



# REVIEW DAS TÉCNICAS PARA RECUPERAR O *SIZING* DA FIBRA DE CARBONO RECICLADA.

Y.M.N. Shimada<sup>1,\*</sup>; R.C.M.S. Contini<sup>1</sup>; H.H. Bernardi<sup>1</sup>

1 Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Professor Jessen Vidal  
Av. Cesare Mansueto Giulio Lattes, 1350 - Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP,  
CEP.: 12247-014, Brasil.  
Telefone: (12) 3905-2423

\*yoshio\_manuel@hotmail.com

**RESUMO:** A fibra de carbono é um material bastante utilizado como reforço de materiais compósitos. Contudo, possui alto custo de aquisição e dificuldade no descarte, sendo assim é necessário considerar a reciclagem do material. Portanto, o estudo visa o reuso da fibra de carbono, onde o *sizing* é degradado durante a reciclagem. O *sizing* melhora a adesão do compósito, resultando em um material com propriedades superiores comparados aos sem *sizing*. devendo-se verificar as técnicas para sua recuperação. Assim sendo, esta pesquisa iniciou-se em livros específicos e complementares sobre Fibras de Carbono, como também foi estruturada por buscas por palavras-chave em sites com conteúdo científico, como Scielo, Google Acadêmico e *Science Direct*. Foi possível indicar a deposição de um polímero na superfície da fibra para recuperar o *sizing* para a fibra de carbono reciclada, onde pode-se utilizar uma variedade de formulações para deposição, que interagem com a matriz a ser utilizada para a conformação do compósito, além de ser um método simples e com baixo custo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibra de Carbono; Reciclagem; *Sizing*.

**ABSTRACT:** Carbon fiber is widely used as reinforcement to composite materials. However, it has a high acquisition cost and difficulty in disposal, so it is necessary to consider the recycling of the material. Therefore, the study aims at the reuse of carbon fiber, where sizing is degraded during recycling. Sizing improves the adhesion of the composite, resulting in a material with superior properties compared to unsized ones. The techniques for its recovery should be verified. Thus, this research began with specific and complementary books on Carbon Fibers, as well as being structured by keyword searches on sites with scientific content, such as Scielo, Academic Google and Science Direct. It was possible to indicate the deposition of a polymer on the surface of the fiber to recover the sizing for the recycled carbon fiber, where a variety of deposition formulations can be used, which interact with the matrix to be used for the conformation of the composite, in addition to of being a simple and low-cost method.

**KEYWORDS:** Carbon Fiber; Recycling; *Sizing*.

## 1. INTRODUÇÃO.

Os materiais compósitos, quando se trata de inovação e desenvolvimento, sempre têm grande visibilidade no mundo industrial, por sua gama de aplicabilidade em diferentes setores (tais como, aeronáutico, aeroespacial, naval, bioengenharia, automobilístico, construção civil, artigos esportivos, entre outros) (PARK, 2015).



Pode-se definir os materiais compósitos como a combinação de dois materiais (reforço e matriz) a nível macroscópico. Esses materiais apresentam boas propriedades químicas, além de serem mais leves, como por exemplo, a fibra de carbono, usada como reforço em uma matriz polimérica (LEVI NETO; PARDINI, 2006).

Dentre os compósitos, em particular, os reforçados com fibras de carbono, estão sendo cada vez mais utilizados para a substituição de materiais metálicos, estes, por sua vez, apresentam boa resistência mecânica, porém, geralmente são caros e pesados e seu processo de manufatura trabalhoso. Por isso, indústrias como a aeronáutica, estão utilizando a fibra de carbono como um material alternativo para a confecção de novas peças para aeronaves, com menos peso e melhores propriedades (PARDINI; PERES, 1996).

