

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES CIÊNCIAS E HUMANIDADES**

YUNIS KARIM TAFAL

Têxteis Técnicos na Construção Civil – Perfis Pultrudados

**São Paulo - SP
2023**

YUNIS KARIM TAFAL

Têxteis Técnicos na Construção Civil – Perfis Pultrudados

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Têxtil e Moda da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciência.

Área de Concentração: Programa de Pós- Graduação em Têxtil e Moda.

Orientador: Prof. Dr. Dib Karam Junior.

São Paulo - SP

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Artes, Ciências e Humanidades,
com os dados inseridos pelo(a) autor(a)
Brenda Fontes Malheiros de Castro CRB 8-7012; Sandra Tokarevicz CRB 8-4936

KARIM TAFAL, YUNIS
Têxteis Técnicos na Construção Civil ? Perfis
Pultrudados / YUNIS KARIM TAFAL; orientador, Dib
Karam Junior. -- São Paulo, 2023.
78 p: il.

Dissertacao (Mestrado em Ciencias) - Programa de
Pós-Graduação em Têxtil e Moda, Escola de Artes,
Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo,
2023.
Versão corrigida

1. perfis pultrudados. 2. FRP. 3. indústria
têxtil. 4. construção civil. 5. pultruded profiles.
6. civil construction. I. Karam Junior, Dib,
orient. II. Título.

***"Lê, em nome do teu Senhor que criou;
Criou o homem de um coágulo.
Lê, que o teu Senhor é Generosíssimo,
Que ensinou através do cálamo,
Ensinou ao homem o que este não
sabia."***

(Alcorão, 96:1-5)

Dedicatória

Aos meus amados avós Abdul Rahman A. Ayoub e Kadige Al Kurdi (*in memorian*), Abdel Karim M. S. Tafal e Aysheh M. S. Mahboub (*in memorian*), imigrantes, que ao chegarem em uma nova terra, que como mascates trabalharam incansavelmente por recursos para que sua descendência tivesse o estudo que não tiveram, dedico este trabalho.

Aos meus pais, Saada Ayoub e Muhammad Abdel Karim, meus pilares, meu arrimo, minha segurança e minha força, que sob todas as intempéries, nunca desviaram de seus propósitos e sempre apagaram sua chama para que a minha pudesse resplandecer, dedico este trabalho.

Agradecimentos

A Deus, pela saúde das faculdades mentais, sustento, refúgio, tenacidade, pela facilidade após a dificuldade, pelo alívio dos pesares, pelo bom círculo social imerso, pelas boas pessoas ao redor e por ter conduzido a mim e a minha família até aqui.

Aos meus ascendentes, que sempre priorizaram o estudo, aprendizado e o desenvolvimento acadêmico, outorgando a mim a possibilidade e os subsídios necessários para tais conquistas.

Ao meu prezado, querido amigo, orientador e professor Dib Karam Junior, de caráter ímpar, que acreditou, facilitou e sempre me apoiou, não apenas nesta, mas em tantas jornadas desde a graduação, desempenhando ainda mais do que o papel de um verdadeiro líder acadêmico, o papel de um mestre.

À minha querida, honrada e amada instituição de ensino, Universidade de São Paulo, que me acolheu de braços afáveis desde a minha graduação, suprimindo minhas expectativas e necessidade de conhecimento até o presente momento, que espero ainda se prolongar pelo tempo em que eu tiver forças para frequentá-la.

Aos meus caros professores, que fizeram parte desta jornada deixando seu legado em algumas das minhas palavras e que espero eu, poder passá-las para futuras gerações, revivendo seus nomes, honrando assim o tempo que estes destinaram a mim, entregando seu mais valioso bem, o conhecimento.

À todas as pessoas que passaram pela minha vida, de todas as partes do mundo, trazendo facilidade, felicidade, fazendo história, proporcionando dias leves e experiências aprazíveis, contribuindo para minha formação ou para o modo de enxergar a vida, meus agradecimentos.

RESUMO

TAFAL, Yunis Karim. **Têxteis Técnicos na Construção Civil – Perfis Pultrudados**. 2023. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Versão Original.

A evolução da indústria têxtil, tal como a crescente demanda que, ano após ano, aumenta exponencialmente, gera cada vez mais resíduos que por vezes ficam sem empregabilidade contribuindo única e exclusivamente para o acréscimo de poluidores no meio ambiente além de serem, de certa forma, um desperdício econômico.

Em paralelo a estes fatores, a construção civil roga por novas tecnologias que possibilitem uma maior agilidade na execução da obra, atribua maior leveza, que reduza a manutenção, diminua os custos, agregue valor ao consumidor final e possibilite manobras que gerem uma diferenciação arquitetônica.

Aliando a oferta residual da indústria têxtil e a demanda da construção civil, faremos um estudo sobre os perfis pultrudados (FRP - Polímero Reforçado com Fibras) como opção de aproveitamento de tais resíduos e aplicabilidades possíveis nas obras. Estes, tratam-se de perfis estruturais imunes à corrosão, têm baixo peso, não são eletro condutores ou propagadores de fogo, apresentam grande resistência mecânica e são excelentes substitutos para os tradicionais perfis de aço, vergalhões de ferro, madeira ou alumínio.

Palavras-chave: perfis pultrudados; FRP; indústria têxtil; construção civil.

ABSTRACT

TAFAL, Yunis Karim. **Technical Textiles in Civil Construction – Pultruded Profiles**. 2023. 77 f. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2023. Original version.

The textile industry evolution as well as the growing demand that, year after year, increases exponentially, generates more waste that sometimes becomes unemployable, contributing solely and exclusively to the increase of pollutants in the environment in addition to being, by the way, an economic waste.

In parallel with these factors, civil construction needs for new technologies that allow greater agility in the work execution, assign greater lightness, reduce maintenance, reduce costs, add value to the final consumer and enable maneuvers that generate architectural differentiation.

Combining the textile industry residual supply and the demand of civil construction, we carried out a study on pultruded profiles (FRP - Fiber Reinforced Polymer) as an option for the use of this waste and possible applicability in the construction works. These are structural profiles that are immune to corrosion have low weight are not electrically conductive or fire-propagating, have great mechanical strength and are excellent substitutes for traditional steel, iron, wooden or aluminum rebar.

Keywords: pultruded profiles; FRP; textile industry; civil construction.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	11
3 OBJETIVO.....	12
3.1 Objetivos Específicos.....	15
4 MÉTODO.....	16
5 DISCUSSÃO	17
5.1 Projetos e Exigências	19
5.2 Concreto Têxtil.....	22
5.3 Visão ambiental	24
5.4 Impacto Ambiental	28
5.5 Pultrusão e FRP.....	30
5.5.1 Reforços de FRP	31
5.5.2 Análise das fibras.....	39
5.6 Ensaio de Materiais e Estruturas	42
6 CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquina de pultrusão.....	4
Figura 2: Exemplos de perfis pultrudados	5
Figura 3: Pultrusão com matriz termoplástica	6
Figura 4: Pultrusão termofixa (gaiola)	7
Figura 5: Equipamento para Pultrusão em Trança.....	7
Figura 6: Detalhe dos filamentos trançados	8
Figura 7: Saída do perfil	8
Figura 8: Máquina de pultrusão conjugada com estações de trançadeiras para trançar os fios, feixes ou cabos	9
Figura 9: Perfis pultrudados trançados.....	9
Figura 10: Pultrusão trançada em curva	10
Figura 11: Corrosão em pilares	13
Figura 12: Ponte estaiada	14
Figura 13: Detalhe inferior do quadro de decks.....	14
Figura 14: Seção da ponte estaiada.....	15
Figura 15: Imagem representando as camadas de um perfil pultrudado	16
Figura 16: Exemplos de fios, pavios, mantas, véus e tecidos usados nos compósitos	17
Figura 17: Exemplos de perfis pultrudados estruturais	17
Figura 18: Propriedades mínimas exigidas para cada grau	20
Figura 19: Exemplos de imagens de perfis e sua empregabilidade	21
Figura 20: Tecido de fibra de carbono.....	22
Figura 21: Tecido impregnado com resina epóxi e areia.....	23
Figura 22: Processo de moldagem das placas para o ensaio de flexão	23
Figura 23: Exemplo da conformação de perfil I para corpo de prova	23
Figura 24: Fibras naturais	26
Figura 25: Fibras sintéticas	27
Figura 26: Sistema Híbrido entre fibra de Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.) e fibra de carbono	30
Figura 27: Esquema de ancoragem e adesivo de FRP	32

Figura 28: Aplicação de folhas de FRP externa, preparação da estrutura e instalação dos ancoradores.....	33
Figura 29: Reforços com fitas de FRP em sulcos	34
Figura 30: Gráfico de força x deflexão em amostras de madeira defeituosas com e sem reforços de FRP	36
Figura 31: Folhas de CFRP.....	37
Figura 32: Lâminas de CFRP	37
Figura 33: Inserção de perfis pultrudados em meio as estruturas comprometidas.....	38
Figura 34: Fluxograma bibliométrico	40
Figura 35: Imagens de vídeo de alta velocidade da sequência de flambagem e falha de uma coluna W curta pultrudada, submetida a compressão axial.....	46
Figura 36: Teste de flexão assimétrica de quatro pontos para medição da tensão de cisalhamento	47
Figura 37: Ensaio de torção sobre amostra de GFRP.....	48
Figura 38: Amostra de GFRP submetida a ensaio mecânico de torção.....	49
Figura 39: Amostra em T de viga W (GFRP) pultrudada.....	50
Figura 40: Adaptação do gabarito para o teste da amostra em T de GFRP	50
Figura 41: Ensaio de tração para junção alma-flange	51
Figura 42: Ensaio de cisalhamento em vigas W (GFRP) pultrudadas.....	52
Figura 43: Corpo de prova ampliado de seção de viga W (GFRP) pultrudada	53
Figura 44: Esquema e esboço do corpo de prova de seção de viga W (GRFP) Pultrudada, das forças de atuação e imagem do equipamento de ensaio utilizado	54
Figura 45: Esboço de corpo de prova de seção de perfil de ângulos simétricos, esquema de forças e equipamento adaptado para teste de flexão de três pontos	55
Figura 46: Delaminação e ruptura por cargas paralelas e transversais	56

1 INTRODUÇÃO

Desde a primeira Revolução Industrial a indústria têxtil, como protagonista principal dos palcos, não apenas políticos e econômicos, vem ganhando cada vez mais espaço em meios diferentes que apenas o da indumentária ou rouparia para casa.

Os produtos têxteis, atualmente, são empregados na medicina como peles sintéticas para escaras de acamados ou queimaduras por exemplo e até em órgãos artificiais, nas áreas aeroespaciais, como aletas de foguetes de material compósito têxtil e fios polimerizados antichamas, na área naval, como mantas de fibras para dar estrutura, leveza e isolamento térmico. Estes são apenas alguns poucos exemplos do quão tecnológica e participativa se tornou esta indústria com a produção de artigos têxteis que surgiram em detrimento às novas demandas que suprissem as evoluções nas diferentes áreas da ciência, demonstrando que o que um dia já foi uma indústria que simplesmente fabricava tecidos para vestimenta, hoje é coadjuvante em inúmeras outras áreas industriais.

A participação têxtil ressaltada aqui, é também a mais relevante para este trabalho, Têxteis Técnicos na Construção Civil. Os expoentes desta dissertação serão os perfis pultrudados e os polímeros reforçados com fibras (FRP - Fiber Reinforced Polymer), passando breve e superficialmente pelo concreto têxtil.

A escolha deste produto se deu por ser um compósito de fios, fibras têxteis ou propriamente mantas de tecidos, banhados por compostos poliméricos que emprega estrutura e conformação aos perfis. Nota-se com isso a possibilidade de escoamento em parte dos resíduos da indústria têxtil, atendendo de certa forma a construção civil, setor este que em 2012 já era responsável por 14% do PIB nacional.

No Brasil, a construção civil é responsável por cerca de 14% do PIB nacional. O setor também é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. Estima-se que sejam utilizados entre 20% e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade. (MESQUITA 2012)

Os dados de consumo, movimentação da economia, geração de riquezas e empregos diretos e indiretos no setor da construção civil são relevantes e chamam atenção por seus números, caso possamos articular produtos construídos com base em resíduos e substratos têxteis que atendam as demandas e novas tecnologias cabíveis à construção civil, este será um importante canal de escoamento para a indústria têxtil com seus resíduos ou produtos primários para suprirem tal demanda.

O emprego de têxteis na construção civil contribui em uma série de fatores como isolamento de umidade, isolamento elétrico, acústico, estruturação cimentícia, tratamento de juntas nas construções a seco, revestimentos com características térmicas e visuais além de vários outros produtos e situações que geram agilidade e otimização dos processos visando lucro, melhoria dos processos, facilidade nos acabamentos e conforto sensorial.

As primeiras construções executadas com o que pode ser retratado como uma releitura de um produto têxtil feito pelo homem, foram tendas primitivas onde usavam ossos de mamute e pele de animais para se protegerem das intempéries e fatores externos que lhes trouxessem possíveis agressões, demonstrando que o papel dos têxteis na construção de moradias como forma de proteção, sensoriais ou físicas, sempre acompanharam o homem em sua história. (BAHAMÓN, 2004)

Perfis pultrudados podem ser uma excelente alternativa para as construções temporárias como tendas de shows, eventos, estruturas de espera para lonas, para revestimentos têxteis e obras temporárias, por ter seu peso muito reduzido em detrimento aos perfis metálicos, sua durabilidade acentuadamente maior que a madeira e a facilidade em montar e desmontar, pois trata-se de uma estrutura totalmente parafusada, não apresenta soldas em suas uniões e sua leveza facilita a instalação e transporte.

No século XX presenciamos os têxteis se expandirem para os mais diversos empregos na construção civil, com figuras de grande renome, como Le Corbusier que apresenta propostas de grandes construções usando material têxtil para soluções construtivas, como o “projeto D” do Pavilhão dos Tempos Novos na Exposição Internacional de Paris, com uma grande área coberta com

lona que serviu como abrigo para a mesma. Frei Otto foi uma figura icônica no emprego dos têxteis na construção moderna.

A figura de Frei Otto marca um ponto de virada na história da arquitetura moderna, especialmente no estudo da arquitetura têxtil. (BAHAMÓN, 2004)

Segundo Forster e Mollaert (2009):

No final do século XIX tem-se uma multiplicação de tendas e circos ambulantes chamados “Chapiteau”. Em geral, eram feitos com lonas de linho ou de cânhamo e suportados por quatro mastros principais e postes fincados ao longo do perímetro da estrutura as quais mantinham a lona tensionada. (Apud ASSIS, 2012)

A evolução da construção civil clama por novos materiais, tecnologicamente avançados, que supram suas necessidades estruturais, térmicas e de design. Levando em consideração tais necessidades e o potencial que os produtos têxteis têm por suas características intrínsecas e grande versatilidade geométrica quando tecidos ou orientados conforme a necessidade particular de cada setor, o presente trabalho demonstra um estudo sobre compósitos, dentre eles os perfis pultrudados e uma análise de suas aplicabilidades.

Perfis pultrudados basicamente são perfis estruturais compostos por camadas de fibras têxteis ou tecidos e impregnados com compostos poliméricos, resinas, para aglutinar, dar resistência e conformar o material. Tanto as fibras quanto a matriz polimérica, podem ser de diferentes tipos de natureza e são escolhidas mediante à necessidade apresentada, função à ser desempenhada e mediante a testes de comportamento mecânico.

Apresentamos como proposta, a construção de perfis pultrudados com o aproveitamento dos resíduos de fibras, fios e tecidos oriundos dos processos de tecelagem, fiação e confecção da indústria têxtil, a fim de minimizar os impactos ambientais e dar um novo uso para o descarte da indústria, esta que está entre as mais poluidoras do setor industrial.

As principais características desses perfis são a leveza, resistência a corrosão, facilidade no transporte, velocidade na montagem das estruturas,

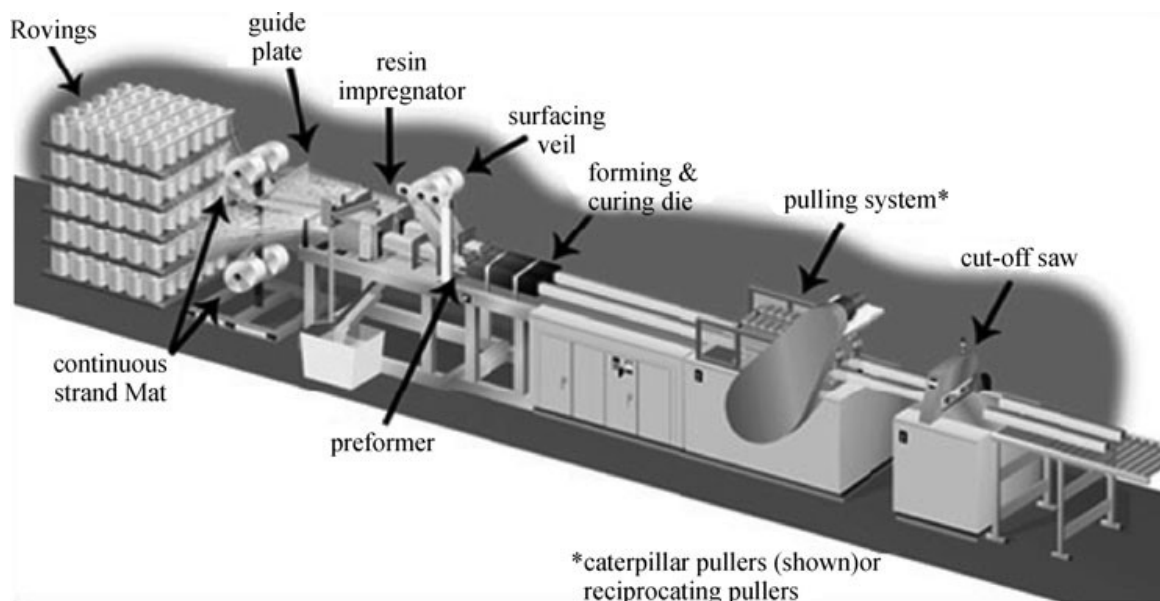
maior durabilidade quando em comparação à perfis metálicos expostos ao tempo, baixa condutibilidade e alta versatilidade.

A pultrusão é um método que permite a fabricação de materiais compósitos. Não apenas geometrias de seção aberta, mas também perfis unicelulares ou multicelulares de formato fechado, também podem ser fabricados por processos de pultrusão, exibindo velocidades máximas de produção de 5 m/min.¹ (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

Atualmente, os materiais convencionais (como concreto, aço, alumínio, madeira) estão perdendo rapidamente a prevalência e dando lugar a materiais compósitos altamente eficientes em muitos mercados. Tal como acontece com todos os outros compósitos produzidos por várias técnicas disponíveis, os perfis pultrudados também provaram sua capacidade de satisfazer os requisitos de custo, resistência mecânica, física e ambiental, ao mesmo tempo em que demonstram excelente desempenho. (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

A figura demonstra de forma sucinta como são produzidos os perfis pultrudados com pequenas mudanças que acontecem principalmente na seção da conformação, mediante aos formatos de perfis desejados para as diferentes aplicações que vão desde de perfis tubulares à vigas I, estas que têm seu emprego destinado para grandes vãos e altas cargas.

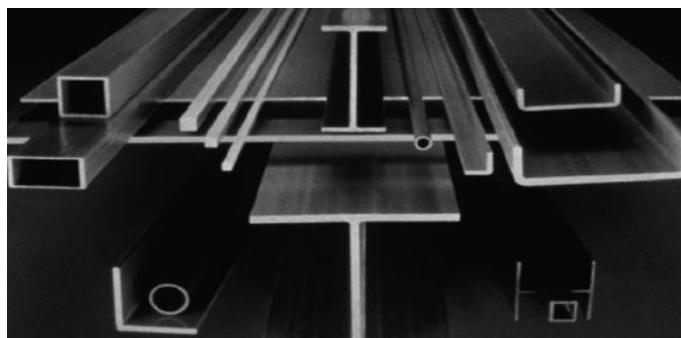
Figura 1: Máquina de pultrusão



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

Na figura 2 vemos alguns exemplos dos diferentes tipos de conformação que podemos encontrar nos perfis pultrudados e cada um com sua respectiva empregabilidade, conferindo através das dimensões, matéria prima e geometria, características específicas que auferem propriedades como uma maior resistência à cargas, torções, maior ou menor maleabilidade, elasticidade, plasticidade do material, menor potencial de condutibilidade elétrica, podendo estes serem usados como estruturas para vedações, sustentação, estruturas construtiva ou ainda apenas para amarrações da estrutura.

Figura 2: Exemplos de perfis pultrudados



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

Diferente dos perfis produzidos através de injeção simples com molde em sua extremidade final, que atribui as características dimensionais ao produto, os chamados perfis extrudados, se conformam através do processo de extrusão e são induzidos por arrasto e conformados através de diferentes processos dentro da mesma unidade produtiva, que ao longo do processo agrega tanto o substrato, a matriz polimérica de diferentes bases como a atribui a geometria ao material.

