



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

William Koiti Oishi

**APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS RECICLADOS COM FIBRA DE CARBONO
BASEADO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS: REVISÃO INTEGRATIVA**

São José dos Campos

2021

William Koiti Oishi

**APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS RECICLADOS COM FIBRA DE CARBONO
BASEADO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS: REVISÃO INTEGRATIVA**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

Orientador: Dr. Marcos Yutaka Shiino

São José dos Campos

2021

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2021]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Oishi, William Koiti

Aplicações de compósitos reciclados com fibra de carbono baseado em propriedades mecânicas: revisão integrativa / William Koiti Oishi. - São José dos Campos : [s.n.], 2021.
67 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2021.

Orientador: Marcos Yutaka Shiino.

1. Intensidade de Energia. 2. Processos de Fabricação. 3. Reciclagem. 4. Propriedades Mecânicas. I. Shiino, Marcos Yutaka, orient. II. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - Unesp. IV. Universidade Estadual Paulista (Unesp). V. Título.

William Koiti Oishi

**APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS RECICLADOS COM FIBRA DE CARBONO
BASEADO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS: REVISÃO INTEGRATIVA**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

São José dos Campos, _____ de
_____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

Departamento de Engenharia Ambiental, ICT/UNESP SJC

Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza

Departamento de Engenharia Ambiental, ICT/UNESP SJC

Prof. M.Sc Francisco Maciel Monticelli

Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP Guaratinguetá

Dedico este trabalho e o resumo de todos esses anos de esforço e aprendizado para minha querida mãe, Neide, e à minha irmã, Patrícia. A minha família a quem amo e devo tanto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Neide, e à minha irmã, Patrícia, que sempre estiveram ao meu lado dando todo o suporte emocional e financeiro, além de me incentivarem a procurar ser alguém além do que poderia imaginar.

Agradeço também aos professores pelo ensino e suporte necessário para a conclusão do curso, em especial o prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino por sua confiança depositada em mim, pelos incentivos e orientações para que pudesse realizar o trabalho.

RESUMO

OISHI, William Koiti. **APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS RECICLADOS COM FIBRA DE CARBONO BASEADO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS: REVISÃO INTEGRATIVA**. 2021. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José dos Campos, 2021.

A busca por equipamentos com elevadas propriedades mecânicas, mais eficientes e mais leves trouxe desenvolvimento e inovação em diversos setores para trazer conforto, segurança e atendimento às legislações ambientais. Sendo principalmente fabricadas e recicladas em países desenvolvidos os compósitos de fibra de carbono dependem de uma logística de exportação, uso e transporte que interligue os agentes para geração de uma economia circular em cada setor. Por meio da revisão integrativa, foram analisados os diversos processos desde o ciclo de vida (CV) da fibra de carbono até às possíveis aplicações dos compósitos reciclados de fibra de carbono com reforço polimérico. Os métodos foram explicitados e comparados por meio de uma tabela de vantagens e desvantagens. As tecnologias analisadas se apresentaram interessantes, na possibilidade de se reciclar e separar as fibras de carbono da matriz e mesmo obtê-las separadamente para posterior fabricação de novas peças, sem grandes perdas de propriedade mecânica. Com o avanço tecnológico e inovações nos processos, é possível a redução no custo final do material. Aliado a isto, se aplicado para produtos que agregam valor, a comercialização destes artigos a base de material reciclado é uma via possível para o desenvolvimento sustentável, sendo necessários uma coordenação e planejamento para interligar as áreas de produção, de uso e de descarte até às empresas recicladoras.

Palavras-chave: Intensidade de Energia; Processos de Fabricação; Reciclagem; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

OISHI, William Koiti. **APLICAÇÕES DE COMPÓSITOS RECICLADOS COM FIBRA DE CARBONO BASEADO EM PROPRIEDADES MECÂNICAS: REVISÃO INTEGRATIVA**. 2021. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José dos Campos, 2021.

In search of lightweight equipment with high mechanical properties, developments and innovations have been conducted in several sectors to bring comfort, safety and compliance with environmental legislation as well as financial gains. Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) composites are mainly manufactured and recycled in developed countries, as such they depend on an export logistics, use and transportation that integrate the many agents to generate a circular economy in each sector. By integrative review, a compilation of articles for each process, ranging from the Life Cycle of the carbon fibre to the recycling methods and areas of application were performed. The methods were then compared listing the advantages and disadvantages. The technologies showed good results, in the possibility of recycling and separating the carbon fibres from the matrix and even to obtain each component isolated, without great losses of mechanical properties. By reducing the final price to the consumers due to advances in technology or innovations in manufacturing processes, allied with the fact that if applied in products with added value, the profit margin for recycled materials can be an interesting way to attain sustainable development. Nevertheless, it is necessary to have a coordination and planning to create a sustainable market through the convergence of interests, to link the production, use and disposal of CFRP to the recycling companies.

Keywords: Energy intensity; Manufacturing processes; Recycling; Mechanical Properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fases de uma ACV.....	15
Figura 2 Diagrama das etapas dos precursores da CF	16
Figura 3 Ciclo de Vida da Fibra de Carbono – Sistema de Produto.....	17
Figura 4 Comparação entre a energia específica dos métodos de reciclagem e a fibra virgem	19
Figura 5 Diagrama dos processos de reciclagem mecânica	21
Figura 6 Diagrama do processo de recuperação de FC por pirólise.....	25
Figura 7 Relação da porosidade e densidade segundo o ciclo de pirólise.....	25
Figura 8 Esquematização da reciclagem por leito fluidizado.....	26
Figura 9 Método de alinhamento hidrodinâmico	31
Figura 10 Esquematização do processo de alinhamento por HiPerDiF	32
Figura 11 Reconexão das fibras de carbono na região fraturada em função do tempo.....	33
Figura 12 Mapa de densidade das pesquisas com base nos autores dos artigos	37
Figura 13 Percentual de retenção da Resistência à tração após o processo de reciclagem.	44
Figura 14 Percentual de retenção do módulo da tração após o processo de reciclagem.	44
Figura 15 Gráfico da resistência à tração pelos métodos de alinhamento.....	49
Figura 16 Gráfico do Módulo da tração pelo método de alinhamento.....	49
Figura 17 Diagrama dos processos de decisão para o rCFRP	55
Figura 18 Esquematização da manufatura de laminada pelo método de rolamento	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Energia específica para os métodos de manufatura	19
Tabela 2	Comparativo dos métodos de reciclagem	28
Tabela 3	Seleção inicial dos artigos referentes ao tema	35
Tabela 4	Separação dos artigos segundo categorias	36
Tabela 5	Lista das companhias recicladoras.....	39
Tabela 6	Lista de possíveis produtos com rCF e rCFRP	40
Tabela 7	Propriedades e tipo das fibras segundo o método de reciclagem	42
Tabela 8	Comparação entre os métodos de alinhamento a seco, hidrodinâmico e HiPerDiF	46
Tabela 9	Variações da Carga suportada pelo alinhamento por campo elétrico	50
Tabela 10	Relação entre o produto rCF, o método de manufatura e produtos	51
Tabela 11	Receita das empresas Hexcel e SGL Carbon.....	52

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
BMC	Bulk Molding Compound
CF	Carbon Fibre
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
CV	Ciclo de Vida
GWP	Global Warming Potential
IKP	Invariant Kinetic Parameters
LITA	Localized In-plane Thermal Assisted
PED	Primary Energy Demand
rCF	Recycled Carbon Fibre
RTM	Resin Transfer Moulding
SCF	Short Carbon Fibre
SEM	Scanning Electron Microscopy
SMC	Sheet Moulding Compound
vCF	Virgin Carbon Fibre

LISTA DE SÍMBOLOS

C₆H₆O	Phenol
DMI	1,2-dimethylimidazole
EG	Etilenoglicol
ESO-VA-CF	Epoxidized Soybean Oil – Vanilin 4-Aminophenol – Carbon Fibre
HNO₃	Ácido Nítrico
HCl	Ácido Clorídrico
KOH	Hidróxido de Potássio
NaOH	Hidróxido de Sódio
ZnCl₂	Cloreto de Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Ciclo de Vida da Fibra de Carbono	15
2.2 Consumo energético nos processos do Ciclo de Vida	18
2.3 Métodos de Reciclagem	20
2.3.1 Mecânica.....	20
2.3.2 Química.....	21
2.3.2.1 Hidrólise ácida à base de resina Biodegradável	22
2.3.2.2 Solvólise	22
2.3.2.3 Imersão em etilenoglicol (EG) e Repolimerização da Solução	23
2.3.3 Térmica	23
2.3.4 Químico e Térmico	27
2.4 Comparativo dos métodos de Reciclagem	27
2.5 Métodos de otimização das propriedades.....	29
2.5.1 Alinhamento das Fibras.....	29
2.5.1.1 Método a Seco.....	30
2.5.1.2 Método Hidrodinâmico	30
2.5.1.3 Método HiPerDiF	31
2.5.1.4 Método por Campo Elétrico	32
2.5.2 Reparo dos danos – Aspectos de reuso ou manutenção	33
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	34
3.1 Identificação do problema.....	34
3.2 Pesquisa na Literatura	34
3.3 Avaliação e Análise da base de dados	37
3.4 Conclusão e Apresentação.....	38
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4.1 Aplicações do rCFRP.....	38
4.2 Desafios atuais da implementação.....	52
4.3 Possíveis melhorias para tornar o rCFRP mais competitivo	55
5 CONCLUSÃO.....	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Inicialmente, o emprego das matrizes poliméricas e o uso das fibras de carbono foram as soluções encontradas para substituir os materiais metálicos visando eficiência de seus sistemas. A substituição gradativa foi devido às propriedades mecânicas serem similares as que os materiais metálicos oferecem e por ter propriedades atrativas como a sua durabilidade, ter baixa massa específica e a capacidade de se moldar em formas complexas. Com essas propriedades, as indústrias automotivas e aeronáuticas se beneficiaram com a redução do peso de seus modelos e melhorando a eficiência energética com a redução do uso de combustíveis (NUNES et al., 2018).

A fibra de carbono possui uma demanda que cresce anualmente, em especial nos países europeus, americanos e do Pacífico asiático, e é utilizada em diversos setores que compreendem a construção civil, os artigos esportivos, equipamentos eletrônicos, automotiva, aeroespacial e aeronaves, na área médica, de defesa militar e no setor de energia presente em turbinas eólicas (VIEIRA; VIEIRA; CHANG CHAIN, 2017).

O compósito de fibra de carbono com reforço polimérico (Carbon Fibre Reinforced Polymer – CFRP) é a junção de uma matriz polimérica, que pode ser termoplástica ou termofixa, e da fibra de carbono virgem (virgin Carbon Fibre – vCF), possuindo tanto as características da fibra de carbono quanto as características do polímero. Quando utilizada matriz termofixa como o epóxi, garantem alta resistência térmica e química pela característica da matriz possuir uma rede de ligações do tipo covalentes. Por outro lado, a matriz reticulada dificulta o processo de degradação química e a separação da fibra da matriz nos processos de reciclagem, ao término da vida útil do produto (YAMAGUCHI et al., 2015).

As preocupações com o aquecimento global e a poluição dos ambientes terrestres e aquáticos são discutidos há décadas e destacam a importância da presença de uma logística reversa em seus processos nas inovações de tal forma a reduzir a pegada ecológica e os futuros custos socioambientais uma vez que os recursos naturais são finitos (OGASA; KEMMOCHI, 1998).

A situação do problema é que os resíduos dos compósitos são destinados para a incineração ou dispostos em aterros. Tal fato repercutiu em diretivas da comunidade europeia que classificaram o CFRP em resíduo químico, atribuindo-lhe maiores taxas de pagamento para descarte em aterros, por entenderem que levaria séculos para se decomporem (ALTAY et al., 2018). Por outro lado, os resíduos passaram a ser levados para a incineração, resultando em maiores emissões de gases do efeito estufa (LIU et al., 2020).

Em vista do volume de resíduos crescente e dos custos ambientais e econômicos, o certificado da ISO 14001 serviu de incentivo para que empresas adotassem uma postura pró desenvolvimento sustentável com vistas a redução de emissão de carbono, melhorar a gestão ambiental, reduzir o volume de resíduos gerados, aplicar a reciclagem e, se inviável, aumentar o tempo de vida útil desses produtos (ABNT NBR ISO 14001, 2005; PEIXE et al., 2019; VIEIRA; VIEIRA; CHANG CHAIN, 2017).

As formas encontradas para reduzir o volume de resíduos gerados do CFRP são estudadas desde sua confecção, na utilização de fibras de carbono reciclados (recycled carbon Fibre - rCF) advindas de processos de reciclagem ou na reutilização de restos de processos, e assim reduzindo-se a energia necessária de fabricação dos compósitos pois a fibra de carbono já foi produzida (CERRUTI et al., 2014).

Dependendo da estrutura do projeto, é necessário que a fibra tenha um comprimento de fibra mínimo, controle no grau de alinhamento e alta fração de volume de fibra. A viabilidade se dará uma vez que o produto final da reciclagem for comparado ao produto de material virgem, apresentando pequenas variações ou valores melhores. Ou então, se comparados ao material não tratado, apresentando melhoras significativas nos valores das propriedades mecânicas como módulo elástico, resistência à tração, comprimento das fibras e porcentagem em volume da fibra (KRATZ; LOW; FOX, 2017; MIYAKE; IMAEDA, 2016).

Por meio da Revisão Integrativa, o presente trabalho comparou os métodos existentes para obtenção de compósitos reciclados, os métodos que podem ser empregados para melhorar as propriedades mecânicas e, também, indicou as potenciais aplicações, os desafios atuais e as propostas de soluções para tornar o compósito reciclado de fibra de carbono com reforço polimérico (recycled Carbon Fibre Reinforced Polymer - rCFRP) mais competitivo com relação ao compósito fabricado com vCF.

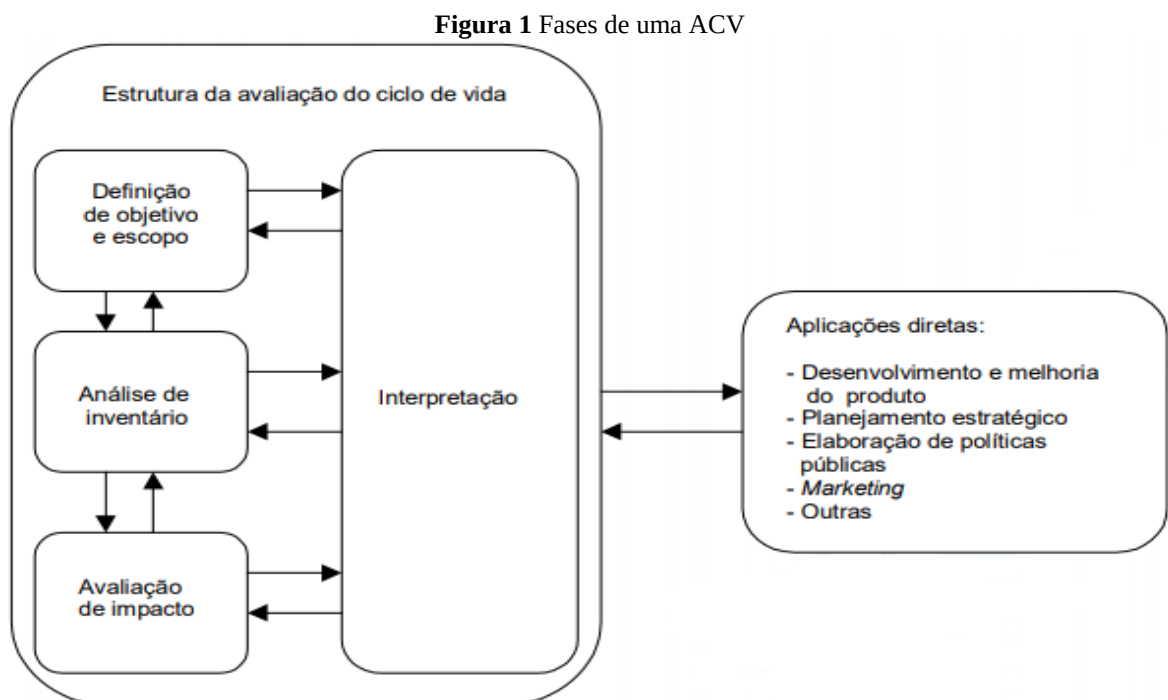
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Ciclo de Vida da Fibra de Carbono

A avaliação do ciclo de vida (ACV) de um produto compreende as etapas necessárias para que ele seja desenvolvido, desde a etapa de extração do material, o uso do produto até que chegue ao término de sua vida útil e por final a etapa de descarte, onde pode ser reingressado no ciclo produtivo por meio de reutilização ou reciclagem (ABNT, 2009).

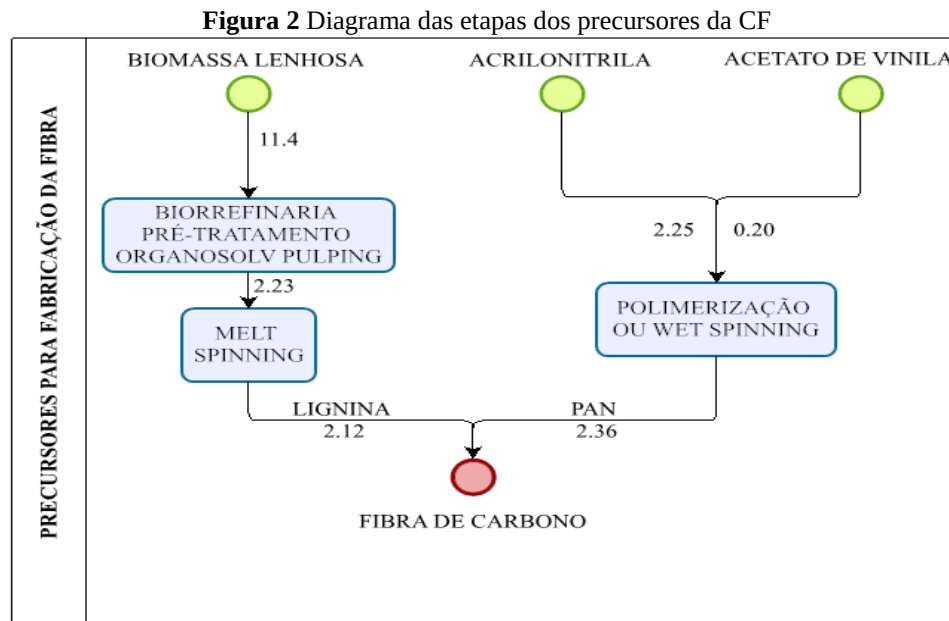
A ACV é dividida em 4 fases ilustrado na **Figura 1**, sendo elas a definição do escopo e objetivo; a fase de análise de inventário; a fase de avaliação de impactos do ciclo de vida (CV) e a fase da interpretação (ABNT, 2009).

