Unisanta Science and Technology, 2023, 10, March
Published Online 2023 Vol. 12 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Viabilidade no Uso do PRFV em Ambientes Industriais em Relação ao Aço

Willy Ank de Morais[1], Bruno Pascotto Russo[1], Marcelo Tavares Saitta[1], Ranieri Pereira Rodrigues[1], Reinaldo Garcia Filho[1], Weslley da Silva Cavalcante Frota[1]

[1]**UNISANTA**– Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Graduação em Engenharia Mecânica
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail: willyank@unisanta.br
Received August, 2022

Resumo: O desenvolvimento de novos materiais permitiu o surgimento de novas soluções para minimizar custos de manutenção e prolongar a vida útil de estruturas industriais. É neste contexto que está o compósito de plástico (matriz polimérica) reforçado com fibra de vidro (PRFV), que apresenta características mecânicas similares aos aços estruturais, mas que pode apresentar vida útil mais prologada e previsível em ambientes industriais que são tipicamente agressivos ao aço. Foram realizados ensaios de tração, de tenacidade ao impacto Charpy e de corrosão como forma de se quantificar as diferenças de desempenho em uso entre o PRFV com um aço estrutural de média resistência. Os resultados destes testes, conforme mostrados neste trabalho, indicaram uma boa confiabilidade do PRFV e sua viabilidade na substituição do aço em aplicações industriais.

Palavras-chave: Aços estruturais. Compósitos de matriz polimérica. PRFV. Plástico Reforçado com Fibra de Vidro. Seleção de materiais.

Feasibility of the Use of FRP for Industrial Environments in Relation to Steel

Abstract: The development of new materials allowed the emergence of new solutions to minimize maintenance costs and extend the useful life of industrial structures. It is in this context that the glass fiber reinforced plastic (GFRP) is present, which mechanical characteristics like structural steels, but that can have a longer and more predictable service life in industrial environments that are typically aggressive to steel. Tensile, Charpy impact notch toughness and corrosion tests were carried out to quantify differences in performance in use between GFRP and a medium-strength structural steel. The results of these tests, as shown in this work, indicated a good reliability of GFRP and its viability in replacing steel on industrial applications.

Keywords: Structural steels. Polymeric matrix composites. GFRP. Glass Fiber Reinforced Plastic. Material Selection.

1. Introdução

Um conceito simples para materiais compósitos seria [1] "um material composto de duas ou mais fases distintas". Assim sendo, um compósito é conceitualmente um material heterogêneo. Obviamente deve-se complementar este conceito restringindo a escala para a consideração da heterogeneidade, para uma escala macro ou submacroscópica. De outro modo todos os materiais poderiam ser considerados compósitos, pois são inevitavelmente heterogêneos se a escala de observação for suficientemente pequena

Em meados do século XX, houve a classificação distinta dos materiais compósitos [1]. A estrutura do compósito é um sistema de material que consiste em duas ou mais fases de uma escala macroscópica, cujo

Copyright © 2021 ISESC.

desempenho e propriedades mecânicas são projetados para serem superiores aos dos materiais constituintes agindo de forma independente [2]. Com o desenvolvimento dos conceitos dos compósitos multifásicos, houve uma oportunidade de desenvolver novos configurações com uma variação extremamente grande em termos de combinações de propriedades, que não podem ser obtidas por ligas metálicas convencionais monolíticas [1].

As propriedades de um material compósito dependem de alguns fatores adquiridos dos seus constituintes, tais como, geometria e distribuição de fases [2]. Essencialmente as fases podem ser de qualquer classe de material, englobando metal, polímero, cerâmico e carbono [3]. Geralmente, uma das fases é descontínua mais rígida e mais resistente, sendo assim chamada de reforço, enquanto a fase menos rígida e de menor resistência mecânica é contínua e definida como matriz [4].

A matriz possui propriedades que geralmente são escolhidas para serem complementares às fibras [5]. Algumas vezes ocorre a presença de uma interfase entre a matriz e o reforço devido às interações químicas e outros efeitos de processamento [2]. Entretanto, as combinações resultam em alta rigidez e resistência à propagação de trincas, devido a influência entre a fibra e matriz [3].

Em termos de desempenho mecânico os materiais compósitos fibrosos de fibras longas apresentam os melhores desempenhos. O tipo de reforço empregado nestes compósitos atua mecanicamente de forma muito efetiva na matriz na qual estão dispersas [6]. Materiais compósitos desta categoria podem ser tão eficientes que apenas estes poderão ser utilizados em certas aplicações especiais, nas quais os demais materiais de engenharia não são recomendados [7].

2. Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Longas

A união geométrica do material de reforço com a matriz pode ser feita de forma a obter-se diferentes tipos de arranjos geométricos entre estas duas fases. A Figura 1 mostra, de maneira genérica, os três tipos básicos de arranjos geométricos entre reforço e matriz.

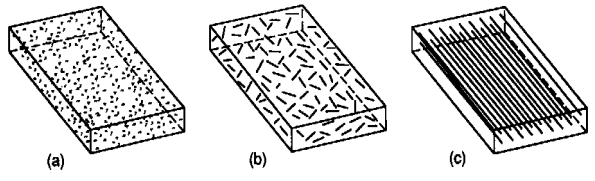


Figura 1. Três arranjos possíveis entre o reforço e a matriz em materiais compósitos: (a) particulado, (b) fibras curtas e (c) fibras longas [9].

Segundo Roesler [9], "a presença das fibras nos compósitos de matriz polimérica, representam 100 vezes mais resistência e rigidez elástica maiores que a matriz sem as fibras". Por esse motivo, o melhor desempenho mecânico de compósitos reforçados por fibras contínuas (Fig. 1.c), ocorre para um valor de fração volumétrica da fibra em torno de 60% [3].