Diante do crescimento da utilização da fibra de carbono em vários setores da indústria, observou-se que este setor ainda possui dificuldades em relação ao descarte, na análise do ciclo de vida do material e o impacto que pode trazer ao meio ambiente. Este trabalho trata-se de um levantamento bibliográfico, para que possa identificar os processos de reciclagem que envolvam o reaproveitamento da fibra de carbono, com melhoria de suas propriedades mecânicas através do processo de tratamentos superficiais, visando o *sizing* da fibra de carbono reciclada, o que leva a melhoria das propriedades adesivas para utilização em um futuro compósito.

### 1.1. Reciclagem de Materiais Compósitos Reforçados com Fibra de Carbono (CRFC)

Existem dois objetivos principais para reciclar compósitos e resíduos de materiais compósitos: o primeiro é evitar colocar o lixo em aterros sanitários, e o segundo, e talvez mais importante, é encontrar maneiras de recuperar e reutilizar esses materiais em aplicações úteis (e lucrativas) (BROSIUS, 2019).

O tipo de reciclagem pesquisado neste trabalho foi a reciclagem química. Esse método apresenta, especialmente, um menor gasto econômico e energético para se implantar e demandam menores quantidades de energia, comparado com outros métodos de reciclagem (AIRES, 2015).

Na pirólise, a morfologia das fibras quase não é alterada (diminuição do diâmetro inferior a 4%) (GORGOJO et al., 2018). Este trabalho estuda a pirólise por ter menor custo de execução. Na pirólise, a decomposição térmica de moléculas orgânicas em uma atmosfera inerte (por exemplo: Argônio ou N<sub>2</sub>), é um dos processos de reciclagem mais difundidos para CRFC. Durante a pirólise, o CRFC é aquecido entre 450°C à 700°C, assim a matriz polimérica é volatilizada em moléculas de menor peso, enquanto as fibras de carbono permanecem inertes e eventualmente recuperadas, necessitando de algum tratamento superficial para melhorar adesão interfacial quando reutilizada.

### 1.2. Sizing da Fibra de Carbono

É bem conhecido que, para um determinado compósito polimérico reforçado com fibra, as propriedades resultantes dependem fortemente da adesão interfacial entre a fibra e a matriz de polímero (VIEILLE et al., 2014), porque a interface desempenha um papel crítico na transferência de tensão entre as fibras e o ambiente circundante de matriz polimérica. No entanto, a superfície quimicamente inerte, a baixa energia superficial e a baixa molhabilidade das fibras de carbono (CFs – *Carbon Fibers*) com a maioria das matrizes poliméricas afetam seriamente a adesão interfacial em compósitos CF/polímero (TIWARI et al., 2011). Isso ocorre porque as superfícies dos CFs primitivos são apolares e compostas de planos basais grafiticos altamente cristalizados com estruturas inertes (GUO et al., 2009).

A fim de alcançar alto desempenho mecânico para compósitos de polímero reforçado com fibra de carbono, é necessária uma forte adesão interfacial entre a fibra e a matriz, a fim de transferir a carga da matriz para as fibras. Para melhorar a adesão interfacial fibra/polímero, muitos métodos convencionais, incluindo o aumento da ligação química entre as fibras e a matriz de polímero com



agente de acoplamento ou a introdução de componentes recentemente ativados ou aumentando a rugosidade da superfície nas superfícies da fibra com tratamentos químicos, térmicos, *sizing* (revestimento) e plasma, foram desenvolvidos para melhorar o intertravamento mecânico, a ligação química e a compatibilidade físico-química entre fibras de carbono e matrizes poliméricas (XIE et al., 2011). Quanto ao tratamento de *sizing*, ele pode proteger as fibras de carbono de danos mecânicos durante o processamento do compósito e melhorar a molhabilidade e a atividade química das CFs (MA et al., 2016).

