se a tensão máxima em que há a ruptura nessas condições.

Em dezembro de 2015 a empresa realizou ensaios para a caracterização de um perfil pultrudado produzido a partir de resina poliéster insaturada, isoftálica, e

Roving de fibra de vidro de peso linear Tex 500. Os dados dos ensaios foram fornecidos para comparação com a literatura, sendo o trabalho de Nunes (2012) o escolhido como referência. Os corpos de prova testados foram produzidos com a parte inferior de um perfil tipo U, tendo 6mm de espessura, aproximadamente 20mm de largura e 50mm de comprimento. As dimensões foram consideradas aproximadas devido à falta de informação por parte da empresa quanto a essas especificações. Foram seguidos os padrões das normas ASTM citadas a seguir, porém não foi possível conferir as especificações devido ao preço elevado para acesso a elas.

4.1. Determinação da resistência à tração

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D638-10, com corpos de prova tipo I preparados pela Pultrusão do Brasil. A velocidade de afastamento das garras do equipamento foi definida em 50mm/min. O condicionamento dos corpos de prova foi de 40h a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa. Foram ensaiados cinco corpos de prova, sendo que o resultado é a média de três. O ensaio foi realizado em corpos de prova obtidos nos sentidos longitudinal e transversal à direção do roving.

4.2. Determinação das propriedades de flexão

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D790-10 – Método A, com corpos de prova preparados pela Pultrusão do Brasil. A distância entre as bases do suporte dos corpos de prova foi definida em 95,68mm e a velocidade de ensaio em 1,37 mm/min. Os corpos de prova foram condicionados por 40h a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL2000 com célula de carga Classe 1. O ensaio foi realizado com corpos de prova obtidos nos sentidos longitudinal e transversal à direção do roving.

4.3. Determinação da força de cisalhamento interlaminar

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D2344/D2344M-13, com corpos de prova preparados pela Pultrusão do Brasil. A velocidade do ensaio foi definida em 1,00 mm/min. Os corpos de prova foram condicionados por 40h a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa. Foi utilizada uma Máquina Universal de Ensaio EMIC DL2000 com célula de carga Classe 1. O ensaio foi realizado com corpos de prova obtidos nos sentidos longitudinal e transversal à direção do roving.

4.4. Determinação da resistência à compressão

O ensaio foi realizado conforme a norma ASTM D695, com corpos de prova preparados pela Pultrusão do Brasil. A velocidade do ensaio foi definida em 1,30 mm/min. Os corpos de prova foram condicionados a 25°C e 50% de umidade relativa. O ensaio foi realizado com corpos de prova obtidos nos sentidos longitudinal e transversal à direção do roving.

5. Resultados e discussão

5.1. Determinação da resistência à tração

Os resultados obtidos no ensaio estão nas tabelas 5 e 6. Foi obtida uma tensão máxima média de 229,2 MPa e um Módulo de elasticidade médio de 43,9 GPa no ensaio de resistência à tração no sentido longitudinal do reforço. Os resultados obtidos são superiores ao do Poliéster insaturado sem reforço que tem uma resistência à tração entre 20 e 70 MPa e um módulo de elasticidade de 2 à 3 GPa, conforme evidenciado na Tabela 1.

Estes resultados confirmam um dos objetivos da produção dos GFRP, que é de melhorar as propriedades mecânicas da matriz e ainda assim manter as propriedades químicas. Mesmo no sentido transversal às fibras, as resistências da

matriz foram superadas. Os valores médios obtidos também estão de acordo com as propriedades mecânicas típicas de perfis pultrudados, conforme mostrado na tabela 2, com os perfis da Pultrusão do Brasil superando-os em resistência à tração transversal e no módulo de elasticidade tanto no sentido transversal quanto longitudinal para tração.

Ao se comparar com os valores típicos do aço mostrados na figura 4, os perfis pultrudados testados obtiveram tensão máxima de tração de 57,3% do valor do aço e módulo de elasticidade de 21,9% o valor do aço. Isso demonstra também outra vantagem do pultrudado, que é a de elevada razão entre resistência e densidade mesmo com resina poliéster, que fornece resistências mecânicas inferiores a outras resinas, como as de Vinil Éster ou Epoxi.

Tabela 5 – Resultados de resistência à tração da amostra no sentido longitudinal.

Corpo de Prova	Tensão Máxima, MPa	Módulo de Elasticidade, MPa	Módulo de Elasticidade, GPa
1	229,5	32971	33,0
2	229,4	51577	51,6
3	228,6	47197	47,2
Média	229,2	43915	43,9
Desvio Padrão	0,49	9728	9,7

Tabela 6 – Resultados e resistência à tração da amostra no sentido transversal.