O comportamento mecânico da matriz é importante, pois a transferência de carga na fibra não pode falhar assim a força da fibra pode ser completamente explorada. Além disso, se tornou atraente como material estrutural devido à alta resistência e modulo de elasticidade da fibra, suportando uma carga elevada [10].

A Tabela 1 apresenta alguns parâmetros importantes para os materiais mais utilizados como reforço fibroso. Dentre todas as fibras utilizadas como reforço, as fibras de vidro ainda ocupam uma posição de destaque devido a sua alta resistência específica e baixo custo de produção, que é inferior às demais fibras avançadas [7]. Devido a isto, a grande parte dos materiais compósitos fibrosos, principalmente para aplicações mais comuns, são reforçados por fibras de vidro.

Tabela 1. Massa específica, rigidez e resistência de alguns materiais empregados como reforço fibroso.

Material da Fibra	ρ (g/cm^3)	E (GPa)	R_m (GPa)
Vidro	2,5 a 2,6	69 a 85	1,5 a 4,8
Aramida	1,4 a 1,5	65 a 147	2,4 a 3,6
Polietileno	0,97	62 a 175	2,2 a 3,5
Carbono	1,75 a 2,2	140 a 820	1,4 a 7,0
Carboneto de Silício	2,4 a 3,5	180 a 820	2,0 a 3,7
Óxido de Alumínio	3,3 a 3,95	300 a 380	1,4 a 2,0

Fonte: adaptado de [9].

Os compósitos de matriz polimérica são muitas vezes designados pelo nome genérico "plástico reforçado" ou PR ("*reinforced plastics*" ou RP) e são os compósitos mais empregados atualmente [5, 7]. Assim como as fibras de vidro são as fibras mais comumente utilizadas para o reforço de compósitos, as resinas poliéster são os materiais para matriz mais largamente utilizados devido ao seu menor custo e pela facilidade de produção de compósitos com este tipo de matriz. Desta forma, materiais compósitos de resina poliéster reforçada com fibras de vidro são muito utilizadas na prática. Este tipo de compósito é barato, leve, relativamente resistente a ambientes agressivos e utilizável normalmente a temperaturas de até 100° C [11].

Copyright © 2023 ISESC.

As resinas epóxi são o segundo tipo de matriz mais utilizado. São mais caras do que as resinas poliéster, mas tem uma melhor resistência mecânica e à umidade, assim como uma menor contração durante a cura e uma maior faixa de temperatura de utilização (até 175°C) [11, 12].

2.1. Fibras de Vidro

Segundo Chawla [6]: "as fibras de vidro comuns são baseadas em sílica (50% ~ 60% Si02) e contêm uma série de outros óxidos de cálcio, boro, sódio, alumínio e ferro". As composições de algumas fibras de vidro mais utilizadas são apresentadas na Tabela 2. A maior parte das fibras de vidro contínuas produzidas é do tipo E [3], principalmente devido às suas características para aplicações elétricas [13], mas também pelo seu desempenho mecânico [6].

Tabela 2. Composições químicas aproximadas de algumas fibras de vidro (% em massa).

Composição	Vidro E	Vidro C	Vidro S
SiO_2	55,2	65,0	65,0
Al_2O_3	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na_2O	0,3	8,5	0,3
K_2O	0,2	-	-
Li_2O_3	7,3	5,0	-

Fonte: adaptado de [3].

Segundo Brigante [13], algumas vantagens das fibras de vidro tipo "E", em relação aos outros materiais são:

- Relação entre elevada resistência à tração
- Estabilidade dimensional: o vidro não diminui ou aumenta com diferentes condições ambientais.
- Elevada resistência térmica;
- Baixa absorção de umidade;
- Elevada resistência ao fogo.

A fibra de vidro apresenta elevada resistência à tração, boa estabilidade dimensional (o vidro não se altera com diferentes condições ambientais) e elevada resistência térmica. Além disso, o vidro pode preservar suas propriedades mecânicas, até 50% de sua capacidade de resistência sob temperatura de 375ºC e 25% em temperatura de 538ºC [13]. Entretanto, seu modulo de elasticidade ou de Young (*E*) é relativamente baixo em comparação com outras fibras de reforço [14], conforme apresentado na Tab. 1 [9].

Soares [15] destaca 12 características que são relevantes para justificar a aplicação das fibras de vidro como reforço estrutural em Polímeros (Plásticos) Reforçados por Fibras de Vidro (PRFV):

1. Leveza: partes de polímeros (plásticos) reforçados ajudam a economizar peso comparado às partes de aço (até 30% mais leves) com similares propriedades termo-mecânicas.
2. Reciclabilidade: devido a diferentes térmicas desenvolvidas a reciclagem das fibras de vidro é uma realidade, como também a reciclagem de termoplásticos ou de reforços de vidro em termoestáveis
3. Não apodrecimento: filamentos de vidro não deterioram e não apodrecem, não sendo afetados pela ação de insetos e roedores.
4. Baixa condutividade térmica: esta característica é altamente estimada na indústria de construção civil, na qual o uso de compostos de fibra de vidro torna possível eliminar passagens térmicas possibilitando economia de calor.
5. Higiene: não é poroso.
6. Inércia química: quando combinada com resinas apropriadas, as fibras de vidro podem constituir compósitos com alta resistência a agentes químicos.
7. Capacidade de carga: fibras de vidro tem uma resistência específica (resistência por unidade de massa) mais alta do que a do aço. Esta característica é o ponto de partida para o desenvolvimento de fibra de vidro para produzir compósitos de alto desempenho.
8. Características elétricas: suas propriedades como um isolador elétrico são excelentes, até mesmo a espessuras pequenas.
9. Compatibilidade com matriz orgânica: a habilidade da fibra de vidro para formar deferentes tipos de interfaces, possibilita que esta seja combinada com muitas resinas sintéticas, como também, com matrizes minerais (gesso, cimento).
10. Incombustibilidade: como um material mineral, fibra de vidro é naturalmente incombustível, não propagando nem mantendo chamas. Quando exposta ao calor, não emite fumaça nem produtos tóxicos.
11. Permeabilidade de Dielétricos: essencial em aplicações como radomes, janelas eletromagnéticas etc.
12. Integração de funções: os materiais compósitos baseados em fibras de vidro podem ser usados para produzir partes de uma peça que integram várias funções e substituir diversas partes montadas.