É utilizada como técnica para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais associados mediante a compilação e avaliação do inventário de entrada e saída do sistema do produto, estando sujeito a interpretações com base nos objetivos do estudo. Pode ser utilizada na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais; na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não-governamentais e marketing; ou na seleção de indicadores de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição (ABNT, 2009).



Fonte: ABNT n°14040, 2009.

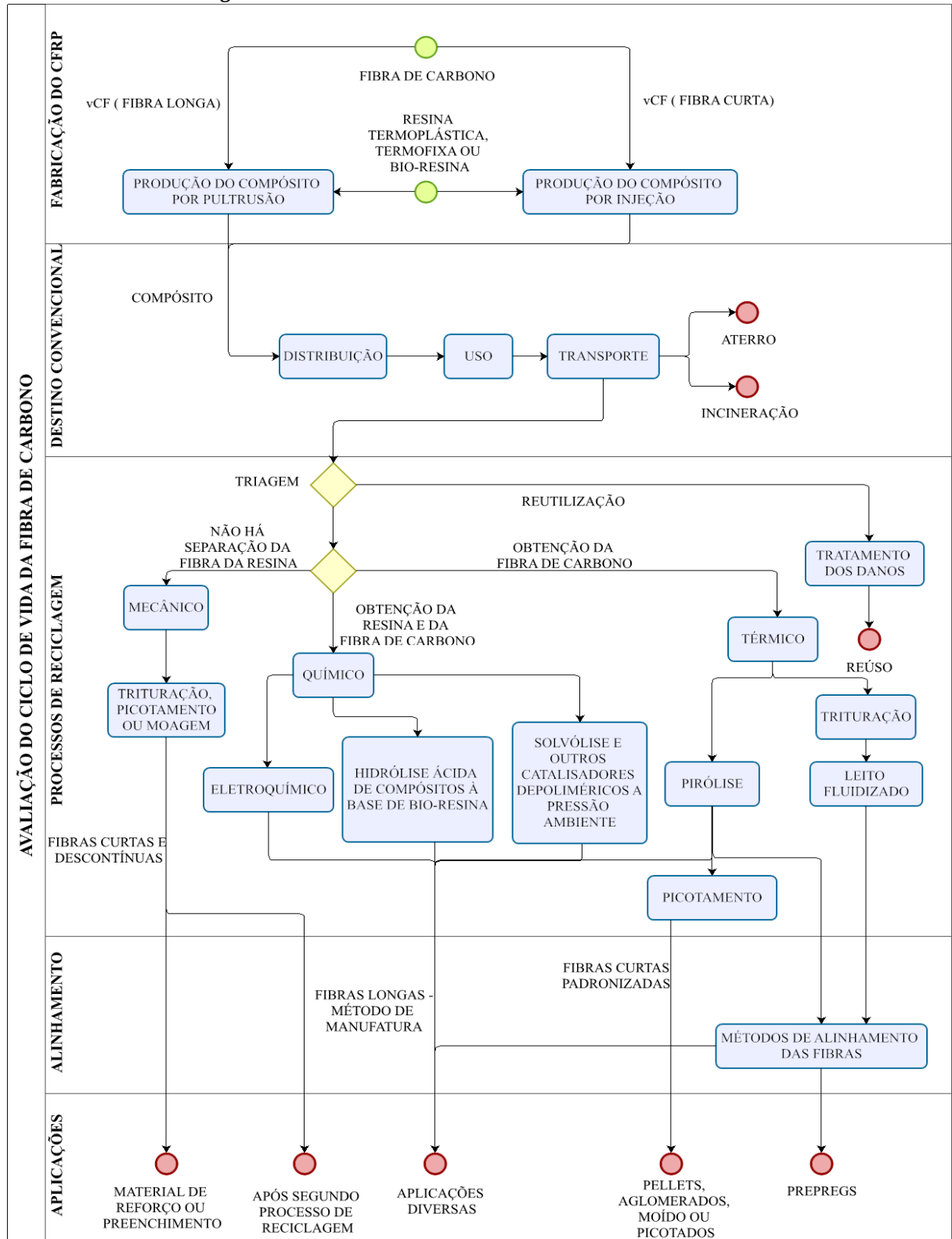
A **Figura 2** ilustra o diagrama dos fluxos de transformação para a produção da fibra de carbono por precursores que podem ser a poliacrilonitrila (PAN) ou Lignina (SULLIVAN, 2006).



Fonte: Adaptado de DAS (2011).

A **Figura 3** ilustra o sistema de produto, que é o conjunto de unidades de processo conectadas materialmente, que realiza uma ou mais funções definidas (ABNT, 2009). O fluxograma indica as matérias-primas utilizadas, fibra de carbono e resina, a fabricação do produto CFRP, a distribuição e uso do produto até as formas de destinação e disposição convencional em aterros ou incineradoras, ou encaminhados para a reciclagem passando por uma etapa prévia de coleta e triagem, a partir do transporte, até às recicladoras. Da etapa de triagem os resíduos podem ser reaproveitados e reutilizados caso estejam em boas condições ou então passam pelos métodos de reciclagem, onde os compósitos passarão por diversos processos até a obtenção da fibra de carbono reciclada com o possível retorno ao ciclo produtivo. A fibra de carbono reciclada pode ser tratada como um produto e comercializado após um processo mecânico que irá padronizar o tamanho e formato. Caso contrário, a fibra reciclada pode ser utilizada para confecção de um compósito reciclado associada a resina também reciclada ou não a partir dos métodos de manufatura. A depender do número de vezes que o material foi reciclado a perda de propriedade mecânica pode ser significativo, limitando as aplicações do compósito ou da fibra de carbono reciclada.

Figura 3 Ciclo de Vida da Fibra de Carbono – Sistema de Produto



Fonte: Adaptado de NUNES et al. (2018), WITIK et al. (2013) e ZHANG et al. (2020) e LIU et al. (2020).

2.2 Consumo energético nos processos do Ciclo de Vida

Para a fabricação da fibra de carbono reciclada (rCF – recycled Carbon Fibre) os métodos que conseguem separar a fibra de carbono da matriz são os métodos químico e térmico. O método mecânico aproveita-se da resina já aderida e apenas reduz o tamanho dos compósitos, como se fosse o resultado da junção de uma fibra de carbono curta ligada a uma resina.

Para cada método de reciclagem existe uma energia específica associada. A exemplo da energia específica empreendida nos processos de reciclagem mecânica, Howarth et al. (2014) se basearam na fresadora Mikron HSM 400. A energia específica para o picotamento com a máquina citada foi calculada em $0,218 \text{ J/mm}^3$ atribuindo-lhe uma relação de $2,03 \text{ MJ/kg}$ para uma taxa de 10 kg/hr . Segundo o estudo, a relação pode ser reduzida a $0,27 \text{ MJ/kg}$ para uma taxa de alimentação de 150 kg/hr .

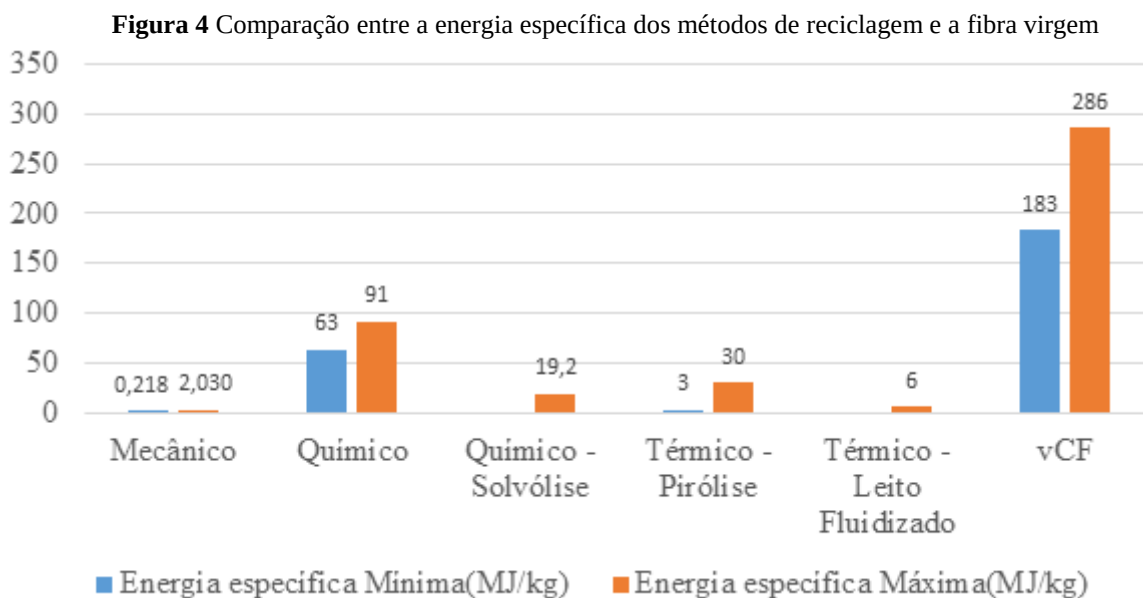
Com relação ao método químico a empresa Hitachi Chemical (2014) analisou a energia despreendida pelos processos de dissolução, limpeza e secagem e foram relacionados ao volume de unidades processadas de 1000, 2000 e 17000 unidades de raquetes de tênis por mês. Para 1000 unidades recicladas, a energia envolvida é de 91 MJ/kg , para 2000 unidades foi de 78 MJ/kg e para 17000 unidades, 63 MJ/kg (Hitachi Chemical, 2014).

Com relação ao método químico por solvólise, Keith e Leeke (2016) contabilizaram a energia despreendida durante a fase de aquecimento (85min) e de reação (2h) de 300g do material sob uma potência constante de 450 W num total de $3,69 \pm 0,01 \text{ MJ}$, que resultou em uma energia específica de $19,2 \text{ MJ/kg}$ (KEITH; LEEKE, 2016).

Com relação ao método térmico por pirólise, Meng et al (2017) citam que o método possui um intervalo de energia específica de 3 a 30 MJ/kg , enquanto o método térmico por leito fluidizado possui energia específica de 6 MJ/kg se considerados os valores da taxa de alimentação, comprimento da fibra e variações dos valores de entrada como gás natural, eletricidade, desprendimento de energia da oxidação da resina, perda de calor e o processamento anual em t/ano de material.

Observa-se que o tamanho da empresa e a taxa de alimentação de processamento são os fatores decisivos do ponto de vista energético numa relação inversamente proporcional. Assim, para uma escala industrial e a uma alta taxa de alimentação, a energia empreendida para recuperar o produto seria relativamente menor. O volume maior produzido aumentaria a disponibilidade do produto no mercado e reduziria o valor ao final dos processos. Associado a

isso, a energia necessária para produzir uma unidade através da reciclagem é significativamente menor que a energia necessária para produzir as fibras de carbono, que fica em torno de 183 a 286 MJ/kg como mostra a **Figura 4** (HOWARTH; MAREDDY; MATIVENGA, 2014).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Howarth et al. (2014), Hitachi Chemical (2014), Meng et al. (2017), Keith e Leeke (2016).

Dados adicionais de intensidade energética por métodos de manufatura dos compósitos se encontram na **Tabela 1**. Dentre os métodos de manufatura há também o método manual por Lay-Up. A EasyComposites, uma das empresas do setor de CFRP, disponibilizou em seu site os procedimentos dos métodos de manufatura, os cuidados durante a preparação do compósito e os fatores que influenciam no resultado final, como por exemplo o *design*, a espessura, a rigidez e a presença de defeitos (EASYCOMPOSITES, 2021).

Tabela 1 Energia específica para os métodos de manufatura

Método de Manufatura	Intensidade Energética (MJ/kg)
Moldagem por autoclave	21,9
Spray up	14,9
Moldagem por transferência de Resina (RTM – <i>resin transfer moulding</i>)	12,8

Método de Manufatura	Intensidade Energética (MJ/kg)
Infusão de Resina assistida por vácuo (VARI – <i>vacuum assisted resin infusion</i>)	10,2
SMC (do inglês - <i>sheet moulding compound</i>)	3,5 – 3,8
Compressão a frio	11,8
Pultrusão	3,1
Produção de Prepreg	40
Moldagem por injeção	19 – 29,9
Moldagem por Compressão	7,2 – 15,9

Fonte: Song; Youn; Gutowski (2009) e Tapper et al. (2020).

2.3 Métodos de Reciclagem

Serão abordados os métodos de reciclagem mecânico, químico, térmico e a combinação de métodos térmico e químico. Os métodos de reciclagem química apresentados são a hidrólise de bio-resina, a solvólise e a imersão em etilenoglicol (EG) enquanto que os métodos térmicos apresentados são a pirólise, o leito fluidizado e a termólise a vapor.

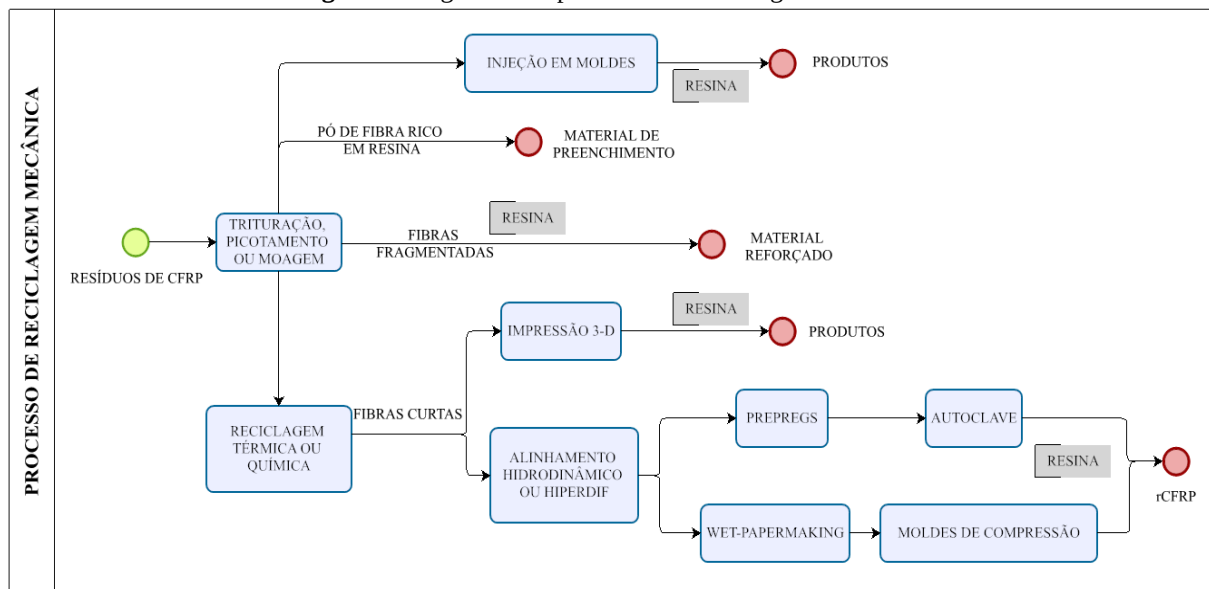
2.3.1 Mecânica

O processo de reciclagem mecânica permite obter fibras de carbono curtas (Short Carbon Fibre - SCF), descontínuas e não alinhadas por meio de picotamento, trituração ou moagem. De acordo com o formato ou o comprimento as fibras de carbono se apresentam na forma de pellets, aglomerados, picotados (*chopped*) ou moídos (*milled*). Atualmente, os pellets termoplásticos podem ser usados como substitutos para aplicações que usam fibras de carbono virgem. Dentre outras formas, as SCF podem ser posteriormente utilizadas como material de preenchimento ou para a confecção de materiais reforçados com adição de resina (VO DONG; AZZARO-PANTEL; CADENE, 2018), para injeção em moldes e mesmo na fabricação de laminados a partir de prepregs após processo de alinhamento das fibras de carbono curtas, como esquematizado na **Figura 5** (PICKERING et al., 2016a; ZHANG et al., 2020). Os valores das

propriedades mecânicas e de adesão da matriz nas fibras de carbono são relativamente inferiores a partir do segundo processo de reciclagem, causado pelo acúmulo de resíduos na superfície das fibras (COLUCCI et al., 2015; LONGANA et al., 2016).

Por outro lado, a fibra pode ser obtida a temperatura e pressão ambiente e sem a presença de reagentes, o que reduz os custos energéticos sem a necessidade de um controle rígido das condições de trabalho, é de fácil operação e pode ser produzido em larga escala. Além disso, o uso do rCFRP em aplicações que não exijam elevadas propriedades mecânicas proporcionam a possibilidade de aplicação em vários setores (HOWARTH; MAREDDY; MATIVENGA, 2014).

Figura 5 Diagrama dos processos de reciclagem mecânica



Fonte: Adaptado de Pimenta et al.(2011).

2.3.2 Química

O processo químico de reciclagem depende dos reagentes empregados e suas finalidades, sendo um método potencial para separação da fibra da matriz polimérica. Em termorrígidos, consiste na extração da matriz polimérica por meio da quebra das ligações e obtenção dos constituintes químicos simples, preservando parte das propriedades mecânicas das fibras, e possibilitando o uso em aplicações estruturais. Um procedimento executado por La Rosa et al. (2016) é a aplicação de 300ml de ácido acético (25% vol) a 80°C durante 1,5h em 6,55g de CFRP imerso na solução. Em seguida é aplicada a filtração separando a fibra de

carbono da fase líquida, totalizando um peso de 3g de fibra de carbono após o processo de secagem. O ácido acético é neutralizado com uma base de NaOH (pH = 10) até o aparecimento de um sólido depositado, que é passado por uma filtração e lavado com água destilada a 40°C, dissolvendo ainda mais o sólido. A adição de mais algumas gotas de NaOH ocasiona na precipitação da resina epóxi.

