

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Anderson Pires Fernandes

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILMES POLIMÉRICOS E DE
FIBRAS DE VIDRO PROVENIENTES DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PÁS
EÓLICAS**

Sorocaba

2019

Anderson Pires Fernandes

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILMES POLIMÉRICOS E DE
FIBRAS DE VIDRO PROVENIENTES DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PÁS
EÓLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva

Financiamento: CAPES

Sorocaba

2019

Fernandes, Anderson Pires

POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILMES
POLIMÉRICOS E DE FIBRAS DE VIDRO PROVENIENTES DO
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PÁS EÓLICAS / Anderson Pires
Fernandes. -- 2019.

121 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Jane Maria Faulstich de Paiva

Banca examinadora: Sandro Donnini Mancini, Vagner Roberto Botaro

Bibliografia

1. Reaproveitamento de resíduos de filmes poliméricos e tecidos de fibras
de vidro.. 2. Moldagem em prensa hidráulica a quente e moldagem por
transferência de resina.. 3. Avaliação de compósitos termorrígidos.. I.
Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Anderson Pires Fernandes, realizada em 08/11/2019:

Profa. Dra. Jane Maria Faulstich de Paiva
UFSCar

Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini
UNESP

Prof. Dr. Vagner Roberto Botaro
UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelos dons da vida, do amor e do conhecimento, que permitem a todo ser humano sonhar, lutar e realizar.

À professora e orientadora Jane, por todo auxílio na concepção e realização do projeto, pois nada seria possível sem seus conhecimentos, sua articulação e seus contatos. Não fosse o bastante, tenho muito a agradecer também pelas dicas com editor de texto, do tipo “na minha máquina deu certo”, que facilitaram demais nossas correspondências. Além, é claro, dos momentos de divã, pois num período turbulento pude contar com seu carinho e paciência. Sou muito feliz em ter sido aceito como orientando da professora Jane, for sure, the best!

À minha família, pela minha educação e por sempre acreditar que eu sou capaz de fazer tudo.

Aos amigos da “firma” pelo auxílio com questionários durante o período experimental como aluno especial, aos amigos do LECMat (Laboratório de Ensaios e Caracterização de Materiais) da UFSCar/Sorocaba pelas trocas de experiências e aos amigos do G.P.S pela companhia e campanha.

Às empresas parceiras: Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda. e Ashland Polímeros do Brasil S.A pelo fornecimento dos materiais utilizados no estudo. À Cristina e à Mariane do Sinctronics pelas análises de termogravimetria e de DSC, e ao Christian pela realização dos ensaios de impacto. Às GR Usinagem e Vidraçaria Franzoni pelo auxílio com o desbaste de amostras para testes.

À UFSCar e ao PPGEPS do Campus Sorocaba pela oportunidade de formação em programa educacional gratuito e de qualidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa.

EPÍGRAFE

Vamos viver nossos sonhos, temos tão pouco tempo.

(Alexandre Magno Abrão)

RESUMO

FERNANDES, Anderson Pires. Potencial de utilização de resíduos de filmes poliméricos e de fibras de vidro provenientes do processo de fabricação de pás eólicas. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, UFSCar - *campus Sorocaba*, Sorocaba, 2019.

Os investimentos em energia eólica vêm crescendo globalmente ao longo dos anos, visando alternativas sustentáveis para o segmento. No entanto, este crescimento carrega consigo acréscimos no consumo de materiais de produção, além de resíduos provenientes de seus processos, que se não tratados adequadamente causam impactos negativos ao meio ambiente. Numa sociedade cada vez mais atenta às questões ecológicas, os conceitos de reutilização e de reciclagem têm sido amplamente difundidos, como formas de amenizar as agressões causadas pelo descarte incorreto de materiais no meio ambiente. Deste modo, visando contribuir para a sustentabilidade dos processos de fabricação das pás eólicas, este estudo investiga oportunidades de reaproveitamento de dois tipos de resíduos provenientes destas indústrias: filmes poliméricos de infusão a vácuo e tecidos de fibras de vidro costurados e aleatórios. Em razão de resultados iniciais insatisfatórios apresentados na utilização destes materiais em conjunto no processo de moldagem por compressão a quente, foi necessário utilizá-los separadamente e em processos de moldagem distintos. A primeira parte do estudo investiga a alternativa de reciclagem dos filmes poliméricos (poliamida) de infusão a vácuo que são descartados após o processo de fabricação de pás eólicas. O trabalho envolveu a reutilização deste tipo de filme polimérico por meio de processo de moldagem à quente em prensa hidráulica. Após a moldagem, as placas foram cortadas em corpos de prova para avaliação mecânica em flexão e impacto e análises térmicas por Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). Os resultados indicaram que o resíduo de filme analisado é uma poliamida (nylon) e suas propriedades mecânicas estão próximas às propriedades citadas na literatura para este tipo de polímero; sendo indicadas para uso em moldagem e/ou usinagem de objetos como mancais, engrenagens, roletes, guias e diversas peças de equipamentos industriais. Na segunda parte, o estudo envolveu um método alternativo de reaproveitamento de resíduos de fibras de vidro (costurados e aleatórios) na confecção de novos compósitos poliméricos termorrígidos. Neste caso, foram utilizados tecidos costurados provenientes dos processos de fabricação das pás eólicas, assim como material recusado na indústria por não-conformidade técnica. Foram confeccionados dez tipos de compósitos com diferentes camadas e arranjos dos tecidos, os quais foram avaliados mecanicamente em flexão e tração e termicamente por Termogravimetria (TG). O processo de confecção utilizado foi a moldagem por transferência de resina (RTM), através do qual a resina polimérica é succionada para dentro do molde, permeando as fibras dos tecidos e, posteriormente, resultando em compósitos. A resina utilizada nas moldagens foi do tipo poliéster insaturada de nome comercial Arazyn 13.0. A análise estatística dos resultados dos ensaios mecânicos, realizada segundo metodologia Tukey, revelou que o número de camadas de fibras de vidro foi determinante para as propriedades mecânicas dos compósitos, porém a orientação dos tecidos no interior dos compósitos não apresentou diferenças significativas. Dependendo da aplicação dos compósitos, se requer maior ou menor resistência mecânica, outros arranjos podem ser analisados a fim de obterem-se as propriedades desejadas. Os compósitos desenvolvidos podem ser aplicados como materiais para obtenção de produtos como portas, pisos, paredes, divisórias de escritório e outros móveis com superfície plana.