O *sizing* tem a funcionalidade de melhorar a adesão inter-filamentar, ajudando a umedecer a fibra em matrizes poliméricas, e atua como um lubrificante para evitar danos à fibra nos processos de produção (MORGAN, 2005). O *sizing* aplicado na fibra deve interagir com a matriz polimérica a ser usada futuramente para conformação de novos compósitos. Esse método envolve revestir a fibra de carbono com uma película muito fina de polímero para torná-la mais fácil de manusear e melhorar o desempenho mecânico dos materiais compósitos (ZHANG et al., 2018).

Os materiais utilizados para recuperar o *sizing* são selecionados de modo a proteger as propriedades físicas. Esses materiais também precisam ser compatíveis com a resina da matriz. Isso inclui solubilidade e/ou reatividade com a resina formulada. Isso permite que a resina penetre na fibra, agrupando ou interagindo com a superfície da fibra. Essa técnica pode alterar o manuseio das fibras de carbono, que inclui proteção, alinhamento e molhabilidade das fibras (PARK, 2015).

Agentes de *sizing* comuns para fibras incluem principalmente resinas termorrígidas como poliuretano (PU) e epóxi (EP) e vários polímeros termoplásticos como polipropileno, poliamida, polietileno, tereftalato de polietileno e polímeros de alta temperatura como polissulfona (PSU), sulfeto de polifenileno (PPS) e (polieteretercetona) PEEK (UNTERWEGER; BRÜGGEMANN; FÜRST, 2014).

Segundo Morgan (2005), o *sizing* pode ser obtido a partir de técnicas como: deposição da solução de um polímero, deposição de um polímero na superfície da fibra por eletrodeposição, deposição de um polímero na superfície da fibra por eletropolimerização e polimerização de plasma. Este trabalho tem o foco na deposição da solução de um polímero.

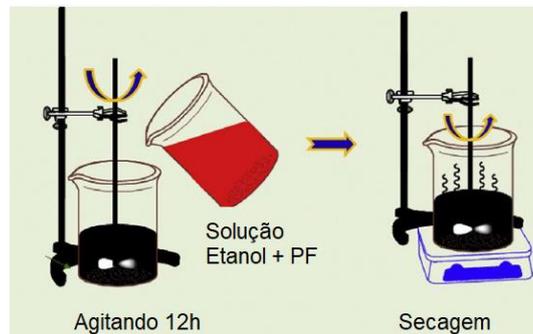
### 1.2.1. Deposição da Solução de um Polímero

Esta é a forma mais comum de *sizing*, onde deposita-se um polímero na interface da fibra de carbono a partir de um banho em solução polimérica. A escolha do *sizing* depende da matriz de resina. Então as resinas epóxi são geralmente usadas para matrizes epóxi, enquanto uma poliamida seria necessária para PEEK (MORGAN, 2005).

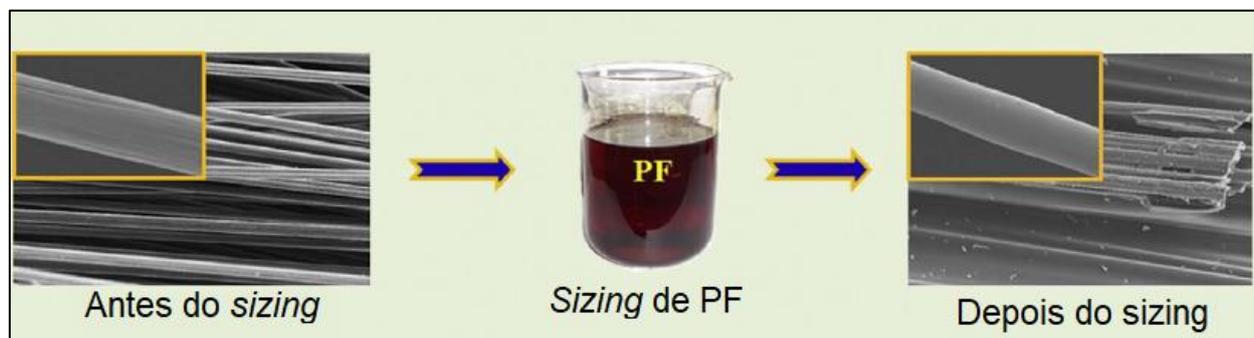
Li et al. (2018) estudou as propriedades mecânicas efetivamente aprimoradas de compósitos de polietersulfona reforçados com fibra de carbono curta moldados por injeção com *sizing* de resina de fenolformaldeído (PF), a partir da imersão de uma quantidade apropriada de CFs não tratadas numa solução de etanol e fenolformaldeído, agitada continuamente por 12h para obter um revestimento uniforme, conforme a Figura 1.