A pultrusão é um processo de produção em massa, contínuo e eficiente em termos de energia, é também econômico para fabricar materiais compósitos de fibra com seção transversal constante (Starr, 2000). A palavra “pultrusão” é uma combinação das palavras da língua inglesa “puxar” (através de uma matriz) e a palavra “extrusão”. “Pultrusão” significa que as fibras impregnadas de resina são puxadas através de uma matriz, enquanto na extrusão o material é empurrado através de uma matriz. M. Milwich, 2016.

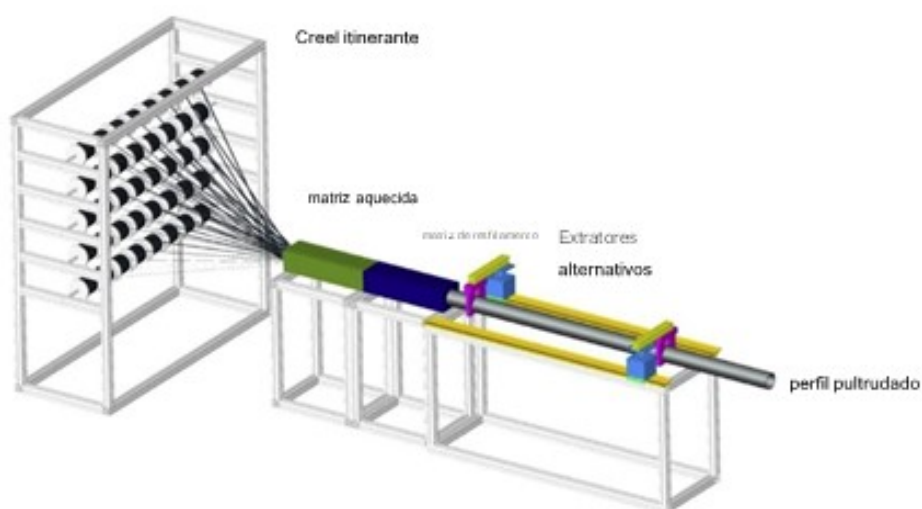
Um outro processo clássico de pultrusão, que teve seu uso amplamente difundido na indústria automobilística, é o de Pultrusão de Tranças. Este perfil demonstrou grande versatilidade também na construção civil, pois é possível, durante seu processo de fabricação, agregar características mecânicas que aumentam a resistência à fadiga, rigidez e tenacidade, além da possibilidade de ser pultrudado de forma maciça, o que viabiliza seu emprego como vergalhões a serem usados em matrizes cimentícias, e pode outorgar uma diferença de peso extremamente relevante em relação ao aço.

Segundo M. Milwich, 2016,

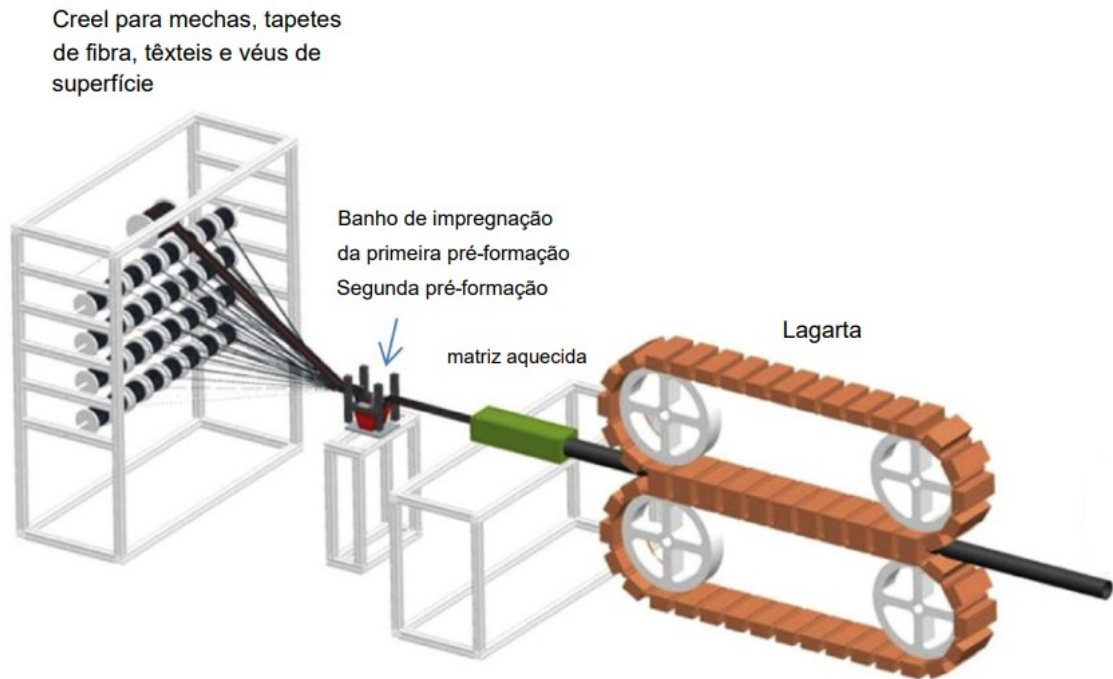
A tecnologia de compósitos reforçados com fibras combina fibras e matriz de maneira sinérgica para fabricar produtos com alta rigidez e tenacidade, alto amortecimento de vibração, alta dissipação de energia de impacto e resistência à fadiga (Ziegmann, 2010). A baixa densidade dos componentes e a ajustabilidade das propriedades mecânicas através do ajuste do ângulo da fibra permitem uma vantagem de peso de até 60% em comparação ao aço e de até 25% em relação à alumina. Outras vantagens são a não corrosão, alta liberdade de projeto geométrico, baixo alongamento térmico e baixo custo de matriz (Hufenbach, 2007).

Nas figuras 3 e 4 temos alguns exemplos de maquinários de pultrusão que podem receber outro maquinário em sua linha, específico para trançar o produto, criando a Pultrusão de Trança, quando integradas em linha.

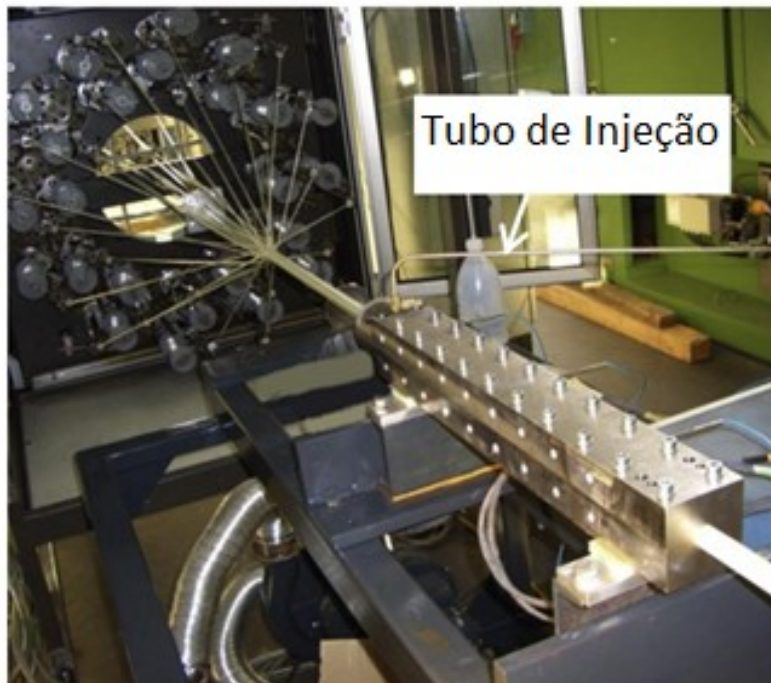
Figura 3: Pultrusão com matriz termoplástica



Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 4: Pultrusão termofixa (gaiola)

Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 5: Equipamento para Pultrusão em Trança

Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 6: Detalhe dos filamentos trançados



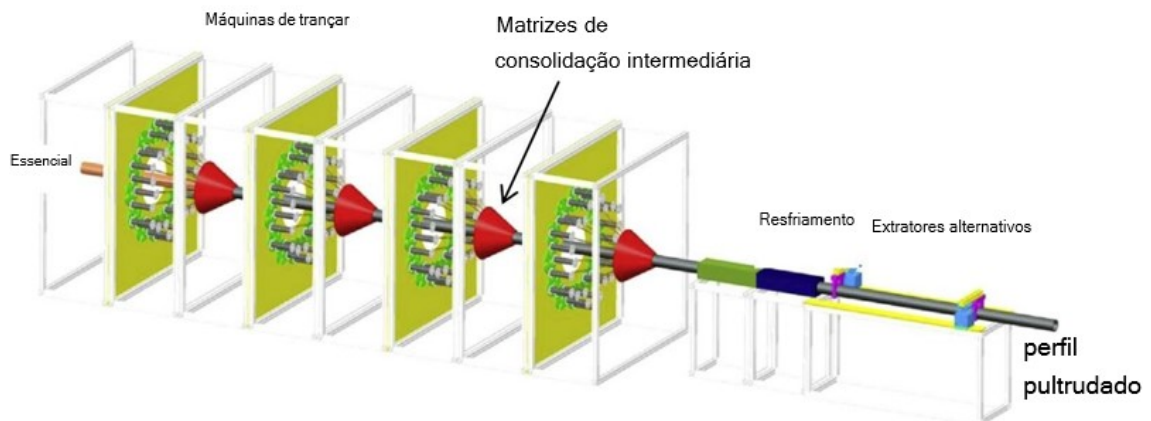
Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 7: Saída do perfil



Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 8: Máquina de pultrusão conjugada com estações de trançadeiras para trançar os fios, feixes ou cabos

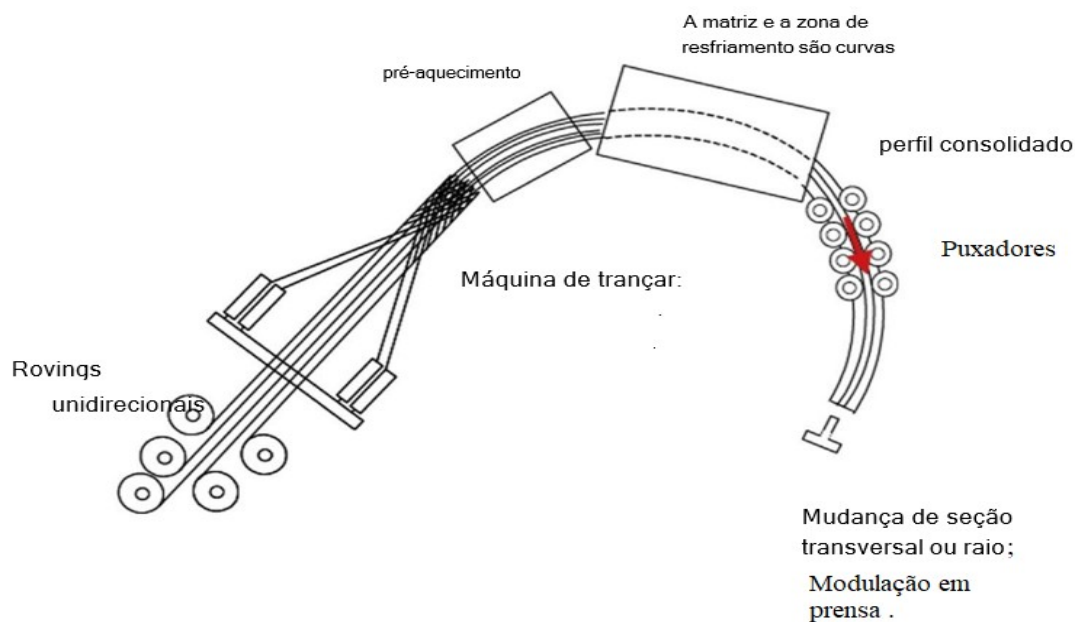


Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 9: Perfis pultrudados trançados



Fonte: M. Milwich, 2016

Figura 10: Pultrusão trançada em curva

Fonte: M. Milwich, 2016

Há ainda um método de pultrusão com base biológica que vem sendo estudado com maior profundidade há mais de uma década. A alternativa teve embasamento na alta demanda de matérias-primas usadas na construção civil e no impacto ambiental graças ao possível reaproveitamento de materiais reciclados que viriam a formar a base destes perfis.

No setor da construção, os FRPs são cada vez mais usados como estruturas de suporte de carga ou estruturas de fachada. Eles apresentam alta rigidez e resistência em combinação com baixo peso.

Outras vantagens são a boa resistência a intempéries, baixa transmissão de calor e múltiplos escopos de projeto (Knippers *et al*, 2010). Além disso, os materiais plásticos reforçados com fibras oferecem a possibilidade de monitorar a saúde estrutural de pontes, edifícios e elementos de fachada, garantindo o comportamento pretendido ao longo da vida útil das estruturas (Gabler, 2012).

Segundo Milwich 2016,

O setor de construção é o maior consumidor individual de matérias-primas da Alemanha; por outro lado, os materiais são parcialmente reciclados. A esse respeito, existem extensas discussões sobre o impacto ecológico dos compósitos como materiais de construção. Embora já existam processos de reciclagem bem introduzidos para “polímeros de fibra de vidro” e tecnologias recém-desenvolvidas para compósitos de fibra de carbono, há uma demanda crescente por

produtos e, conseqüentemente, perfis pultrudados de fontes de base biológica (Gensewich e Riedel, 1999; Gengnagel, 2012; Angelov e outros, 2007).Fonte: M. Milwich, 2016.

Outros atributos são a processabilidade dos materiais, o desenvolvimento de sistemas de proteção contra incêndio e a estabilidade ao UV. O foco está na técnica de pultrusão econômica (trançada), que através da produção em série, consegue atender o setor de construção. O objetivo é substituir o aço altamente vulnerável à corrosão, o aço zincado, pintado ou inox e também vigas e perfis de alumínio que têm preços elevados. Um outro objetivo é substituir ou melhorar os compósitos de madeira e plástico (WPC's), que têm um desempenho mecânico inferior.(M. Milwich, 2016)

2 JUSTIFICATIVA

Os últimos anos foram marcados por uma elevação vertiginosa nos preços, principalmente das commodities, possivelmente por terem seu preço globalizado, sofrendo mais com o cenário mundial e também nos setores de energia elétrica.

Na construção civil são empregados vários itens que frequentemente sofrem com essas variações mais relevantes de preço, por vezes inviabilizando a obra, já que os preços de custo ultrapassariam os aceitáveis de venda para determinada região.

Os combustíveis afetam direta ou indiretamente os custos de uma obra, já que, inclusive o frete dos produtos da indústria à obra, deve ser otimizado ao máximo, fazendo com que o transporte em questão carregue a maior quantidade possível dos produtos a serem usados, mantendo o mesmo peso de carga total.

Outro problema são as obras realizadas nas proximidades das áreas litorâneas ou úmidas, onde é observada uma oxidação precoce dos perfis metálicos, comprometendo estruturalmente esta e exigindo manutenções com pequenos intervalos de tempo, onerando o custo de manutenção.

Levando em consideração esses fatores, esta pesquisa foi pautada no emprego dos perfis pultrudados com o aproveitamento de alguns resíduos da indústria têxtil como substrato do compósito, contorna-se assim a questão da oxidação, o custo de frete elevado, por serem mais leves que os ferrosos, a energia gasta no processo de fabricação destes perfis é menor e a participação das commodities dentro de uma obra pode ser reduzida.

Todos esses fatores chamaram atenção e se mostraram relevantes para este estudo. Caso tais perfis apresentem comportamento estrutural satisfatório e também supram as necessidades e normas cabíveis, podem ser uma excelente alternativa dentro da construção civil e como demanda importante para parte dos resíduos da indústria têxtil.

Alguns profissionais ligados à construção civil sugerem que perfis de FRP, dependendo da matéria prima que provém o substrato têxtil do compósito, podem ser mais onerosos do que outras classes de perfis que desempenhem o mesmo papel, este questionamento parece coerente quando analisado de forma pontual, sem levar em conta a totalidade da obra ou estrutura pois, quando há o emprego de perfis de FRP, a redução de peso também impacta na fundação, podendo esta ser mais delgada, tais perfis permitem vencer um vão livre maior, reduzindo assim a necessidade de pilares intermediários de apoio e não apresentam as patologias clássicas dos perfis ferrosos como a oxidação, reduzindo o custo de manutenção de obra.

3 OBJETIVO

O objetivo principal do presente trabalho é de apresentar alternativas de aproveitamento para alguns resíduos da indústria têxtil com empregabilidade dentro da construção civil, com ênfase nos perfis pultrudados.

O estudo pretende analisar estruturalmente, através de referências bibliográficas, ensaios laboratoriais destrutivos e não destrutivos, alguns comportamentos dos perfis pultrudados e do concreto têxtil quando confeccionados com diferentes tipos de substratos da indústria têxtil, que nos dirão se oferecem certas capacidades como resistência aceitável ao cisalhamento, tração, compressão e torção, suficientes para serem empregados na construção civil de forma estrutural e quiçá possam substituir o emprego da fibra de vidro e a fibra de carbono, sendo estas as de emprego mais comum nestes perfis.

Caso os estudos e análises mostrem-se promissores, a partir destes, uma forma de escoamento para parte do descarte da indústria têxtil pode ser sugerida, sendo uma opção viável dentro da construção civil que, caso apresente vantagens econômicas, estruturais ou que agregue de alguma forma

valor à obra, pode ser difundida com maior facilidade na área de aplicabilidade em questão.

O objetivo através das análises propostas, é encontrar um perfil ou um composto com aplicabilidade na construção civil que seja resistente à tração, compressão, torção, flexão e cisalhamento, com baixa condutibilidade elétrica e que não oxide ou enferruje como é o caso dos perfis metálicos, tão difundidos. Abaixo, está demonstrada uma patologia clássica encontrada em pilares de pontes em áreas litorâneas que compromete severamente a estrutura. Trata-se da ferrugem dos vergalhões de ferro usados para estruturar o concreto que, quando enfrentam este tipo de condição, apresentam tais patologias que comprometem estruturalmente toda a obra, gerando risco iminente ao público que se utiliza de tal edificação.

Figura 11: Corrosão em pilares



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

Exemplos de empregabilidades dos perfis pultrudados:

Figura 12: Ponte estaiada



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

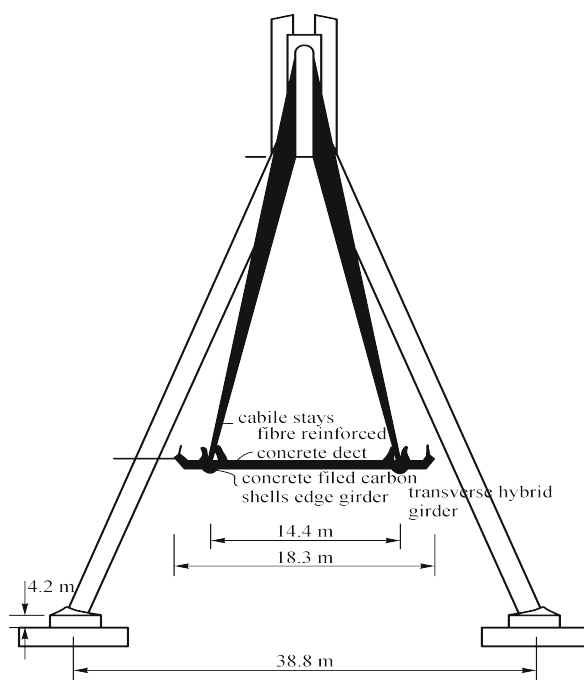
Figura 13: Detalhe inferior do quadro de decks



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

A figura 14, em um corte transversal, detalha partes da ponte estaiada das figuras 12 e 13 apresentadas acima.

Figura 14: Seção da ponte estaiada



Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013)

3.1 Objetivos Específicos

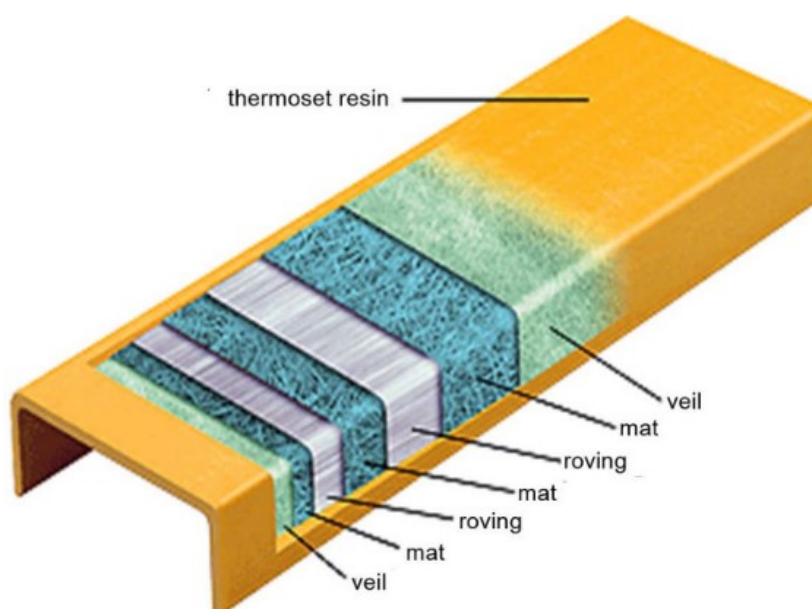
- Estudar as necessidades específicas da construção civil no quesito estrutural.
- Apresentar alternativa viável para o problema, usando compósitos como os perfis pultrudados, fibras têxteis para estruturação de materiais de obra ou ainda o emprego do concreto têxtil como solução para questões ressaltadas anteriormente neste trabalho.
- Utilizar resíduos da indústria têxtil como parte dos compósitos, comumente usados na indumentária, em tecidos para saneamento, profiláticos e outros de emprego menos específico.
- Sugerir através de dados e referenciamento a capacidade potencial de substituição de determinados perfis e componentes dentro da construção civil pelos compósitos e componentes supracitados.
- Buscar matérias primas e alternativas que tenham menor impacto ao meio ambiente em sua fabricação ou descarte, buscando adequar de forma promissora o setor da construção civil às novas proposições e regulamentações de proteção ambiental.