2.3.2.1 Hidrólise ácida à base de resina Biodegradável

A fibra de carbono reforçada a base de uma resina bio-epóxi, nomeada ESO-VA-CF (do inglês Epoxidized Soybean Oil – Vanilin 4-Aminophenol – Carbon Fibre) com dimensão de 100mm x 100mm x 0.45mm, é submersa em uma solução de ácido clorídrico (HCl) 0,1M a temperatura ambiente para realizar uma hidrólise ácida da matriz. A matriz se separa da fibra de carbono sob condições ácidas resultado da dissociação das ligações das bases de Schiff (composto com a estrutura $R_1R_2C=NR'$, $R' \neq H$) após 20h. A fibra pode ser obtida integralmente sem afetar sua estrutura com uma leve redução das propriedades mecânicas. A síntese da bioresina de vitrímero, uma classe de plásticos derivada de polímeros termofixos, ocorre com o tratamento de ESO com VA numa proporção de hidroxila/epóxi a 0.7/1.0 em dois procedimentos com DMI (1,2-dimetilimidazol) como catalisador. A primeira etapa é o pré-tratamento em frasco sob agitação mecânica a 210°C por 10 min em um ambiente rico em N_2 . A segunda etapa é transferir o produto pré-tratado para um molde (100mm x 100mm x 0.5mm) e tratado a 210°C sob 10MPa por 50 minutos em uma máquina de moldagem por compressão. A fibra de carbono reciclada ligada à bioresina pode gerar outro compósito (LIU et al., 2020b).

2.3.2.2 Solvólise

Pode ser realizada por um solvente em estado supercrítico/subcrítico ou por um solvente a pressão ambiente. O solvente mais empregado é a água em estado supercrítico e subcrítico, mas também podem ser empregados tetralina, álcoois em estado supercrítico e subcrítico e ácido nítrico (JIANG et al., 2015). O primeiro caso de solvólise com solvente supercrítico/subcrítico é utilizado para decompor matrizes termofixas e separar as fibras da matriz, geralmente controlando condições como a temperatura e a pressão e na presença de um catalisador como C_6H_6O e KOH. A matrix se despolimeriza completamente em metanol

subcrítico na presença do catalisador KOH 0,036 mol/L a uma temperatura de 65°C (ZHANG et al., 2020). Alternativamente, em água em estado supercrítico imerso numa solução de 150ml de 0,30M de TBD-EG/NMP e aquecido a 170°C por 1,5h para remover praticamente toda a matriz e obtendo o tecido de fibra de carbono após lavar com acetona e secagem. Outro método de reciclagem utiliza o N-Butanol em estado supercrítico com 0,05 mol/L KOH a temperatura de 330°C, pressão de 6,5MPa e tempo de reação de 60min para separar a matriz da fibra (LIU et al., 2020a; ZHANG et al., 2020). Esses métodos geram longas fibras sem resíduos na superfície com pequenas reduções nas propriedades mecânicas. Foi observado também que a eficiência na decomposição da matriz é de 90% a 10 minutos e 99% a 120 minutos de duração (NAM et al., 2019). Diferente da pirólise, ela atua a temperaturas mais baixas mas necessita de um equipamento mais robusto que seja capaz de resistir ao efeito de corrosão a elevadas temperatura e pressão. A depender do solvente empregado pode significar um impacto ao ambiente e ao trabalhador, o que dificulta a instalação em escala industrial. O segundo caso em pressão ambiente utiliza-se de ZnCl_2 e etanol como catalisador decompondo a matriz polimérica a 190°C. Esse sistema permite a clivagem seletiva das ligações de C-N na estrutura interligada e transformando a matriz polimérica em oligômeros solúveis em solvente orgânico (LIU et al., 2017).

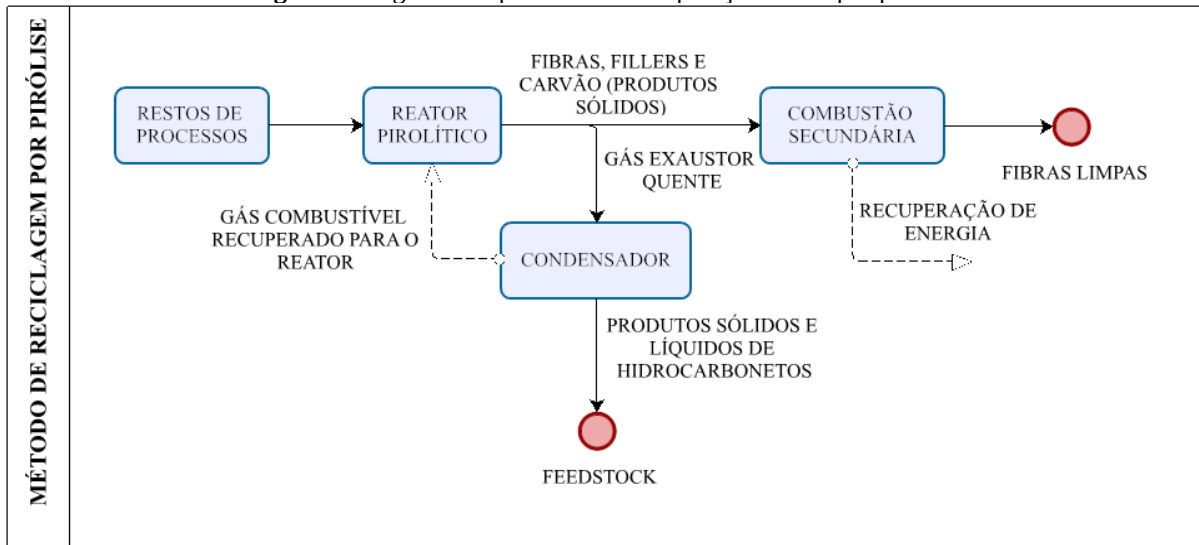
2.3.2.3 Imersão em etilenoglicol (EG) e Repolimerização da Solução

Inicia-se pela imersão de um compósito termofixo em um solvente de Etilenoglicol (EG) à alta temperatura (160-180°C) por um período de 4h. A matriz polimérica é então gradualmente dissolvida no solvente por um processo de transesterificação e o tecido da fibra limpo pode ser separado. Aquecendo-se novamente a solução por mais 3h, o etilenoglicol evapora-se obtendo assim a matriz polimérica que servirá para a manufatura de um novo compósito pelo processo de repolimerização que pode durar 10h. Vale ressaltar que durante o primeiro processo de aquecimento, pode ocorrer a repolimerização se o volume de solvente de etilenoglicol não for suficiente para sobrepor a taxa de evaporação do mesmo (YU et al., 2016).

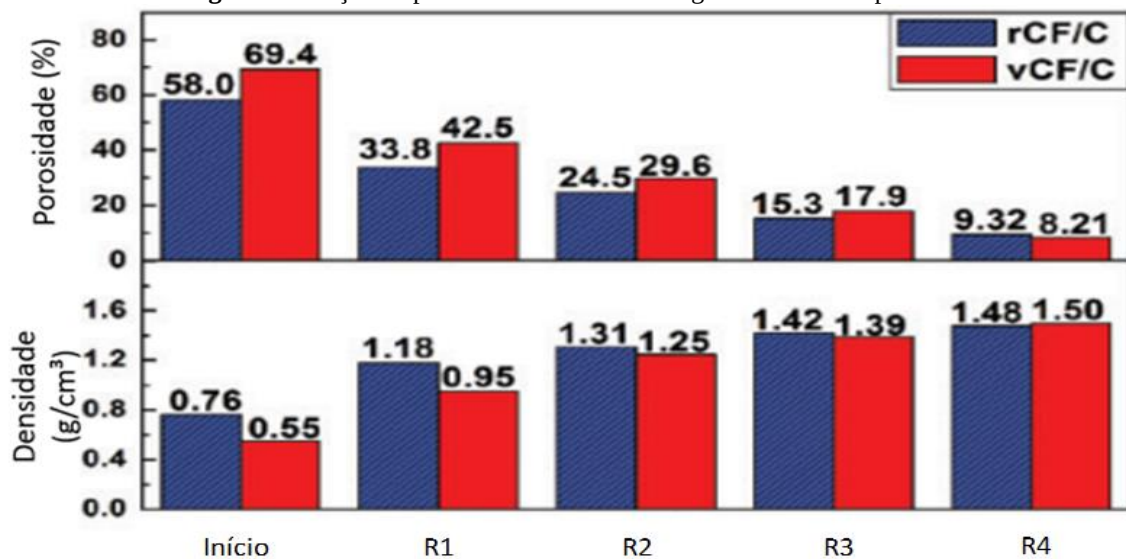
2.3.3 Térmica

Pode ser realizado por pirólise, por leito fluidizado ou por termólise à vapor. A pirólise é o processo mais amplamente utilizado com obtenção de fibras de carbono com propriedades

mecânicas similares à fibra virgem. O material é previamente caracterizado por análise termogravimétrica para se conhecer a temperatura de degradação da matriz. Após conhecido a temperatura, os compósitos podem ser submetidos a rampas isotérmicas, geralmente a temperaturas acima de 400°C até 700°C. Vale ressaltar que temperaturas acima de 650°C podem ocasionar na decomposição da própria fibra, com deposição de resíduos do processo na superfície e possíveis perdas de propriedades mecânicas, sem o devido controle das condições - o processo está esquematizado na **Figura 6**. Os restos de CFRP são colocados em um reator onde, após fechado a portilha, um gás inerte de nitrogênio é liberado para remover o ar na câmara (ocorre na ausência de oxigênio) e aquecendo gradualmente a câmara a uma taxa constante até chegar na temperatura desejada (rampas isotérmicas). Tal processo gera gases que são removidos do reator e parcialmente condensados em uma bobina de resfriamento com água. O líquido contém compostos aromáticos com valor calorífico de 37MJ/kg. O óleo e gás produzidos podem representar um *feedstock* expressivo, importante para outros processos. Após o processo no reator pirolítico, é necessário passar por um tratamento para remover os resíduos na superfície das fibras. Avanços na tecnologia permitiram tornar o processo mais eficiente energeticamente, aumentando a taxa de transferência térmica com uma redução da energia consumida pelo método assistido por micro-ondas para aquecimento no lugar do aquecimento convencional. O fator negativo é que para cada ciclo de pirólise realizado os resíduos da combustão da matriz tendem a preencher os poros das fibras de carbono e aumentar consequentemente a densidade, como ilustrado na **Figura 7**. Obs: A figura foi adaptada indicando por R que o material passou por uma etapa de reciclagem e o número indicando o número de ciclos de reciclagem aplicados. (APS, 2009; BALAJI; RUDD; LIU, 2020; GIORGINI et al., 2015; GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012; GUO; BAI, 2021; KARUPPANNAN GOPALRAJ; KÄRKI, 2020).

Figura 6 Diagrama do processo de recuperação de FC por pirólise

Fonte: Traduzido de Karupannan Gopalraj; Kärki (2020).

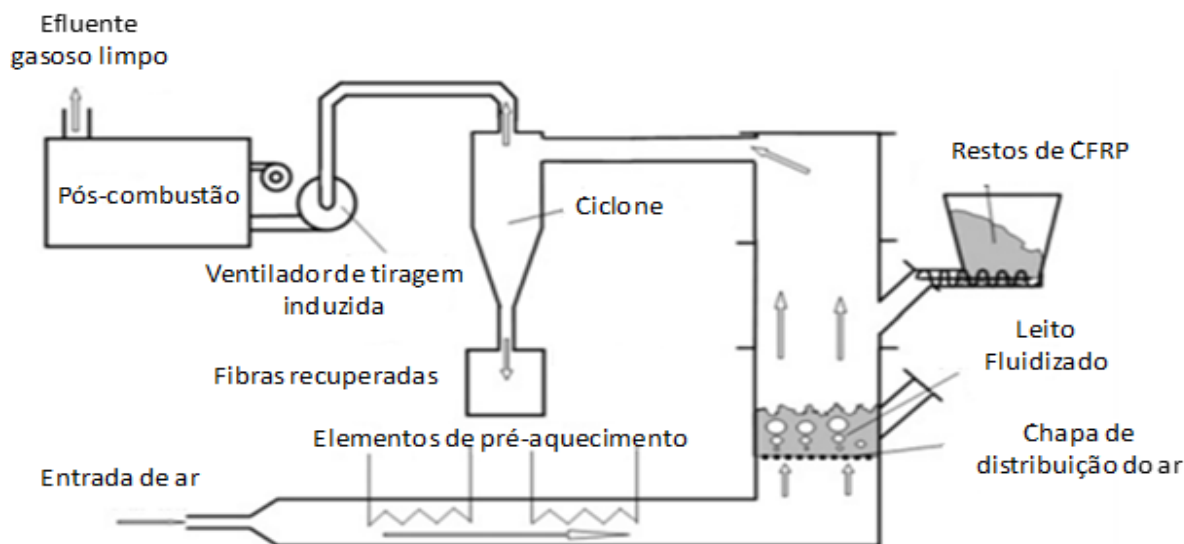
Figura 7 Relação da porosidade e densidade segundo o ciclo de pirólise

Fonte: Traduzido de Guo; Bai (2021).

O método por leito fluidizado, esquematizado na **Figura 8**, consiste em aplicar combustão na matriz polimérica em um fluido quente, com temperaturas de 450°C até 550°C e em ambiente rico em oxigênio. Durante a reciclagem os resíduos de CFRP são injetados em uma camada de silica em uma malha metálica. Conforme o ar quente passa pela camada e decompõe a resina, tanto as moléculas oxidadas quanto os filamentos de fibra são carreados pela corrente de ar, enquanto mais materiais metálicos são incorporados na camada. O método é eficiente para componentes contaminados no término de vida útil do produto. Uma possível

rota das fibras recuperadas é a moldagem por compressão (GIANNADAKIS; SZPIEG; VARNA, 2011; MENG et al., 2017; PIMENTA; PINHO, 2011).

Figura 8 Esquemática da reciclagem por leito fluidizado



Fonte: Traduzido de Jiang et al. (2008).

O método por termólise a vapor utilizado pela empresa francesa Alpha Recyclage Composites, baseia-se em processos termoquímicos que utilizam a água superaquecida a pressão ambiente para degradar a matriz orgânica e recuperar as fibras que são então, recicladas em novos compósitos termoplásticos. O resultado da interação da água com o compósito gera três produtos: uma fração gasosa permanente, uma fração gasosa condensada e a fibra de carbono reciclada. Tal método provou ser eficiente por não apresentar sinais de degradação da superfície e mantendo propriedades mecânicas similares da vCF. Por meio dos métodos de Kissinger e IKP foram estimadas as energias de ativação para degradação, indicando uma separação quase integral a temperaturas menores quando comparadas com a pirólise. Além disso, resultados de tensão de ruptura indicaram preservação quase integral dos valores, sendo 3852MPa para o reciclado e 3864MPa para o vCF tipo AS4C. Numa ACV proposta por Nunes et al. (2018), a demanda por eletricidade para os processos de picotamento e da termólise a vapor representam uma redução de 25% no total de energia consumida quando comparada à produção de vCF, além de produzir calor durante o processo da combustão de gases, em 2,736MJ/kg CFRP (BERTHET; BERNHART; SOUDAIS, 2015; NUNES et al., 2018).

2.3.4 Químico e Térmico

Segundo estudo proposto por Greco et al. 2012, fibras de carbono da Torayca800S/3900 foram submetidas inicialmente ao processo de pirólise indicado na **Figura 6**, aquecendo a fibra de carbono a 500°C por 20 minutos e outra por 90 minutos também na mesma temperatura. Em seguida foi realizado o tratamento por oxidação a 450°C ou a 600°C ambos durante 90 minutos ou aplicação em solução ácida 5% de HNO₃ durante 30 minutos a 100°C para identificar possíveis modificações no grau de adesão das fibras à matriz polimérica, variações no diâmetro das fibras e nas propriedades mecânicas. (GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012)

Por meio da análise de microscopia foi confirmado o acúmulo de uma região carbonizada na amostra de 20 minutos de pirólise e em contrapartida, completamente removidas na amostra a 90 minutos em um segundo processo de aquecimento. O tratamento superficial por oxidação ou em solução ácida provaram melhorar a adesão à matriz polimérica via incorporação de polaridade, mas também apresentou redução no diâmetro da fibra, sendo significativa a alteração de acordo com temperaturas mais altas podendo inclusive causar danos significativos. (GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012)

Sobre o grau de manutenção das propriedades mecânicas, com relação à resistência e módulo à tração, para fibras de carbono com comprimento menor as perdas não foram significativas em relação às fibras relativamente maiores, numa variação de menos 8% em relação à fibra virgem. No entanto, observou-se que um processo de oxidação a 600°C o material foi danificado e perdeu significativamente suas propriedades mecânicas (34% em relação ao material virgem) não servindo, portanto, para aplicações estruturais. Houve pouca alteração nas propriedades mecânicas com o tratamento em solução ácida. (GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012)

2.4 Comparativo dos métodos de Reciclagem

Resumindo as informações apresentadas, os métodos foram comparados em fatores positivos e em fatores negativos como mostra a **Tabela 2**. Cada método apresenta vantagens específicas e fatores limitantes decorrentes da tecnologia empregada, ficando à disposição das empresas recicladoras optarem pelo método de reciclagem.