Depois disso, as misturas resultantes foram secas a 60°C para remover o etanol e, em seguida, resfriadas naturalmente à temperatura ambiente. Durante a secagem, a amostra resultante deve ser agitada continuamente para um revestimento uniforme e, finalmente, as CFs revestidos com fenolmaldeído foram obtidos.

A fim de avaliar a qualidade do revestimento de PF em superfícies da CF, as CFs não tratadas e as CFs com *sizing* de PF foram caracterizadas e as micrografias são mostradas na Figura 2. Pode-se observar que o PF é uniformemente disperso e firmemente envolvido nas superfícies da CF para sintetizar um novo reforço hierárquico. Isso indica que o PF foi revestido com sucesso nas superfícies CF.



**Figura 1.** Exibição esquemática do *sizing* de PF na superfície da CF. Adaptado de Li et al., 2018.



**Figura 2.** Imagens de MEV das CFs antes e depois do *sizing* de PF. Adaptado de Li et al., 2018).

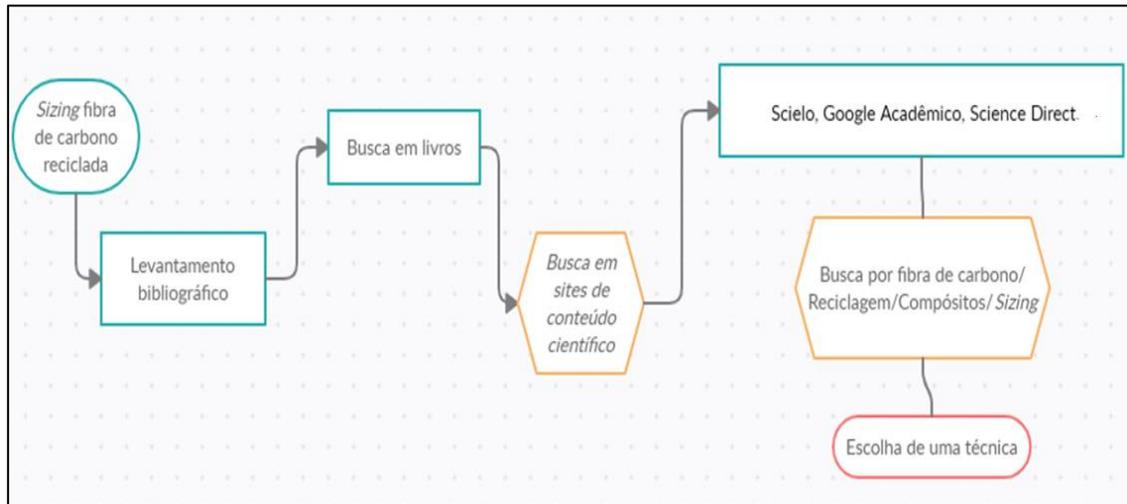
## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo é um levantamento bibliográfico de tratamentos superficiais de recuperação do *sizing* da fibra de carbono após a reciclagem. Para isso, foram apresentadas técnicas utilizadas em fibras de carbono virgens.