Copyright © 2020 ISESC

2.2. Polímero (Plástico) Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

O PRFV é um material de engenharia que apresenta uma excelente razão desempenho/preço e resistência ao intemperismo, quando comparado ao aço [1, 6, 8]. Palucka e Bensaud-Vincent [16] descrevem a evolução no seu desenvolvimento ao longo de quatro gerações:

1ª) década de 1940, caracterizada pela melhora das propriedades dos materiais, crescimento na produção das matérias primas (fibras e matrizes) e início da produção do plástico reforçado;

2ª) década de 1960, marcada pelo início da exploração espacial, produção de novas fibras, tais como carbono, boro e aramida (kevlar®) e maior combinação entre materiais no conceito mais amplo de materiais compósitos;

3ª) décadas de 1970 e 1980, com a imersão dos compósitos em novos mercados, especialmente no uso das fibras de carbono em equipamentos esportivos e a melhoria dos compósitos com matrizes metálicas e cerâmicas;

4ª) década de 1990, na qual surgem materiais híbridos não orgânicos e orgânicos, combinados em escala molecular e nanocompósitos.

Com o desenvolvimento de polímeros na década de 40, foi verificado que estes por mais fortes que sejam, eram também frágeis e quebradiços, então por este motivo os engenheiros da época buscaram soluções para resolver o problema de fragilidade deste material, perceberam que ao imergir fibras na matriz de materiais poliméricos de baixa resistência, estas tinham a capacidade de absorver parte da tensão, acrescentando rigidez ao material e gerando um material compósito mais resistente. Além disso, a matriz polimérica protege as fibras, evitando arranhões que poderiam causar o colapso dessas fibras sob baixas tensões. [17].

O primeiro processo de produção de polímero reforçado com fibra de vidro consistia na adição das fibras de vidro ao polímero fundido e esta mistura era então despejada em um molde. Porém a distribuição da fibra na matriz polimérica não era homogênea, sendo necessário o desenvolvimento de novas técnicas para a adição destas fibras de maneira mais homogênea. [16]. Além da questão da homogeneidade, as fibras de vidro eram danificadas no processo de cura da resina empregada na época, que exigia altas pressões para que ocorresse, de modo que houve a necessidade do desenvolvimento de resinas termofixas com cura às menores pressões, que possam ser reforçadas com fibras de vidro, tais como: epóxi e fenol, melaminas e silicoses [15].

Algumas técnicas desenvolvidas facilitavam a obtenção dos compósitos, como a adoção das chamadas 'pré pregs', que são folhas pré-impregnadas com fibra de reforço em uma matriz de resina com a cura parcialmente concluída. Tal técnica também eliminou algumas etapas na produção, possibilitava o corte e a armazenagem antes da consolidação das peças [16].

Os compósitos de fibras contínuas possuem características mecânicas que não só dependem apenas das propriedades das fibras, mas também do grau em que uma carga aplicada é transmitida às fibras pela fase da matriz através das suas extremidades e de sua superfície cilíndrica [4, 6, 12, 14], como ilustrado pela Figura 2. Ademais, os polímeros reforçados com fibras são materiais anisotrópicos, cujas propriedades mecânicas dependem de como o material foi projetado e executado em termos do aspecto, orientação e fração volumétrica do reforço, espessura, número e orientação das camadas, para o caso de compósitos laminados [2, 6, 18].

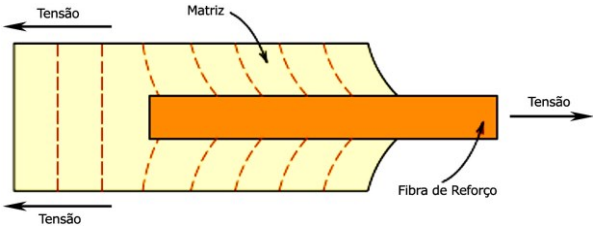


Figura 2. O padrão de deformação na matriz que envolve uma fibra que é submetida a uma carga de tração aplicada. Adaptado de [1, p.672].

Algumas questões também devem ser consideradas ao se empregar PRFV, conforme descritos nos itens a seguir.

2.2.1. Radiação Ultravioleta (UV)

Quando a superfície do compósito é exposta aos raios ultravioleta (UV) ocorrem simultaneamente aquecimento e reações químicas, resultando na quebra das ligações no polímero, assim reduzindo o desempenho do compósito particularmente na sua superfície exposta [18]. Por isso para maximizar sua vida útil, deve-se aplicado um inibidor de UV, para retardar a degradação da superfície, quando o mesmo sofre a exposição direta e prolongada da luz solar, ou a outra fonte de luz que contenha UV.

Conforme o grau de degradação da resina devido à exposição prolongada aos raios UV podendo levar à florescência (aparecimento/exposição) da fibra. Essa condição ocorre quando os filamentos de fibra de vidro, próximos à superfície, tornam-se expostos de forma proeminente devido à degradação/corrosão da matriz polimérica (resina) [19].

Segundo Mano [20], quando se trata de degradação por radiação UV, há dois estágios foto-oxidativos. A primeira etapa é a iniciação fotoquímica, que começa após a criação de um estado excitado proveniente da absorção de radiação

Copyright © 2023 ISESC.

por algum cromóforo, que é alguma parte do polímero que absorve energia na região do UV (ou da luz visível). Se for um cromóforo extrínseco, presente na própria estrutura do material, os radicais livres provenientes da reação fotoquímica darão início a degradação polimérica. Já para o intrínseco (tipicamente contaminantes/aditivos), os radicais livres já são parte integrante do material, atuando em reações e gerando mais radicais livres, ou podem também iniciar oxidações, reticulação.