Tabela 2 Comparativo dos métodos de reciclagem

Método	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Mecânico	- Produção rápida - Pode ser produzido em larga escala - Operado a temperatura e pressão ambiente - Livre de reagentes - Padronização	- Fibras não orientadas e descontínuas - Perda considerável de propriedades mecânicas em reciclagens sucessivas - Emissão de poeira perigosa
Químico	- Operado a pressão ambiente - Propriedades mecânicas similares às da fibra virgem - Produção de fibras longas - Fibra livre de resíduos	- Controle das condições de trabalho - Impacto ambiental depende dos reagentes a serem utilizados
Químico (Solvólise)	- Propriedades mecânicas similares às da fibra virgem - Redução de GWP - Cadeia de reciclagem fechada	- Não é possível aplicar em grandes dimensões - Custos operacionais elevados
Químico (a base de bioresina)	- Não há danos estruturais na fibra - Fibras longas - Cadeia de reciclagem fechada	- Desempenho mecânico inferior
Térmico (Pirólise)	- Propriedades mecânicas similares às da fibra virgem - Livre de solventes e reagentes - Metodologia bem definida - Não necessita de agentes catalisadores - Fibras longas	- Pode ocorrer redução do comprimento da fibra - Deposição de resíduos da matriz - Controle das condições de trabalho
Térmico (Leito fluidizado)	- Podem ser processados materiais contaminados e produzidas fibras limpas	- Perda de propriedades mecânicas - Não pode ser utilizado em aplicações estruturais

Método	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Térmico (Termólise a Vapor)	- Propriedades mecânicas similares às da fibra virgem - Não há degradação da superfície das fibras - Opera a pressão ambiente - Requer menor temperatura para degradar a matriz em comparação à pirólise	- Processo tecnológico requer prévio picotamento e, portanto, resultam em SCF - Alto consumo energético
Químico e Térmico	- Cadeia de reciclagem fechada - Produção de fibras longas - Propriedades mecânicas e dimensões semelhantes	- Alto consumo energético - Controle das condições de trabalho - Pode reduzir o diâmetro da fibra

Fonte: Adaptado de Pimenta; Pinho (2011).

2.5 Métodos de otimização das propriedades

2.5.1 Alinhamento das Fibras

O alinhamento das fibras é considerado um dos parâmetros mais importantes para desenvolver produtos com maior possibilidade de alternativas de uso. Isso possibilita oferecer valores maiores para a resistência e módulo em tração de rCFs descontínuos (fibras curtas), segundo as orientações preferenciais das fibras, um maior percentual de volume de fibra e a facilidade de manufatura que requer pressões de moldagem inferiores para atingir o mesmo resultado, podendo ser comparados ao material virgem (PICKERING et al., 2016a; PIMENTA; PINHO, 2011).

Os métodos de alinhamento podem ser feitos a seco, em um fluido hidrodinâmico, em um campo elétrico e até em campo magnético. Dentre eles o método mais utilizado e que apresenta melhores resultados é o método hidrodinâmico devido a tecnologias estabelecidas bem desenvolvidas, oferecendo versatilidade para uma escala de pesquisa e podendo ser facilmente ampliado para escalas industriais e vendido comercialmente. (LIU et al., 2021b; MIYAKE; IMAEDA, 2016; PICKERING et al., 2016a).

O método por campo elétrico é geralmente usado em nanotubos de carbono ou fibras de matrizes poliméricas e o método de alinhamento por campo magnético é limitado para comprimentos de fibra menores que 500 microns (LIU et al., 2021b).

2.5.1.1 Método a Seco

O método de alinhamento compreende a combinação da fibra de carbono curta e descontínua associada a fibras sintéticas termoplásticas que agem como meio de suspensão para que as fibras de carbono sejam orientadas de acordo com o processo de *drafting* e *combing* proposto por Miyake T. e Imaeda S. (2016). A partir de um sistema de compressão por rolamento os dois materiais passam por uma esteira, onde a fibra de carbono se combina gradativamente com a fibra sintética e se alinhando, formando um fio misturado. A máquina então entrelaça o fio por rotação e ao final do processo, ela é agrupada para a formação de uma fita por um processo tecnológico têxtil convencional de fiação. Tal método de alinhamento conseguiu melhorar as propriedades de módulo em tração em até 3,5 vezes e resistência à tração em até duas vezes quando comparadas com a fibra descontínua e com direcionamento randômico.

2.5.1.2 Método Hidrodinâmico

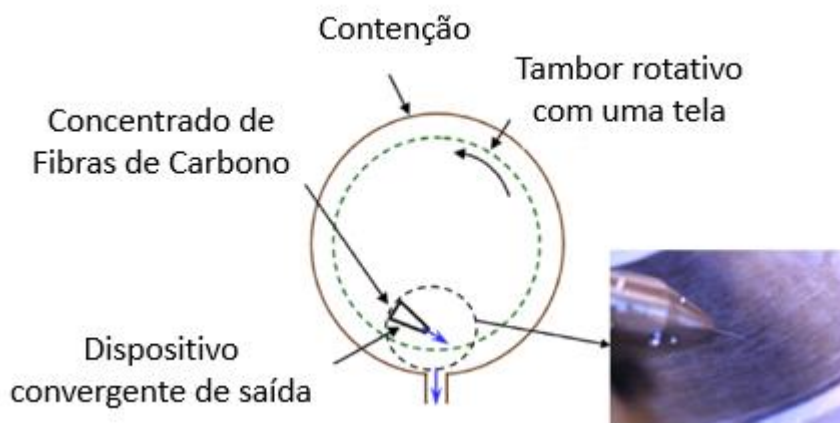
O método de alinhamento hidrodinâmico é resultado do fluxo do fluido sobre a fibra descontínua que pode ser realizado pelos processos de extrusão, filtração e centrifugação, sendo os dois últimos os mais comumente utilizados.

O método de filtração inicialmente realizado por processo de fluxo descontínuo era capaz de produzir camadas de fibras alinhadas de até 40cm de comprimento por 30cm de largura e foi desenvolvido para produzir continuamente rolos de camadas de 152mm de extensão. O método consiste em dispersar fibras curtas e descontínuas em glicerina para formar uma suspensão, as quais são pressionadas em direção a um dispositivo convergente por um canal estreito de saída. As fibras são alinhadas dentro deste dispositivo por meio do gradiente de velocidade através das linhas hidrodinâmicas de suspensão como visto na **Figura 9**. O dispositivo se encontra logo acima de uma esteira por onde percorre repetidamente para depositar a suspensão em uma região da malha que vai se formando. Vácuo é aplicado embaixo

da malha para promover a drenagem e, então, a malha molhada é lavada com *spray* de água contendo agentes ligantes. O método pode ser mais eficiente na presença de uma alta taxa de cisalhamento no meio viscoso; na utilização de fibras curtas; baixo carregamento de fibra e na redução de ar aprisionado dentro do dispositivo para evitar a ocorrência de desvios pelas fibras passantes. Tal método mostrou eficácia e mais de 90% da fibra estava com desvio menor que 15° da direção desejada, mas é limitado pela produtividade de 4kg/h pois necessita de lavagem do meio de transporte viscoso e secagem após a manufatura (LONGANA et al., 2016; PICKERING et al., 2016a).

O método da centrifugação parte do mesmo princípio da filtração, mas com modificações, substituindo a única saída axial por várias saídas convergentes radiais. A malha é substituída por um tambor giratório forrado internamente com uma malha fina, podendo o material em suspensão ser submetido a um gradiente de velocidade para ser acelerado com auxílio da força centrífuga (PICKERING et al., 2016a).

Figura 9 Método de alinhamento hidrodinâmico

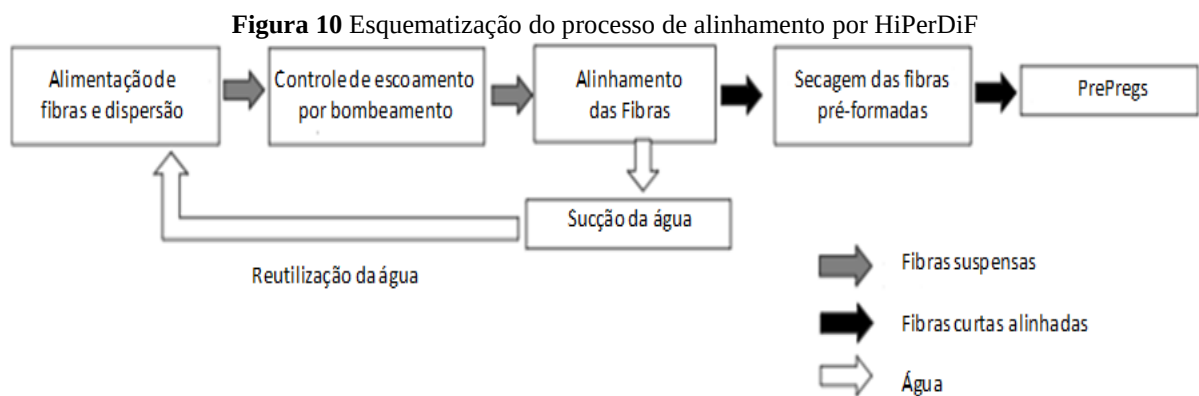


Fonte: Traduzido de Liu et al. (2021).

2.5.1.3 Método HiPerDiF

O método High Performing Discontinuous Fibre (HiPerDiF) compreende a suspensão de baixa concentração de fibras de carbono curtas em água, acelerada por bombas peristálticas através de bocais que são direcionados a uma esteira transportadora perfurada com um sistema de sucção logo abaixo. As fibras são orientadas por uma série de placas paralelas espaçadas a um máximo de 1/3 do comprimento das fibras. Quando as fibras atingem estas placas, a orientação das mesmas altera transversalmente à direção do jato d'água e são guiadas a uma

esteira transportadora que alinha as fibras de acordo com a direção do movimento da esteira como mostra a **Figura 10**. As fibras alinhadas passam pelo processo de secagem por radiação infravermelha. Uma posterior etapa é a combinação com resina aplicando-se pressão e calor e formação de prepregs e laminados por autoclave. O diferencial deste método é o emprego da água ao invés da glicerina, o que significa uma redução no tempo de manufatura e de custos (LONGANA et al., 2016; TAPPER et al., 2019).

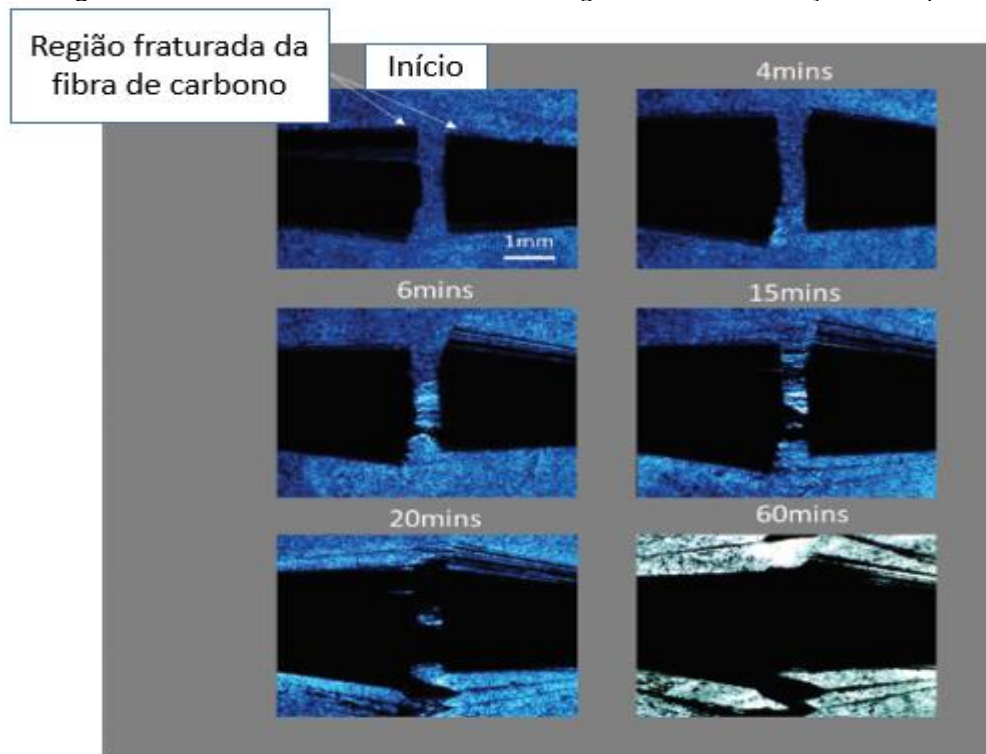


Fonte: Traduzido de Yu; Potter; Wisnom (2014).

2.5.1.4 Método por Campo Elétrico

As fibras de carbono curtas (Short Carbon Fibres – SCF) apresentam condutividade elétrica e podem ser alinhadas segundo um campo elétrico quando submetidas a uma diferença de potencial (d.d.p.) no material, sendo a direção do campo a mesma do direcionamento das fibras estruturais. Enquanto as fibras estão se alinhando, o líquido contendo a resina, dispersor e SCF se solidifica a temperatura ambiente para fixar a posição das SCF. A voltagem, o tempo de duração (ilustrado na **Figura 11**), a qualidade inicial e o comprimento das fibras são fatores determinantes para resultados mecânicos melhores. Esse processo de alinhamento é utilizado também para tratamento e reparo de danos locais superficiais e mesmo internos, desde que o fluido contendo as fibras de carbono curtas consiga preencher os vazios da área afetada sendo necessário, porventura, o auxílio de uma bomba (WANG et al., 2020b).

Figura 11 Reconexão das fibras de carbono na região fraturada em função do tempo



Fonte: Traduzido de Wang et al. (2020).

2.5.2 Reparo dos danos – Aspectos de reuso ou manutenção

Os compósitos reforçados de fibra de carbono danificados são imersos dentro de um agente de tratamento contendo fibras de carbono curtas que preenchem, em caso de ruptura, as lacunas entre as fibras rompidas sob um campo elétrico. Aproveitando-se da característica de condutividade elétrica das SCF estas podem se alinhar de acordo com o campo elétrico, previamente discutido, gerado através da lacuna, conectando-se uma fonte de alimentação ao compósito. Foi observado que a resistência melhora em relação à fibra danificada, ao acrescentar o agente de tratamento no local e solidificá-lo (+37,2%), ao submeter o conjunto dentro de um campo elétrico (+36,3% a 9V), ao aumentar a voltagem aplicada no material (+43,5% a 50V), ao aumentar o teor do volume de fibras (+32,7% a 10,1%vol e +43,5% a 13,8%vol) e por fim à qualidade e comprimento da fibra (+43% a 100μm e + 47,3% a 150μm) (WANG et al., 2020b).

Há outras formas de reparo da matriz polimérica de CFRP podendo ser por injeção de resina que ao solidificar melhora significativamente a carga suportada; por reparo de remendo; pela aplicação de pó de polímero na região desgastada aplicando-se pressão; e por soldagem no

caso de polímeros termofixos para casos severos (fibra danificada), onde é capaz de recuperar parcialmente as propriedades mecânicas do produto. Essas formas de reparo em estruturas de engenharia, podem alterar o peso e a geometria do compósito e não são eficientes em reparar danos internos a estrutura. Para os compósitos termofixos, estes podem se submeter à solução em EG, previamente discutido, e uma vez a fibra separada da matriz pode-se optar por combinar com outra resina para melhorar as propriedades mecânicas. Tal processo é eficiente apenas em produtos cuja fibra de carbono não foi seriamente danificada (YU et al., 2016).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Tratando-se de uma revisão integrativa da literatura, este trabalho foi baseado nos procedimentos propostos por Whitemore e Knafl(2005) e Hopia et al. (2016), que estabelecem 5 etapas que compreendem a: identificação do problema; pesquisa na literatura; avaliação dos dados; análise dos dados e apresentação. A revisão integrativa é um método específico de revisão que sintetiza o conhecimento empírico e teórico da literatura para oferecer maior entendimento de um fenômeno ou problema atual, podendo além disso contribuir para o desenvolvimento de teorias e ter aplicabilidade direta na prática e em políticas públicas.

3.1 Identificação do problema

O estudo visa responder às seguintes questões:

Q1: Quais as aplicações possíveis, de acordo com as propriedades mecânicas, para os rCFRPs?

Q2: Quais os desafios atuais para esta prática de reciclagem do CFRP?

Q3: Quais as possíveis melhorias nos processos para tornar o rCFRP mais competitivo?

3.2 Pesquisa na Literatura

Foram pesquisados os artigos nas bases de dados indicadas na **Tabela 3** por meio de palavras-chave e critérios de inclusão e em seguida, os dados passaram por critérios de exclusão, tais quais: a configuração na pesquisa avançada nas bases de dados (filtros de área e

propriedades mecânicas); remoção de artigos porventura duplicados entre as bases de dados, escolhendo aqueles que apresentarem maior detalhamento; artigos por título e conteúdo do resumo não relacionados ao objeto de estudo ou referente a outras áreas e domínios (palavras-chave eram citados, mas não aprofundados); artigos que após a leitura completa do texto não apresentaram conteúdo relevante (questão de atualização ou por se tratar de algo subjetivo sem apresentar direcionamentos ou aplicações específicas) ou novo que pudesse contribuir para elaboração do estudo.

Dados adicionais exigidos pelo trabalho podem indicar necessidade de verificação das referências dos artigos analisados, sendo descartados os dados daqueles que não mais possuem meios de acesso ou que demonstram ser de difícil localização. Podem também ser necessárias buscas em sites eletrônicos e das empresas atuantes no ramo de negócios de compósitos para atualização do conteúdo e construção dos gráficos e das tabelas. Ao final foram adicionadas as normas, os artigos sobre a revisão integrativa e associados.

Devido a situação da pandemia e da dinâmica do setor de compósitos com os efeitos sofridos pelo setor aeronáutico com a redução na demanda generalizada, a atualização do conteúdo para compreender a situação atual e os desafios foi essencial.

Tabela 3 Seleção inicial dos artigos referentes ao tema

Base de dados	Área de Pesquisa	Tipo	Período	Palavras-Chave	Quantidade de artigos	Nº artigos aplicada a pesquisa avançada
Scopus		Artigos			238	67
Springer	Título,	Científicos,		“Recycled	6	6
Tandfonline	Resumo	Revistas,	1998-	Carbon	7	7
Online Library Wiley	e Palavra-Chave	Revisões, Livros, Capítulos de Livros	2021	Fibre” AND “Mechanical Properties”	22	19
Total					273	99

Fonte: O autor (2020).