Corpo de Prova	Tensão Máxima, MPa	Módulo de Elasticidade, MPa	Módulo de Elasticidade, GPa
1	92,8	14843	14,8
2	87,7	12534	12,5
3	96,2	13250	13,2
Média	92,2	13542	13,5
Desvio Padrão	4,28	1182	1,18

5.2. Determinação das propriedades de flexão

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão podem ser vistos na tabela 7. Novamente, os dados obtidos estão condizentes com as propriedades típicas do perfil pultrudado, com os perfis da Pultrusão do Brasil superando os dados da tabela 2 em

Resistência à flexão longitudinal e transversal, e também no módulo de elasticidade na flexão longitudinal.

Tabela 7 – Resultados obtidos nas avaliações da resistência à flexão.

Sentido de obtenção dos corpos de prova	Logitudinal	Transversal
Tensão na Máxima Flexão, MPa (média)	437,6	186,1
Módulo de Elasticidade na Flexão, MPa (média)	20314	11190

5.3. Determinação da força de cisalhamento interlaminar

Os resultados dos ensaios podem ser vistos na tabela 8. Novamente, os resultados estão próximos aos valores típicos citados na tabela 2, com os perfis da Pultrusão do Brasil superando a força de corte interlaminar no sentido longitudinal.

Tabela 8 – Avaliação da força de cisalhamento interlaminar.

Sentido de obtenção dos corpos de prova	Logitudinal	Transversal
Força de cisalhamento (F^{sb5}), MPa	33,4	20,8
Módo de falha	Deformação Inelástica	Cisalhamento interlaminar / Flexão

5.4. Determinação da resistência à compressão

Os resultados do ensaio podem ser vistos nas tabelas 9 e 10. Para a compressão longitudinal foi obtida resistência média de 249,65 MPa, alongamento de 1,83% e módulo de elasticidade de 11,8 GPa. Para a compressão transversal, obteve-se resistência média de 72,58 MPa, alongamento de 2,01% e módulo de elasticidade de 3,5 GPa. Novamente os resultados estão dentro do esperado para os valores típicos de perfis FRP, sendo apenas o módulo de elasticidade na compressão transversal inferior aos valores esperados

Tabela 9 - Resultados de resistência à compressão da amostra no sentido longitudinal.

Amostra Nº	Id. Amostra	Força Máxima, N	Limite de resistência, Mpa	Alongamento, %	Módulo de Elasticidade, MPa	Área Transversal, mm ²
1	CP 1	-20545,26	-255,54	1,96	17092,94	80,400
2	CP 2	-19343,93	-240,60	2,06	2961,99	80,400
3	CP 3	-20300,09	-252,49	1,60	17471,34	80,400
4	CP 4	-24198,29	-300,97	1,88	18301,95	80,400
5	CP 5	-15171,13	-188,70	1,58	15146,22	80,400
6	CP 6	-22335,00	-277,80	1,85	17982,52	80,400
7	CP 7	-18706,48	-232,67	1,75	4283,43	80,400
8	CP 8	-18927,14	-235,41	1,84	16871,48	80,400
9	CP 9	-17529,67	-218,03	1,73	3676,66	80,400
10	CP 10	-23658,92	-294,27	2,03	4473,50	80,400
Valor Mínimo		-15171,13	-188,70	1,58	2961,99	80,400
Valor Máximo		-24198,29	-300,97	2,06	18301,95	80,400
V. Médio		-20071,59	-249,65	1,83	11826,20	80,400
D. Padrão		2778,42	34,56	0,16	6927,11	0,030

Tabela 10 - Resultados de resistência à compressão da amostra no sentido transversal.

Amostra Nº	Id. Amostra	Força Máxima, N	Limite de resistência, Mpa	Alongamento, %	Módulo de Elasticidade, MPa	Área Transversal, mm ²
1	CP 1	-5835,05	-72,51	2,04	1670,03	80,470
2	CP 2	-6599,98	-82,02	1,54	1694,22	80,470
3	CP 3	-6006,67	-74,64	2,22	1300,57	80,470
4	CP 4	-5290,77	-65,75	1,74	6587,00	80,470
5	CP 5	-5575,17	-69,28	1,81	6941,08	80,470
6	CP 6	-7477,69	-92,93	1,95	1843,51	80,470
7	CP 7	-6026,28	-74,89	2,29	6252,26	80,470
8	CP 8	-4520,94	-56,18	2,20	1563,49	80,470
9	CP 9	-5246,64	-65,2	1,72	6532,06	80,470
10	CP 10	-5825,24	-72,39	2,56	1450,48	80,470
Valor Mínimo		-4520,94	-56,18	1,54	1300,57	80,470
Valor Máximo		-7477,69	-92,93	2,56	6941,08	80,470
V. Médio		-5840,44	-72,58	2,01	3583,47	80,470
D. Padrão		801,81	9,96	0,31	2586,52	0,039