2.2.2. Degradação Química

Segundo Paoli [21], os polímeros têm sua degradação iniciada por agentes químicos, que só podem atuar em situações específicas. Estes contaminantes não reagem no escuro e em atmosfera inerte, mas quando postos em um ambiente com presença de oxigênio (O_2) e expostos à luz (UV), estes se tornam eficientes elementos de degradação. Há a possibilidade também do mecanismo de degradação serem ativados por aquecimento. Da condição dos agentes sendo ativados por luz, é dada a terminologia "fotoquímica", já por meio do calor, "termoquímica".

Os agentes de degradação podem ter origem interna, podendo ser componentes da formulação do material polimérico, resíduos de catalisador, agentes de cor ou contaminações gerais provenientes do processo de polimerização. Já os agentes degradantes externos podem ser poluentes atmosféricos, soluções de lavagem e esterilização, hidrólise, contato do polímero com óxidos metálicos, óleos lubrificantes, fluídos hidráulicos e/ou combustíveis [21].

Adicionalmente, segundo Oliveira [22], a umidade do ambiente influencia no processo de degradação das fibras de vidro ou de silicatos. Neste caso, as moléculas de água (H_2O) quebram as ligações tensionadas presentes nas extremidades das trincas do material compósito, fazendo essas trincas crescerem rapidamente sob fadiga estática.

Existem também polímeros denominados hidrofílicos, que possuem a capacidade de formar ligações de hidrogênio com as moléculas de água, Tais polímeros possuem uma relação constitutiva elástica não linear e dependente da umidade relativa do ambiente onde está inserido conforme descrita pela equação [22]:

$$E = E_0 \cdot e^{(a-bm)} \quad (1)$$

Sendo que m é a quantidade de umidade presente, a e b são constantes do material e $E = E_0 \cdot e^a$ é o módulo de Young do material sem umidade. A Figura 3 apresenta curvas tensão-deformação afetadas pelo efeito da humidade (envelhecimento higroscópico).

Segundo Catto [23], a hidrólise é dependente de fatores como temperatura, água, Ph, tempo e a atividade da água, outro fator impactante é a estrutura molecular do polímero, já que estruturas moleculares organizadas como estruturas cristalinas, impedem a difusão do O_2 e H_2O, já estruturas amorfas facilitam a degradação química oxidativa e hidrolítica.

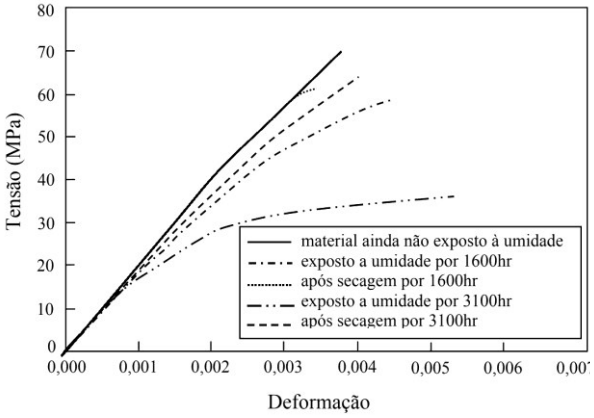


Figura 3. Curvas tensão-deformação demonstrando o efeito do envelhecimento higroscópico na direção transversal às fibras [22, p.14].

2.2.3. Calor

O material PRFV tem sua baixa transmissibilidade térmica, sendo adequado para aplicações sob temperatura controlada. Como todas as matrizes poliméricas são de natureza hidrocarbonada, estas queimam vigorosamente em caso de incêndio e produzem fumaça pesada. Por causa dessa circunstância são utilizados agentes retardadores de fogo, para ajudar a minimizar a propagação de chamas [3, 5, 6, 18]. Adicionalmente, Fecht [19, p. 52] afirma que:

> "Os PRF são isolantes térmicos, pois tem uma baixa condutividade térmica, assim retardando o progresso do calor através do material. Consequentemente, o material não suporta facilmente a combustão. Chamas transitórias geralmente produzem carbonização limitada do revestimento da superfície e do laminado da superfície. A exposição prolongada a chamas em longo prazo pode produzir carbonização mais extensa. As resinas de poliéster começam a queimar a cerca de 700°F (371,11°C) com exposição direta não-transitória. Se necessário, os produtos PRFV podem ser fabricados com um aditivo retardador de fogo que permite que o produto atenda aos padrões UL94 e / ou ASTM D635."

Quando PRF são expostos a elevadas temperaturas é difícil generalizar o comportamento mecânico e térmico, pois o comportamento do material depende de muitas variáveis, por exemplo, tipo de fibra e matriz, taxa de fração volumétrica, módulo de elasticidade das fibras e material da matriz [24].

Copyright © 2020 ISESC

2.2.4. Biodegradação

Bajpai e Singh [18] definem a biodegradação como sendo "o processo no qual os microrganismos atacam o substrato e o decompõem em pequenos constituintes". Conforme o tipo de polímero e a natureza do microrganismo a degradação dos compósitos poliméricos reforçados com fibra são afetados. A degradação do polímero ocorre em quatro estágios [18, p. 257]:

- 1º estágio, envolve o ataque do microrganismo na superfície do polímero,
- 2º estágio, ocorre o crescimento e a multiplicação sucessiva do microrganismo pela utilização de carbono,
- 3º estágio, surgem rupturas da cadeia polimérica que se tornam monômeros e
- 4º estágio, evolução da degradação sob condições aeróbias e aeróbicas.