A avaliação final do conteúdo dos artigos é necessária para reafirmar que todos estão

bem alinhados com o objetivo da pesquisa (HOPIA; ADJUNCT; EXPERT, 2016; WHITEMORE; KNAFL, 2005). Em seguida, os artigos utilizados foram separados de acordo com categorias para que o leitor possa ter fácil acesso caso queira buscar por mais detalhes, como mostra a **Tabela 4**.

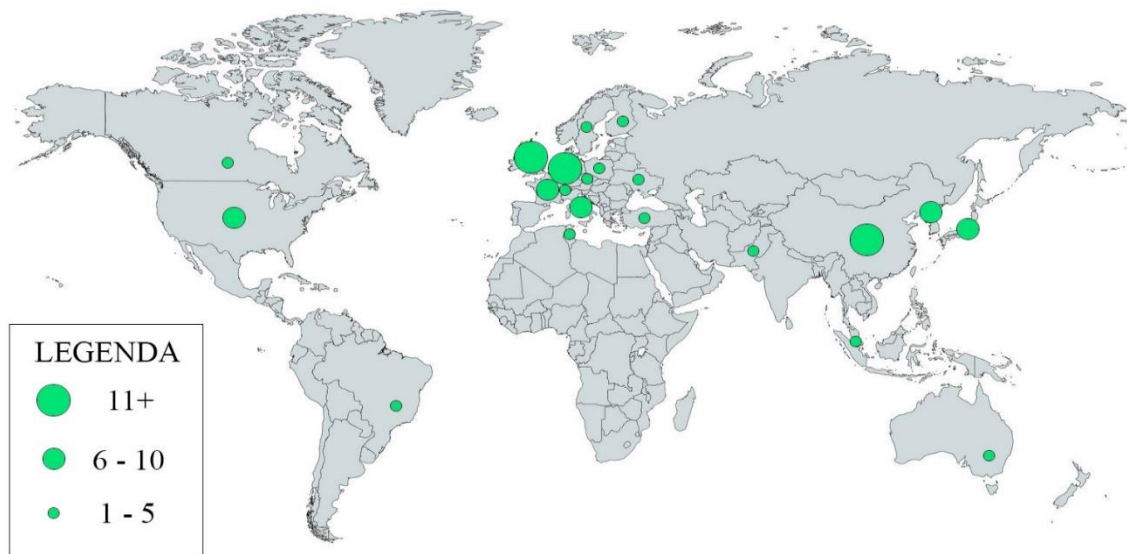
Tabela 4 Separação dos artigos segundo categorias

Categoria	Referência
Avaliação do Ciclo de Vida	(MCKECHNIE, 2018); (VO DONG; AZZARO-PANTEL; CADENE, 2018); (WITIK et al., 2013); (SCELSI et al., 2011); (NUNES et al., 2018); (LA ROSA et al., 2016); (DAS, 2011); (PILLAIN, 2019); (HOWARTH; MAREDDY; MATIVENGA, 2014); (MENG et al., 2017); (LIU et al., 2021a); (TAPPER et al., 2020)
Alinhamento	(LIU et al., 2021b); (VAN DE WERKEN et al., 2019); (WANG et al., 2020b); (BAXTER; PALMESE; ALVAREZ, 2020); (YU; POTTER; WISNOM, 2014); (TAPPER et al., 2019); (LONGANA et al., 2016);
Aplicações	(BLEDZKI et al., 2020); (CITY, 2015); (PESCE et al., 2019); (KUP; ZOUHAR, 2020); (ALEXANDER et al., 2018); (VAIDYA; THEODORE, 2020); (BARILE; CASAVOLA; DE CILLIS, 2019); (XIONG et al., 2021); (SMOLEŇ et al., 2021); (BILYM et al., 2021); (RADEMACKER; FETTE; JÜPTNER, 2018); (WANG et al., 2020a); (YEONG; GOH, 2020); (KIZAKI et al., 2020)
Gerenciamento dos Resíduos	(VO DONG; AZZARO-PANTEL; BOIX, 2019); (GUO; BAI, 2021); (DONG et al., 2017); (BALAJI; RUDD; LIU, 2020); (GIORGINI et al., 2015); (CERRUTI et al., 2014);
Norma ISO	(NBR ISO14001); (PEIXE et al., 2019)
Métodos	(YU et al., 2016); (LIU et al., 2020b); (JIANG et al., 2015); (COLUCCI et al., 2015); (YAMAGUCHI et al., 2015); (JIANG et al., 2008); (PICKERING et al., 2016b); (APS, 2009); (MEYER; SCHULTE; GROVE-NIELSEN, 2009); (VAN DE WERKEN et al., 2019); (LIU et al., 2017); (HOWARTH; MAREDDY; MATIVENGA, 2014); (BERTHET; BERNHART; SOUDAIS, 2015); (SONG; YOUN; GUTOWSKI, 2009); (GRECO; MAFFEZZOLI;

Categoria	Referência
	BUCCOLIERO, 2012); (HADIGHEH; WEI; KASHI, 2021); (NUNES et al., 2018);
Revisão do Cenário	(ZHANG et al., 2020); (PIMENTA; PINHO, 2011); (KARUPPANNAN GOPALRAJ; KÄRKI, 2020); (VIEIRA; VIEIRA; CHANG CHAIN, 2017)
Testes Mecânicos	(SHI et al., 2014); (ALTAY et al., 2018); (BARILE; CASAVOLA; DE CILLIS, 2019); (GIANNADAKIS; SZPIEG; VARNA, 2011); (MEFTAH et al., 2017); (WEI et al., 2018); (MISCHO et al., 2020);
Fonte: Autor (2021).	

A **Figura 12** mostra a concentração das pesquisas com base nos autores dos artigos analisados neste estudo por meio de círculos verdes. Observa-se que há uma concentração nos países mais desenvolvidos, em específico na região da União Européia.

Figura 12 Mapa de densidade das pesquisas com base nos autores dos artigos



Fonte: Autor (2021).

3.3 Avaliação e Análise da base de dados

Selecionada a amostra de artigos no qual o estudo foi baseado, Whittemore e Knafl (2005) indicam os possíveis elementos para análise de dados, como por exemplo o encontro de

fatores que se cruzam; a construção de uma cadeia lógica de evidências; a observação de padrões, temas e plausibilidade; a realização de contrastes e comparações. Os autores apontam que a avaliação da qualidade dos estudos pode ser possível na comparação ou análise da metodologia aplicada em estudos.

Como cada artigo possui um foco e cada um adotou uma abordagem com relação aos dados e ferramentas disponíveis, houve a necessidade do encontro de informações. Assim, para as áreas relacionadas a temas teóricos, foram referenciados para cada método os artigos que descreveram as etapas dos processos com clareza, com informações coerentes aos encontrados nos demais relacionados ao mesmo tema. E com relação aos artigos com dados empíricos, o fator mais importante foi a presença dos dados requeridos.

3.4 Conclusão e Apresentação

A conclusão deve estar alinhada com os objetivos e responder de forma clara e concisa ao leitor os problemas identificados no primeiro item da Metodologia. Segundo Whitemore e Knafl (2005), a apresentação pode ser no formato de tabelas ou diagramas, explicitando os detalhes das fontes e as evidências que levaram à conclusão demonstrando uma cadeia lógica de evidências.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Segundo o proposto pela Metodologia, cada item procurou abordar e responder as 3 questões apresentadas na seção 3.1.

4.1 Aplicações do rCFRP

Para a primeira questão foram inicialmente listadas as maiores companhias recicladoras indicadas na **Tabela 5** no mercado de rCFRP, de acordo com a tecnologia empregada de reciclagem e a produção anual em t/ano. Os dados foram extraídos inicialmente de artigos mais recentes e então verificados nos sites das próprias recicladoras. Caso houve alguma alteração entre o observado no site e o apontado no artigo, os termos e valores foram atualizados. Caso

contrário, foram permanecidos os valores apresentados nos artigos por uma questão de confiança com relação aos dados apresentados pelos autores. NI indica que não foi informado, nem em artigos ou no site eletrônico.

Tabela 5 Lista das companhias recicladoras

País	Companhia	Tecnologia de Reciclagem	Produção anual (t/ano)
Alemanha	- SGL Carbon	- Pirólise	1500
	- CFK Valley Stade Recycling GmbH	- Pirólise	1000
Bélgica	- Solvay	- Reaproveitamento dos restos de prepregs dos processos	NI
	- Procotex Corporation	- NI	NI
Espanha	- TRC	- Pirólise	NI
	- BCircular(spin-off da CSIC)		
Estados Unidos	- Carbon Conversions	- Pirólise	2000
	- Carbon Fiber	- Mecânico	717,43
	- Remanufacturing	- Mecânico	NI
	- Shocker Composites	- Reaproveitamento de restos de prepregs e fibras secas e Mecânico	NI
	- Vartega		
França	- Alpha Recyclage Composites	- Termólise de Vapor	300
Itália	- Karborek RCF	- Pirólise	1000
	- Rymyc S.R.L.	- Térmico e Mecânico (<i>sizing</i>)	500
Japão	- Toray Industries, Mitsubishi Chemical Holding e Teijin Limited	- Pirólise	1000
	- Hitachi Chemical Company Ltda	- Solvólise	12
		- Pirólise	60
	- Takayasu		

País	Companhia	Tecnologia de Reciclagem	Produção anual (t/ano)
Reino Unido		- Pirólise	
	- ELG Carbon Fibre	- Reaproveitamento dos	2000
	- Sigmatex	restos de prepregs dos	NI
	- V-Carbon	processos	1,7
	- Universidade de Nottingham	- Solvólise	100
	- Universidade de Manchester	- Leito Fluidizado	≈20
		- Mecânico	

Fonte: Adaptado de Chang et al. (2020).

Em seguida, foi elaborada a lista das possíveis aplicações do rCF ou rCFRP indicada na **Tabela 6** nas diversas áreas. Os dados também foram extraídos de artigos e dos sites das recicladoras. O rCFRP pode ser usado como material de revestimento ou preenchimento, como base para produtos leves; para produtos cuja durabilidade é fator essencial; para produtos que necessitam de um grau de rigidez ou então são utilizados devido à sua facilidade em se moldar em formas e geometrias complexas, a depender da resina empregada.

Vale ressaltar que as aplicações de rCF ou rCFRP dependem da qualidade e da origem do CFRP antes de reciclado, sendo este o fator determinante para altos valores absolutos de módulo e resistência à tração que possibilitam um amplo leque de aplicações. Logo, é essencial que o material a ser reciclado não esteja previamente contaminado, pois isto limita os métodos e as aplicações possíveis.

Tabela 6 Lista de possíveis produtos com rCF e rCFRP

Setor	Produto
Artigos Esportivos	Quadros de bicicleta, pneus de bicicleta ¹ , guidão, Bastão de trilha Hike, binóculos e outros artigos ópticos esportivos ² , taco de Hurley, roupas, rolo de filamentos de impressão 3-D
Eletroeletrônicos	Elementos de aquecimento, Capas de celulares ³ , Filtros de Ar quente ⁴ , Esteiras transportadoras

¹ (ALPHA RECYCLAGE COMPOSITES, 2021; VARTEGA, 2021)

² (KUP; ZOUHAR, 2020)

³ (KARBOREK, 2021)

⁴ (PROCOTEX, 2020)

Setor	Produto
Engenharia Civil	Cimento ⁵ , mobílias
Indústria Aeroespacial	Superfícies de controle, forro para cadeiras de aviões
Indústria Automotiva	Cabos de pneus, capô de automóveis, carcaças e base para equipamento eletrônicos, tapetes, tampas de motor, partes interiores como protetores anti-corrosão e cover de sistema de navegação ⁶ , tensores à prova de abrasão, superfícies de plástico reforçadas com fibra e pára-choques dianteiro e traseiro reforçados com fibra, painéis da carroceria (portas, porta-mala, paralamas e painéis laterais) ⁷ , braço triangular e suspensão, apoios no pilar A, estrutura de fixação para assento traseiro, painéis de caminhões, plataforma da carroceria do caminhão, pilar C e o tronco superior da parede divisória de carros da BMW 7 Series
Indústria Óptica	Armações de óculos
Instrumentos Musicais	Ukelele ⁸ , Auto-falantes, equipamentos de áudio
Médico-Hospitalar	Guias para cirurgias ortopédicas, fixadores, dispositivos protéticos, componentes de próteses mecânicas ⁹ , cadeiras de rodas, braços robóticos, bengalas brancas para deficientes visuais
Navegação	Forros de rCFRP para Cascos dos barcos do time britânico da INEOS ¹⁰ , ferramentas e tecidos não-tecidos para estruturas ¹¹ para suportar o barco
Energia (Turbinas eólicas)	Malha de fibra de carbono com resina termofixa para proteção contra descargas elétricas ¹²

Fonte: Autor (2021)

⁵ (XIONG et al., 2021)

⁶ (CARBONXT, 2021)

⁷ (BALAJI; RUDD; LIU, 2020)

⁸ (VARTEGA, 2021)

⁹ (ALEXANDER et al., 2018)

¹⁰ (BLEDZKI et al., 2020)

¹¹ (INEOS, 2021)

¹² (WANG et al., 2020a)

Com relação às propriedades mecânicas, o artigo seguiu uma linha de raciocínio apontando os métodos de reciclagem estudados para a manufatura do produto reciclado e as formas de aprimoramento para melhorar as propriedades mecânicas, podendo identificar aquelas que melhor conservaram as propriedades mecânicas em relação à vCF ou vCFRP ou à situação anterior ao processo. Como mostra a **Tabela 7**, foram analisados os valores da resistência à tração, módulo à tração, comprimento da fibra dos métodos empregados e o percentual em volume de fibras.

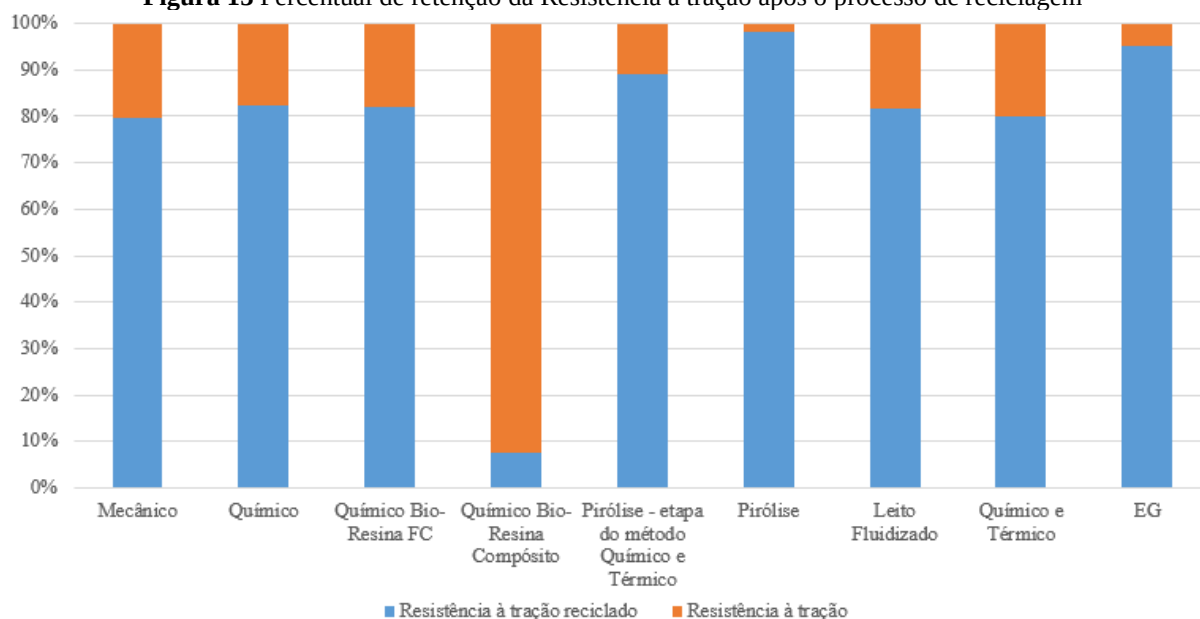
Tabela 7 Propriedades e tipo das fibras segundo o método de reciclagem

Método de Reciclagem	Modelo da Fibra ou Compósito	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	L (mm)	% wt	Referência
Mecânico	TorayCA PA66CF30	188.2 (-20,4%)	20.5(-12,8%)	0,3	30	(COLUCI et al., 2015)
Químico	Toray T700S (epoxy KBR-1729)	2900 a 3700 (-18 a -36%)	221,3 a 257,7 (-7,2 a -20,2%)	100 a 150	NI	(NAM et al., 2019)
Químico (Bio-Resina)	ESO-VA-CF rCF	11.2(-92,3%) 2710(-17,9%)	0.76 (-35,6%) 7.23 (-24,3%)	100	28,5	(LIU et al., 2020b)
Químico (EG)	T300	4180(-5%)	233,38(-3%)	115,6	13,7	(YU et al., 2016)
Térmico (Pirólise)	T300	3285(-1,77%)	231(-2,54%)	25	43,5	(GUO; BAI, 2021)
Térmico (Leito fluidizado)	T800	4896(-18,2%)	334(+8,4%)	3 a 5	NI	(PICKE RING et al., 2015)
Químico e Térmico	T800S (Pirólise)	5251 (-11%)	271,4 (-8%)	50	55	(GRECO ;

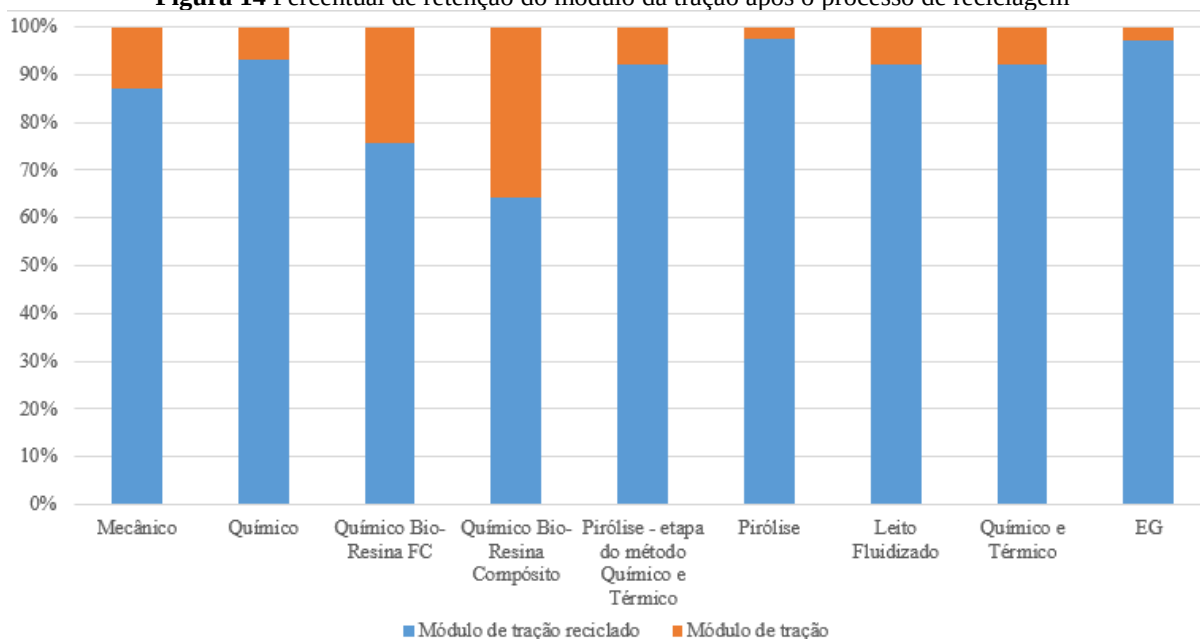
Método de Reciclagem	Modelo da Fibra ou Compósito	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Tração (GPa)	L (mm)	% wt	Referência
(Pirólise, Oxidação e tratamento com ácido)	T800S (Oxidação a 450°C)	5251 (-11%)	254,7 ($\approx$ -14%)			MAFFE
	T800S (Oxidação a 600°C)	1770 (-70%)	157,24(-46,7%)			ZZOLI; BUCCO
	T800S(Ácido Nítrico)	4720 (-20%)	271,4 ($\approx$ -8%)			LIERO, 2012)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Colluci et al. (2015), Nam et al. (2019), Liu et al. (2020), Yu et al. (2016), Guo; Bai (2021), Pickering et al. (2015), Greco; Maffezzoli; Buccoliero (2012).