- Demonstrar viabilidade no emprego desta tecnologia mediante a fatores econômicos, de praticidade, design, longevidade dos materiais e valor agregado para o consumidor, com intuito de ressaltar que diferentes tecnologias podem beneficiar não apenas o cliente intermediário, como as construtoras e incorporadoras, mas também o cliente final.
- Apontar fibras de origem sintética e natural como opções potenciais de substratos, para compor os perfis pultrudados.

4 MÉTODO

Após escolhidas as opções viáveis levando em conta a natureza do substrato têxtil e o tipo de matriz, baseando-se na literatura e nas características potenciais que possam suprir as necessidades desejadas para a execução de uma edificação, deu-se início a fase laboratorial, onde amostras de FRP, com diferentes materiais têxteis e geometrias, foram submetidas à esforços mecânicos e, mediante aos resultados obtidos, foram indicadas para as diferentes empregabilidades dentro da construção civil.

Figura 15: Imagem representando as camadas de um perfil pultrudado



Fonte: www.isocompositos.com.br/pultrusao.asp

Figura 16: Exemplos de fios, pavios, mantas, véus e tecidos usados nos compósitos



Fonte: www.isocompositos.com.br/pultrusao.asp

Figura 17: Exemplos de perfis pultrudados estruturais



Fonte: www.isocompositos.com.br/pultrusao.asp

5 DISCUSSÃO

Através da análise dos substratos têxteis, que por suas características, podem ou não apresentar potencialidades para serem empregados na fabricação de perfis pultrudados e que terão seu uso

direcionado à construção civil, discorreremos sobre a viabilidade do uso de certas fibras em detrimento à outras e também sob a ótica da literatura preexistente, buscamos apresentar materiais previamente testados e que tiveram sucesso na busca por atender as exigências de tal indústria.

Em um segundo estágio, após escolhida a natureza da matéria prima têxtil do compósito, levando em conta as propriedades das fibras e estudos realizados por alguns pesquisadores, foi feito o levantamento das características dos perfis, baseados em literatura prévia, como estes se comportam quando usamos fibras orientadas, fibras desorientadas, fios simples, multifilamentos, pavios, tecidos ou a mistura entre alguns destes.

A escolha do material resinoso, o composto polimérico em questão, que servirá como adesivo e dará estrutura ao compósito, deverá atender requisitos como resistência mecânica, não condutibilidade elétrica, não propagar chamas e apresentar baixa condutibilidade térmica, requisitos estes de suma importância para que o perfil ao ser pultrudado, possa atender a nossa proposta, segundo os parâmetros preestabelecidos pela construção civil.

Após a análise das variáveis supracitadas, iniciam-se as escolhas dos perfis, qual será sua composição quanto ao substrato têxtil a ser usado, se este será composto por fibras sintéticas, naturais ou híbridas, a escolha de sua matriz resinosa, a orientação das fibras e sua geometria, esperando que estes compósitos se comportem de maneira promissora durante os testes para o emprego na construção civil, mediante às escolhas feitas e levando em consideração as características que foram relevantes para tal emprego.

É imperativo que os engenheiros e a indústria da construção adotem totalmente esse material eficiente e inovador, é necessária uma compreensão profunda do comportamento estrutural dos elementos de FRP pultrudados. As seções fechadas de FRP pultrudados oferecem algumas vantagens distintas como alternativa às seções abertas. (GAND A. K. *et al*, 2013)

Segundo (GAND A. K. *et al*, 2013):

A construção de novas estruturas não atende apenas aos requisitos estéticos, mas também fornece uma expressão de leveza e simplicidade. O comportamento de seções fechadas de FRP pultrudados foi estudado e examinado exaustivamente. Existe uma extensa lista de pesquisa sobre o comportamento de compressão

axial de tubos de FRP pultrudados como compósitos não preenchidos e preenchidos com concreto.

Vários modelos matemáticos, analíticos e numéricos foram estudados. A influência do tempo e da temperatura em compósitos de FRP foi investigada. O desenvolvimento de novas conexões de seções fechadas de FRP pultrudados é uma área que requer extensa pesquisa.

5.1 Projetos e Exigências

Não necessariamente uma obra deve apresentar apenas perfis pultrudados em sua parte estrutural, por vezes são escolhidos sistemas híbridos, compostos por aço, concreto e propriamente os perfis FRP pultrudados em detrimento às suas diferentes características que quando somadas, atingem o resultado esperado de forma satisfatória.

Os compósitos dessa natureza devem atender à algumas exigências, na Europa, estas são regidas pela norma EN 13706-3:2002, que contempla os fatores e requisitos estruturais.

O projeto e a aplicação de um composto FRP estrutural, requer uma compreensão e conhecimento de propriedades físicas e mecânicas dos materiais FRP. As propriedades típicas são normalmente fornecidas pelo fabricante do produto de material FRP. Na Europa, a norma EN 13706-3:2002 define a especificação de perfis pultrudados. A especificação define aquelas propriedades, que devem ser especificadas e o nível a ser obtido para cada grau de perfil. A especificação usa o código de forma curta, Exx, para se relacionar com o “Módulo Efetivo de Flexão” do perfil, testado em um comprimento total do perfil. Dois graus; E23 e E17 são definidos. Estas são propriedades mínimas que os perfis devem alcançar para atender às propriedades mecânicas do material. De acordo com as propriedades que devem ser alcançadas para cada classe de perfil apresentamos na Tabela 1. A densidade típica de perfis pultrudados de FRP, varia de 1700–1900 kg/m³. (GAND A. K. *et al*, 2013).

A figura 18 apresenta alguns exemplos de testes mecânicos aos quais os perfis devem ser submetidos, a grandeza da unidade de mensuração e a norma do tipo de teste aplicado, em detrimento ao grau exigido:

Figura 18: Propriedades mínimas exigidas para cada grau

Propriedades mínimas exigidas para cada grau de acordo com EN 13706-3:2002 [5]

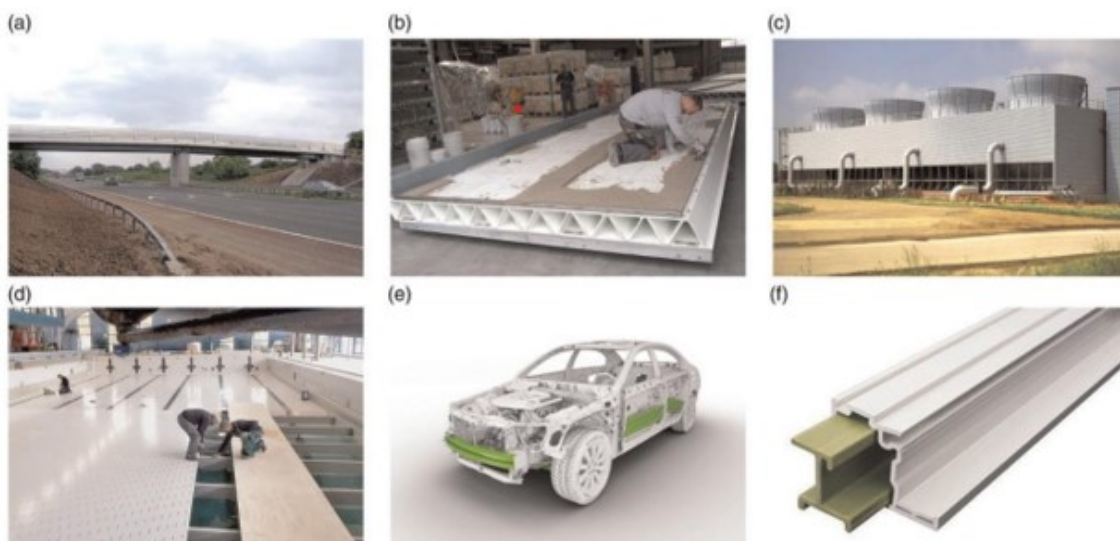
	propriedade	unidade	método de teste	propriedades mínimas	
				grau E23	grau E17
1.1	teste de seção completa	GPa	Anexo D, EN 13706-2:2002	23	17
1.2	módulo de tensão-axial	GPa	EN ISO 527-4	23	17
1.3	módulo de tensão-transversal	GPa	EN ISO 527-4	7	5
1.4	força de tensão-axial	MPa	EN ISO 527-4	240	170
1.5	força de tensão-transversal	MPa	EN ISO 527-4	50	30
1.6	pino-rolamento de resistência-axial	MPa	Anexo E, EN 13706-2:2002	150	90
1.7	pino-rolamento força-transversal	MPa	Anexo E, EN 13706-2:2002	70	50
1.8	resistência à flexão-axial	MPa	EN ISO 14125	240	170
1.9	resistência à flexão-transversal	MPa	EN ISO 14125	100	70
1.10	resistência ao cisalhamento interlaminar-axial	MPa	EN ISO 14130	25	15

Fonte: (GAND A. K. *et al*, 2013) - Adaptada pelo autor

Assim como os perfis, os conectores também seguem normas e padrões, apesar de não participarem deste trabalho, vale ressaltar que os perfis de FRP se conectam basicamente de duas formas, parafusada ou colada com reforços e adesivo próprio. Nas áreas de maior carga, zonas estruturais, usa-se os conectores parafusados, as furações, posicionamento e diâmetro dos parafusos devem levar em conta, não apenas os cálculos, mas também a orientação do sentido da pultrusão do perfil, evitando fender, sulcar ou lacerar este por esforços aplicados em pontos não apropriados para recebê-los.

A ligação por adesivo pode ser feita quando não tratamos de zonas estruturais que receberão cargas com massas importantes, como nos casos de guarda-corpos, contraventamentos ou pequenos reforços intermediários em treliças leves.

Figura 19: Exemplos de imagens de perfis e sua empregabilidade



(a) - Construção de ponte: Ponte GRP na autoestrada M6 do Reino Unido, Lancashire. (b) - Construção do tabuleiro da ponte: Tabuleiro da báscula veicular da ponte "Gafanhoto" em Karrebæksminde, Dinamarca. (c) - Construção de torre de resfriamento: Torres de resfriamento Marley, produção SPX. Imagem usada com permissão da SPX Cooling Technologies, Inc. apenas para fins educacionais e informativos. Copyright 2019 SPX Cooling Technologies, Inc. Todos os direitos reservados. (d) - Construção relacionada à água: fundo de piscina flexível e durável para parque aquático dinamarquês, Dinamarca. (e) - Uso de compósito termoplástico com teor de fibra extremamente alto combinado com PA6 (Poliamida sem fibra) utilizada no para-choque dos carros. (f) - Produção de elementos para janelas: Substituição do tradicional inserto de alumínio por insertos de poliuretano pultrudado, composto por 80% de fibra de vidro e 20% de poliuretano Baydur 3500.

Fonte: (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

As opções de empregabilidade dos perfis pultrudados são inúmeras, basicamente podem ocupar o lugar da maioria dos perfis extrudados, conformados à vácuo ou peças estampadas, muitas vezes com maior eficácia do que seus concorrentes. (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

Uma previsão feita pela European Pultrusion Technology Association (EPTA), prevê um crescimento de pultrudados no mercado de elementos e estruturas de mais de US\$ 100 bilhões em 2022. Os autores preveem o aumento da pultrusão, e suas aplicações nos mercados existentes e também dentro de novos mercados que ainda estão fora do escopo do atual. (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

Em 2011, a Thomas Technik & Innovation patenteou um novo conceito de processo de pultrusão que possibilita a fabricação de perfis não lineares, graças ao uso da matriz móvel curva. De fato, esse processo pode ser usado para fabricar componentes para

indústria aeroespacial, indústrias automotivas, de transporte, construção, arquitetura e aplicações únicas na infraestrutura. (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

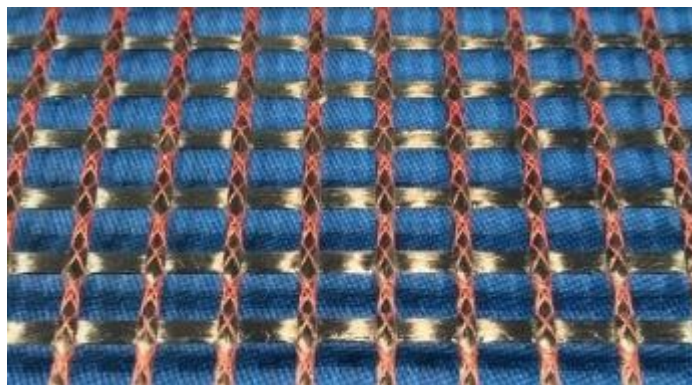
5.2 Concreto Têxtil

O termo Concreto Têxtil ou meramente CT, diz respeito a um material compósito que em sua conformação recebe substrato têxtil em uma matriz cimentícia. Este produto pode ser utilizado de diferentes maneiras dentro da construção civil, desde pisos e lajes onde as telas e vergalhões que antes seriam de material metálico, agora passam a ser de tecidos e fibras à perfis estruturais que receberão grandes cargas e necessitam vencer grandes vãos livres.

O concreto têxtil (CT) é um material compósito constituído por uma ou mais camadas de tecidos embebidos em uma matriz cimentícia composta por materiais granulométricos finos. Dentre as vantagens com relação aos materiais de construção tradicional (concreto armado), pode-se citar a elevada resistência à corrosão e excelente resistência mecânica, possibilitando a produção de elementos estruturais mais leves e esbeltos. Os tecidos, que são principalmente constituídos de fibras de carbono, vidro e aramida, são flexíveis e possibilitam a criação de elementos estruturais de diversas formas e geometrias devido à sua maleabilidade (Brameshuber & Brockmann, 2006). (F. C. A. Santos, *et al*,2017)

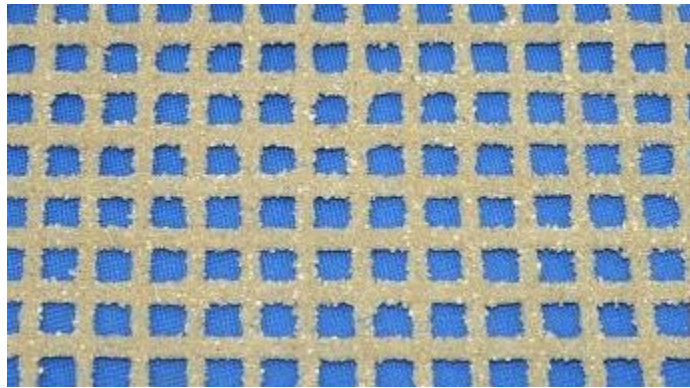
As figuras abaixo apresentam alguns exemplos de tecidos usados na composição do concreto têxtil e moldagem de placas para ensaio de flexão:

Figura 20: Tecido de fibra de carbono



Fonte: (F. C. A. Santos, *et al*,2017)

Figura 21: Tecido impregnado com resina epóxi e areia



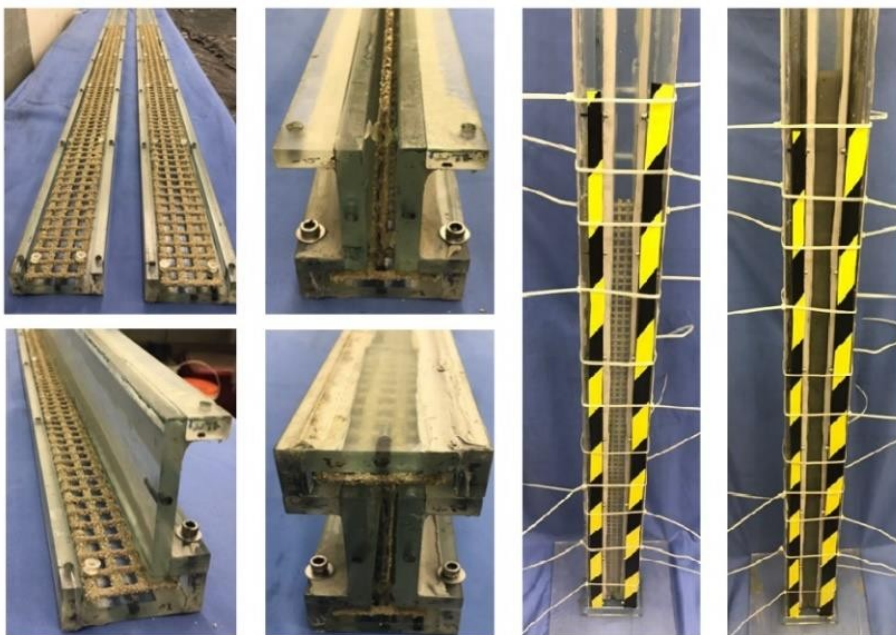
Fonte: (F. C. A. Santos, *et al*,2017)

Figura 22: Processo de moldagem das placas para o ensaio de flexão



Fonte: (F. C. A. Santos, *et al*,2017)

Figura 23: Exemplo da conformação de perfil I para corpo de prova



Fonte: (F. C. A. Santos, *et al*,2017)

Em ambos os casos, sendo perfis pultrudados ou de concreto têxtil, nota-se uma evidente busca por materiais que mecanicamente tenham melhor eficiência, apresentem uma massa reduzida, e que sejam delgados para contribuir com a arquitetura. Nestes dois casos, a estrutura se dá por bases têxteis, ainda que divergentes nas matrizes, um com cimento e outro com polímero, seus empregos são próximos quanto à função desempenhada.

Conhecidos por vergalhões de FRP (Fiber Reinforced Polymer), os vergalhões de polímero reforçados com fibra, são comumente fabricados a partir de substratos como o basalto, alumínio ou carbono e sua matriz resinosa também pode apresentar diferentes bases, como epóxi, a base de poliéster ou ainda vinílica, dentre outras.

Cada tipo de substrato quando aglutinado junto a sua matriz confere ao vergalhão características como maior ou menor flexibilidade, resistência a tração, a impacto e cisalhamento, o que irá ditar a escolha de cada um é a necessidade peculiar à ser atendida. A conformação deste material, apesar de usar basicamente os mesmos e principais itens do perfil pultrudado, difere quanto à disposição das fibras, fios e pavios.

Uma opção que vem sendo estudada pelo mercado, tanto pela sua viabilidade econômica quanto por suas propriedades mecânicas e ambientais, são os polímeros reforçados com fibras naturais, tratados por NFRPs (Natural Fiber Reinforced Polymers) em diferentes geometrias.

5.3 Visão ambiental

As fibras de origem natural, além de serem provenientes de fontes renováveis, diminuem potencialmente o impacto ambiental no caso de descarte dos resíduos da mesma, que podem acontecer durante o processo fabril, têm sua preparação e mecanismo de extração menos agressivo para o ambiente do que as fibras sintéticas, apresentam preço reduzido em detrimento às clássicas fibras de carbono, vidro e basalto e garantem maior isolamento térmico e acústico quando aplicados em compósitos com esta finalidade para a construção civil, substituindo materiais que têm em fabricação fatores resultantes nocivos para a natureza.

As fibras naturais não são fibras criadas pelas mãos humanas e podem ser produzidas a partir de plantas, que não são sintéticas. As mudanças nos regulamentos sobre a reciclabilidade de compósitos e as preocupações ambientais, obrigaram os pesquisadores a criar materiais a partir de fontes renováveis. Linho, cânhamo, sisal, Kenaf e juta são exemplos de fibras naturais que possibilitam a necessária sustentabilidade. (Navaratnam *et al*, 2023).

Este compósito é leve e mais barato do que aquele feito de fibras sintéticas reforçadas. Além disso, estes compósitos de fibras naturais têm o potencial para mitigar a variações térmicas e acústicas quando usadas como material isolante. (Navaratnam *et al*, 2023)
Além disso, diminuirá os resíduos de construção que são enviados para aterros, aumentará a eficiência energética e promoverá a noção de sustentabilidade. (Navaratnam *et al*, 2023)

Compósitos de fibras naturais tiveram melhor performance em certas áreas quando comparados com os compósitos reforçados com fibra de vidro. A fibra de linho é uma forte candidata para substituir o vidro como material de reforço devido à sua natureza, com baixo custo, peso reduzido e alta rigidez para aplicações estruturais. (Navaratnam *et al*, 2023)

Algumas opções foram estudadas e mensuradas em trabalho prévio, também foram analisadas em compostos híbridos, onde havia a presença de mais de um tipo de fibra, variando a porcentagem da concentração das mesmas em cada amostra.