2.2.5. Fadiga Mecânica

A solicitação por fadiga está presente na maioria das aplicações de engenharia nas quais cargas flutuantes presentes sendo submetidas ao material, mesmo abaixo do seu limite elástico, produzem danos que podem levar o material à fratura [25]. Este processo de rompimento por fadiga nos materiais heterogêneos e isotrópicos é iniciado pela propagação de uma trinca, já no caso dos materiais compósitos, este processo se dá pela soma de danos generalizados, tais como [26]: descolamento entre a fibra e matriz, fissuras transversais e longitudinais à direção de aplicação da força e rompimento de fibras. Esta condição está esquematizada na Figura 4.

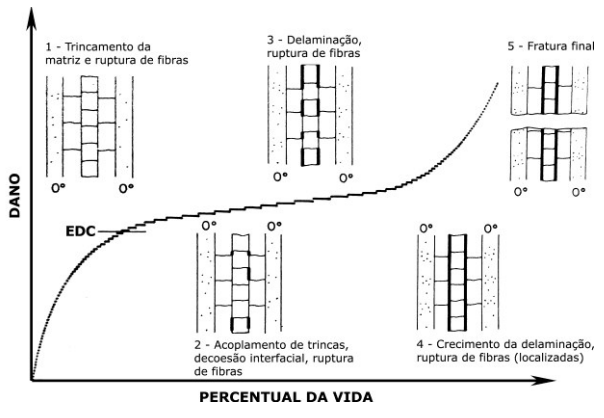


Figura 4. Evolução dos mecanismos de falha na matriz e nas fibras de reforço e o Estado de Danos Característico (EDC) desenvolvido ao longo da vida em fadiga de um material compósito de reforço fibroso. Adaptado de [28, p.109].

Pelo fato de os materiais compósitos terem sua estrutura heterogênea, os mesmos possuem uma maior vida em fadiga quando são comparados aos de estrutura homogênea, pois as heterogeneidades presentes no material compósito causam um efeito de barreira, impedindo a propagação de fissuras e trincas pelo material por caminhos preferenciais, retardando o crescimento destes defeitos [6, 7].

Este efeito de retardamento da fadiga se faz presente principalmente em compósitos fibrosos [7], pois fibras de reforço induzem a propagação de trincas perpendicularmente à direção de aplicação da força (Fig. 4). Desta forma, por apresentarem maior resistência à fadiga que materiais homogêneos e possuir menos peso estrutural, os compósitos são atrativos para setores onde é necessária uma melhor vida em fadiga, como o aeroespacial, estruturas com carregamento variável (tais como pontes), veículos de transporte, componentes industriais, estruturas expostas a ação do vento ou ao carregamento hidrodinâmico [7].

Para que seja feita a análise de fadiga em materiais compósitos laminados e sua prevenção, há algumas variáveis que devem ser levadas em consideração, pois influenciam nesta análise, tais como [27]: condições de carregamento, percentual de fibra e de matriz, condições de temperatura e umidade de trabalho, entre outros. Assim sendo, é necessário a escolha de uma configuração de compósito correta para a condição de trabalho, considerando-se não só os parâmetros de carregamento, mas também a umidade e temperatura. Dentre os possíveis parâmetros de configuração é possível variar, por exemplo o percentual de reforço e o tipo de sistema fibra/matriz, buscando uma melhor aderência entre a matriz e as fibras. Geralmente, quando há um acréscimo do percentual de fibras em detrimento do percentual de matriz, ocorre uma perda de resistência à fadiga, devido ao aumento de tensões internas, e estas facilitam que danos se propaguem [27].

3. Materiais e Métodos

Como forma de demonstrar a aptidão do PRFV em relação ao aço estrutural de média resistência, foram avaliados os seguintes materiais:

- PRFV (pultrudados), como fornecidos em perfil em "U" 101,6 x 50,1 x 6,0 mm;
- barras chatas de aço nas dimensões 4 x 20 x 200 mm (similar ao aço ASTM A36:2019);
- perfis de aço estrutural em "U" 102,6 x 41,4 x 6,7 mm (similar ao aço ASTM A36:2019).

Foram realizados ensaios mecânicos e um teste de corrosão. Empregou-se uma fresa de topo para usinar os corpos de prova (CP's) para o ensaio de tração conforme a ASTM E8/E8M:2016 com L0 = 32 mm. O mesmo ocorreu

Copyright © 2023 ISESC.

para os CP's para realizar o ensaio de impacto Charpy, cuja geometria final é compatível com a ASTM E23:2018 (tipo "A" – entalhe em "V"). Os CP's para o teste de corrosão consistiriam de dois trechos de perfis "U", um de PRFV e outro de aço estrutural. As dimensões empregadas estão apresentadas na Figura 5 e foram definidas com base nas dimensões disponíveis do perfil de PRFV doado para testes, visando compatibilizar dimensional e geometricamente os perfis testados entre si, averiguando de forma mais similar o seu desempenho sob corrosão.

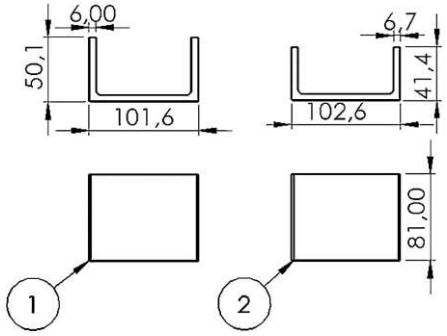


Figura 5. Planta e vista frontal dos corpos de prova para o ensaio de corrosão: PRFV (1); aço ASTM A36:2019 (2).

Para os ensaios de tração, empregou-se uma máquina universal de ensaios, marca EMIC modelo DLC 10.000 com a capacidade de 100 kN. Para os ensaios de impacto Charpy, empregou-se uma máquina de impacto Losenhausenwerk PSW 30. Ambos os equipamentos estão localizados nos laboratórios da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), Santos -SP.