A metodologia para a construção deste trabalho foi organizada conforme a Figura 3, onde preliminarmente foi escolhido o tema da pesquisa (*sizing* da fibra de carbono reciclada) para ser fazer um levantamento bibliográfico (busca em livros e sites de conteúdo científico utilizando palavras-chave), selecionando o conteúdo pertinente para o estudo com o objetivo de escolher um tratamento superficial de *sizing* a ser aplicado na fibra de carbono reciclada.

Inicialmente, a pesquisa foi embasada em três livros. O primeiro livro utilizado foi *Carbon Fibers*, que foi escrito por Son-Jin Park, no ano de 2015, publicado pela Editora Springer, em sua série de livros *Springer Series in Materials Science*, no volume 210. O segundo livro é o *Carbon Fibers and Their Composites*, escrito por Peter Morgan, publicado no ano de 2005 por Taylor & Francis Group. O terceiro, o livro *Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia*, escrito por Levy Neto e Pardani, 1ª edição, publicado pela editora Blucher, em 2006.

O conteúdo da revisão de literatura foi estruturado utilizando palavras-chave baseadas no tema abordado por essa pesquisa. As palavras-chave foram utilizadas em *sites* buscadores de conteúdo científico, como *Scielo*, *Google Acadêmico* e *Science Direct*.



**Figura 3.** Fluxograma da metodologia aplicada a pesquisa.

A pesquisa foi estruturada a partir das palavras-chave como: Fibra de carbono, Precursores de fibra de carbono, Precursor Poliacrilonitrila fibra de carbono, Materiais Compósitos, Matriz polimérica, Resina epóxi, Resina poliéster, Resina fenólica, Reforço de materiais compósitos, Compósitos reforçados com fibras, Compósitos reforçados com fibra de carbono, Reciclagem, Descarte de materiais compósitos, Descarte de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, Reciclagem de compósitos, Reciclagem de Compósitos com Fibra de Carbono, Reciclagem de Compósito de Fibra de Carbono com matriz Epóxi, Reciclagem de Compósito de Fibra de Carbono com matriz Poliéster, Reciclagem de Compósito de Fibra de Carbono com Matriz Fenólica, *Sizing* fibra de Carbono, *Sizing* Deposição da solução de um polímero fibra de carbono, *Sizing* Deposição de um polímero na superfície da fibra de carbono por eletrodeposição, *Sizing* Deposição de um polímero na superfície da fibra carbono por eletropolimerização, *Sizing* Polimerização por Plasma na Superfície da Fibra de Carbono, Interface de Materiais Compósitos, Adesão de Materiais Compósitos.

Os resultados da busca por palavras-chave em sites de conteúdos científico, assim como uma análise desses resultados são apresentados no item 3.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As buscas feitas no *Google Acadêmico* foram refinadas, para buscar conteúdo atual, a partir do ano de 2006 até a atualidade, em qualquer idioma, por ordem de relevância e incluindo citações. No *SciELO*, foi refinada a partir de 2010, em todos os idiomas. No *Science Direct* a busca foi feita em inglês e refinada para publicações a partir de 2010, na área da Ciência dos Materiais, Engenharia, Engenharia Química, e Química. Os resultados das buscas nos três *sites* de conteúdo científico são apresentados na Tabela 1, conforme o número de conteúdo encontrado.