Os valores expressos na **Tabela 7** indicam valores distintos que dependem do modelo de fibra e da resina empregada, ou então por se tratarem de compósitos como é o caso do ESO-VA-CF e da TorayCAPA66CF30. O valor reduzido do módulo de rCF pelo método químico por bio-resina é devido a medição ser transversal, enquanto os demais foram medições longitudinais. Além disso a diferença entre os valores da fibra de carbono e do compósito é devido a relação de translação. Por conta disso, as **Figuras 13 e 14** foram baseadas no percentual do módulo e resistência à tração retidos após o processo de reciclagem, representada por azul o valor percentual após o processo de reciclagem.

Figura 13 Percentual de retenção da Resistência à tração após o processo de reciclagem

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Colluci et al. (2015), Nam et al. (2019), Liu et al. (2020), YU et al. (2016), Guo; Bai (2021), Pickering et al. (2015), Greco; Maffezzoli; Buccoliero (2012).

Figura 14 Percentual de retenção do módulo da tração após o processo de reciclagem

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Colluci et al. (2015), Nam et al. (2019), Liu et al. (2020), Yu et al. (2016), Guo; Bai (2021), Pickering et al. (2015), Greco; Maffezzoli; Buccoliero (2012).

Nas **Figuras 13 e 14**, a primeira barra de pirólise é a etapa anterior à exposição por reagentes químicos do método Químico e Térmico, podendo-se observar que houve uma boa retenção das propriedades mecânicas, além de melhorar a adesão superficial para posterior fabricação do compósito (GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012).

Observa-se que por comparação da retenção das propriedades mecânicas os métodos térmico por pirólise e químico por EG apresentaram os melhores resultados. Em segundo lugar temos os métodos Químico, Leito Fluidizado e Químico e Térmico, e em terceiro lugar os métodos Mecânico e Químico por Bio-Resina.

Comparando-se o comprimento da fibra resultante do processo de reciclagem, todos os métodos químicos são indicados para a fabricação de fibras longas, enquanto os métodos por Leito Fluidizado e Mecânico fabricam apenas fibras curtas. O método por Pirólise pode fabricar tanto fibras longas como fibras curtas.

Com relação às limitações, o método por Leito Fluidizado foi o mais otimizado para obter esse resultado expressivo, pois segundo Pickering et al. (2015) os autores citam que a perda de propriedade mecânica gira em torno de 25 a 50% do material virgem. Além disso, os métodos químicos apresentam as seguintes limitações: o EG serve apenas para matrizes termofixas; o método Químico e Térmico acrescenta mais etapas nos processos de produção, o que representa tempo e custos adicionais; a capacidade instalada é reduzida pela contrapartida dos impactos ambientais e à saúde do trabalhador; o método por bio-resina buscou estudar a reprocessabilidade do ESO-VA-CF e então, pulverizou em granulados o compósito e remodelou pelo método de manufatura por compressão, o que levou a perdas expressivas de resistência à tração por se tratar de fibras curtas e não mais o compósito com fibras longas. O método por Pirólise ocasiona na degradação da matriz e preenchimento dos vazios pela matriz residual, aumentando a densidade do material e reduzindo a adesão superficial com consequente diminuição das propriedades mecânicas (GRECO; MAFFEZZOLI; BUCCOLIERO, 2012; LIU et al., 2020b; LONGANA et al., 2016; YU et al., 2016).

Com relação à velocidade de produção, o método mecânico é o mais indicado, pois bastaria aumentar a capacidade instalada e a velocidade de produção com alterações na maquinaria. Os demais métodos exigem condições de trabalho e tempos de exposição definidos para não afetar a adesão superficial, diâmetro da fibra e permitir a separação total da fibra da matriz (HADIGHEH; WEI; KASHI, 2021).

Com relação à acessibilidade do tratamento de resíduos e custos operacionais, Dong et al. (2017) indicam que o método mecânico em especial com a técnica de *grinding*, que permite a obtenção de um pó de compósito rico em resina e uma fração fibrosa de compósitos, possui maior acessibilidade e relativamente menores custos operacionais, mas a técnica gera produtos com baixo valor agregado. Em contrapartida o método químico por solvólise consegue obter

produtos de alta qualidade, separar totalmente a fibra da matriz e obter oligômeros, mas é relativamente o método com os maiores custos operacionais (CHEN et al., 2018; DONG et al., 2017). Segundo Dong et al.(2018) o método por Pirólise, sem contabilizar a recuperação energética, encontra-se no meio termo entre os métodos Mecânico e Químico por Solvólise. Lembrando-se que do primeiro processo após a condensação dos produtos gerados no reator pirolítico há a formação de um *feedstock* e após o segundo processo de aquecimento há a recuperação energética (KARUPPANNAN GOPALRAJ; KÄRKI, 2020).

Com relação à necessidade da adição de etapas para melhorar as propriedades mecânicas ou para contornar possíveis situações adversas, os métodos Térmicos podem exigir o alinhamento das fibras. Os métodos químicos são, nesse sentido mais eficientes pois conseguem obter a resina e a fibra de carbono separados para posterior repolimerização e obtenção do compósito reciclado. A **Tabela 8** indica os métodos de alinhamento a seco, hidrodinâmico e por HiPerDiF e a **Tabela 9** indica o método de alinhamento por campo elétrico. Obs: As nomenclaturas R1 e R2 servem para indicar o primeiro ciclo de reciclagem e o segundo ciclo de reciclagem, respectivamente.

Tabela 8 Comparação entre os métodos de alinhamento a seco, hidrodinâmico e HiPerDiF

Métodos de otimização	Modelo da Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo da tração (GPa)	L (mm)	%wt	Referência
Alinhamento das Fibras – Hidrodinâmico	Tenax-A HT C124	826	98	3	46	(LIU et al., 2021b)
	Tenax-A HT C124	458	62	12	40	
	Toray T800S	1417	87	7	42	
	HS recycled	322	60	1,15	38	
Alinhamento das Fibras – HiPerDiF	Toho	731	65,9	3	37,7	(LONGANA et al., 2016; TAPPER et al., 2019; YU;
	Tenax	614,0	52,0		28,3	
	HTS40 +	(-16%)	(-21,1%)		28,5	
	Resina	279	40,4			

Métodos de otimização	Modelo da Fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo da tração (GPa)	L (mm)	%wt	Referência
Alinhamento das Fibras - Seco	Epóxi MTM49-3	(-61,9%)	(-38,7%)			POTTER; WISNOM, 2014)
	Toho	695(0,0%)	60,2(0,0%)			
	Tenax	425	45,4			
	C124 + PA6	(-38,8%)	(-24,5%)		28	
		414	36,3			
		(-40,4%)	(-39,7%)			
	Toray T700SC-12K	38 ± 6	3,6 ± 0.6	SCF (3mm)		
	Orientação Randômica			60mm (média)	13,3	(MIYAKE; IMAEDA, 2016)
	Toray T700SC-12K Alinhado a 90°	78 ± 6 (+105,3%)	12,2 ± 0.9 (+238,9%)	100 (teste de tração)		

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Liu et al. (2021), Longana et al. (2016), Tapper et al. (2019), Yu; Potter; Wisnom (2014) e Miyake; Imaeda (2016).

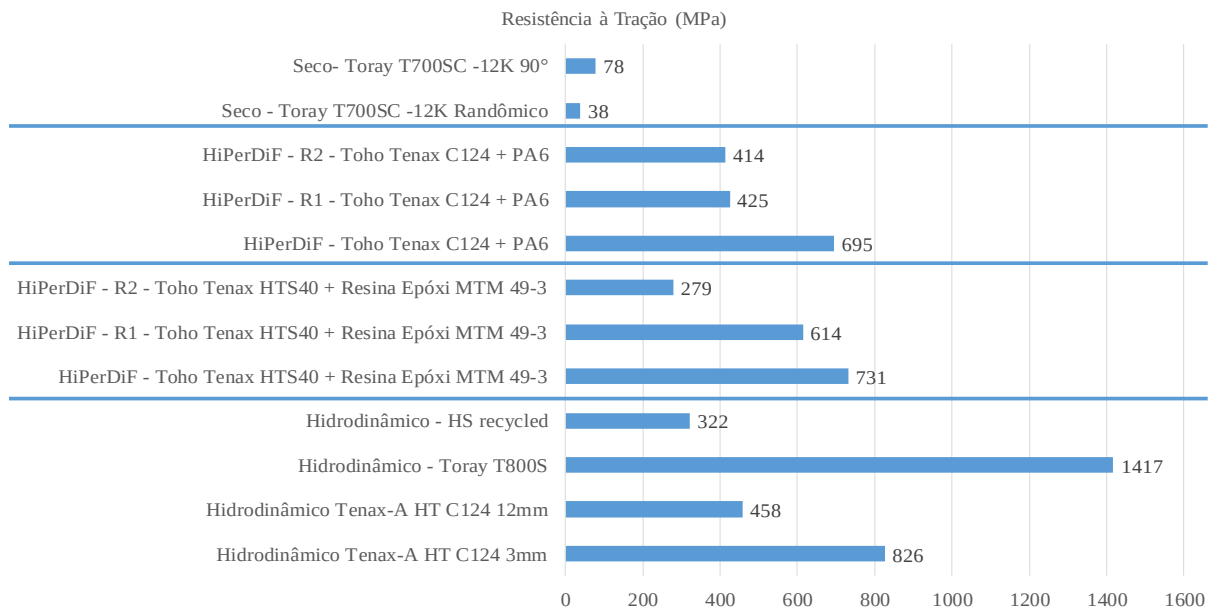
Para ilustrar os métodos, as **Figuras 15 e 16** foram divididas em seções. A primeira seção sobre o método de alinhamento a seco indicou aumentos consideráveis entre a fibra curta com orientação randômica e a orientada. De acordo com Miyake e Imaeda (2016), o grau de orientação foi estudado a um desvio padrão de 13,7° quando o gráfico de probabilidade de distribuição foi compatível com uma função Gaussiana. No caso, aproximadamente 70% das fibras estavam alinhadas dentro do escopo de $\pm 14^\circ$.

A segunda e a terceira seções compreenderam o estudo do método de alinhamento por HiPerDiF com uma resina termoplástica de poliamida (PA6) e outro estudo com uma resina termofixa com epóxi MTM 49-3, respectivamente. Tapper et al. (2019) consideram que a redução do módulo de tração foi provavelmente causada pela presença de aglomerados de fibras

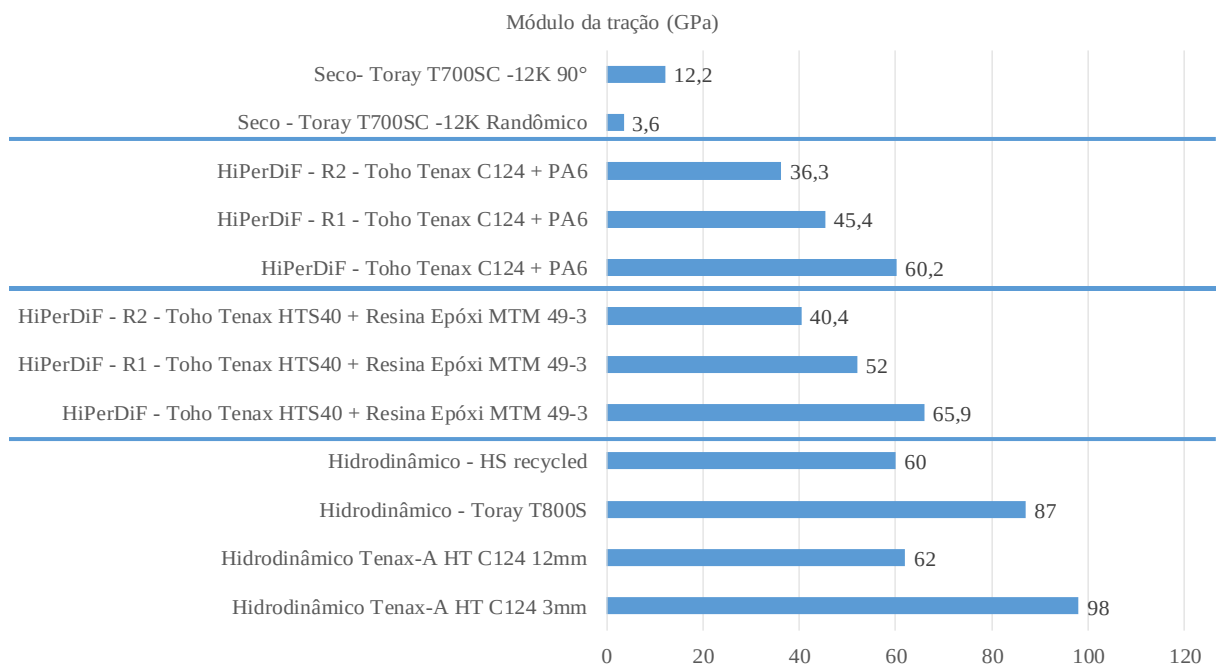
nos pré-formados, evidenciados nas superfícies fraturadas dos compósitos reciclados. O aglomerado de fibras resultou na formação de uma região densa em fibras, o que aumenta a interação entre fibras e amplifica as tensões, resultando em uma fratura no processo de manufatura do compósito. Tal circunstância pode ser atribuído ao desalinhamento das fibras ao passar pelo processo de recuperação por reciclagem por pirólise.

Longana et al. (2016) estudaram os efeitos do alinhamento por HiPerDiF e da reciclagem por pirólise em um prepreg de vCF com epóxi realizando dois ciclos contendo cinco etapas cada a definir: a preparação; os testes de tração; a reciclagem por pirólise; medição do comprimento do rCF e imageamento por SEM (Microscópio eletrônico por varrimento – do inglês Scanning Electron Microscopy); e a manufatura do novo prepreg pelo alinhamento HiPerDiF. Os autores citam que houve uma redução já prevista da resistência da fibra, indicando que houve um aumento de matriz residual nas fibras pela análise por SEM a cada processo de reciclagem por pirólise. A retenção das propriedades no primeiro ciclo de reciclagem aconteceu, pois, o processo de queima foi bem-sucedida em remover a resina da fibra, permitindo uma maior adesão da nova matriz e a fibra de carbono. O segundo ciclo de reciclagem por pirólise detectou redução no comprimento das fibras e o acúmulo de resíduos da matriz.

A quarta seção compreendeu o estudo do método de alinhamento hidrodinâmico. O módulo da tração da fibra reciclada por leito fluidizado (indicada por *HS_recycled*), obtida a partir de restos de compósitos laminados cuja origem é desconhecida, atingiu valores satisfatórios após o processo de alinhamento quando comparados aos valores de fibras virgens curtas (indicada por Toray T800S). Ao comparar a fita de fibras de carbono de 3mm e 12mm, Liu et al. (2021) mencionam que a fibra de 12mm apresentou maior nível de glicerina residual, indicando que o processo de lavagem é ineficaz para lidar com conteúdo inicial de glicerina elevado. A presença da glicerina ao final reduziu a adesão superficial da matriz na fibra de carbono afetando consideravelmente as propriedades mecânicas.

Figura 15 Gráfico da resistência à tração pelos métodos de alinhamento

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Liu et al. (2021), Longana et al. (2016), Tapper et al. (2019), Yu; Potter; Wisnom (2014) e Miyake; Imaeda (2016).

Figura 16 Gráfico do Módulo da tração pelo método de alinhamento

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Liu et al. (2021), Longana et al. (2016), Tapper et al. (2019), Yu; Potter; Wisnom (2014) e Miyake; Imaeda (2016).