Para a realização do teste de corrosão foram empregados dois corpos de prova, como mostrados na Fig. 5, que tiveram suas massas aferidas. Ambas as superfícies dos CPs foram previamente preparadas para este ensaio, o aço sofreu um processo de jateamento. O PRFV, por sua vez, foi lixado, visando dotar ambos os corpos de prova de uma mesma condição padrão.

Os corpos de prova foram posicionados em uma plataforma da canaleta de água quente de resfriamento de uma planta do ácido sulfúrico localizada em Cubatão. As condições físicas de ambos os corpos de prova foram registradas ao longo de 36 dias, findo o qual, foi feita uma aferição de suas massas finais para comparação de resultados.

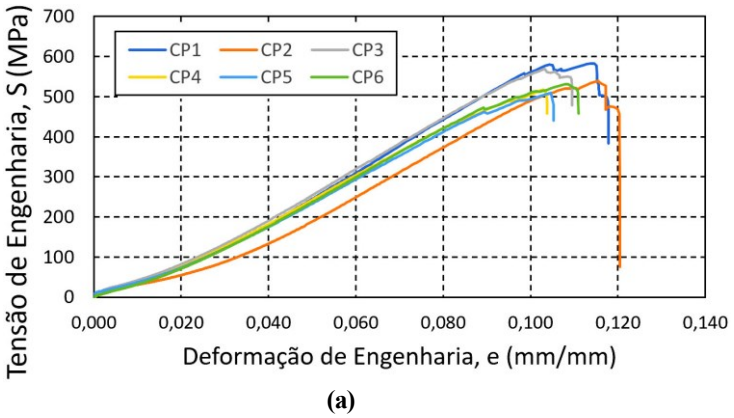
4. Resultados e Discussão

Foram analisados 6 corpos de prova de PRFV em tração, obtendo-se assim as curvas tensão versus deformação, apresentadas na Figura 6. A respeito do ensaio de tração do PRFV, nota-se que a maior resistência a tração foi de 583MPa para uma resistência típica de um aço ASTM A36 da ordem de 300 MPa, sendo que a garantia de norma para este material é de uma tensão de escoamento para 0,2% de deformação de 250 MPa.

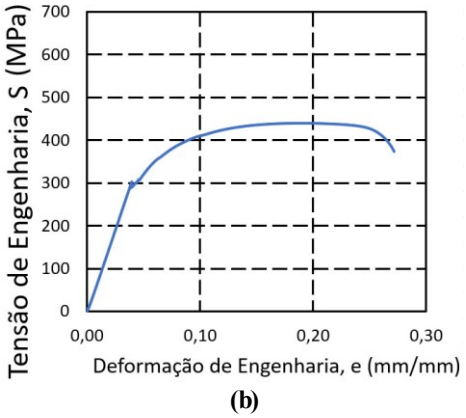
No ensaio impacto Charpy a temperatura de teste válida para todos os CP's foi de 25°C, tendo sido obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. A Figura 7 apresenta o aspecto dos CP's de PFRV após a realização do ensaio Charpy.

Tabela 3. Resultados do ensaio de Charpy no PRFV.

Valores de Energia obtidas por impacto Charpy				
CP1	40 J		CP5	40 J
CP2	40 J		CP6	40 J
CP3	56 J		CP7	56 J
CP4	49 J		**Média**	**47 ± 7J**



(a)



(b)

Figura 6. Gráficos Tensão x Deformação para o: (a) PRFV e (b) aço ASTM A36.

Copyright © 2020 ISESC



Figura 7. Aspecto visual dos CPs de PRFV após o ensaio de tenacidade ao entalhe Charpy: (a) comparativo geral entre três CPs; (b) comparativo entre o CP que absorveu maior energia com o que absorveu menor energia.

Os três CPs ilustrados na Fig. 7.a foram aqueles que apresentaram os maiores níveis de energia absorvida durante o ensaio Charpy. Nesse caso é possível observar que grande parte das fibras presentes resistiram a tensão de cisalhamento gerada no ensaio e que o material acabou se curvando sobre a face de impacto do martelo, dando aos CP's um formato em "V". Ao final do teste estes CP's foram projetados para fora da base do maquinário do ensaio o que se associa à maior energia absorvida por estes CP's.

Outro aspecto que corrobora a uma maior energia absorvida durante o impacto, conforme a comparação apresentada na Fig. 7.b, é que nestes casos as fibras se mantiveram praticamente intactas, com maior presença de dobramento, de modo a serem obtidos mais descolamentos da interface matriz/fibra e propagação de trincas pelo material. Tais condições aumentam a área superficial da fratura, aumentando consequentemente a energia absorvida no ensaio de impacto Charpy. Nos CP's com valores de energia menores percebeu-se um expressivo rompimento de fibras e um descolamento da interface entre matriz/fibra além de trincas, gerando metades, pedaços mais "íntegros" do material (Fig. 7.b).

Através de dados obtidos recentemente por Marguerito et al. [29], em um trabalho publicado para avaliar a tenacidade do aço estrutural ASTM A36, na condição de junta soldada, foi possível comparar os resultados destes dois materiais. A Figura 8 apresenta resultados para o aço ASTM A36 ao redor de uma junta soldada típica [29]. Nesta figura encontra-se uma reta tracejada representando a média dos resultados que foram obtidos para os CP's em PRFV. É possível observar que a média (Tab. 3) obtida pelos resultados do ensaio em PRFV possuí similaridade com resultados para o aço ASTM A36 a uma distância entre 8 e 18 mm, que está localizada dentro da zona afetada pelo calor da soldagem (ZAC) neste aço.