**Tabela 1. Resultados das pesquisas por palavra-chave encontradas em *websites* de conteúdo científico.**

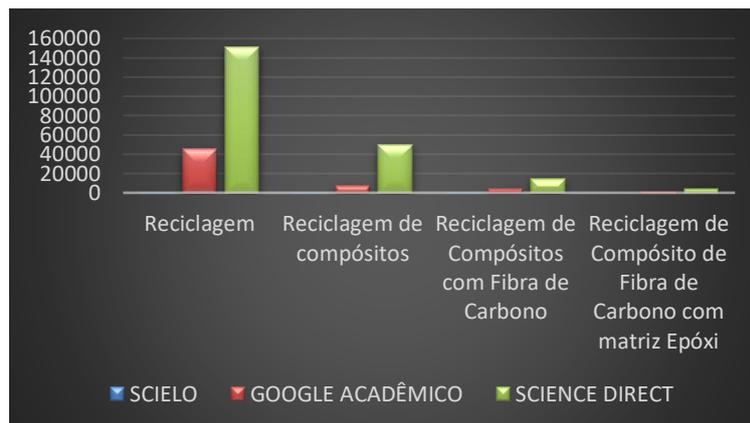
BUSCA	PALAVRA-CHAVE	SCIELO	GOOGLE ACADÊMICO	SCIENCE DIRECT
1	Fibra de carbono	123	19.000	150.200
2	Precusores de fibra de carbono	1	15.800	53.496
3	Precursor Poliacrilonitrila fibra de carbono	1	426	3.956
4	Materiais Compósitos	177	18.200	405.049
5	Matriz polimérica	139	15.200	216.881
6	Reforço de materiais compósitos	36	14.300	57.872
7	Compósitos reforçados com fibras	36	8.260	68.617
8	Compósitos reforçados com fibra de carbono	17	15.200	45.700
9	Reciclagem	414	45.000	150.900
10	Descarte de materiais compósitos	4	8.180	26.331
11	Descarte de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono	1	3.160	2.419
12	Reciclagem de compósitos	13	7.560	50.324
13	Reciclagem de Compósitos com Fibra de Carbono	1	4.000	14.762
14	Reciclagem de Compósito de Fibra de Carbono com matriz Epóxi	0	1.230	4.321
15	<i>Sizing</i> fibra de carbono	1	3.970	11.194
16	<i>Sizing</i> Deposição da solução de um polímero fibra de carbono	0	5.380	6.071
17	<i>Sizing</i> fibra de carbono reciclada	0	846	19.692
18	Interface de materiais compósitos	16	16.100	189.217
19	Adesão de materiais compósitos	5	13.800	68.453

Para analisar os resultados obtidos a partir das pesquisas de palavras-chave, foi feito um comparativo entre os principais *sites* de busca de conteúdo científico. A Figura 4 mostra o refinamento das palavras-chave para as buscas, com o exemplo do tema “Reciclagem”.

Conforme o exemplo supracitado, pode-se analisar que apesar dos filtros aplicados e o refinamento das palavras-chave, a quantidade de trabalho sobre o tema é bastante expressivo. Contudo, após a leitura e apuração de quais documentos seriam utilizados neste trabalho, pôde-se observar que obteve temáticas que não faziam parte deste estudo junto a esses resultados apresentados nos *sites* de buscas. Quando mais se refinava a busca a partir de palavras-chave específicas para o tema, menor eram os resultados úteis para este trabalho.

Quanto ao método de reciclagem foi constatado que a pirólise é ideal para a reciclagem das fibras de carbono de materiais compósitos. Além disso, as fibras não sofrem alterações na composição e morfologia (diâmetro semelhante das virgens) após o processo de reciclagem.