Sobre o método de alinhamento das SCF por campo elétrico, Wang et al. (2020) indicaram que as SCF possuíam diâmetro de 7µm, uma tensão de cisalhamento na interface entre a fibra e a matriz de 75MPa e valores para a resistência à tração da matriz e da fibra iguais

a 55-68MPa e 3150MPa, respectivamente. Diferente das tabelas acima, o artigo trouxe dados referentes à carga suportada pelo compósito, como mostra a **Tabela 9**. O autor afirmou também que para um fator de alinhamento de orientação da fibra de 0,31 o processo de alinhamento por campo elétrico atingiu uma recuperação de 47,3% do desempenho do compósito virgem para uma resistência à tração da fibra de 2800MPa e 13,8% do volume de fibras. Testes futuros sobre esse método podem ser a aplicação de melhores estratégias de pulso com picos de alta tensão e tempos de descanso mais longos para aumentar o fator de alinhamento para 0,5 (equivalente ao caso de fibras biaxiais paralelos); empregar fibras mais longas; ou utilizar CF com valor de resistência à tração próximo a 6000MPa (WANG et al., 2020b).

Tabela 9 Variações da Carga suportada pelo alinhamento por campo elétrico

Alinhamento da Fibra por Campo Elétrico

Situação	Carga Suportada (N)
Fibra EC não danificada	6091
Danificada	1311
Preenchimento	1536
Preenchimento SCF descarregado	2267
Preenchimento SCF carregado 9V	2210
Preenchimento SCF carregado 25V	2460
Preenchimento SCF carregado 50V	2650
100µm fibra EC/AGM	2650
150µm AGM	2879
150µm AGM + Dispersante	2487

EC: Fibra de Carbono da Easy Composites Ltd

AGM: Fibra de Carbono AGM 99-150 da Asbury Graphite Mills

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2020).

Por conta da demanda por rCFs com formatos e tamanhos padronizados, há a necessidade eventual de um processo mecânico ao final da reciclagem (CARBONXT, 2021). Sendo assim, os métodos de reciclagem mais empregados na **Tabela 10** são a mecânica (depende da qualidade do material a ser reciclado) e/ou térmica por pirólise.

Como praticamente todos os artigos apresentam se o compósito é viável ou não para a fabricação de algum produto sem mais detalhamentos sobre os valores mínimos necessários para as aplicações, a **Tabela 10** indica uma lista dos produtos que podem ser processados a

partir dos métodos de manufatura e materiais de rCF. Os principais motivos podem ser que o material usualmente utilizado tenha uma propriedade mecânica inferior ao do compósito ou então porque outras propriedades do compósito são exploradas e procuram dar uma destinação ao rCF. Valores de propriedade mecânica para determinados materiais listados na CarboNXT (CARBONXT, 2021) apontam Resistência a tração maior que 3500MPa e módulo à tração maior que 230 GPa.

Tabela 10 Relação entre o produto rCF, o método de manufatura e produtos

Material	Método de Manufatura	Produtos
rCF*	- Autoclave	- Painéis de carroceria
	- Moldagem por Injeção	- Quadros de bicicleta
Non-woven mats	- Moldagem por Compressão	- SMC ou Prepregs
	- Moldagem por Transferência de Resina (RTM)	- Painéis de teto de automóveis - Estrutura de fixação para assento traseiro
Prepregs	- Lay-Up	- Componente para Próteses Mecânicas
Chopped rCF	- <i>Carding e Combing</i>	- Mistura de fios ¹³
Milled rCF	- Filler	- SMC ou tapetes não-tecidos
	- LSAM** – Moldes + Extrusão + Autoclave	- Molde das pás giratórias do rotor de helicóptero
Pellets	- Impressão 3D por Resina Termofixa	- Malhas protetoras contra descargas elétricas
rCF Mats	- RACETRAK (RTM)	- Suspensão de braço triangular para carros elétricos
	- Moldagem por Injeção	- Forros dos Cascos de barcos, ferramentas e frames de suporte
rCF SMC	- Pressionamento ou Moldagem por Injeção	Interiores de automóveis e aviões, Pilar C de automóveis, tronco superior da parede divisória de carros da BMW 7 Series,

¹³ (AKONDA; LAWRENCE; WEAGER, 2012)

Material	Método de Manufatura	Produtos
rCF BMC		Materiais de construção, Eletroeletrônicos e veículos automotivos

*Não especificado

**Em estudo

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Balaji; Rudd; Liu (2020), CarboNXT (2021), Akonda; Lawrence; Weager (2012), Bledzki et al. (2020), Wang et al. (2020), INEOS (2021).

4.2 Desafios atuais da implementação

Um dos maiores desafios atuais enfrentados por todas as empresas do ramo é lidar com os efeitos da pandemia, que impactou direta ou indiretamente na vida dos trabalhadores, dos fornecedores e consumidores por conta da redução da demanda em escala global. (MarketsAndMarkets, 2021). Segundo dados disponíveis no site das empresas Hexcel e SGL Carbon, duas das maiores companhias no mercado global de CF e CFRP, houve uma queda significativa nas vendas segundo a **Tabela 11**.

Tabela 11 Receita das empresas Hexcel e SGL Carbon

Companhia	Net Revenue (2019-milhões)	Net revenue (2020-milhões)	Capital de Trabalho (2019-milhões)	Capital de Trabalho (2020-milhões)
Hexcel	2355,7 USD	1502,4 USD	96,5 USD (4° Trimestre)	87,8 USD (4° Trimestre)
SGL Carbon	1086,7€	919,4€	406,8 €	351,8 €

Fonte: Hexcel (2021), SGL Carbon (2021).

O mercado de rCF alcançou em 2020 o valor de 109 milhões de dólares, com expectativas de crescimento a taxas de 12%a.a. e o mercado de CF alcançou 17,5 bilhões de dólares no mesmo ano. Aproximadamente 80% do valor total de vendas representa o consumo pelo setor aeronáutico e estes necessitam de propriedades mecânicas que o rCF não alcançam. Por outro lado, o rCF depende do consumo de CFs e são dois sistemas complementares. Apesar de haver competição pelo mesmo nicho conforme o rCF apresenta valores próximos do vCF, ou no caso a empresa que vende o vCF também realiza a reciclagem, o rCF por ser mais acessível a custos menores, se apresentaria como substituto a valores mais acessíveis ao público.

O perfil dos consumidores está cada vez mais em busca de produtos mais baratos, de boa qualidade, inovadores e sustentáveis (MarketsAndMarkets, 2021). Como visto anteriormente na **Figura 4**, o valor energético para produção de 1kg da rCF pode ser de 0,076% a 31,82% do valor energético da produção de 1kg de vCF a depender do método de reciclagem e da qualidade de CF. Além disso, McKechnie et al. (2018) dizem que o valor representativo do Potencial de Aquecimento Global (GWP) dos processos de reciclagem variam entre -19 a -27kgCO₂eq e a Demanda de Energia Primária (PED) varia entre -395 a -520MJ/kg CFRP. E, apenas para reforçar o impacto positivo ao meio ambiente, Scelsi et al. (2011) calcularam uma estimativa do ponto de equilíbrio entre a maior eficiência dos combustíveis, por ser um material leve, e a elevada energia de fabricação do CFRP, quando relacionada aos produtos metálicos e, sendo mais específico, aos produtos feitos com material de alumínio. O balanço energético passa a ser positivo para o CFRP a partir de 3600km e 13600km percorridos para os transportes aéreo e automotivo em rodovias, respectivamente (MCKECHNIE, 2018; MENG et al., 2017; SCELSE et al., 2011).

Meng et al.(2018) citam que as empresas devem procurar a viabilidade econômica relacionando-se os custos operacionais para a reciclagem e a taxa de alimentação no sistema, tendo em mente que os valores de propriedade mecânica do rCFRP resultante dessas modificações podem influenciar o valor agregado ao produto (MENG; MCKECHNIE; PICKERING, 2018). Segundo análise no artigo de Meng et al. (2017), alterando-se a taxa de alimentação no sistema ou a capacidade de instalação para o método de reciclagem térmico por leite fluidizado, o valor do compósito poderia chegar a 5 dólares/ kg o que representaria no ano analisado a 15% do valor médio do vCFRP por kg. Atualmente, de acordo com a CarboNXT (CARBONXT, 2021), a produção de rCF representa economias de 20 a 40% em relação à vCF. E para a empresa Sigmatex (SIGMATEX, 2021), a captura e o uso de restos dos processos para a fabricação de tecidos *non-woven* permite usar apenas 10 a 20% da demanda energética comparada aos métodos químico e de pirólise. Com a redução do valor do custo para a produção do compósito reciclado, o produto pode se tornar mais competitivo.

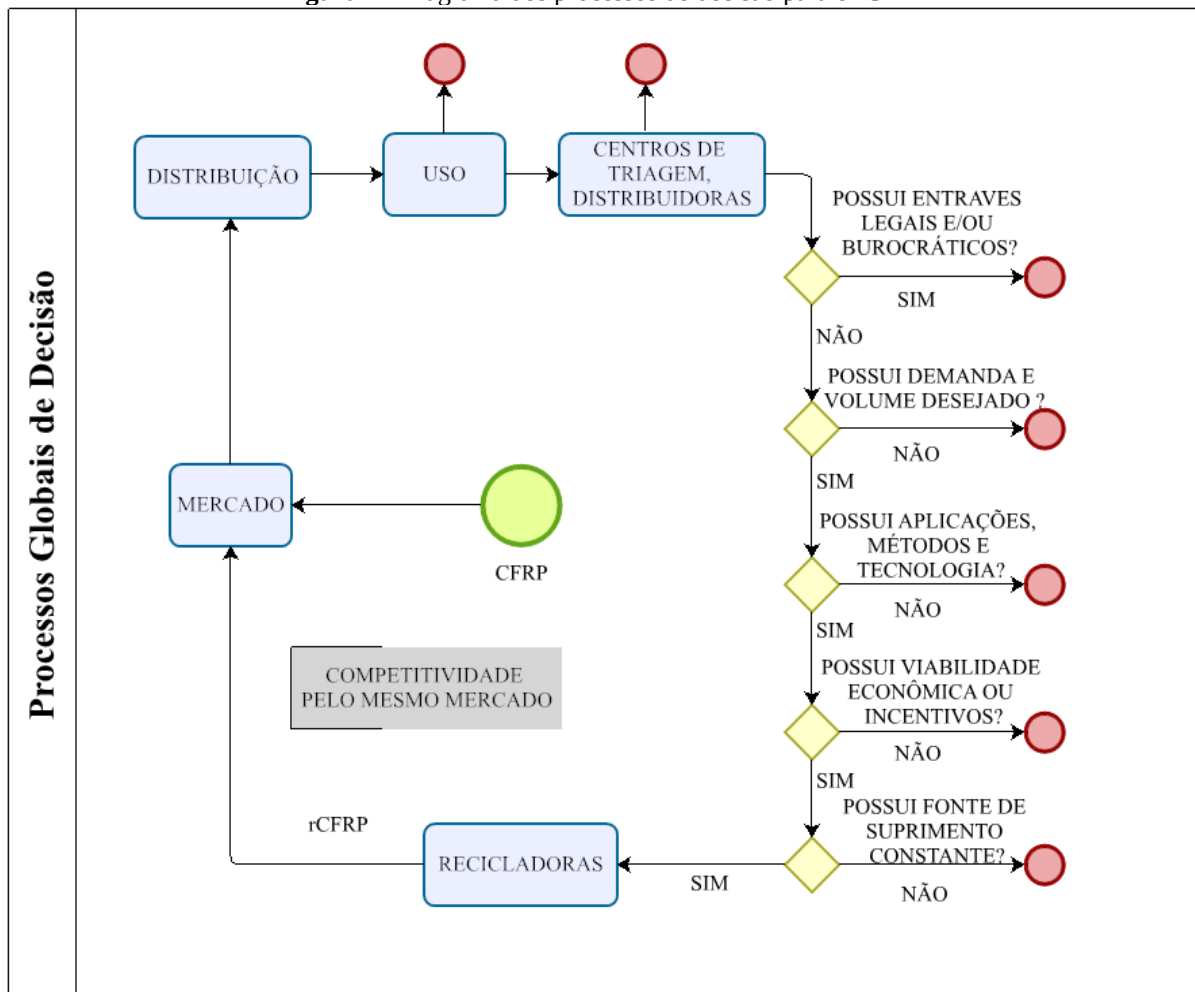
Os desafios da implementação de recicladoras estão ilustrados na **Figura 17**. Em mercados já estabelecidos e desenvolvidos o processo de reciclagem é viabilizado com a proximidade das empresas recicladoras dos centros geradores de resíduos ou das áreas de produção, da presença de infraestrutura e incentivos governamentais. Para fins de cálculo sobre o potencial número de empregos gerados e da quantidade em toneladas de compósitos

reciclados, Pillain et al. (2019) descrevem as cinco etapas para o cálculo da estimativa que são: a conversão monetária dos recursos ambientais; o estabelecimento de coeficientes técnicos; o número de horas trabalhadas; a estimativa do estoque; e por fim, a estimativa do número de empregos.

Outro desafio atual é, além de uniformizar a fonte e padronizar a qualidade e tamanho dos CFRPs que serão destinados às recicladoras, é reduzir o volume de CFRP que é enviado para incineradoras e aterros. Segundo Karuppannan et al. (2020), a porcentagem reciclada de produtos com Fibra de Carbono enviadas para aterros registrada no Reino Unido foi de 20% e 2% foram reutilizados. Além disso, se resgatados os 2000t/ano de CF destinados a aterros podem valer em torno de €14,7 milhões de rCF considerando o valor de €10/kg no mercado.

De outro ponto de vista, os produtos também são distribuídos fora dos países de produção e devem atender às legislações dos países receptores. Atualmente a busca pelos compósitos está crescente nos países emergentes. A exemplo disso, a Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (ALMACO) informou em seu relatório de 2019 um aumento no volume de vendas de 8,3% e um aumento de 5,6% do faturamento comparados ao registro do ano anterior. As áreas de destino dos compósitos foram: a construção civil (32%), transportes (27%), corrosão/saneamento (22%), energia elétrica (4%), energia eólica (4%) e náutico (2%).

Figura 17 Diagrama dos processos de decisão para o rCFRP



Fonte: Autor (2021).

4.3 Possíveis melhorias para tornar o rCFRP mais competitivo

As possíveis melhorias envolvem 4 fatores:

- Utilização em aplicações de maior valor agregado
- Investimentos em pesquisas que viabilizem manufatura de um maior leque de produtos
- Investimentos em métodos e tecnologias que aumentem a capacidade e a velocidade de produção
- Incentivos para que os resíduos de CFRP sejam efetivamente encaminhados para as recicladoras, oferecendo vias mais baratas.

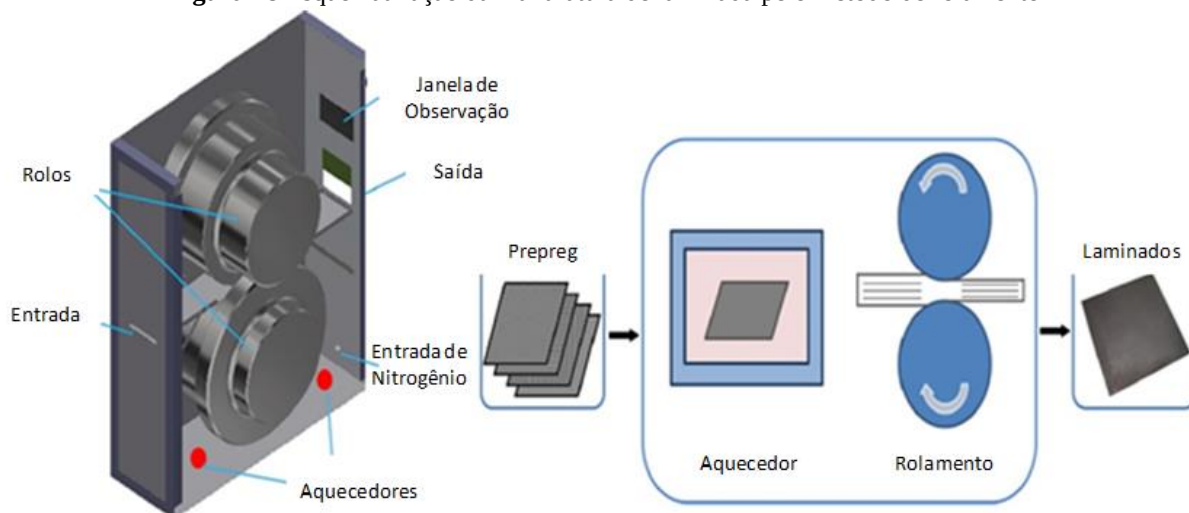
A primeira possível melhoria seria comercializar o material reciclado na forma de produtos com alto valor agregado, como por exemplo em quadros para a fabricação de bicicletas de fibra de carbono cujos valores variam entre R\$799,00 a R\$79.999,00 para aros acima de 26, e assim ampliando a margem de lucros considerando-se o peso total de material utilizado na confecção e no interesse crescente por meios não poluentes e mais acessíveis. Além disso, o rCFRP pode fazer parte de peças de interior de carros elétricos, visto que há uma iniciativa global por diversas montadoras (por exemplo a Nissan, General Motors, Renault, Volvo, Honda, Jaguar, Ford e BMW) com atuação governamental para descontinuação da fabricação de carros movidos a combustível por uma questão ambiental, na tentativa de se reduzir a emissão de gases de efeito estufa. A procura por materiais leves e reciclados com boas propriedades mecânicas podem servir de incentivo para a utilização do rCFRP.

A segunda possível melhoria seria investir na área de impressão 3D-LITA com auxílio de braço robótico como método de manufatura de compósitos de material reciclado com alto teor de volume de fibras e que permitam o *design* do produto. Tal proposta foi utilizada recentemente por Wang et al. (2020) e serviu de base para a elaboração de malhas protetoras de CFRP contra descargas elétricas em turbinas eólicas, mas uma vez concretizado para a manufatura de peças e partes de automóveis e aeronaves, permitirá a rápida produção e automação para a manufatura de compósitos de forma contínua que antes precisavam ter operadores altamente qualificados. E por permitir a alteração no projeto dos produtos não haverá necessidade de adquirir e comportar nas instalações novas maquinarias específicas, reduzindo custos futuros (WANG et al., 2020a; YEONG; GOH, 2020).