A figura 24 exemplifica alguns tipos de fibras naturais que podem ser empregadas na confecção dos perfis pultrudados, sendo sua escolha definida pelo emprego final de cada perfil.

Figura 24: Fibras naturais

(a) - Juta. (b) – Cânhamo. (c) - Kenaf. (d) - Linho, (e) – Rami. (f) – Sisal. (g) - Bambu.

Fonte: Navaratnam *et al*, 2023

O comprimento das fibras tem grande relevância para a resistência do perfil a ser pultrudado, especialmente quando a ligação interfacial entre os componentes é fraca, mas o fator de maior importância a ser considerado nos perfis reforçados com fibras naturais, ou simplesmente NFRPs, é o teor das fibras que o compõem e a orientação direcional destas fibras, tais fatores impactam diretamente na resistência à tração e elasticidade do material.

O teor de fibras naturais é o elemento mais importante na determinação do desempenho de compósitos NFRP. Um estudo demonstrou o desempenho dos compósitos feitos com mantas não tecidas de cânhamo e fibras de polipropileno misturadas em diferentes proporções e revelou que o aumento da porcentagem de fibras de cânhamo nos compósitos acima diminuiu a resistência à tração. Uma redução máxima de 34% na elasticidade foi observada quando usaram 70% de fibras de cânhamo no compósito NFRP na direção perpendicular. A resistência à tração dos compósitos NFRP com fibras orientadas perpendicularmente foi de 20 a 40% menor do que a dos compósitos NFRP com fibras orientadas paralelamente. (Navaratnam *et al*, 2023)

Figura 25: Fibras sintéticas

Fonte: (Navaratnam *et al*, 2023)

A figura 25 traz exemplos de fibras sintéticas usadas com maior relevância dentro da construção civil, seja em formato de vergalhões para reforço do concreto em peças estruturais, em perfis a serem usados de forma independente como vigas e colunas ou ainda como mantas de isolamento acústico, térmico ou hídrico.

O trabalho traz maior ênfase para os perfis pultrudados pois, apesar da bibliografia que trata do concreto têxtil (CT) ter demonstrado resultados promissores através dos ensaios mecânicos, há contradições e recomendações relevantes para o desprezo do reforço nas bases de cálculo, como vemos na citação abaixo:

À medida que a esbeltez das estruturas cresce, seu comportamento resistente passa a ser governado pelo estado limite de instabilidade.

Embora o fenômeno de flambagem de elementos de concreto armado tenha sido estudado por diversos autores (Bazant, 2010; MacGregor, 1986), não foram encontrados trabalhos sobre elementos de concreto têxtil na base de dados consultada. Mesmo com relação ao uso de barras de polímero reforçado com fibras em elementos comprimidos de concreto armado, a ACI 440.1R-15 (2015) recomenda desprezar a contribuição do reforço, apesar de trabalhos recentes apontarem o contrário (Afifi et al., 2014). (F. C. A. Santos, *et al*, 2017)

5.4 Impacto Ambiental

Sabe-se que dentre as fibras expostas anteriormente neste trabalho, as sintéticas apresentam um impacto ambiental mais acentuado, seja pela liberação de gases responsáveis pelo Efeito Estufa em seu processo de fabricação, por seu descarte, por sua reciclagem ou pelo esgotamento de recursos naturais.

Em alguns casos, como no da produção da fibra de carbono, a emissão de CO₂, gás carbônico, supera a quantidade liberada durante a fabricação do aço em 15 vezes e tem um consumo energético exponencialmente maior do que este último. Já para o caso da reciclagem, a produção da fibra de carbono é menos impactante do que o processo de reaproveitamento do aço.

Quanto a fibra de vidro, para a sua produção, é observado um consumo energético aproximadamente 4,5 vezes menor do que a quantidade de energia necessária para produzir a mesma quantidade de fibras de carbono, quase se equiparando com a do aço convencional.

Apesar dos números relativamente expressivos quanto ao consumo de energia e em outros casos, ao CO₂ lançado na atmosfera, em detrimento ao processo de produção de tais fibras e perfis que se usam destas em sua composição, estas fibras se mostram altamente viáveis pois, quando agregadas a base cimentícia por exemplo, apresentaram uma performance superior, outorgando ao concreto reforçado com estas, uma maior resistência mecânica quando em comparação ao concreto reforçado com aço convencional, reduzindo assim a quantidade de cimento necessária na estrutura e diminuindo as dimensões para se criar uma peça estrutural que suporte a mesma carga que o concreto reforçado com aço suportaria.

A fabricação de SFRPs, cria emissões substanciais de gases do efeito estufa e esgotamento de recursos naturais. A fabricação de fibra de carbono gera aproximadamente 15 vezes mais CO₂ do que o aço tradicional. Além disso, a produção de fibra de carbono é 4,6 vezes mais intensa no consumo de energia (ou seja, 230 MJ/kg) do que o aço tradicional (ou seja, 50 MJ/kg). No entanto, a reciclagem da fibra de carbono pode reduzir sua intensidade energética em comparação com o aço. Em contraste, a fabricação de 1 kg de fibras de vidro, consumiram 54,7 MJ, o que é inferior ao da produção de fibra de carbono. Entretanto, mesmo que esses materiais compostos tenham um impacto ambiental significativo, continuam sendo uma alternativa viável ao reforço com aço. Outorga a resistência necessária ao passo que reduz os impactos ambientais adversos. Um estudo de Maxineasa *et al.* destacou que a viga de aço RC reforçada com CFRP aumenta a capacidade de carga e reduz os impactos desfavoráveis ao meio ambiente.

Os impactos ambientais de uma viga de RC são influenciados pela quantidade de cimento usado na mistura de concreto, bem como pelas armaduras de aço para o reforço da viga. O uso inovador desses FRPs para fortalecer e modernizar ou atualizar estruturas de concreto antigas, pode reduzir a quantidade de cimento e reforços de aço. (Navaratnam *et al*, 2023)

As fibras naturais são as que geram menor impacto ambiental, ainda que, para serem cultivadas, algumas delas necessitem de uma área de plantio maior. Partem de fonte renovável, não esgotando recursos escassos e em seu ciclo final, no caso da incineração, geram uma quantidade menor de gases nocivos à atmosfera.

As fibras naturais também se mostraram uma boa alternativa, assim como a reciclagem das fibras sintéticas para minimizar os impactos ambientais diretos e colaterais.

A fibra de juta gera maior quantidade de carbono que outras fibras naturais, pois sua produção por hectare é menor. Compósitos de fibras naturais apresentam algo em torno da metade de emissão de carbono em comparação aos compósitos feitos com fibras de vidro, quando mensurando todos os passos de fabricação. Joshi *et al* e Broeren *et al*, analisaram o ciclo de vida das fibras naturais em detrimento às fibras de vidro. Os estudos deles comprovaram que a fabricação das fibras naturais tem menor impacto frente a produção da fibra de vidro e, no fim da vida das fibras naturais, no processo de incineração que são submetidas, economiza energia e tem uma emissão reduzida de gases do efeito estufa. Malviya *et al*, demonstraram em seu estudo de caso que os compósitos de fibra natural emergiu como uma alternativa viável para os compósitos reforçados com fibras sintéticas. (Navaratnam *et al*, 2023)

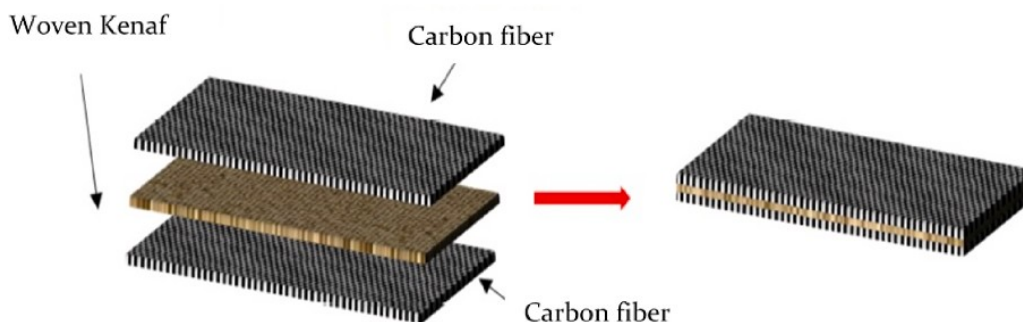
No geral, o uso de FRP seja de fibra sintética ou fibra natural, no setor da construção civil, demonstrou reduzir o impacto ambiental, incluindo a reciclagem das fibras sintéticas. Além disso, as fibras naturais são materiais de construção mais ecológicos para

construção sustentável. Portanto, os materiais de FRPs, são considerados um componente vital para crescimento sustentável do setor da construção civil e devem ser adequadamente comercializados como uma solução para o meio ambiente no presente contexto global. (Navaratnam *et al*, 2023)

Apesar dos compósitos de fibras naturais serem relevantemente menos impactantes ao meio ambiente, muitas vezes sozinhos, dentro de um compósito, não atendem às necessidades requeridas ou demandadas pela indústria da construção civil. Nada impede que não possam ser usadas de forma híbrida, em composição com fibras sintéticas por exemplo, agregando assim características conferidas peculiarmente por cada classe de fibra, uma pode apresentar maior elasticidade e outra maior resistência à tração, juntas configurariam um sistema híbrido com resistência mecânica e flexibilidade para não ocasionar fissuras ou rompimento do conjunto.

Abaixo vemos uma representação de um sistema híbrido, entre fibras naturais e sintéticas.

Figura 26: Sistema Híbrido entre fibra de Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) e fibra de carbono



Fonte: Navaratnam *et al*, 2023

5.5 Pultrusão e FRP

Durante o processo de pultrusão, além das opções de compostos poliméricos para a base, há uma gama de produtos têxteis que podem ser experimentados, desde fibras à tecidos prontos, passando por diferentes origens de matéria prima, comprimentos, títulos e gramaturas tal como a variação em sua geometria, dada no setor de conformação do processo, que

também tem papel fundamental para agregar resistência mecânica ao compósito.

Muitos estudos foram feitos até agora, com o objetivo de desenvolver modelos analíticos e equações para a previsão do comportamento de fluência de compósitos. Principais dentre estas teorias são: o modelo da lei de potência de Findley para descrever o comportamento a longo prazo de elementos FRP submetidos a tensões constantes; a regra das misturas que se aproximam para combinar os efeitos do comportamento dependente do tempo, da matriz e das fibras, Scharepy, procedimento integral único, o princípio da superposição de Boltzmann e a série de Prony, que é análoga às molas e amortecedores (arranjos de Kelvin e Maxwell).218.459 Especificamente, um modelo de elementos pultrudados explicando a natureza viscoelástica da resina bem como o comportamento elástico do reforço de fibra e sua arquitetura, foram apresentados em Cardoso e Harry,460. (VEDERNIKOV A. *et al*,2020)

5.5.1 Reforços de FRP

Dentre as diversas empregabilidade dos polímeros reforçados com fibras, há também a opção do reforço externo de uma estrutura preexistente que tenha demonstrado fadiga ou dano mediante à uma carga excessiva, deterioramento ou abalo mecânico, sem que haja a necessidade de ser substituída por inteiro.

Vigas de concreto armado podem sofrer rupturas nas ligações de encontro com pilares, tanto em sua ferragem quanto na matriz cimentícia. Estruturas e vigas de madeira que cedem às cargas excessivas, podem receber os reforços externos com FRP, evitando maiores manobras, como a substituição de partes estruturais.

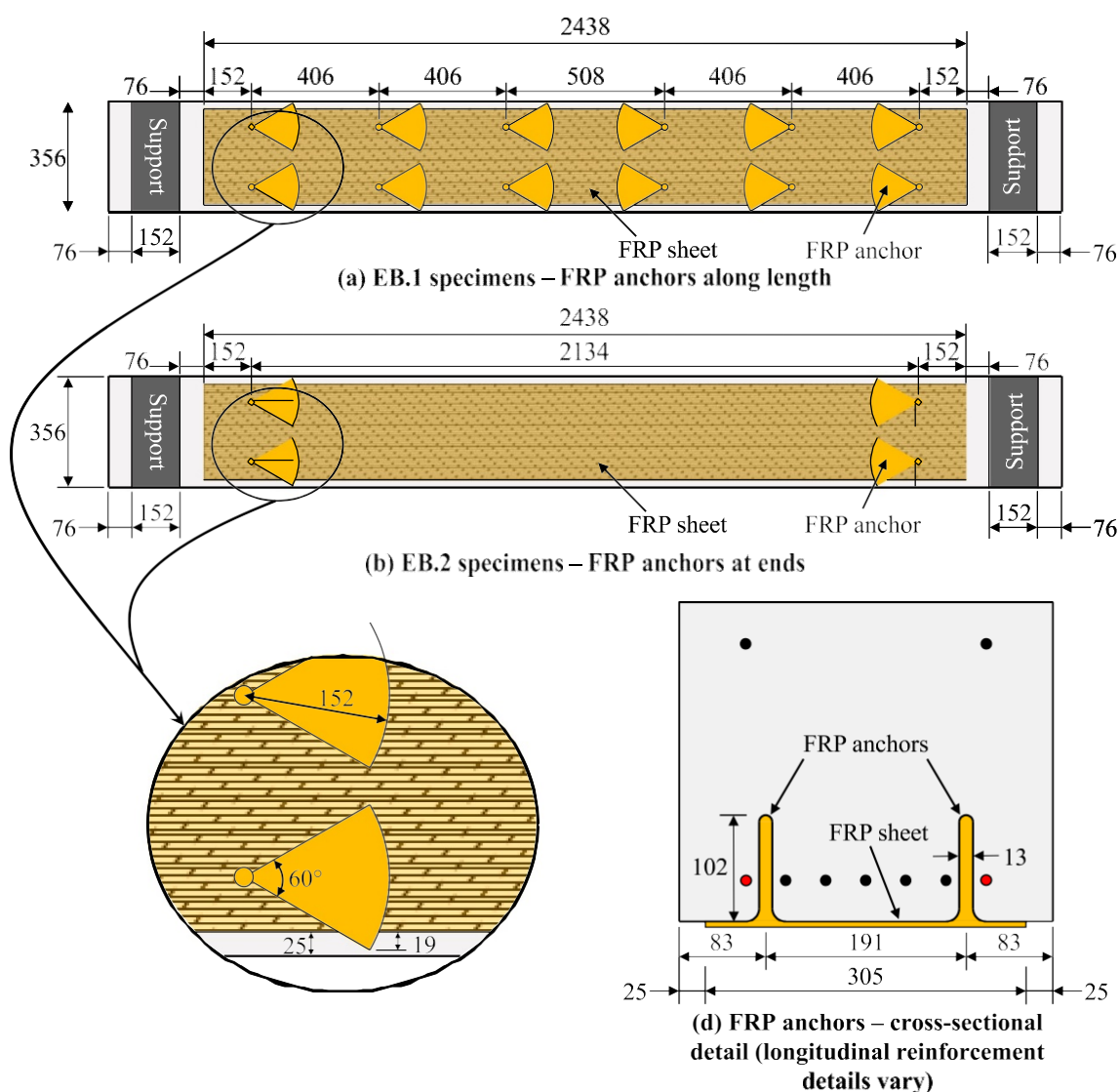
Esta tecnologia possibilita reparos rápidos e com pequenas movimentações quando comparada com a forma tradicional onde se substitui parte da estrutura, aumentando o tempo de vida útil da edificação e reduzindo o custo de manutenção, uma vez que requer mão de obra reduzida, menor trabalho logístico e reparos pontuais, sem que haja a necessidade do descarte da peça ou parte danificada, quando a patologia é diagnosticada precocemente.

A tecnologia do reforço externo nas vigas, sejam estadas de concreto armado ou de madeira, é usada também para aumentar a capacidade de resistência à flexão. Nas estruturas de concreto, usa-se ancoradouros de FRP, como pinos excêntricos que são incrustados ao longo da estrutura ou em

suas extremidades, sendo que na ancoragem realizada nas extremidades se mostrou mais eficiente e, a parte externa da viga, ligada aos ancoradores, recebe a folha de FRP, costumeiramente confeccionada através de fibras de carbono ou de vidro.

A figura 27 representa as duas maneiras de ancoragem, a realizada ao longo da peça e a realizada nas extremidades da mesma. Na parte inferior direita da imagem, em um corte transversal, podemos observamos com maior facilidade o ancorador e a folha adesiva de FRP na parte externa da estrutura. O corte reflete a visão longitudinal da peça.

Figura 27: Esquema de ancoragem e adesivo de FRP



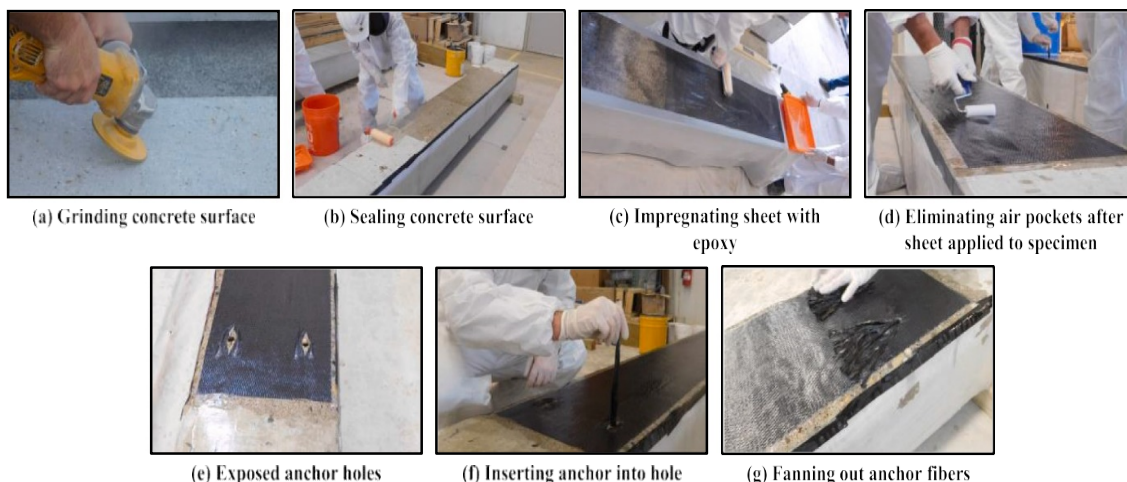
Fonte: Jacobs *et al*,2023

Nas extremidades superiores dos ancoradores, região que irá ficar para o lado de fora da peça, são dispostos pavios interligados a ele e do mesmo material, posteriormente são abertos em forma de leque, apresentando um ângulo de abertura de 60°.

A numeração apresentada na figura 27, refere-se às cotas de medidas e fazem parte de um estudo peculiar encontrado no trabalho de “Jacobs *et al*, 2023 - Evaluation of flexural strengthening methods for beams with simulated deterioration using spike-anchored FRP externally bonded sheets and near-surface-mounted strips”, que apresenta também maiores detalhes e citações do motivo pelo qual o autor se usou de tais dimensões, uma vez que não há uma especificação clara para este método.

Na figura 28 pode-se verificar uma sequência que demonstra passo a passo essa técnica.

Figura 28: Aplicação de folhas de FRP externa, preparação da estrutura e instalação dos ancoradores

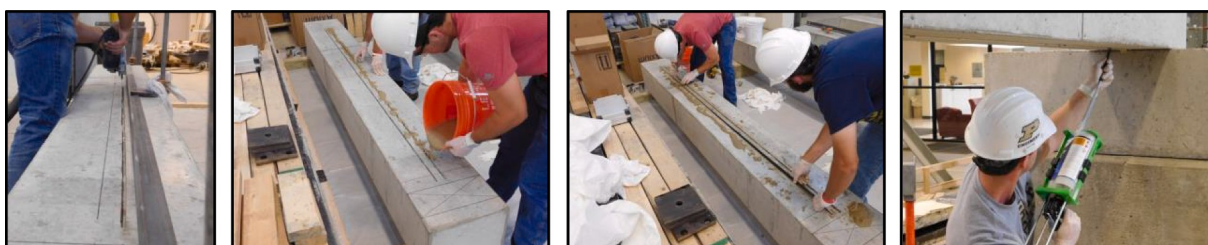


- (a) - Lixamento da peça de concreto. (b) - Aplicação de selante na superfície da estrutura de concreto. (c) - Impregnação das folhas/lâminas de reforço com epoxy. (d) - Extração das bolhas de ar que ocorrem no processo de laminação. (e) - Orifícios para os ancoradores. (f) - Inserção do ancorador no orifício. (g) - Abertura em leque das fibras do ancorador.