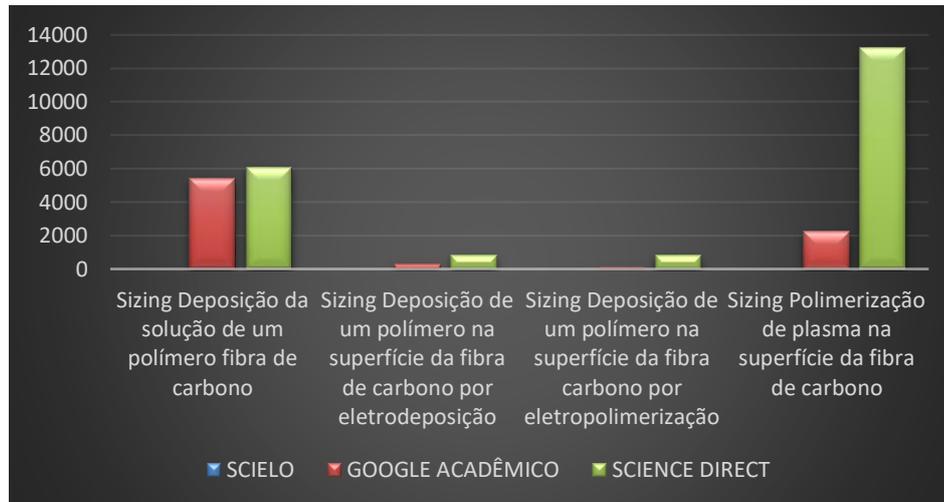
Baseando-se nos resultados das pesquisas das técnicas de *sizing* (apresentadas na Tabela 1), algumas discussões foram fundamentadas a partir da quantidade de conteúdo encontrado (utilizando as palavras-chave nos *sites* buscadores de conteúdo científico), assim como a seleção de conteúdos pertinentes ao tema deste estudo e está apresentado na Figura 5.



**Figura 4.** Resultados da busca em sites de conteúdo científico com a palavra-chave “Reciclagem”.

Para o estudo da técnica de deposição de um polímero na superfície da fibra por eletrodeposição, abordada no livro *Carbon Fiber and their Composites* de Peter Morgan, foi feita uma busca em *sites* de conteúdo científico a fim de encontrar outras informações para a sua dissertação. Todavia, após analisar os resultados obtidos, pôde-se considerar pouca informação útil na literatura para afirmar seus benefícios. Então, é necessário ter o estudo inicial de potencial de deposição, tempo de deposição, temperatura de deposição e composição eletrolítica do polímero, além de se avaliar se é válido o custo utilizado para o ferramental.

Ainda que localizados alguns resultados nas buscas por conteúdo científico, não foi identificado na literatura conteúdo, que de fato, abordasse a técnica de deposição de um polímero na superfície da fibra de carbono por eletropolimerização, tratada no livro *Carbon Fiber and their Composites*.



**Figura 5.** Análise comparativa sobre as técnicas de *sizing*.

Foi identificado bastante conteúdo com as buscas sobre a técnica de polimerização de plasma (também referida no livro *Carbon Fiber and their Composites* de Peter Morgan), porém, grande parte desses resultados não foram relevantes para a construção deste trabalho. Pôde-se observar, após a seleção dos conteúdos, que este método modifica apenas de algumas camadas moleculares da fibra de carbono, causando alterações pouco profundas no material, contudo as propriedades mecânicas da fibra são preservadas, mesmo com pequena alteração superficial (CORRÊA, 2018).

Com o segundo maior número de resultados localizados, a deposição de um polímero na superfície é técnica de *sizing* mais discutida. Pode-se citar como vantagens dessa técnica:

- (a) utilização de vários tipos de soluções de *sizing* para diferentes tipos de materiais que podem ser empregados em matrizes poliméricas e,
- (b) baixo custo com ferramental e maquinário, uma vez que as fibras que recebem essa técnica são banhadas em uma solução de polímero.

Não foi localizado na literatura desvantagens da técnica de deposição de um polímero.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente trabalho, como já citado, apresentou algumas formas de recuperar o *sizing* da fibra de carbono reciclada. Como pôde-se observar, a fibra de carbono é um material com custo consideravelmente alto, e pode ser obtida por importação de outros países, visto que o Brasil produz pouca fibra de carbono, quando se trata de escala industrial.

As fibras de carbono quando chegam a seu ciclo final de vida, são descartadas e seu reuso inutilizado, ocasionando a dificuldade de descartá-las em locais adequados.

A reciclagem da fibra de carbono traz grandes benefícios para o meio industrial, visto que, reciclando o material, abandona-se o custo para a aquisição de fibras virgens, protege-se o meio ambiente, desconsidera-se o descarte inapropriado, busca-se a reintegração do material para conformação de novos compósitos.