A terceira possível melhoria seria aplicar o método de rolamento para prepregs obtidos de laminados reciclados. O desafio seria padronizar o tamanho do laminado reciclado e aumentar a % em volume em massa de fibra, que podem ser em parte obtidos pelo método de alinhamento HiPerDiF ou na escolha prévia de rCF de alta qualidade. O método de manufatura de laminados de CFRP por rolamento proposto por Kizaki et al. (2020), ilustrado na **Figura 18**, foi 4 vezes mais rápido que o processo convencional de autoclave e permite a fabricação contínua de produtos longos. O tempo aproximado requerido para o processo de autoclave é de 4h, devido à taxa gradativa de aumento de temperatura para o tratamento dos prepregs e o tempo de duração uma vez alcançada a temperatura. No método por rolamento, o tempo de préaquecimento foi fixado em 40min e o tempo de tratamento dos prepregs mais otimizado foi de 20min. Tanto a pressão de rolamento quanto a espessura das camadas de CFRP são

proporcionais ao nível de tratamento dos laminados antes do rolamento. Foram empregadas fibras de carbono contínuas e unidirecionais do modelo T700SC da Toray Industries Inc, contando com 67% em volume em massa de fibra e 5 μ m de diâmetro.

Figura 18 Esquemática da manufatura de laminada pelo método de rolamento



Fonte: Traduzido de Kizaki et al. (2020).

A quarta possível melhoria é viabilizar o encaminhamento dos resíduos de CFRP que são direcionados para os aterros para as recicladoras. Na França, por exemplo, eles implementaram um sistema de contribuição eco onde um certo valor é embutido no preço de venda dos pneus, cujo preço varia de €1,35 para pneus de veículos de turismo a €110 para pneus de tratores, para que ao final ele compense os custos de coleta, reciclagem e destinação final. A empresa Alpha Recyclage Composites (ALPHA RECYCLAGE COMPOSITES, 2021) aplicou a tecnologia de termólise à vapor em escala industrial para a valorização desses produtos. Como o material fica inerte no meio, devido à sua alta durabilidade, resistência a corrosão e degradação, seria prudente usar esses resíduos e trazê-los de volta para a cadeia produtiva pelos métodos de reciclagem. A empresa que trabalha com o material virgem se beneficia com a redução de resíduos gerados e as recicladoras se beneficiam com a entrada de matéria prima.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou responder às questões propostas na metodologia, indicando a existência de uma base de dados extensas na literatura, quanto a métodos que podem ser empregados para reciclar o material, otimizar suas propriedades e mesmo tornar o

produto mais competitivo, barateando os custos de produção e/ou agregando valor nas aplicações conforme são feitas as melhorias nas tecnologias já existentes.

A partir da compilação das informações, pode-se extrair que as propriedades mecânicas dos rCFRPs dependem de 5 fatores: da qualidade do CFRP (tamanho, origem e qualidade); do método de reciclagem empregado; do método de alinhamento; da escolha da resina e a escolha do método de manufatura. Cada método possui pontos positivos e negativos e os fatores políticos podem exercer influência na tomada de decisão sobre quais deles utilizar.

Um ponto essencial é que haja a coleta prévia e triagem antes de serem lançados aos aterros e sejam diretamente encaminhados às recicladoras pois a rota para reciclagem acaba sendo limitada, o que afeta também as possíveis aplicações.

Inovações e investimento em pesquisas, em específico aos métodos de reciclagem química, são importantes para aumentar o leque de possibilidades de fabricação a partir do material reciclado ou então para obter produtos com propriedades mecânicas melhores que podem porventura ter aplicação estrutural e ter tempo reduzido de produção, o que viabilizaria a comercialização em larga escala. Uma proposta possível seria com a automação dos processos que reduziria o impacto ambiental com gastos energéticos, emissão de gases e não teria problemas quanto ao impacto na saúde do trabalhador.

Algumas tomadas de decisão podem contribuir para a redução dos resíduos gerados que são encaminhados para destinações pouco sustentáveis como nos aterros, onde o material fica inerte no meio, ou então em incineradoras, onde se é dado um destino final para um resíduo que poderia voltar ao ciclo produtivo, o produto deste novo ciclo gera renda, trabalhos e financiamentos para futuras pesquisas. Assim, o sucesso do setor contribuiria com o desenvolvimento sustentável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização do trabalho, o autor declara não ter recebido suporte financeiro ou quaisquer formas de influência que poderiam resultar em conflitos de interesse com respeito a pesquisa, autoria ou publicação eventual do artigo.

REFERÊNCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 14040: Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura**, 2009.

AKONDA, M. H.; LAWRENCE, C. A.; WEAGER, B. M. Recycled carbon fibre-reinforced polypropylene thermoplastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 1, p. 79–86, 2012.

ALEXANDER, D. et al. Design and manufacturing of high-performance prostheses with additive manufacturing and fiber-reinforced polymers. **Production Engineering**, v. 12, n. 2, p. 203–213, 2018.

ALPHA RECYCLAGE COMPOSITES. **Página inicial**. Disponível em: <<http://www.arcomposites.com/>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

ALTAY, L. et al. Manufacturing of recycled carbon fiber reinforced polypropylene composites by high speed thermo-kinetic mixing for lightweight applications. **Polymer Composites**, v. 39, n. 10, p. 3656–3665, 2018.

APS, R. CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route : Process Optimization. v. 43, n. 9, 2009.

ASSOCIAÇÃO Brasileira De Normas Técnicas (2004), NBR **ISO 14001** – Sistema de gestão ambiental: especificação e diretrizes para uso. Rio de Janeiro: ABNT. 14 p.

BALAJI, A. B.; RUDD, C.; LIU, X. Recycled Carbon Fibers (rCF) in Automobiles: Towards Circular Economy. **Materials Circular Economy**, v. 2, n. 1, 2020.

BARILE, C.; CASAVOLA, C.; DE CILLIS, F. Mechanical comparison of new composite materials for aerospace applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 162, n. August 2018, p. 122–128, 2019.

BAXTER, J. R.; PALMESE, G. R.; ALVAREZ, N. J. Waste to high performance materials: Self-assembly of short carbon fiber polymer composites. **Applied Materials Today**, v. 20, 2020.

BERTHET, F.; BERNHART, G.; SOUDAIS, Y. Using steam thermolysis to recycle carbon fibres from Composite waste. n. September, 2015.

BILYM, P. et al. Carbon fiber plastics for vehicles manufactured by resource-saving formation technology. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1021, n. 1, 2021.

BLEDZKI, A. K. et al. Recycling of Carbon Fiber Reinforced Composite Polymers — Review — Part 2 : Recovery and Application of Recycled Carbon Fibers. **Polymer Composites**, v. 12, n.12, 2020.

CARBONXT. **MITSUBISHI CHEMICAL ADVANCED MATERIALS**. Disponível em: <<https://www.carbonxt.de/en/>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

CERRUTI, P. et al. Up-cycling end-of-use materials: Highly filled thermoplastic composites obtained by loading waste carbon fiber composite into fluidified recycled polystyrene. **Polymer Composites**, v. 35, n. 8, p. 1621–1628, 2014.

CHEN, W. et al. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Social functional mapping of urban green space using remote sensing and social sensing data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, n. September, p. 436–452, 2018.

CITY, W. The application of composite fiber materials in sports equipment Lei zhang. n. Emim, p. 450–453, 2015.

COLUCCI, G. et al. The effect of mechanical recycling on the microstructure and properties of PA66 composites reinforced with carbon fibers. v. 42275, p. 1–9, 2015.

DAS, S. Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 3, p. 268–282, 2011.

DONG, P. A. V. et al. A Bicriteria Optimisation Approach for Waste Management of Carbon Fibre Reinforced Polymers Used in Aerospace Applications: Application to the Case Study of France. **Waste and Biomass Valorization**, v. 8, n. 6, p. 2187–2208, 2017.

EASYCOMPOSITES. **Learning**. Disponível em: <<https://www.easycomposites.co.uk/learning>>. Acesso em: 6 jul. 2021.

GIANNADAKIS, K.; SZPIEG, M.; VARNA, J. Mechanical Performance of a Recycled Carbon Fibre/PP Composite. **Experimental Mechanics**, v. 51, n. 5, p.

767–777, 2011.

GIORGINI, L. et al. Recovery of Carbon Fibers From Cured and Uncured Carbon Fiber Reinforced Composites Wastes and Their Use as Feedstock for a New Composite Production. 2015.

GRECO, A.; MAFFEZZOLI, A.; BUCCOLIERO, G. Thermal and chemical treatments of recycled carbon fibres for improved adhesion to polymeric matrix. 2012.

GUO, W.; BAI, S. A new strategy of reusing abandoned carbon fiber reinforced plastic : Microstructures and properties of C / C composites based on recycled carbon fiber. 2021.

HADIGHEH, S. A.; WEI, Y.; KASHI, S. Optimisation of CFRP composite recycling process based on energy consumption, kinetic behaviour and thermal degradation mechanism of recycled carbon fibre. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 125994, 2021.

HOWARTH, J.; MAREDDY, S. S. R.; MATIVENGA, P. T. Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 46–50, 2014.

INEOS. **Sports Sailing**. Disponível em: <<https://www.ineos.com/sports/sailing/>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

JIANG, G. et al. Surface characterisation of carbon fibre recycled using fluidised bed. n. February, 2008.

JIANG, L. et al. Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation : Reinforcement study of the recycled fiber in new composites. v. 42658, 2015.

KARBOREK. **Página inicial**. Disponível em: <<http://karborekrcef.it>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

KARUPPANNAN GOPALRAJ, S.; KÄRKI, T. A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 3, p. 1–21, 2020.

KEITH, M. J.; LEEKE, G. A. OPTIMISATION OF SOLVOLYSIS FOR

RECYCLING CARBON FIBRE REINFORCED COMPOSITES. n. June, p. 26–30, 2016.

KIZAKI, T. et al. Continuous manufacturing of CFRP sheets by rolling for rapid fabrication of long CFRP products. **Composites Part B**, v. 189, n. October 2019, p. 107896, 2020.

KUP, R.; ZOUHAR, J. Application of Composite Materials in Sports Optics. v. 20, n. 2, p. 200–209, 2020.

LA ROSA, A. D. et al. Recycling treatment of carbon fibre/epoxy composites: Materials recovery and characterization and environmental impacts through life cycle assessment. **Composites Part B: Engineering**, v. 104, p. 17–25, 2016.

LIU, T. et al. Mild chemical recycling of aerospace fiber / epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin. **Polymer Degradation and Stability**, v. 139, p. 20–27, 2017.

LIU, W. et al. CFRP Reclamation and Remanufacturing Based on a Closed-loop Recycling Process for Carbon Fibers Using Supercritical N-butanol. **Fibers and Polymers**, v. 21, n. 3, p. 604–618, 2020a.

LIU, W. et al. Life cycle assessment and energy intensity of CFRP recycling using supercritical N-butanol. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 2021a.

LIU, Y. Y. et al. Biobased epoxy vitrimer from epoxidized soybean oil for reprocessible and recyclable carbon fiber reinforced composite. **Composites Communications**, v. 22, n. August, p. 100445, 2020b.

LIU, Z. et al. Development of high performance recycled carbon fibre composites with an advanced hydrodynamic fibre alignment process. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123785, 2021b.

LONGANA, M. L. et al. Multiple closed loop recycling of carbon fibre composites with the HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) method. **Composite Structures**, v. 153, p. 271–277, 2016.

March 2014 Hitachi Chemical Technical Report. n. 56, 2014.

MCKECHNIE, J. Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential

of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options. 2018.

MEFTAH, H. et al. Characterization of a new fully recycled carbon fiber reinforced composite subjected to high strain rate tension. **Applied Composite Materials**, v. 25, n. 3, p. 507–526, 2017.

MENG, F. et al. Composites : Part A Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. **Composites Part A**, v. 100, p. 206–214, 2017.

MENG, F.; MCKECHNIE, J.; PICKERING, S. J. An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 109, n. November 2017, p. 207–220, 2018.

MEYER, L. O.; SCHULTE, K.; GROVE-NIELSEN, E. CFRP-recycling following a pyrolysis route: Process optimization and potentials. **Journal of Composite Materials**, v. 43, n. 9, p. 1121–1132, 2009.

MISCHO, F. et al. Use of recycled carbon staple fibers in an advanced thermoforming process and analysis of its crash performance. **Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science**, v. 6, n. 1, p. 48–56, 2020.

MIYAKE, T.; IMAEDA, S. A dry aligning method of discontinuous carbon fibers and improvement of mechanical properties of discontinuous fiber composites. **Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science**, v. 2, n. 3–4, p. 117–123, 2016.

NAM, Y. et al. Application of supercritical water for green recycling of epoxy-based carbon fiber reinforced plastic. **Composites Science and Technology**, v. 173, n. January, p. 66–72, 2019.

NUNES, A. O. et al. Life cycle assessment of a steam thermolysis process to recover carbon fibers from carbon fiber-reinforced polymer waste. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 9, p. 1825–1838, 2018.

PEIXE, B. C. S. et al. Factors related to the maturity of environmental management systems among Brazilian industrial companies. **RAE Revista de Administracao de Empresas**, v. 59, n. 1, p. 29–42, 2019.

PESCE, P. et al. Mechanical characterisation of multi vs. uni-directional carbon fiber frameworks for dental implant applications. **Materials Science and Engineering C**, v. 102, n. April, p. 186–191, 2019.

PICKERING, S. J. et al. Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites. **University of East Anglia**, 2015. Disponível em: <https://ueaeprints.uea.ac.uk/id/eprint/59648/>. Acesso em: 25 maio. 2021.

PICKERING, S. J. et al. Applications for carbon fibre recovered from composites. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 139, n. 1, 2016a.

PILLAIN, B. Social life cycle assessment framework for evaluation of potential job creation with an application in the French carbon fiber aeronautical recycling sector. p. 1729–1742, 2019.

PIMENTA, S.; PINHO, S. T. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. **Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 378–392, 2011.

PROCOTEX. **Página inicial**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=02X0QhqeFa8>>. Acesso em: 25 maio. 2021.

RADEMACKER, T.; FETTE, M.; JÜPTNER, G. Sustainable Use of Carbon Fibers through CFRP Recycling. **Lightweight Design worldwide**, v. 11, n. 5, p. 12–19, 2018.

SCELSI, L. et al. Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. v. 5, n. 3, p. 209–217, 2011.

SIGMATEX. **Recycled carbon fibre non-woven fabric**. Disponível em: <<https://www.sigmatex.com/sigmatex-launches-recycled-carbon-fibre-non-woven-fabric>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

SMOLEŃ, J. et al. Utilization of CFRP waste as a filler in polyester resin-based composites. **Journal of Composite Materials**, 2021.

SONG, Y. S.; YOUN, J. R.; GUTOWSKI, T. G. Composites : Part A Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. **Composites Part A**, v. 40, n. 8, p. 1257–1265, 2009.

SULLIVAN, R. A. Automotive carbon fiber: Opportunities and challenges. **Jom**, v. 58, n. 11, p. 77–79, 2006.

TAPPER, R. J. et al. A closed-loop recycling process for discontinuous carbon fibre polyamide 6 composites. **Composites Part B**, v. 179, n. August, p. 107418, 2019.

TAPPER, R. J. et al. An evaluation of life cycle assessment and its application to the closed-loop recycling of carbon fibre reinforced polymers. **Composites Part B: Engineering**, v. 184, n. November 2019, p. 107665, 2020.

VAIDYA, U.; THEODORE, M. Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications ☆. **Composites Part B**, v. 198, n. April, p. 108156, 2020.

VAN DE WERKEN, N. et al. Investigating the effects of fiber surface treatment and alignment on mechanical properties of recycled carbon fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 119, n. December 2018, p. 38–47, 2019.

VARTEGA. **Página inicial**. Disponível em: <<https://www.vartega.com/>>. Acesso em: 3 maio. 2021.

VIEIRA, D. R.; VIEIRA, R. K.; CHANG CHAIN, M. Strategy and management for the recycling of carbon fiber-reinforced polymers (CFRPs) in the aircraft industry: a critical review. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 24, n. 3, p. 214–223, 2017.

VO DONG, A.; AZZARO-PANTEL, C.; BOIX, M. A multi-period optimisation approach for deployment and optimal design of an aerospace CFRP waste management supply chain. **Waste Management**, v. 95, p. 201–216, 2019.

VO DONG, P. A.; AZZARO-PANTEL, C.; CADENE, A. L. Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, n. January, p. 63–75, 2018.

WANG, B. et al. Fabrication of continuous carbon fiber mesh for lightning protection of large-scale wind-turbine blade by electron beam cured printing. **Additive Manufacturing**, v. 31, n. October 2019, p. 100967, 2020a.

WANG, Y. et al. Self-healing of structural carbon fibres in polymer composites. **Cogent Engineering**, v. 7, n. 1, 2020b.

WEI, H. et al. Mechanical properties of carbon fiber paper reinforced thermoplastics using mixed discontinuous recycled carbon fibers. **Advanced Composite Materials**, v. 27, n. 1, p. 19–34, 2018.

WITIK, R. A. et al. Carbon fibre reinforced composite waste: An environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 49, p. 89–99, 2013.

XIONG, C. et al. Sustainable use of recycled carbon fiber reinforced polymer and crumb rubber in concrete: mechanical properties and ecological evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123624, 2021.

YAMAGUCHI, A. et al. Recyclable carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) containing degradable acetal linkages: Synthesis, properties, and chemical recycling. **Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry**, v. 53, n. 8, p. 1052–1059, 2015.

YEONG, W. Y.; GOH, G. D. Previews 3D Printing of Carbon Fiber Composite : The Future of Composite Industry ? **Matter**, v. 2, n. 6, p. 1361–1363, 2020.

YU, H.; POTTER, K. D.; WISNOM, M. R. Composites : Part A A novel manufacturing method for aligned discontinuous fibre composites (High Performance-Discontinuous Fibre method). v. 65, p. 175–185, 2014.

YU, K. et al. Carbon Fiber Reinforced Thermoset Composite with Near 100% Recyclability. **Advanced Functional Materials**, v. 26, n. 33, p. 6098–6106, 2016.

ZHANG, J. et al. Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. **Composites Part B**, v. 193, n. April, p. 108053, 2020.