Fonte: Jacobs *et al*,2023

Um outro formato demonstrado por Jacobs et al.2023, são os reforços de fitas incrustadas dentro da estrutura de concreto. Neste método, dois sulcos são criados no sentido longitudinal das vigas, em seu longo eixo, ficando próximos à face oposta à que receberá a carga, na face de tensão, estes sulcos são parcialmente preenchidos com adesivo onde posteriormente serão introduzidas e fixadas as fitas de FRP e recobertas por uma nova porção de adesivo, deixando-as completamente imersas dentro dos sulcos, como vemos na figura abaixo:

Figura 29: Reforços com fitas de FRP em sulcos



Fonte: Jacobs *et al*,2023

Segundo Jacobs et al., 2023, as duas técnicas, folhas de FRP colocadas na face externa das vigas com ancoradores e no reforço com fitas de FRP incrustadas nas mesmas, podem recompor a força e a rigidez do conjunto, mostrando-se como métodos viáveis para maiores estudos e possíveis aplicações na construção civil.

Como esperado, ambos os reforços de ligações externas, FRP e NSM, podem restaurar a força e a rigidez no pós-craqueamento, assim como a flexão, observada na deterioração simulada onde foram subtraídas ou cortadas as barras de reforços de aço. (Jacobs *et al*, 2023)

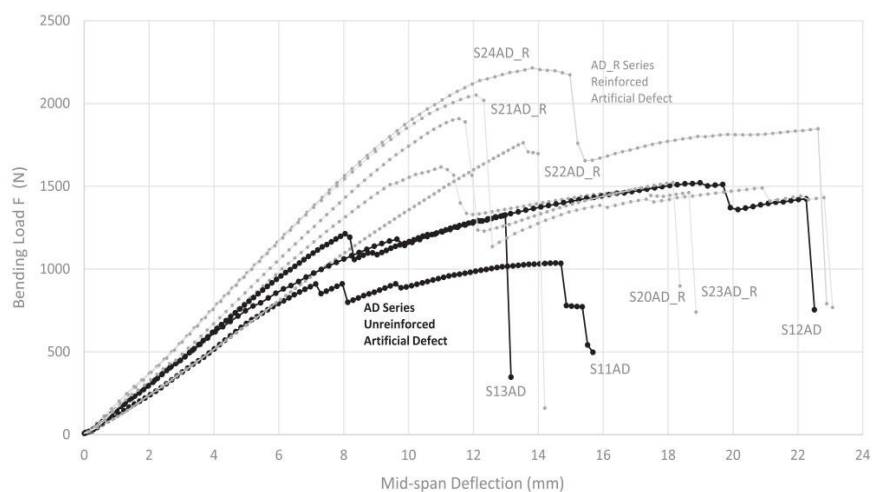
Dada a versatilidade na aplicação dos reforços externos de FRP, que podem ser utilizados tanto como ferramenta de manutenção, quando o dano já está aparente, quanto para a profilaxia, para prevenir e resguardar a estrutura de possíveis patologias, exemplificar-se-á o caso da madeira, onde reforços de FRP podem ser colocados em regiões de formação das gemas ou

fissuras naturais preexistentes nas peças, evitando uma possível patologia mais severa em decorrência da evolução destas fissuras ou de rupturas e destacamento dos nós nas regiões de formação das gemas da madeira, quando a peça for submetida às cargas resultantes da edificação.

Por se tratar de uma estrutura de origem natural, não há uma padronização efetiva no caso da madeira pois, ainda que sejam extraídas peças de uma mesma espécie de madeira, lida-se com fatores que interferem na formação da árvore como a sua idade, regiões de crescimento com regime chuvoso mais ou menos intenso, modificações celulares, essências de madeiras que podem apresentar mais de um sentido de crescimento das fibras, presença de nós em maior ou menor quantidade e tamanho, e além destes fatores ligados à matéria prima, deve-se levar em consideração o tipo de desdobro da madeira, se este prioriza a maior concentração de anéis de crescimento dentro de uma mesma peça ou não, se está livre de regiões menos densas da tora como o alburno e a medula entre outros fatores que corroboram com a dificuldade da padronização em peças de madeira.

Abaixo têm-se duas amostras de madeira de mesma espécie, uma com defeito preexistente e outra livre de defeito, e também um gráfico que demonstra os resultados de amostras defeituosas com e sem reforços de FRP, quando submetidas ao teste de flexão (carga x deflexão).

Figura 30: Gráfico de força x deflexão em amostras de madeira defeituosas com e sem reforços de FRP



(a)



(b)

Legendas do gráfico: AD - Representam as amostras não reforçadas com FRP.

AD_R – Representam as amostras reforçadas com FRP.

Fonte: Corradi M. *et al*,2021

A análise do gráfico nos permite entender que os reforços de FRP, neste caso confeccionados a partir da fibra de carbono, quando aplicados às peças de madeira defeituosa, apresentam resultados satisfatórios. Apesar de ter apresentado certos ganhos de resistência quando adicionado à peça de madeira defeituosa, o FRP não foi capaz de restaurar a capacidade original das amostras sem defeito que seria de 17,66 kN.

As vigas defeituosas não reforçadas, que apresentaram uma resposta estrutural pobre tanto em termos de capacidade de flexão como de

rigidez durante a primeira série de ensaios, tiveram um bom desempenho quando testadas após o reforço CFRP, ou seja, o material compósito foi eficaz no reforço das vigas, anulando ou reduzindo o efeito do defeito. Para as vigas de madeira, a capacidade de flexão aumentou de 10,45 kN (vigas defeituosas) para 14,16 kN (vigas defeituosas reforçadas), com um incremento de 35,5%. No entanto, o reforço de CFRP não foi capaz de restaurar a capacidade original das vigas não defeituosas (17,66 kN). Corradi M. *et al*, 2021

Abaixo temos alguns exemplos de técnicas dos reforços de FRP em vigas de madeira:

Figura 31: Folhas de CFRP



Fonte: Corradi M. *et al*, 2021

A figura 32 apresenta folhas de CFRP, polímero reforçado com fibra de carbono, conjugadas à uma das faces da viga de madeira.

Figura 32: Lâminas de CFRP

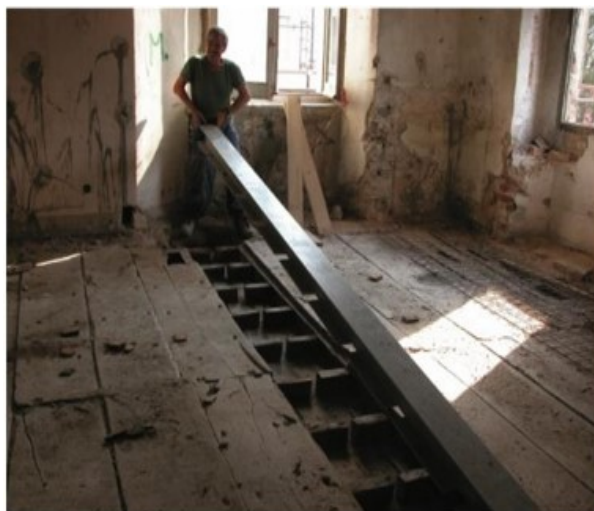


Fonte: Corradi M. *et al*, 2021

A figura 32 demonstra a confecção de lâminas, mais espessas, de CFRP que serão posteriormente conjugadas às vigas de madeira. As lâminas de CFRP são usadas quando a patologia natural da viga ou o dano é pouco maior, quando comparado com as peças onde as folhas de CFRP já foram suficientes, para a correção dos problemas apresentados por estas.

Em certas situações, onde os reforços peça a peça são inviáveis, seja pelo acesso à elas ou pela quantidade de peças estruturais comprometidas, um técnica que pode ser usada é a de introduzir novos elementos pultrudados em meio a estrutura já existente no local, sendo perfis longos e robustos ou pequenas grapas incrustadas conjugando os elementos preexistentes. Essa técnica distribui melhor os esforços, aliviando assim o excesso de carga que antes era exercido pontualmente em partes da estrutura existente, como vemos na figura 33 abaixo, onde elementos pultrudados, são inseridos em meio à outras peças estruturais de madeira, que já se encontravam no local.

Figura 33: Inserção de perfis pultrudados em meio as estruturas comprometidas



Fonte: Corradi M. *et al*,2021

Dada a facilidade em agregar novas seções dentro da mesma unidade produtiva para a criação de novos produtos que atendam com maestria os requisitos técnicos de cada setor, sejam estas de conformação,

consolidação, resfriamento ou outras técnicas que possibilitem a confecção de produtos ainda mais refinados para seu respectivo emprego, a tecnologia de pultrusão se mostra cada vez mais coadjuvante com as demandas, como a estudada com maior relevância neste trabalho, a da construção civil.

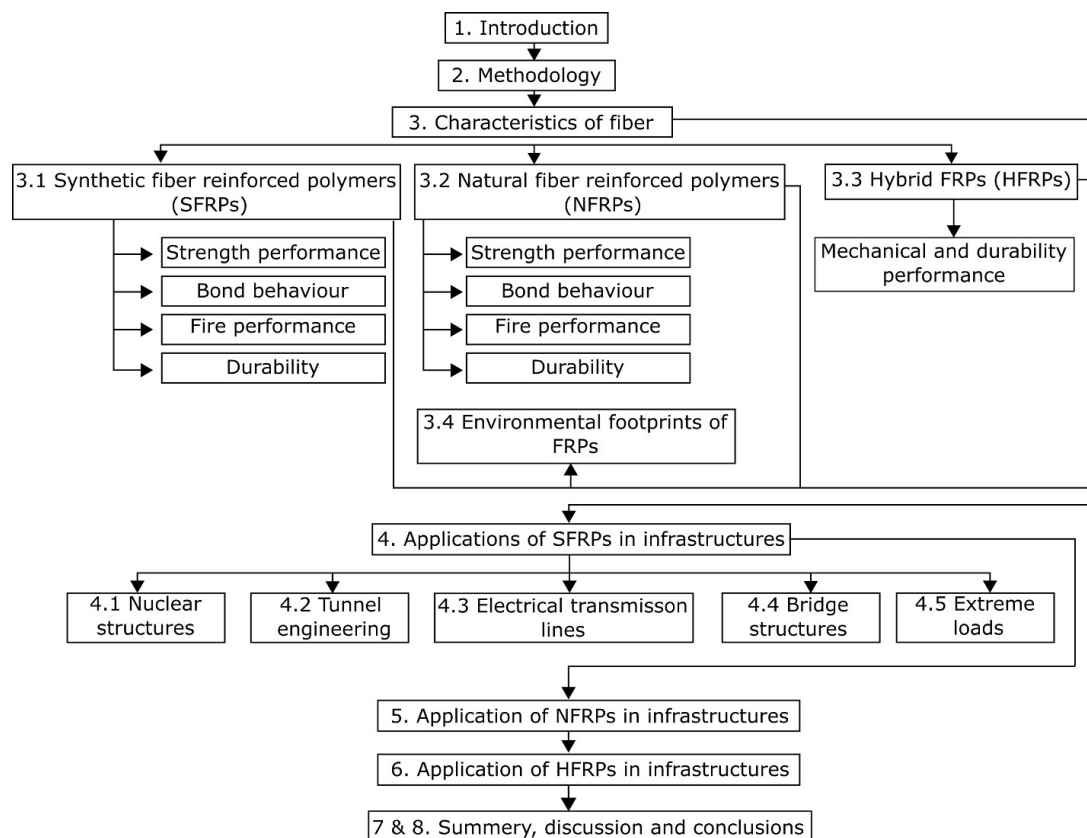
5.5.2 Análise das fibras

O substrato de maior relevância dentro dos polímeros reforçados com fibras, é justamente este último, as fibras, que em detrimento a sua natureza, orientação e proporção, poderão ou não conferir os atributos desejados para suas diversas funções dentro da indústria e para mensurar as propriedades destas, assim como seu potencial de empregabilidade, são realizadas análises teóricas e práticas.

Em seu trabalho “Applications Of Natural And Synthetic, Navaratnam 2023”, apresenta uma metodologia para a análise dos polímeros reforçados com fibras, criteriosa e detalhada. São levados em conta, para cada grupo de fibras que compõem o compósito, sejam estas, sintéticas, naturais ou híbridas, fatores como a resistência deste polímero ao fogo, a condutibilidade elétrica, durabilidade, performance mecânica, capacidade de ligação entre as fibras e força do conjunto. Mediante aos resultados, são expostas as empregabilidades para cada tipo de FRP.

Abaixo está o organograma extraído do artigo supracitado, com a análise bibliométrica proposta em questão:

Figura 34: Fluxograma bibliométrico



Fonte: Navaratnam *et al*, 2023

Observamos uma maior aplicabilidade dos polímeros reforçados com fibras sintéticas para fortalecer o concreto utilizado em diferentes áreas da construção civil, pois apresentam uma satisfatória resistência à tração, requisito este que é indispensável nesta indústria. Dentre os compósitos de polímeros reforçados com fibras sintéticas (SFRP) mais utilizados, estão os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP), polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP), polímeros reforçados com fibras de aramida (AFRP) e os polímeros reforçados com fibras de basalto (BRFP).

Fibras sintéticas podem ser categorizadas em três tipos, como fibras de carbono, fibras de vidro (E-glass, S-glass and Z-glass) e aramida (poliamidas aromáticas, kevlar 49). A matriz polimérica (resinas) e as fibras de alta performance (carbono, vidro e aramida) são os dois principais componentes dos Compósitos SFRP. A combinação da matriz polimérica com as fibras de reforço, resultou na criação de diversos Materiais SFRP, incluindo carbono FRP (CFRP), vidro FRP (GFRP), aramida FRP (AFRP) e basalto FRP (BFRP). (Navaratnam *et al*, 2023)

Atualmente a evolução nas tecnologias de reforço FRP, foram significativamente influenciadas pela alta resistência à tração do SFRP em estruturas de concreto armado dentre a maioria das melhorias estruturais em infraestrutura. O comportamento à tração é considerado uma propriedade fundamental de um FRP usado no concreto estrutural de um projeto. Desta forma, o emprego do SFRP otimiza e contribui no desempenho como sendo reforço de elementos estruturais do concreto. (Navaratnam *et al*, 2023)

Na bibliografia, encontram-se duas subdivisões das fibras naturais, as fibras naturais de origem vegetal, ou simplesmente tratadas por fibras vegetais que podem ser extraídas a partir de folhas, sementes e caules, e as fibras naturais de origem animal, também tratadas por fibras animais, por exemplo o cabelo, a seda e a lã.

Em contraponto com a classificação de fibras realizada por Navaratnam *et al*, 2023, um estudo realizado na Universidade Plymouth do Reino Unido por SUMMERSCALES J. *et al*, trata as fibras chamadas de sintéticas por Navartan, como naturais minerais, são exemplos destas, o amianto e o basalto.

As fibras naturais podem ser provenientes de animais (por exemplo, cabelo, seda, lã), minerais (por exemplo, amianto e basalto) ou de plantas (por exemplo, folha, semente e caule). O uso de fibras naturais como reforço para compósitos de matriz polimérica, foi revisado por SUMMERSCALES *et al*. (2010a, 2010b, 2013), que lista diversos outros livros e análises dele. Esse capítulo centrar-se-á na utilização de fibras vegetais, uma vez que estas são atualmente objeto de considerável interesse, porque eles são recursos renováveis e por isso são percebidos como um recurso 'verde' ou 'sustentável'. (SUMMERSCALES J. *et al*, 2013)

Quanto às fibras vegetais, estas podem ser categorizadas segundo a região da planta de onde são extraídas. As fibras liberianas, extraídas da parte externa do caule, por onde percorre o floema, as fibras da folha, as fibras das gramíneas, das sementes e as fibras da madeira. As categorias estão exemplificadas abaixo:

Liberianas: Linho, cânhamo, urtiga e kenaf.

Folha: Abacá (cânhamo-de-manila), abacaxi e sisal.

Gramíneas: Bambu, miscanthus e palha de trigo.

Semente: Coco ou algodão.

Madeira: Pode ser extraída de várias espécies de madeiras.

As fibras vegetais podem ser classificadas de acordo com a sua localização na anatomia da planta. As principais divisões são, liber (do caule, por exemplo, linho, cânhamo e urtiga em zonas temperadas ou juta e kenaf em zonas tropicais), folha (por exemplo, abacá, abacaxi ou sisal), gramíneas (bambu, miscanthus ou palha de trigo), sementes (coco ou algodão) ou fibras de madeira. Todas essas fibras têm aplicação como reforço para compósitos. Os processos de crescimento, colheita, separação das fibras e sua origem podem variar, mas para as fibras liberianas, a sequência de execução do processo é normal e é descrita com mais detalhes em SUMMERSCALES *et al*, 2010a.

Apesar do grande apelo por conta do fator de redução do impacto ambiental e por se tratar de um recurso não escasso e renovável, que pode ser mantido através de plantações, as fibras vegetais são por natureza hidrofílicas, o que gera uma incompatibilidade com a matriz polimérica que é hidrofóbica, na fabricação dos polímeros reforçados com fibras, fazendo-se assim necessário alguns tratamentos prévios destas fibras.

A fabricação de compósitos de matriz polimérica pode reunir dois materiais que têm incompatibilidade inerente. As fibras naturais sem tratamento são hidrofílicas, enquanto os sistemas de matrizes poliméricas (especialmente polímeros olefínicos), podem ser hidrofóbicos. Tratamentos de superfície das fibras podem mudar a interface físico-química destas, melhorando o desempenho do sistema. (SUMMERSCALES J. *et al*, 2013)

5.6 Ensaio de Materiais e Estruturas

Neste subitem, damos relevância à bibliografia e aos ensaios realizados em estudos anteriores, com os polímeros reforçados com fibras, mais difundidos na construção civil, os polímeros reforçados com fibras de vidro ou GFRP.

Por se tratarem de materiais ortotrópicos, os perfis de polímeros reforçados por fibras apresentam relevante dificuldade nos ensaios em detrimento aos testes realizados para mensurar as resistências mecânicas de perfis de aço, alumínio ou de materiais não compostos, principalmente quando a geometria dos perfis não é homogênea, como no caso das vigas “W” e em

perfis onde a espessura ou alma, assim chamada, se diferencia em certas regiões dos perfis.

Outro agravante, como no caso dos perfis W, é a ligadura das abas à alma principal, que por conta da forma de fabricação, não extrudada, pode apresentar uma fadiga precoce aos esforços, tornando-se pontos de fragilidade.

Esses apontamentos conduzem a realização de testes pontuais para cada região de perfis heterogêneos, em sua geometria ou morfologia, e ao final, um teste realizado com o conjunto formado, o perfil em sua totalidade, estabelecendo uma média de resistência para que possivelmente atenda os pré-requisitos mecânicos desejados para suprirem as demandas de cada setor de destino da peça.

A situação é muito mais complicada para materiais GFRP pultrudados porque eles são inerentemente ortotrópicos. Consequentemente, no mínimo será necessário cortar amostras retangulares, paralelas e transversais ao comprimento de uma aba ou alma para determinar os módulos elásticos longitudinais e transversais, assim como as resistências do perfil. Além disso, devido à natureza da arquitetura da fibra do perfil, as resistências à tração e à compressão diferem, e muito mais testes devem ser realizados para determinar essas propriedades para materiais GFRP pultrudados do que para aço ou alumínio. (TURVEY G.J.,2023)

Diferentes entidades renomadas pelo mundo, criaram proposições para padronização dos ensaios mecânicos a serem realizados nestes perfis a fim de alcançar uma normativa viável a ser aplicada e laudada por órgãos especializados.

Existem vários padrões que descrevem em detalhes como esses testes de amostras devem ser realizados, sendo um dos primeiros o EN ISO 527-4. A American Society for Testing and Materials (ASTM) também desenvolveu padrões para testes de tração e compressão nos materiais de compósitos poliméricos reforçados com fibras. Eles prescrevem as formas e dimensões gerais das amostras, detalhes da aba, o número mínimo de amostras a serem testados e como os módulos e resistências devem ser determinados a partir das respostas de carga versus deformação. Além disso, para os ensaios de compressão, também são incluídas as descrições dos dispositivos anti-flambagem. Padrões semelhantes também foram desenvolvidos por outras organizações (ver, por exemplo, EN 13706-2). (TURVEY G.J.,2023)

Alguns testes propositalmente sofrem adequação nas amostras e acabam divergindo em partes da norma escolhida à ser seguida, pois muitos equipamentos para mensuração das forças foram criados para atender a indústria aeroespacial, que usava compósitos com fibras laminadas.

Certos padrões foram desenvolvidos para atender outras propriedades mecânicas relevantes para os perfis pultrudados, como rigidez e a resistência à tração através da espessura.

Deve-se considerar que padrões foram desenvolvidos para determinar várias outras propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados com fibras, por exemplo, a rigidez e resistência à tração através da espessura e a resistência de viga curta. Além disso, também deve ser reconhecido que muitos desses testes padrões foram desenvolvidos originalmente para material compósito reforçado com fibra laminada usado em aplicações aeroespaciais. (TURVEY G.J.,2023)

Com vistas a busca pela redução de peso da indústria aeroespacial, os compósitos poliméricos confeccionados a partir das fibras laminadas apresentam espessura reduzida, isso também graças à escolha da natureza da fibra escolhida que por vezes apresenta grande resistência e leveza, como o caso da fibra de carbono, e para atender à indústria da construção civil, as amostras levadas às bancadas de testes, costumeiramente requerem um espessamento em suas paredes, para atenderem à demanda deste setor, gerando um desvio no padrão sugerido pela norma à condição das amostras.