A reciclagem química do compósito reforçado com fibra de carbono é técnica mais utilizada e tem o objetivo de preservar a fibra, no caso desse estudo, a técnica escolhida foi a pirólise. Com este método, é possível degradar uma diversidade de matrizes poliméricas, além de possuírem um valor comercial menor que os produtos obtidos por outras técnicas de reciclagem química.



Após o processo de pirólise, a fibra de carbono necessita de uma aplicação de *sizing* na sua interface, para melhorar a interação mecânica fibra/matriz, como também o aumento da energia de superfície, o que facilita as forças adesivas para o novo compósito.

Portanto, apesar de cada técnica de aplicação de *sizing* apresentada ter seu lado positivo, a deposição da solução de um polímero é uma técnica eficiente, onde pode-se estudar a interação de vários tipos de matrizes (tanto termofixas como termoplásticas, após a aplicação do *sizing*) com a fibra de carbono, e ser uma técnica de simples execução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, A. W. **Remoção De Resina Epóxi Para Reciclagem De Fibra De Carbono Por Processo Oxidativo Leve**. Universidade Federal da Fronteira Sul. Cerro Largo, RS, 2015.

BROSIUS, D. **Composites Recycling — No More Excuses**. Disponível em: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-recycling-no-more-excuses>. Acessado em: 12/04/2021.

CORRÊA, F. H. **Funcionalização de Fibras de Carbono por Plasma Pulsado em Gaiola Catódica**. UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

GORGHOJO, A. F. et al. Obtención de fibra de carbono reciclada mediante pirolisis de preimpregnados curados. **Revista de la Asociación Española de Materiales Compuestos**, v. 2, n. 3, p. 12–15, 2018.

GUO, H. et al. Interface property of carbon fibers/epoxy resin composite improved by hydrogen peroxide in supercritical water. **Materials Letters**, v. 63, n. 17, p. 1531–1534, 15 jul. 2009.

LEVI NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. 1º ed. Editora: BLUCHER, 2006.

LI, F. et al. Effectively enhanced mechanical properties of injection molded short carbon fiber reinforced polyethersulfone composites by phenol-formaldehyde resin sizing. **Composites Part B: Engineering**, v. 139, p. 216–226, 15 abr. 2018.

MA, Q. et al. Effects of surface treating methods of high-strength carbon fibers on interfacial properties of epoxy resin matrix composite. **Applied Surface Science**, v. 379, p. 199–205, 30 ago. 2016.

MORGAN, P. **Carbon fibers and their composites**. Taylor & Francis, 2005.

PARDINI, L. C.; PERES, R. J. C. Tecnologia de Fabricação de Pré-Impregnados para Compósitos Estruturais Utilizados na Indústria Aeronáutica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 32–42, 1996.

PARK, S.-J. **Carbon Fibers**. Second Edition. Springer. 2015.

TIWARI, S. et al. Influence of cold remote nitrogen oxygen plasma treatment on carbon fabric and its composites with specialty polymers. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 4, p. 964–974, fev. 2011.



UNTERWEGER, C.; BRÜGGEMANN, O.; FÜRST, C. **Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization Polymer Composites**, fev. 2014.

VIELLE, B. et al. Influence of Matrix Toughness and Ductility on the Compression-after-impact behavior of Woven-ply Thermoplastic-and Thermosetting-composites: A Comparative Study Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO). **Composite Structures**, v. 110, p. 207–218, 2014.

XIE, J. et al. Improving carbon fiber adhesion to polyimide with atmospheric pressure plasma treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 206, n. 2–3, p. 191–201, 25 out. 2011.

ZHANG, T. et al. Effect of Polyurethane Sizing on Carbon Fibers Surface and Interfacial Adhesion of Fiber/Polyamide 6 Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 16, 20 abr. 2018.