6. Conclusão

No presente trabalho identificou-se que os perfis pultrudados possuem resistências diferentes quando testados na direção longitudinal (paralela às fibras) ou transversal (perpendicular às fibras) devido ao posicionamento das fibras. Devido à interação fibra/matriz, possuem Relação tensão-deformação elástica-linear até a ruptura, o que contrasta com o comportamento dúctil do aço. De maneira geral apresentam tensão última superior à da maioria dos aços estruturais, porém módulo de elasticidade reduzido, variando entre 10% a 20% do módulo de elasticidade do aço. A principal vantagem em relação as propriedades mecânicas é a alta relação

resistência/peso, uma vez que é um material extremamente leve, com uma densidade cerca de 4 a 5 vezes inferior à do aço.

Com base nos resultados apresentados dos ensaios mecânicos, pode-se afirmar que os perfis pultrudados de fibra de vidro da Pultrusão do Brasil atendem os requisitos de qualidade e as propriedades mecânicas desejadas nos materiais compósitos. Os resultados dos ensaios mostram que as propriedades mecânicas são superiores ao material puro da matriz e são comparáveis aos valores do aço, ainda mantendo densidade baixa e permitindo aplicações em ambientes quimicamente hostis. Embora seja um produto inovador, a desvantagem principal é o custo inicial elevado para o comprador do material, o que restringe sua aplicação generalizada, mas é bastante utilizado em ambientes de alta corrosividade e humidade. Apesar disso, a sua aplicação vem ganhando força em diversas áreas, podendo se beneficiar no futuro pela regulamentação de uso de materiais, diminuindo os custos pelo desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação e aumento na escala de produção.

Para os fabricantes destes materiais, é importante que a qualidade do produto final seja garantida através dos ensaios clássicos de determinação das propriedades mecânicas. Também se faz necessário a realização de novos estudos para a determinação das resistências químicas e durabilidade em intempéries, como umidade, ambientes alcalinos, temperatura e fadiga, nas resistências mecânicas do material. Especialmente para o longo prazo, uma vez que tais informações são pouco disponíveis na literatura atual.

7. Referências Bibliográficas

Albuquerque, Renata Jorge de: Desenvolvimento de material compósito para reforços de dutos de aço, Tese submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de Pós-Graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ – Brasil, Junho de 2005.

Camatta et al.: Compósitos 2: Tecnologia de processos, primeira edição. Editora Abmaco. São Paulo, 2012.

Chawla, Krishan K.: Composite Materials – Science and Engineering, Third Edition. Springer Science Books. New York, 2012.

Correia, Sônia Marisa Maciel Leitão: Estudo da tolerância ao dano de tubagens em PRFV, Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, 2008.

Martins, João Luís; Martins, Belo: Manual de controle de qualidade e durabilidade de estruturas em GFRP, Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa, Portugal, 2011.

Nunes, Francisco Felício: Comportamento estrutural de perfis Pultrudados de GFRP reforçados com mantas de CFRP – Caracterização experimental e modelação numérica. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal. Março, 2012.

Paiva et al.: Comparação da resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos epóxi/carbono de aplicação aeronáutica, Anais do 9º Congresso Brasileiro de

Polímeros. Outubro, 2007.

Sousa, João Pedro Girão Meireles De: Durabilidade de Perfis Pultrudados de Viniléster Reforçados Com Fibras De Vidro (GFRP), Dissertação para obtenção de grau de mestre em engenharia civil, Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, Outubro de 2011.

Teixeira, Pedro Manuel Veiga: Análise e dimensionamento de perfis pultrudados de GFRP, dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, Instituto Superior Técnico Universidade de Lisboa, Lisboa-Portugal, Novembro de 2010.

Tortelli, Ricardo: Análise de substituição de perfis em aço por perfis pultrudados com enfase em suas uniões, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Projeto e processos de fabricação, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo fundo, Passo Fundo, 2013.

Vieira, Janine Domingos: Estudo do comportamento estrutural de perfis pultrudados sob efeito de alta temperatura, Tese submetida para a obtenção do grau de doutor em ciências em engenharia civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

V.M. Karbhari et al.: Durability Gap Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure, ASCE Journal of Composites in Construction, 7, 2003, 238-247.