Conseqüentemente, eles nem sempre são aplicáveis a materiais GFRP pultrudados sem que haja um pequeno desvio da especificação da amostra recomendada ou modificações nos dispositivos de teste. A razão mais comum para isso é que as espessuras dos materiais nos compósitos aeroespaciais (predominantemente CFRP- Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono), devido à importância primordial da economia de peso, são geralmente mais delgadas do que os compósitos GFRP pultrudados, usados na engenharia civil. (TURVEY G.J.,2023)

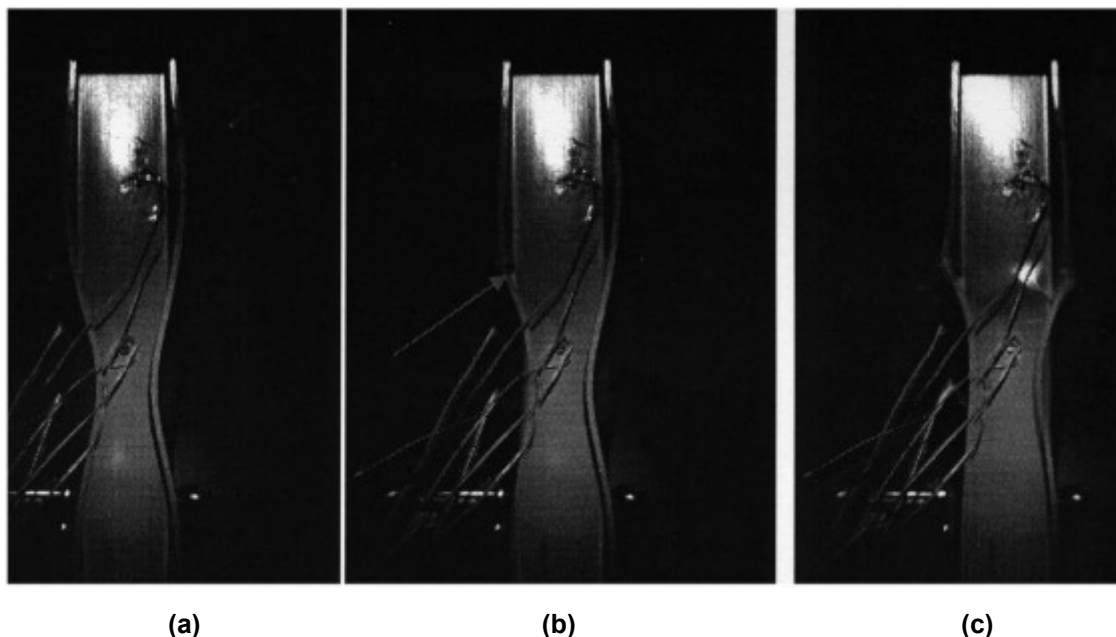
Quando submetidos aos testes, como mencionado anteriormente neste item, o ponto de maior fragilidade dos perfis pultrudados W, é a ligadura da aba com a alma, conhecido também por junção alma-flange, região esta onde ocorre o colapso primário quando o perfil é submetido às diferentes cargas e tensões combinadas, principalmente na região destas junções, pois a

arquitetura das fibras neste ponto diverge das que estão alocadas na alma do perfil e nas abas. Isto se aplica a outros compósitos pultrudados de geometria composta, onde haja acoplamentos ou curvaturas de angulação acentuada, caso em que a morfologia ou sentido das fibras divergem ao longo deste.

Testes em vigas e pilares WF mostraram que o colapso final é geralmente desencadeado por trincas localizadas e/ou separação de uma ou ambas as mesas da alma. Este modo de colapso ocorre dentro do regime “pós-encurvado”, de modo que, no instante do colapso, a chamada junção alma-flange é submetida a um estado de tensão combinada. No entanto, dentro da junção alma-flange, a arquitetura da fibra difere daquela na alma e nos flanges. Consequentemente, os dados de resistência derivados de testes padronizados de amostras de alma ou flange não refletem adequadamente as resistências das junções de alma-flange dos perfis. O reconhecimento dessa situação levou ao desenvolvimento de uma série de testes fora do padrão das amostras de perfis. Os testes foram desenvolvidos para quantificar os módulos de tração, cisalhamento, flexão e as resistências das junções de perfis de flange largo (WF), com ângulos iguais. As resistências podem então ser usadas para formular critérios de falha para as junções. (TURVEY G.J.,2023)

A figura abaixo demonstra o colapso e o momento da flambagem de uma de uma viga w pultrudada confeccionada a partir da fibra de vidro e matriz polimérica em um teste de compressão axial. Podemos reparar que nos momentos iniciais da flambagem, esta ocorre justamente na junção entre a alma e a aba, região de maior fragilidade. Alguns fatores poderiam contribuir para isto, mas no caso dos perfis poliméricos reforçados por fibras, tal situação ocorre pelo depósito assimétrico das fibras ao longo das diferentes regiões dos perfis, principalmente nos ângulos e curvaturas.

Figura 35: Imagens de vídeo de alta velocidade da sequência de flambagem e falha de uma coluna W curta pultrudada, submetida a compressão axial



- (a) - O estado de flambagem pós localizada imediatamente antes do início da falha. (b) - O instante do início da falha na junção esquerda da alma com o flange (veja a ponta da seta). (c) - Desenvolvimento de mais falhas em ambas as junções alma-flange e na alma.

Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

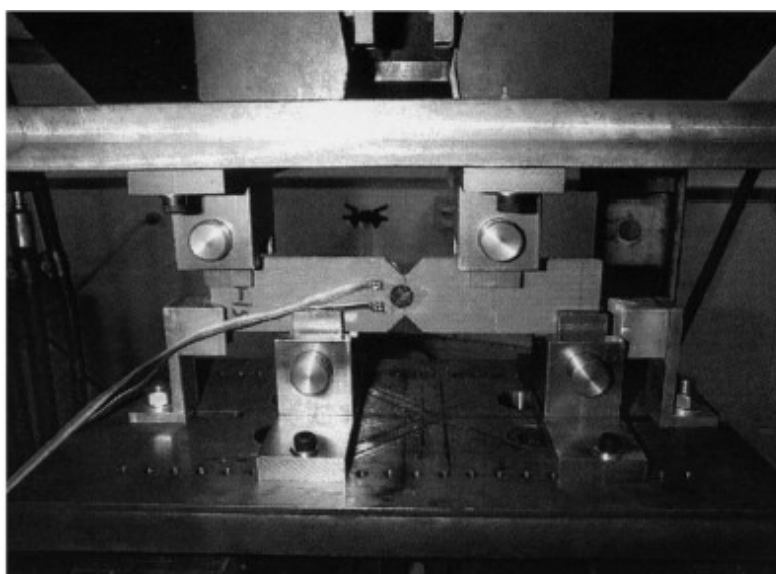
Na crença de que o colapso de colunas GFRP pultrudadas é um processo dinâmico, imagens de vídeo de alta velocidade foram usadas para tentar capturar o início e a progressão da falha durante testes de compressão axial em colunas WF curtas. Três imagens do evento de falha de um desses testes são mostradas na Fig. 11.26. A imagem à esquerda mostra a coluna em um estado pós-flambagem estável. A imagem do meio, tirada cerca de 1/2000 de segundo depois, mostra que a falha começa na junção LH da alma da coluna. Essa imagem é particularmente significativa, principalmente porque muitos analistas estruturais tendem a ignorar o fato de que, mesmo na presença de simetria estrutural e de carga em escala macro, as estruturas de materiais compostos geralmente falham de forma assimétrica. A razão é simplesmente, na microescala, as fibras e a matriz não são distribuídas simetricamente, principalmente nas junções alma-flange. A imagem à direita mostra o desenvolvimento do modo de colapso. Nesta imagem, a falha se desenvolveu nas junções LH e RH do flange da alma e ambos os flanges começaram a colapsar como resultado do rompimento local das junções do flange da alma. Também é evidente que a alma está começando a inchar localmente devido ao rompimento da junção da alma direita com o flange. (TURVEY G.J.,2023)

A patologia inicial mais comum observada nestes tipos de perfis pultrudados, quando submetidos aos testes mecânicos, fossem de compressão, flexão ou torção, foi a delaminação nas bordas e flanges.

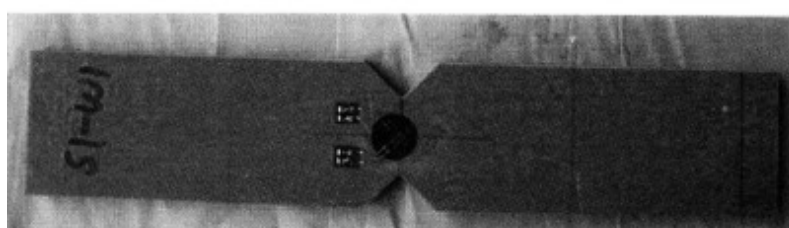
Visto que os pontos de maior fragilidade, que primeiramente cedem aos esforços aplicados ao perfil, se apresentam nas abas, ligaduras, flanges e junções, foram desenvolvidos alguns testes pontuais para cada seção.

A figura a seguir exemplifica um teste de flexão assimétrica de quatro pontos para mensurar a tensão de cisalhamento em uma amostra de GFRP, entalhada em v e com extensômetro biaxial colado ao seu centro.

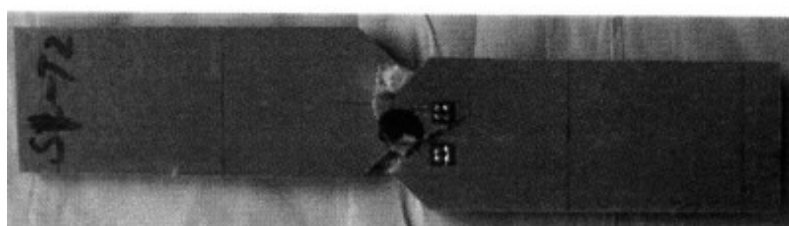
Figura 36: Teste de flexão assimétrica de quatro pontos para medição da tensão de cisalhamento



(a)



(b1)



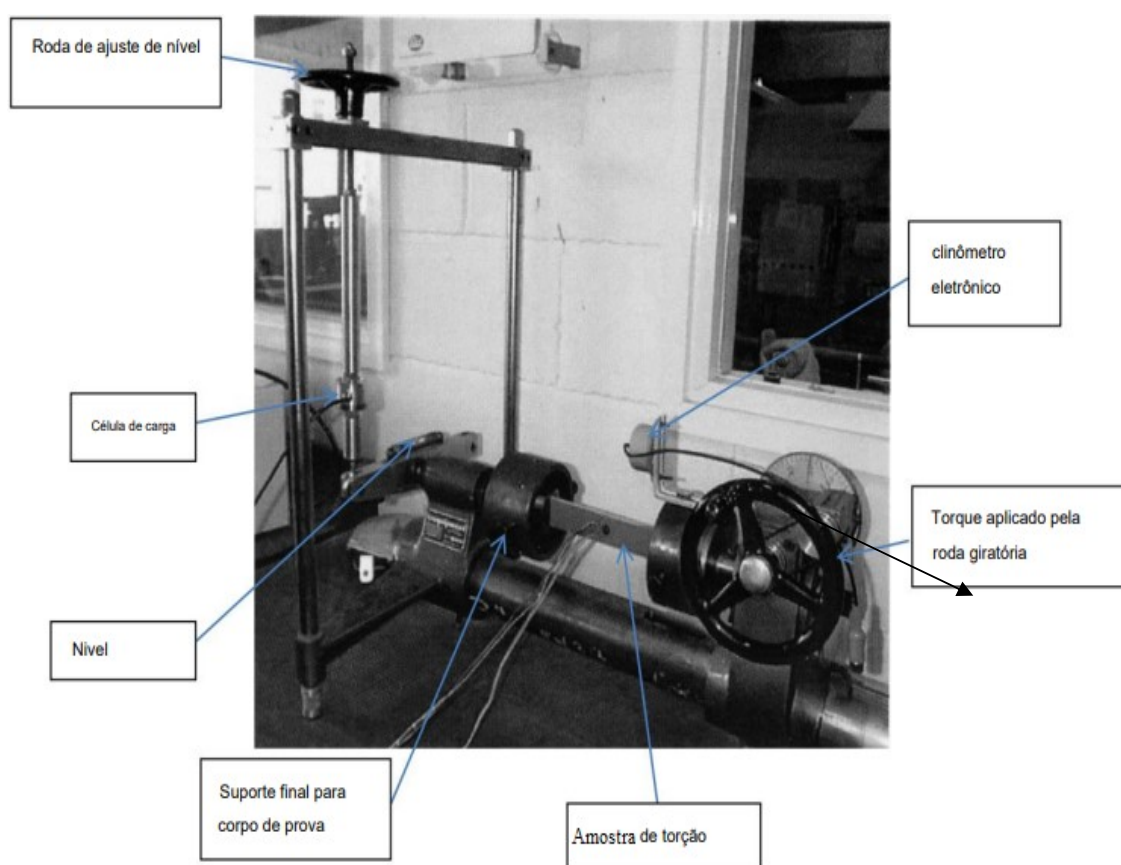
(b2)

(a) - Amostra de GFRP inserida em equipamento para ensaio de flexão de 4 pontos. (b1) - Amostra de GFRP antes do ensaio. (b2) - Amostra de GFRP apresentando deformação por cisalhamento após a execução do teste.

Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

A figura 37 abaixo mostra um dispositivo de teste de torção axial para mensurar o módulo de cisalhamento e a resistência final ao cisalhamento da amostra de GFRP pultrudados.

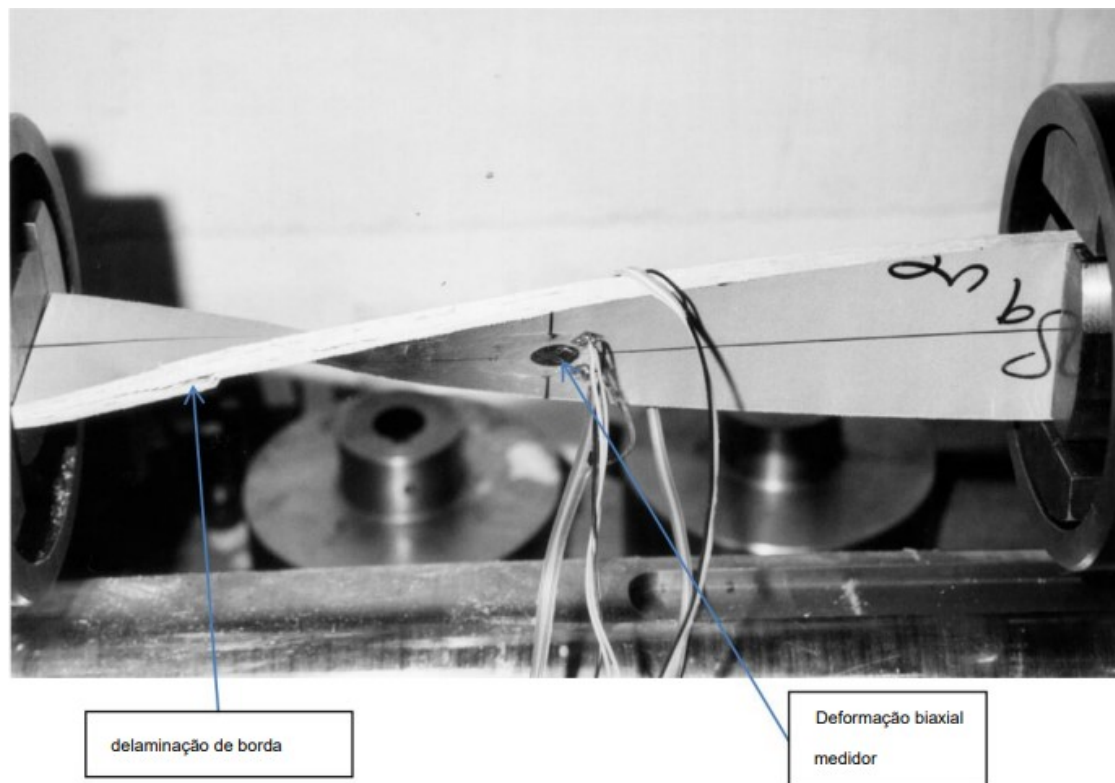
Figura 37: Ensaio de torção sobre amostra de GFRP



Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

O equipamento acima demonstrado, permite também ensaios em outros formatos de amostras, onde basicamente é necessária a troca dos gabaritos das presilhas onde são fixadas as amostras ao equipamento.

Figura 38: Amostra de GFRP submetida a ensaio mecânico de torção



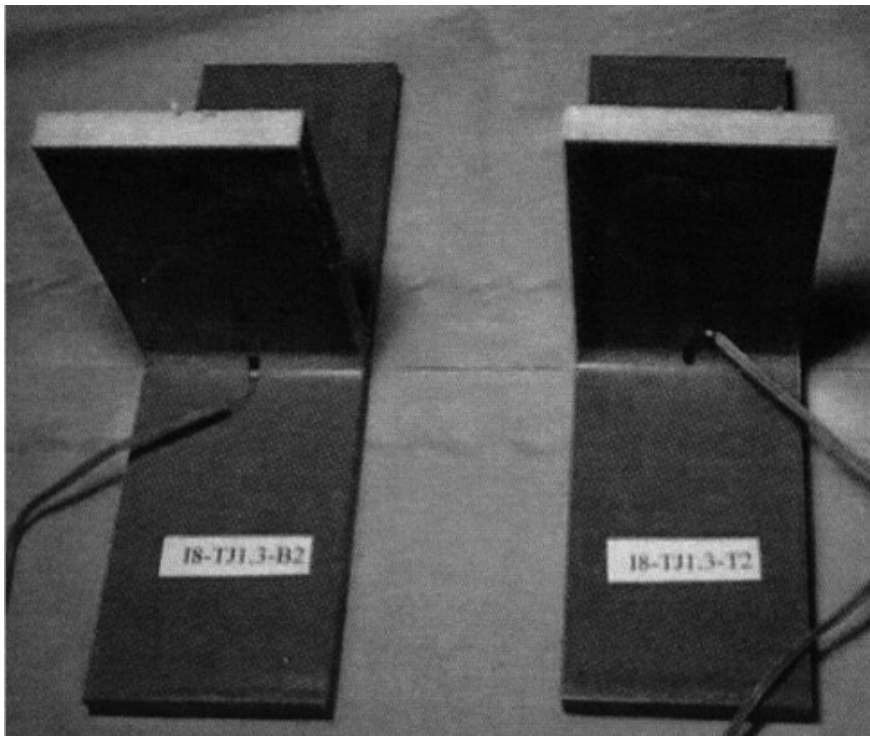
Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Após submetida ao teste, nota-se a deformação biaxial da amostra assim como sua delaminação de borda, que ocorrem antes do colapso total da peça.

Para os testes nas regiões da alma-flange, por vezes são necessárias adaptações aos equipamentos de ensaios e aos corpos de prova.

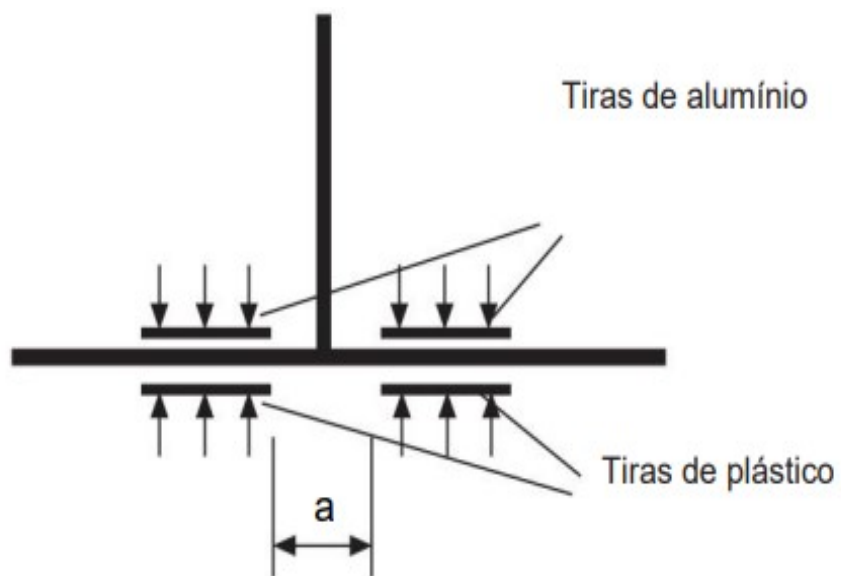
Para um ensaio de resistência à tração na região da alma-flange de uma viga W de GFRP pultrudada, foi realizado um corte longitudinal em um pedaço de viga W e posteriormente seccionada de forma transversal, deixando assim a amostra em formato de T.