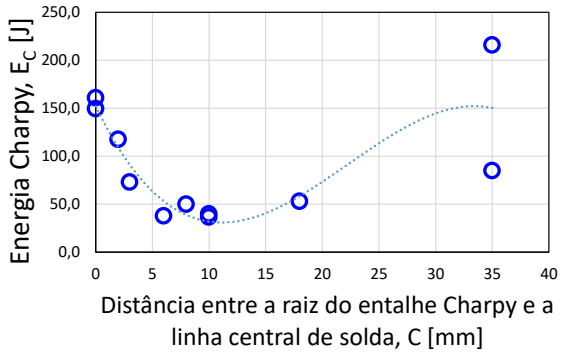


Figura 8. Gráfico comparativo entre energia Charpy x distância da raiz do entalhe e a linha central da solda, C (mm) [29] de um aço ASTM A36 com a média dos valores obtidos para o PRFV neste estudo.

Antes de execução do teste de corrosão, os CP's empregados foram pesados, sendo que o CP em aço obteve 782,82 g e o de PRFV obteve 183,41g. Após isto, os corpos de prova foram posicionados no local do ensaio, conforme mostrado na Figura 9.a, expostos a um ambiente agressivo durante uma época do ano tipicamente chuvosa na região de Cubatão.

Após 14 dias expostos ao ambiente agressivo, ambos os corpos de prova sofreram novamente processos de jateamento e lixamento e foram registrados conforme a Figura 9.b. Após mais 14 dias, os corpos de prova sofreram o mesmo processo do registro anterior e foram comparados por foto, conforme Figura 9.c. Após 36 dias, os materiais foram retirados do local de ensaio, sofreram o mesmo processo dos registros anteriores e ambos tiveram suas massas aferidas tendo sido encontrados os valores de 767,60 g e 183,41g para o aço e o PRFV, respectivamente.

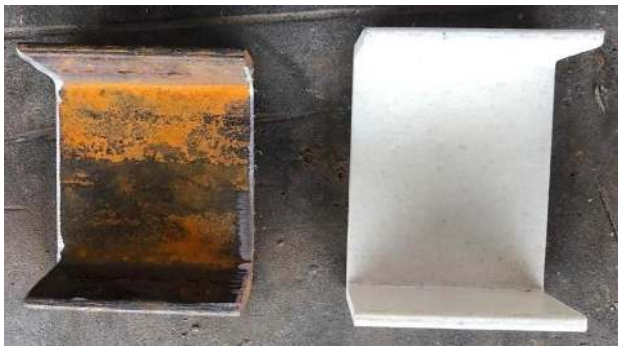
Copyright © 2023 ISESC.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Teste de corrosão: (a) local onde os CP's foram posicionados (acima da plataforma); (b) comparativo entre os corpos de prova (após 14 dias de teste, antes do jateamento); (c) comparativo entre os corpos de prova (após 28 dias de teste e depois do jateamento).

É perceptível, tanto nas fotos da Fig. 9.b e 9.c, quanto nos resultados da perda de massa que o perfil em aço possui um menor desempenho nas condições de agressividade a que os perfis foram submetidos. Apesar do tempo limitado do teste, ocasionado como um reflexo posterior da pandemia de COVID-19, foi possível quantificar uma perda de massa de 1,9% no elemento estrutural em aço.

Neste caso, para se evitar a perda por corrosão no aço estrutural é possível empregar processos conhecidos de proteção contra corrosão, inclusive salientados na norma brasileira de projeto de estruturas metálicas (NBR 8800:2008), tais como revestimentos orgânicos (pinturas), camadas galvânicas (zinco, liga alumínio-zinco) ou mesmo empregar aços mais sofisticados (como o aço inoxidável). Porém todas estas opções causam aumento de custos e prazos em relação ao uso do PRFV, que durante este teste não apresentou nenhuma perda de massa, ressaltando seu desempenho nas condições avaliadas neste trabalho.

5. Conclusões

Em comparação com um aço estrutural típico (ASTM A36), o PRFV ofereceu um nível de resistência mecânica aproximadamente 30% maior, segundo atestado por resultados de ensaios de tração, apresentados na Fig. 6. Portanto, através dos dados obtidos, é possível substituir o aço pelo PRFV empregando, pelo menos, o mesmo nível de resistência mecânica no projeto.

Considerando tenacidade ao impacto, o aço tem um desempenho superior quando comparado com o PRFV. Entretanto, em uma junta soldada de aço estrutural ASTM A36, esta apresenta uma tenacidade na região da ZTA tipicamente menor do que o PRFV, que não utiliza soldagem no processo de montagem ou uso. Portanto, o PRFV possui uma tenacidade compatível com as juntas soldadas de aço estrutural comum, sendo então possível

Copyright © 2020 ISESC

também empregá-lo nestas mesmas aplicações sem a perda de desempenho estrutural.

Em questão de resistência à corrosão, o PRFV demonstrou ampla vantagem quando comparado ao aço ASTM A36, embora as grandes dificuldades encontradas para a realização do ensaio devido à pandemia do vírus COVID-19, levou a um curto tempo de realização do ensaio. Mesmo assim foi possível destacar uma perda de aproximadamente 2% em massa do aço por conta da oxidação, enquanto o PRFV manteve-se com sua massa inicial, além de manter o mesmo aspecto durante todos os 36 dias de ensaio, conforme apresentado na Fig. 9.a e 9.b.

Em um comparativo geral, foi possível demonstrar que o PRFV apresenta características semelhantes ao aço costumeiramente usado em construções metálicas, comprovando assim sua utilidade para tal área, especialmente em condições de maior agressividade ambiental ou com necessidade de redução de operações de montagem (evitando-se soldagem, pintura, etc.).

Referências

1 CALLISTER, William D. JR; RETHWISCH, David, G; **Fundamentals of Materials Science and Engineering: An integrated Approach**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons 2015.

2 DANIEL, Isaac M; ISHAI, Ori. **Engineering mechanics of composite materials.**2. ed. New York: Oxford University Press. Copyright, 2006.