Figura 39: Amostra em T de viga W (GFRP) pultrudada



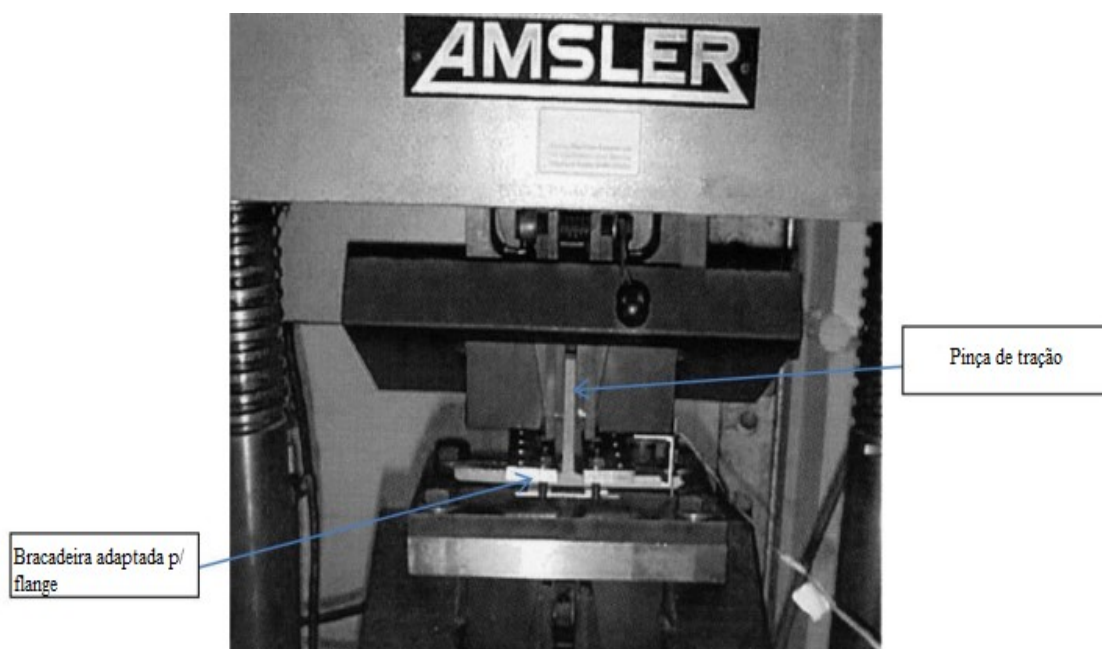
Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Figura 40: Adaptação do gabarito para o teste da amostra em T de GFRP



Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Figura 41: Ensaio de tração para junção alma-flange

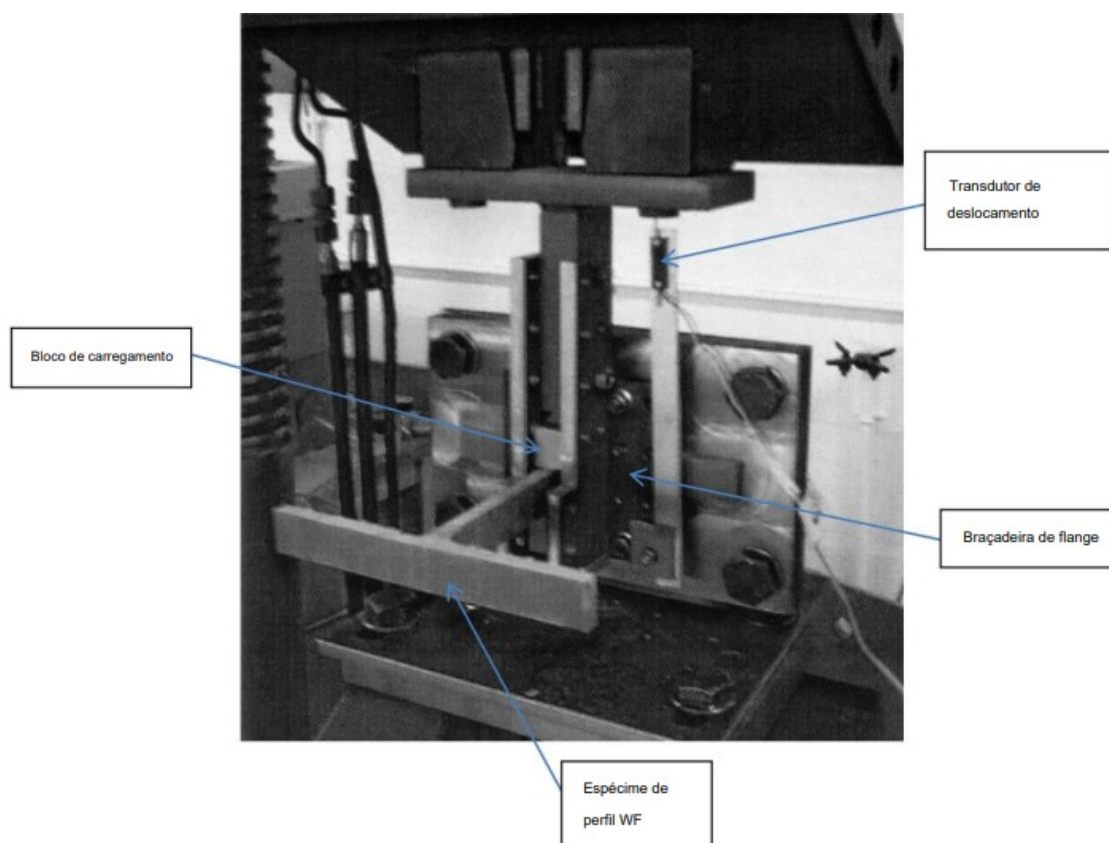


Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Neste ensaio, é aplicada uma força de tração até que haja a ruptura na ligação alma-flange, onde estão acoplados dois extensômetros para quantificar a força de tração aplicada no momento de ruptura.

Também foi desenvolvido um outro teste mais complexo do que o supracitado, para quantificar a resistência ao cisalhamento das junções alma-flange dos perfis W pultrudados. Para tal, cortes transversais são feitos nestas vigas W e extraídas amostras em formato I, para serem usadas como corpos de prova.

Figura 42: Ensaio de cisalhamento em vigas W (GFRP) pultrudadas

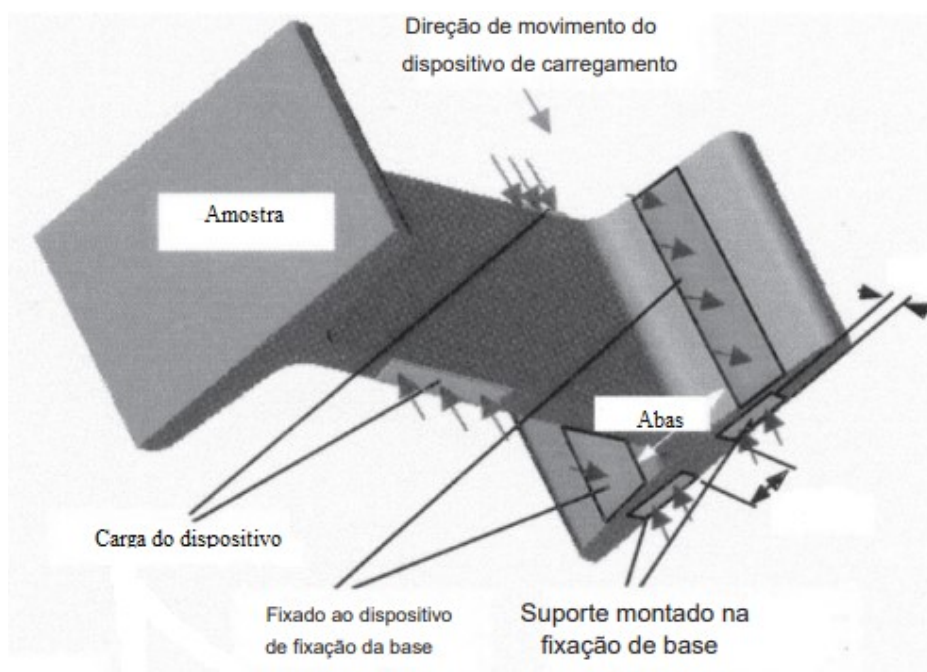


Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Neste teste, uma carga vertical é aplicada rente ao suporte de fixação através do bloco de carregamento, que pode ser observado pela seta à esquerda da figura acima.

A imagem a seguir demonstra com mais detalhes o formato da amostra, os locais de fixação no equipamento de ensaio e onde são exercidas as forças.

Figura 43: Corpo de prova ampliado de seção de viga W (GFRP) pultrudada



Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

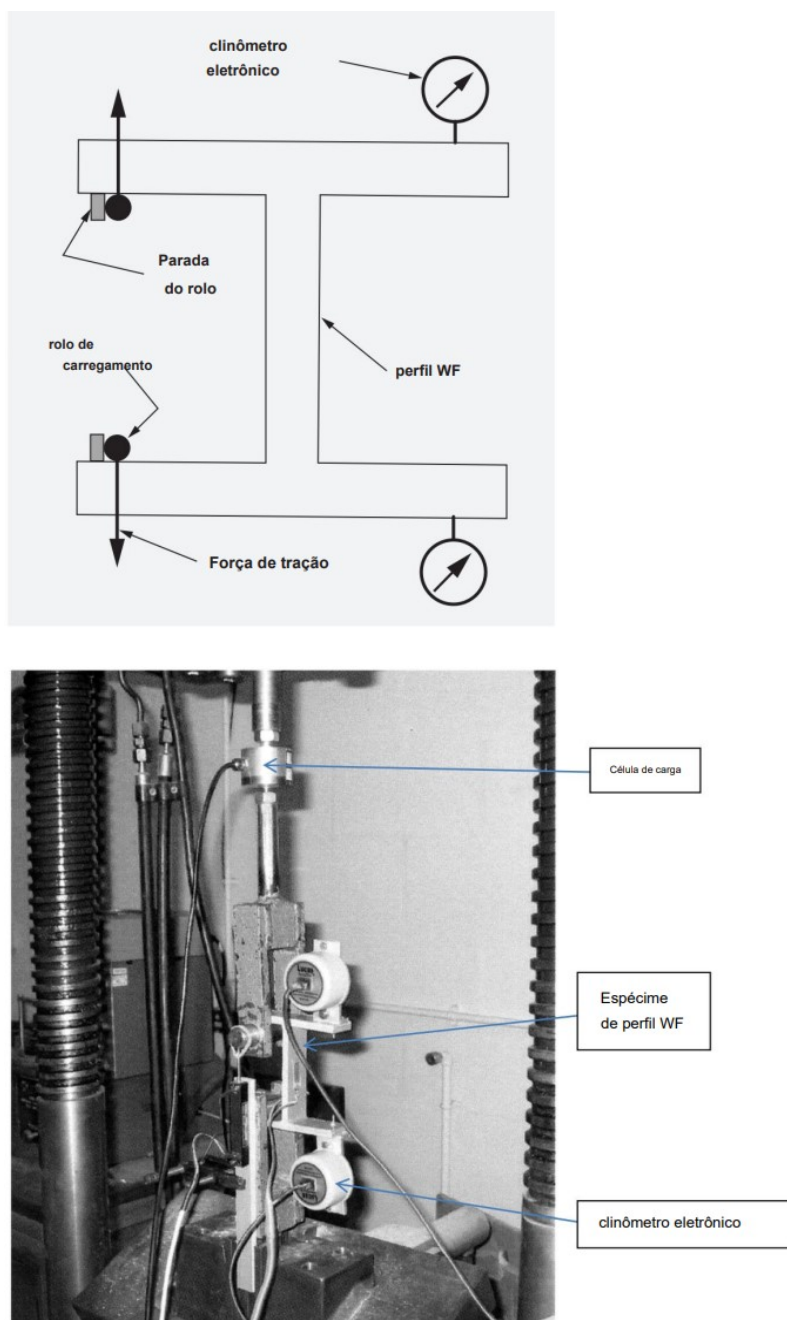
Testes de flexão para as ligações alma-flange também foram criados e adaptados, dentre estes, há um teste em que se pode mensurar tanto a resistência à flexão quando a rotação na junção alma-flange das amostras de viga W (GFRP) pultrudadas.

Neste ensaio, usando como amostra uma seção de viga W, apresentando uma geometria de I, forças de tração de mesma direção e sentidos opostos são aplicadas em um dos lados dos flanges, tanto na superior quanto na inferior, sujeitando ambas às mesmas forças e gerando a abertura angular nas pernas dos flanges de um dos lados (flexão no modo de abertura) e o conseqüente fechamento angular nas pernas dos flanges do lado oposto.

Com o intuito de medir as rotações nos ângulos das junções alma-flange, foram instalados dois clinômetros eletrônicos no lado oposto dos flanges ao que recebe as cargas de tração, tanto no flange superior quanto inferior.

Na figura 44 abaixo, estão representados o esboço do corpo de prova, o esquema de forças que atuam sobre ele, a região da inserção dos clinômetros eletrônicos e a imagem do equipamento de ensaio usado neste teste.

Figura 44: Esquema e esboço do corpo de prova de seção de viga W (GRFP) Pultrudada, das forças de atuação e imagem do equipamento de ensaio utilizado

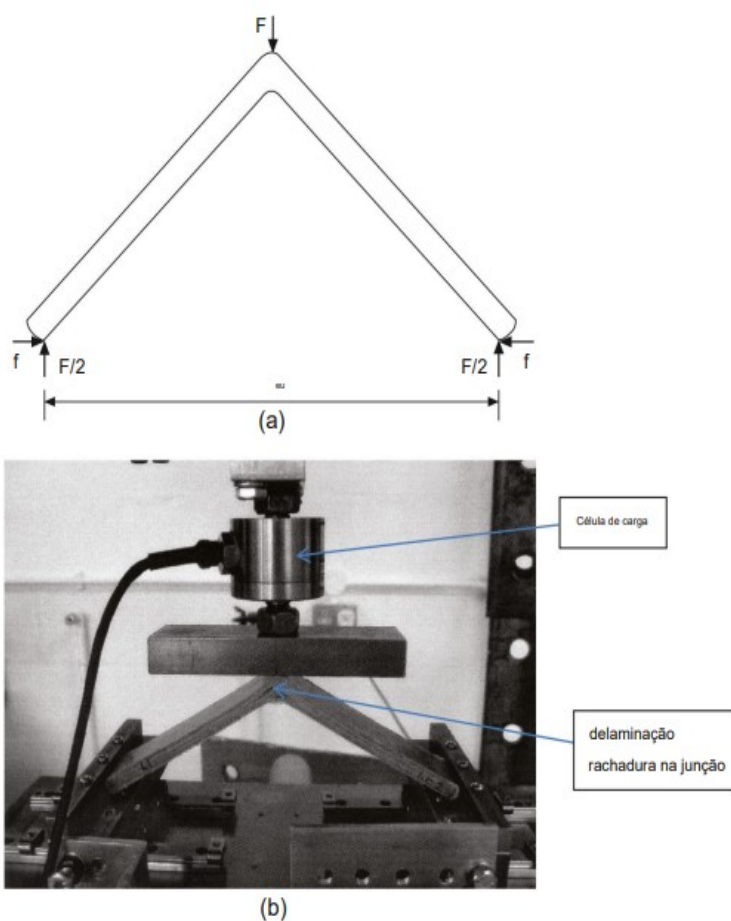


Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Um outro teste específico de flexão para as junções de perfis de ângulos iguais foi desenvolvido e consiste em um ensaio de flexão de três pontos, onde uma amostra em forma de L com pernas simétricas ou V invertido, como uma chapa retangular dobrada, é submetida à uma força vertical em seu vértice, quando colocada à bancada de testes, tendo os dois outros pontos apoiados à mesa. Esta força é aplicada até o colapso total da

peça, porém, durante o processo de deformação, são averiguados os módulos de plasticidade e delaminação do material, como vemos no diagrama e na imagem da figura 45.

Figura 45: Esboço de corpo de prova de seção de perfil de ângulos simétricos, esquema de forças e equipamento adaptado para teste de flexão de três pontos



(a) - Esquema dos vetores de força e esboço do corpo de prova. (b) - Equipamento adaptado para o teste de flexão de três pontos no corpo de prova de GFRP, e o momento da falha na junção das pernas quando submetida à força vertical de teste.

Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

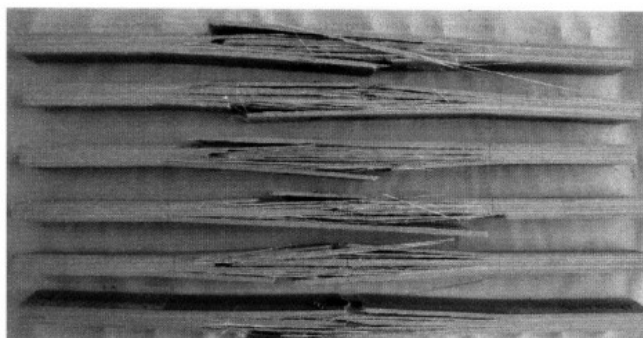
Segundo TURVEY G.J.,2023, ao apresentar em seu trabalho imagens ampliadas de delaminações e rupturas dos materiais pultrudados quando submetidos aos diferentes ensaios mecânicos, com forças empregadas em diferentes eixos, nos faz questionar o uso dos materiais poliméricos

reforçados por fibras, onde estes apresentariam melhor performance em detrimento à orientação direcional das forças.

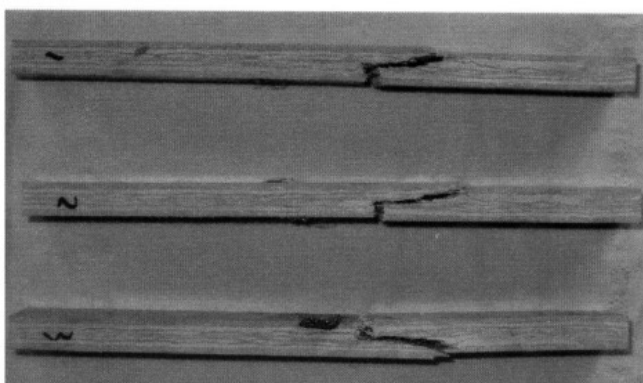
Cargas de tração na mesma direção da pultrusão, do longo eixo, aplicada de forma paralela às fibras, fios ou à progressão do material fibroso e cargas aplicadas transversalmente ao sentido da pultrusão, fazem com que os perfis pultrudados apresentem relevantes diferenças nas resistências mecânicas, balizando assim o emprego e dimensionamento do material.

Na figura 46 em uma rápida análise visual, onde para o ensaio mecânico foram aplicadas forças em amostras semelhantes de vigas W de (GFRP) pultrudadas sem abas, mas com orientação direcional das forças aplicadas diferentes, sendo uma paralela e outra perpendicular à pultrusão, analisamos em (a), quando aplicada a força, no sentido paralelo à pultrusão, uma delaminação precoce e mais extensa do que enxergamos na imagem (b), onde a carga aplicada na amostra foi perpendicular ao sentido da pultrusão.

Figura 46: Delaminação e ruptura por cargas paralelas e transversais



(a)



(b)

(a) - Delaminação extensa em amostra de (GFRP) ocasionada por força aplicada no sentido paralelo ao da pultrusão do material. (b) - Ruptura focal em amostra de (GFRP) ocasionada por força aplicada no sentido perpendicular ao da pultrusão.

Fonte: (TURVEY G.J.,2023)

Diferente do aço, onde o calculista e o projetista não necessitam de maiores preocupações e cuidados com os módulos de resistência, uma vez que habitualmente já são fornecidos pelos fabricantes e também conhecidos pela indústria da construção civil por conta de suas inúmeras empregabilidades trazendo dados assertivos diante de um campo amostral enorme que vem sendo testado ao longo de séculos, gerando e alimentando sistemas de cálculo estrutural que facilitam o trabalho do profissional encarregado, os polímeros reforçados por fibras, por serem materiais ortotrópicos, ou seja, materiais que tem características que diferem ao longo dos três eixos ortogonais e sua análise depende do ponto em que são observadas, necessitam ainda de estudos mais meticulosos onde deve se levar em conta, as diferentes partes que formam a geometria do perfil à ser utilizado, de maneira independente, assim como testes e ensaios mecânicos para cada uma destas regiões e posteriormente, através dos dados coletados que muitas vezes surgem oriundos de testes adaptados, como vimos nessa dissertação, partir para o cálculo estrutural do conjunto.

Para estruturas metálicas, como aço, geralmente é suficiente realizar uma série de ensaios de tração em corpos de prova especificados de acordo com a norma relevante, por exemplo, BS EN ISO 6892 - 1:2009, para determinar o módulo de elasticidade e força de rendimento. Na verdade, o projetista estrutural geralmente não precisa se envolver com a determinação dessas propriedades, elas são fornecidas pelos fornecedores das seções de aço ou os valores são fornecidos no código de projeto de aço estrutural.

A situação é muito mais complicada para materiais GFRP pultrudados porque eles são inerentemente ortotrópicos. Conseqüentemente, é no mínimo, necessário cortar amostras retangulares paralelas e transversais ao comprimento de uma aba ou alma, para determinar os módulos elásticos longitudinais, transversais e as resistências do perfil. Além disso, devido à natureza da arquitetura da fibra do perfil, as resistências à tração e à compressão diferem muito, assim sendo, muito mais testes devem ser realizados para determinar essas propriedades para materiais GFRP pultrudados do que para aço ou alumínio. (TURVEY G.J.,2023)

6 CONCLUSÃO

No estudo bibliográfico, há notória percepção de que os substratos mais usados nos compósitos poliméricos reforçados por fibras são aqueles de carbono e de vidro. Aponta-se como trabalhos futuros desta dissertação, ensaios mecânicos de perfis pultrudados, com aquelas que podem ser as substitutas em potencial das fibras sintéticas, naturais e as fibras encontradas em maior escala dentro da indústria têxtil, auferindo através dos testes as características peculiares de cada compósito estruturado com tais materiais, buscando atender de forma mais eficaz o viés ambiental e apontando as resistências peculiares a cada ensaio de força.