3 MORTENSEN, A; **Concise Encyclopedia of Composite Materials.** 2. ed. Department in Oxford, UK: Elsevier Ltda, 2007.

4 KAR, Kamal K; **Composite Materials: Processing, Applications, Characterization**: Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2017.

5 KUMAR, K; DAVIM, Paulo, P; **Composites and Advanced Materials for Industrial Applications.** Hershey PA, USA: IGI Global, 2018.

6 CHAWLA, Krishan K. **Composite Materials: Science and Engineering.** New York: Springer Science & Business Media, 2012.

7 MORAIS, Willy Ank. **Estudo e caracterização da resistência a impactos de baixas energias de materiais compósitos.** Dissertação de Mestrado. Departamento de ciência dos materiais e metalurgia. PUC-Rio, 1999.

8 DOWLING, N.E., **Mechanical behavior of materials**, Prentice-Hall Inc., 1st edition, Englewood Cliffs, 1993.

9 ROESLER, Joachim; HARDERS, Harald; BAEKER, Martin. **Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers, and Composites.** New York: Springer Science & Business Media, 2007.

10 CHUNG, Deborah D. L; **Composite Materials: Science and Applications**. 2. ed. New York: Springer-Verlag London Limited, 2010.

11 WEIDNER, J.C., Constituent material form, In: ASM **Engineered Materials Handbook: V1 Composites**, American Society of Metals and Materials, 1st edition, 4th printing, Materials Park, Ohio, USA, pp.105-134, 1993.

12 MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D., **Composite Materials: Engineering and Science**. Chapman & Hall, London, first edition, 1994.

13 BRIGANTE, Domenico; **New Composite Materials:** Selection, Design, and Application. Switzerland: Springer, 2014.

14 MALLICK, P.K; **Processing of Polymer Matrix Composites: Processing and Applications**. New York: CRC Press, 2018.

15 SOARES, Mychellangelo dos Santos. **Processamento de Polímeros Reforçados por Fibra de Vidro.** 2009. (FEMAT – Faculdade de Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Pará – UFP, Pará.

16 PALUCKA T e BENSAUD-VINCENT B. **Composites overview: origins of composites.** The Dibner Institute for the History of Science and Technology; 2013. Disponível em: <https://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/composites/Composites_Overview.htm>. Acesso em março 2022.

17 LANDESMANN, Alexandre; SERUTI, Carlos Alexandre; BATISTA, Eduardo de Miranda. **Propriedades Mecânicas de Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro para Aplicações Estruturais**. Esteira. Res., São Carlos, v. 18, n. 6, p. 1372-1383, dezembro de 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000601372&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 30 de maio de 2022.

18 BAJPAI, Pramendra K; SINGH, **Inderdeep**; **Reinforced Polymer Composites: Processing, Characterization and Post Life Cycle Assessment**. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2019.

19 FECHT, Galen; TASK Committee on Fiber-reinforced Polymer Products for Overhead Utility Structures. **Recommended Practice for Fiber-Reinforced Polymer Products for Overhead Utility Line Structure.** Volume 104 de ASCE Manual and Reports on Engineering Practice. 2. ed. American Society of Civil Engineers, 2019.

20 MANO, Bárbara I. S (2009). **Compósitos de PP com fibras de curauá obtidos por extrusão/injeção:** processamento, formulação, degradação e estabilização. Campinas. Dissertação (Mestrado). UNICAMP. p.19-20. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/248564>. Acesso em 13 de julho de 2022.

Copyright © 2023 ISESC.

21 PAOLI, Marco Aurélio de; **Degradação e estabilização de polímeros.** 1. ed. Artliber, São Paulo, 2009.

22 OLIVEIRA, Branca Freitas de (2004). **Um modelo analítico e computacional para consideração de defeitos de envelhecimento em estruturas de material compósito.** Porto Alegre. Tese de Doutorado. UFRGS p.14 Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4850>. Acesso em 13 de junho de 2022.

23 CATTO, André Luis (2015). **Resistência ao intemperismo natural e ataque fúngico de compósitos polímero-madeira.** Porto Alegre. Dissertação (Doutorado). UFRGS. p.32 Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/118838>. Acesso em 13 de junho de 2022.

24 JAIN, Ravi; LEE, Luke. **Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications;** Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability. New York: Springer Sciente+Business Media B.V, 2012.

25 MORAIS, Willy Ank. **Ensaios Mecânicos dos Materiais** - Volume 1. 1. ed. São Vicente: WILLY ANK Soluções para o Setor Metal Mecânico, 2018.

26 CORREIA, Sónia M. M. L. (2008). **Estudo da tolerância ao dano de tubagens em PRFV.** p.23. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/10986/2/Texto%20integral.pdf >. Acesso em 30 de maio de 2022.

27 FREIRE JÚNIOR, R. C. S; AQUINO, E. M. F. (2004). **Falha por fadiga e comportamento estático de compósitos de PRFV de fabricação industrial.** UFRN. Disponível em: <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:iberoingmecanica-2005-vol09-n1-7070/Falha_por_fadiga.pdf >. Acesso em 30 de maio de 2022.

28 REIFSNIDER, K. L. **Fatigue of Composite Materials**. Composite Materials Series, 4. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1991.

29 MARGUERITO, Caio N. F; MATHIAS, Luiz F. P; MORAIS, Willy A; SANTA'ANA, Audrey D; SANTOS, Aluizio C; SANTOS, Bruna R; **Descrição da Tenacidade por Impacto Charpy ao Redor de Juntas Soldadas de Aço Estrutural e Simulação de suas Curvas Dinâmicas Força x Tempo.** Unisanta Science and Technology, v.9, n.1, 2020. Disponível em <https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/2468>. Acesso em 30 de maio de 2022.

Copyright © 2020 ISESC