Dentre os fatores observados, levou-se em conta a questão da afinidade pela absorção de água, de cada fibra. As fibras mais requisitadas e com melhor desempenho quando agregadas aos compósitos, foram as sintéticas, pela sua hidrofobia. A baixa ou nenhuma afinidade com água contribui para que durante o processo, não ocorra a absorção ou a liberação de líquidos absorvidos anteriormente por essas fibras, o que comprometeria a aderência e ligação dos componentes do compósito em sua fabricação. As fibras naturais, principalmente as de origem vegetal, se mostraram acentuadamente hidrofílicas, tendo seu uso viabilizado mediante a tratamentos prévios de superfície, para assim torná-las relevantemente hidro-repelentes, a ponto de viabilizar seu uso, mas são processos onerosos e que geram certo impacto ambiental, por vezes contraditórios à proposta do uso das fibras vegetais.

Ao longo dos estudos, notamos uma diferença na categorização de um grupo específico de fibras e foi enunciada neste trabalho afim de dirimir possíveis entroncamentos futuros, ao exemplo do contraponto entre os autores Navaratnam e SUMMERSCALES J. onde este último intitula as fibras chamadas de sintéticas por Navartnam, como naturais minerais. SUMMERSCALES também subdivide as fibras naturais em mais dois outros subgrupos, os das fibras vegetais e das de origem animal.

Reincidentemente, trabalhos anteriores, se usam da análise da performance de perfis pultrudados e reforços poliméricos confeccionados a partir de um sistema híbrido de fibras, buscando contemplar tanto a redução do

impacto ambiental quanto atender as normativas e especificações da indústria da construção civil no quesito do desempenho mecânico.

Os compósitos poliméricos reforçados com fibras, aqui suscitados, se mostraram eficientes também nos reparos de estruturas danificadas ou comprometidas, fosse pela ação do tempo, questões sísmicas ou abalos mecânicos.

No decorrer dos estudos e através de dados de ensaios mecânicos e citações, observamos que algumas regiões dos perfis pultrudados, especialmente os mais apontados e mencionados nessa dissertação como o caso das vigas W de (GFRP) pultrudadas, são mais suscetíveis a danos e colapsos, são essas zonas das junções alma-flange ou regiões de ligaduras e ângulos no caso dos outros tipos de perfis como os retangulares, quadrados, cantoneiras ou triangulares. Alguns fatores contribuem para isso, o próprio fato de tratarmos de materiais e perfis ortotrópicos com diferentes orientações direcionais das fibras dentro do compósito, já sugere um importante quesito a se levar em conta, assim como o fato do perfil ser pultrudado e não extrudado, trazer limitações da produção homogênea e contínua do material, uma vez que para certos perfis, flanges e abas podem ser agregadas em um segundo momento, facilitando um ponto de fragilidade nos acoplamentos. Assim como tantas outras peculiaridades dos compósitos poliméricos reforçados por fibras, questões como as supracitadas nos dão um pequeno vislumbre do quão grande são as variáveis a serem estudadas, conduzindo cada vez mais a um direcionamento do estudo, já que o assunto abordado apresenta uma gama extremamente acentuada de abordagens e vertentes.

REFERÊNCIAS

A. S. G. MESQUITA. **Análise da Geração de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Teresina, Piauí**, 2012. HOLOS, Ano 28, Vol. 2. Instituto Federal do Piauí. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/835/530>. Acesso em 3 de março de 2022.

ACI 440.1R-15, 2015. **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. American Concrete Institute.

AFIFI, M. Z., MOHAMED, H. M., BENMOKRANE, B., 2014. **Axial capacity of circular concrete columns reinforced with glass-FRP bars and spirals**. Journal of Composites for Construction, 18, pp. 04013017.

ASSIS, R.G., **Um estudo sobre arquitetura têxtil no Brasil: o segmento de mercado das estruturas tensionadas feitas com membranas de poliéster/PVC**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação Têxtil e Moda, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

BAHAMÓN, A. **Arquitectura Textil: Transforma El Espacio, Espanha**: Instituto Monsa de Ediciones, S.A., 2004.

BANK L C. **Composites for Construction—Structural Design with FRP Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

BANK LC. **Composites for construction: structural design with FRP materials**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

BS EN ISO 13706–3:2002. **Reinforced plastics composites. Specifications for pultruded profiles**. Part 3: Specific requirements, British Standards Institution.

CIRIA C779. In: MOTTRAM J.T., HENDERSON J. (eds.). **Fibre-reinforced polymer bridges – guidance for designers**. London, UK: CIRIA, 2018, pp. 6.

Engineered for the automotive industry. Disponível em: <http://cqfd-composites.com/ultimate-mechanics>. Acesso em 02 de abril de 2022.

GAND A. K., CHAN T. M., MOTTRAM J. T. **Civil and structural engineering applications, recent trends, research and developments on pultruded fiber reinforced polymer closed sections: a review** Frontiers Structural Civil Engineering. 7(3). London, pp. 227–244. 2013

HOLLOWAY L C. **The evolution of and the way forward for advanced polymer composites in the civil infrastructure**. Construction & Building Materials, 2003, 17(6–7): 365–378.

- IBRAHIM S, POLYZOIS D, HASSAN S. **Development of glass fibre reinforced plastic poles for transmission and distribution lines.** Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(5): 850–858.
- JARIWALA H., JAIN P. **A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications.** J Reinf Plast Compos 2019; 38: 441–453
- MOHAMED H M, MASMOUDI R. **Axial load capacity of concretefilled FRP tube columns: Experimental versus theoretical predictions.** Composites for Construction, 2010, 14(2): 231–243.
- MOHAMED H M, MASMOUDI R. **Deflection predictions of steel and FRP-reinforced concrete-filled FRP tube beams.** Composites for Construction, 2011, 15(3): 462–472.
- MORTENSEN K.P., PETTERSON R.W., **Fiberglass reinforced polyester in cooling towers – structural application.** In: Cooling Technology Institute Annual Conference (eds. Rees B, Nelissen P, Cerra H, et al.). Corpus Christi, Texas, 3-7 February 2013, Red Hook, pp. 286–294. New York: Curran Associates.
- MOTTRAM J T. **Evaluation of design analysis for pultruded fibre-reinforced polymeric box beams.** Structural Engineer, 1991, 69(11): 211–220.
- SAFONOV A.A, CARLONE P., AKHATOV I. **Mathematical simulation of pultrusion processes: a review.** Compos Struct 2018; 184: 153–177.
- SANTOS F.C.A. , CARDOSO D.C.T. **COMPORTAMENTO DE PLACAS FINAS DE CONCRETO TÊXTIL SUJEITAS À COMPRESSÃO**, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro , CILAMCE 2017.
- SARFARAZ R, VASSILOPOULOS A.P., KELLER T. **Block loading fatigue of adhesively bonded pultruded GFRP joints.** Int J Fatigue 2013; 49: 40–49.
- VEDERNIKOV A., SAFONOVA. , TUCCI F. , CARLONE P. and AKHATOV I. **Pultruded materials and structures: A review** Journal of Composite Materials 2020, Vol. 54(26) 4081–4117.
- WU Z., MIRMIRAN A., ZHU Z., SWANSON J. **Flexural behaviour of prestressed FRP tubular bridge deck.** Composites. Part B, Engineering, 2009, 40(2): 125–133.

____ <https://www.isocompositos.com.br/pultrusao.asp>. Acesso em 5 de março de 2022.

____ <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>. Acesso em 5 de março de 2022.

____ www.aeroexpo.online/pt/prod/zwick-gmbh-co-kg/product-182711-48393.html. Acesso em 25 de março de 2022.

Pultrusion of braids ----- M. Milwich Institut für Textil- und Verfahrenstechnik der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, Denkendorf, Germany; Hochschule Reutlingen, Reutlingen, Germany ----- Advances in Braiding Technology

Navaratnam et al **“Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment”** Journal of Building Engineering 66 (2023).

Jacobs et al,2023-Evaluation of flexural strengthening methods for beams with simulated deterioration using spike-anchored FRP externally bonded sheets and near-surface-mounted strips. Composite Structures 305 (2023) 116463

Corradi M. et al.,2021- Local FRP reinforcement of existing timber beams - Composite Structures 258 (2021)

Manufacturing methods for natural fibre composites- SUMMERSCALES J. et al, 2021.

G.J. Turvey - Testing of pultruded glass fiber-reinforced polymer (GFRP) composite materials and structures - - 2023 (Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering 2023, Pages 343-441)

T. Hara, Tunnel Lining with Corrugated FRP Sheets, Computing in Civil and Building Engineering, 2014.

S.H. Kim, G.N. Kim, S.J. Hong, C.W. Kim, W.S. Jang, S.J. Yoon, Structural Behavior of FRP Lighting Pole System, Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 2010.

A. Godat, F. Légeron, V. Gagné, B. Marmion, Use of FRP pultruded members for electricity transmission towers, Compos. Struct. (2013).

J. Smits, Fiber-reinforced polymer bridge design in The Netherlands: architectural challenges toward innovative, sustainable, and durable bridges, Engineering (2016).

G. Hegemier, L. Stewart, Application of Fiber-Reinforced Polymers to Reinforced Concrete Bridges, Innovative Bridge Design Handbook, Elsevier, 2016.

S. Rajagopal, S. Prabavathy, Investigation on the seismic behavior of exterior beam–column joint using T-type mechanical anchorage with hair-clip bar, J. King Saud Univ. Eng. Sci. (2015).

S. Nasrin, S. Khusru, Z. Tafheem, Fiber reinforced polymers for seismic retrofitting of structures, in: 4th Annual Paper Meet and 1st Civil Engineering Congress, 2011, Dhaka, Bangladesh.

T.C. Triantafillou, Seismic retrofitting of structures with fibre-reinforced polymers, *Prog. Struct. Eng. Mater.* (2001).

V.V. Cao, S.Q. Pham, Damage-based seismic retrofitting approach for nonductile reinforced concrete structures using FRP composite wraps, *Adv. Civ. Eng.* (2020).

S.N. Bousias, T.C. Triantafillou, M.N. Fardis, L. Spathis, B.A. O'Regan, Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without corrosion, *Struct. J.* (2004).

A. Maazoun, B. Belkassem, B. Reymen, S. Matthys, J. Vantomme, D. Lecompte, Blast response of RC slabs with externally bonded reinforcement: experimental and analytical verification, *Compos. Struct.* (2018).

S. Luhar, T. Suntharalingam, S. Navaratnam, I. Luhar, J. Thamboo, K. Poologanathan, P. Gatheeshgar, Sustainable and renewable bio-based natural fibres and its application for 3D printed concrete: a review, *Sustainability* (2020).

S. Leipold, A. Petit-Boix, The circular economy and the bio-based sector- Perspectives of European and German stakeholders, *J. Clean. Prod.* (2018).

R. Blok, J. Smits, R. Gkaidatzis, P. Teuffel, Bio-based composite footbridge: design, production and in situ monitoring, *Struct. Eng. Int.* (2019).

J. Smits, R. Gkaidatzis, R. Blok, P. Teuffel, Bio-based composite pedestrian bridge—Part 1: design and optimization, in: *Proceedings of IASS Annual Symposia, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, 2016, pp. 1–10.

D. Mathijssen, Innovative bio-composite bicycle swing bridge “Ritsumasy!” in The Netherlands shows why the industry should embrace bio-based composites, *Reinforc. Plast.* (2020).

R. Ahmad, R. Hamid, S. Osman, Physical and chemical modifications of plant fibres for reinforcement in cementitious composites, *Adv. Civ. Eng.* (2019).

F. Steffens, H. Steffens, F.R. Oliveira, Applications of natural fibers on architecture, *Procedia Eng.* (2017).

Y.G. Thyavihalli Girijappa, S. Mavinkere Rangappa, J. Parameswaranpillai, S. Siengchin, Natural fibers as sustainable and renewable resource for development of eco-friendly composites: a comprehensive review, *Front. Mater.* (2019).

M. Sanjay, G. Arpitha, L.L. Naik, K. Gopalakrishna, B. Yogesha, Applications of natural fibers and its composites: an overview, *Nat. Resour.* 7 (3) (2016) 108–114. [207] M. Fan, F. Fu, Introduction: a Perspective—Natural Fibre Composites in Construction, *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Elsevier, 2017.

X. Yang, W.-Y. Gao, J.-G. Dai, Z.-D. Lu, K.-Q. Yu, Flexural strengthening of RC beams with CFRP grid-reinforced ECC matrix, *Compos. Struct.* (2018).

H. Toutanji, L. Zhao, Y. Zhang, Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix, *Eng. Struct.* (2006).

P. de la Rosa García, A.C. Escamilla, M.N.G. García, Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials, *Compos. B Eng.* 55 (2013).

[250] L. Canning, S. Luke, Development of FRP bridges in the UK—an overview, *Adv. Struct. Eng.* (2010).

T. Aravinthan, A. Manalo, Field applications and case studies of FRP in civil infrastructure: the Australian experience, in: *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*, International Institute for FRP in Construction (IIFC), 2012.

K. Mei, Y. Li, Z. Lu, Application study on the first cable-stayed bridge with CFRP cables in China, *J. Traffic Transport. Eng.* (2015).

H. Auman, C. Stratford, A. Palermo, An overview of research and applications of FRP in New Zealand reinforced concrete structures, *Struct. Eng. Int.* (2020).

C. Allen, J. Noonan, N. Cosic, in: *Strengthening of the West Gate Bridge Concrete Viaducts*, Austroads Bridge Conference, 8th ed., 2011 Sydney, New South Wales, Australia, 2011.

Freger, G.E., Kestelman, V.N., Freger, D.G., 2005. *Braiding Pultrusion Technology for Advanced, for Advanced Structural Composites*. McGraw-Hill, ISBN 0-07-143478-X.

Gabler, M., 2012. *Funktionsintegrierte Faserverbundwerkstoffe e ein Beitrag zu strukturintegrierter Sensorik (Dissertation)*. Universitat Stuttgart.

Garthaus, C., Barfuss, D., Witschel, B., Gude, M., 2015. Tape braiding: high-performance fibre-reinforced thermoplastic profile structures. *JEC Compos. Mag.*

Milwich, M., Speck, T., Speck, O., Stegmaier, T., Planck, H., 2006. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom. *Am. J.*

Gómez EP, González MN, Hosokawa K, Cobo A. Experimental study of the flexural behavior of timber beams reinforced with different kinds of FRP and metallic fibers. *Compos Struct* 2019.

Borri A, Corradi M. Strengthening of timber beams with high strength steel cords. *Compos Part B - Eng* 2011.

Soriano J, Pellis BP, Mascia NT. Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars. *Compos Struct*.

Arriaga F, Fernandez-Cabo JL, Aira JR. Timber beam bearing reinforcement with GFRP glued-in plates: strength and hydrothermal effects. *J Mater Civ Eng ASCE* 2017.

Chang WS. Repair and reinforcement of timber columns and shear walls-a review. *Constr. Build Mater* 2015.

Bertolini M, Macedo L, Almeida D, Icimoto F, Lahr F. Restoration of structural timber elements using epoxy resin: analysis of mechanical properties. *Adv Mat Res* 2013.

Titirla M, Michel L, Ferrier E. Mechanical behaviour of glued-in rods (carbon and glass fibre-reinforced polymers) for timber structures-An analytical and experimental study. *Compos Struct*.

Raftery GM, Kelly F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Compos Part B - Eng* 2015.

Schober KU, Harte AM, Kliger R, Jockwer R, Xu Q, Chen JF. FRP reinforcement of timber structures. *Constr Build Mater* 2015.

Raftery GM, Harte AM. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Compos Part B - Eng* 2011.

[23] Raftery GM, Harte AM. Nonlinear numerical modelling of FRP reinforced glued laminated timber. *Compos Part B – Eng* 2013.

MD Wakeman and CD Rudd (2000), Chapter 2.27: Compression molding of thermoplastic composites, In R Talreja and J-A Manson (editors): 'Comprehensive Composite Materials Encyclopedia, volume 2: Polymer Matrix Composites', Elsevier Science, Oxford.

P Wambua, J Ivens and I Verpoest (2003), Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?, *Composites Science and Technology* .

RP White (1974), Time-temperature superpositioning of viscosity-time profiles of three high temperature epoxy resins, *Polymer Engineering and Science*.

O Wolf, M Crank, M Patel, F Marscheider-Weidemann, J Schleich, B Hüsing and G Angere (2005), Techno-economic feasibility of large-scale production of

bio-based polymers in Europe, European Commission Director-General Joint Research Centre Technical Report EUR 22103 EN. ISBN 92–79–01230–4.

M Zampaloni, F Pourboghrat, SA Yankovich, BN Rodgers, J Moore, LT Drzal, AK Mohanty and M Misra (2007), Kenaf natural fiber reinforced polypropylene composites: A discussion on manufacturing problems and solutions, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.

D Cripps, TJ Searle and J Summerscales (2000), Chapter 2.21: Open mould techniques for thermoset composites, In R Talreja and J-A Manson (editors): 'Comprehensive Composite Materials Encyclopedia, volume 2: Polymer Matrix Composites', Elsevier Science, Oxford.

S Coll, A Murtagh and C Ó Brádaigh (2004), Resin film infusion of cyclic PBT composites: consolidation analysis, Proceedings of the Eighth International Conference on Flow Processes in Composite Materials, New York (USA).

S Comas-Cardona (2012), Manufacturing composite structures for automotive applications: robustness challenges, 11th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Auckland NZ, plenary talk.

ACI Committee 440. ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2017.

Rich WB, Jacobs RR, Williams CS, Frosch RJ. Repair and strengthening of bridges in Indiana using fiber reinforced polymer systems: Volume 2–FRP flexural strengthening and end region repair experimental programs. Report No. FHWA/IN/JTRP-2021/10, Joint Transportation Research Program, Purdue University, 2021.

Pevey JM, Rich WB, Williams CS, Frosch RJ. Repair and strengthening of bridges in Indiana using fiber reinforced polymer systems: Volume 1–review of current FRP repair systems and application methodologies. Report No. FHWA/IN/JTRP-2021/09, Joint Transportation Research Program, Purdue University, 2021.

Kalfat R, Al-Mahaidi R, Smith ST. Anchorage devices used to improve the performance of reinforced concrete beams retrofitted with FRP composites: state-of-the-art review. J Compos Constr 2013.

ASTM. C150/C150M-18: Standard specification for Portland cement. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.

ASTM. A615/A615M-16: Standard specification for deformed and plain carbon steel bars for concrete reinforcement. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

[31] Niemitz CW. Anchorage of carbon fiber reinforced polymers to reinforced concrete in shear applications. Master's thesis, University of Massachusetts Amherst, ScholarWorks@UMass Amherst, 2008.

Niemitz CW, James R, Brena SF. Experimental behavior of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets attached to concrete surfaces using CFRP anchors. *J Compos Constr* 2010.

Orton, SL. Development of a CFRP system to provide continuity in existing reinforced concrete buildings vulnerable to progressive collapse. PhD dissertation, The University of Texas at Austin, Texas Scholar Works, 2007.

Pudleiner DK. Design considerations based on size effects of anchored carbon fiber reinforced polymer (CFRP) systems. Master's thesis, The University of Texas at Austin, Texas Scholar Works, 2016.

Jirsa JO, Ghannoum WM, Kim CH, Sun W, Shekarchi WA, Alotaibi NK, Pudleiner DK, Zhu J, Liu S, Wang H. Use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) with CFRP anchors for shear-strengthening and design recommendations/quality control procedures for CFRP anchors. Report No. FHWA/TX-16/0-6783-1, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2017.

Kim IS. Use of CFRP to provide continuity in existing reinforced concrete members subjected to extreme loads. PhD dissertation, The University of Texas at Austin, Texas Scholar Works, 2008.

Kim YG. Shear behavior of reinforced concrete T-beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and CFRP anchors. PhD dissertation, The University of Texas at Austin, Texas Scholar Works, 2011.

Carmichael BM, Barnes RW. Repair of the Uphapee Creek Bridge with FRP laminates. Report RP-930-466-2, Auburn University Highway Research Center, University of Auburn, 2005.

Hag-Elsafi O, Kunin J, Alampalli S, Conway T. Strengthening of Route 378 Bridge over Wynantskill Creek in New York using FRP laminates. Report No. FHWA/NY/SR-01/135, Transportation Research and Development Bureau: New York State Department of Transportation, 2001.

Hag-Elsafi O, Kunin J, Alampalli S. In-service evaluation of a concrete bridge FRP strengthening system. Report No. FHWA/NY/SR-03/139, Transportation Research and Development Bureau: New York State Department of Transportation, 2003.