Palavras-chave: Reaproveitamento. Resíduos de fabricação de pás eólicas. Filme polimérico de bolsa de vácuo. Fibras de vidro. Compósitos.

ABSTRACT

The investments made in wind energy have been growing globally over the years, aiming at sustainable alternatives for the segment. However, this growth carries with it an increase in the consumption of production materials and wastes from its processes, which if not properly treated cause negative impacts to the environment. In a society increasingly attentive to ecological issues, concepts of reuse and recycling have been widely disseminated as ways of mitigating the aggression caused by the incorrect disposal of materials in the environment. Thus, in order to contribute to the sustainability of wind turbine manufacturing processes, this study investigates opportunities to reuse two types of waste from these industries: vacuum infusion polymer films and stitched and random glass fiber fabrics. Due to unsatisfactory initial results presented when using these materials together in the hot compression molding process, it was necessary to use them separately and in different molding processes. The first part of the study investigates alternative recycling of polymeric vacuum bag films that are discarded after the manufacturing process of wind turbine blades. The work involved the reuse of this type of polymer film by means of a hot molding process in a hydraulic press. After molding, the plates were cut into specimens for mechanical evaluation in flexural and impact tests and for Thermogravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). The results indicated that the waste analyzed is polyamide (nylon) and its mechanical properties are close to the properties mentioned in the literature for this type of polymer, being indicated for use in molding and/or machining of objects such as bearings, gears, rollers, guides and various pieces of industrial equipment. In the second part, the study proposes an alternative method for the reuse of glass fiber wastes (stitched and random) in the manufacture of new thermosetting polymer composites. Here, stitched fabrics from manufacturing processes were used, as well as material refused for technical non-compliance. Ten composites with different layers and fabric arrangements were prepared, which were mechanically evaluated in flexural and tensile and thermally by thermogravimetric analysis (TGA). The preparation process used was the resin transfer molding (RTM) whereby the polymer resin is suctioned into the fiber reinforcements, giving rise to the composites. The resin used in the moldings was the unsaturated polyester type of trade name Arazyn 13.0. Finally, the statistical analysis of mechanical results, performed according to Tukey's methodology, revealed that the number of glass fiber layers is determinant for mechanical properties of the composite, whereas the orientation of the fabrics inside the composites does not present significant differences. Depending on the application of the composites, if higher or lower mechanical resistance is required, other arrangements can be analyzed in order to obtain the desired properties. The composites developed can be applied as materials to obtain products such as doors, floors, walls, office partitions and other furniture with flat surface.

Keywords: Reuse. Wind turbine manufacturing waste. Vacuum bag polymer film. Glass fibers. Composites.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Capacidade anual instalada.....	17
FIGURA 2 – Participação dos mercados de energia eólica.....	18
FIGURA 3 – Consumo de material para fabricação de pás eólicas.....	19
FIGURA 4 – Projeção de resíduos de pás eólicas até 2050.....	20
FIGURA 5 – Esquema do processo mecânico.....	23
FIGURA 6 – Esquema do processo de pirólise.....	25
FIGURA 7 – Fotografias do “antes e depois” de uma pá eólica que passa pelo processo de pirólise.....	25
FIGURA 8 – “Aglhas” de compósitos, com as dimensões de 6mm de diâmetro e 100mm de comprimento, usinadas a partir de placas de pás eólicas.....	28
FIGURA 9 – Esquema de economia circular para GFRP.....	31
FIGURA 10 - Esquema representativo de uma estrutura reticulada da RPI sintetizada a partir de um glicol e anidridos.....	35
FIGURA 11 – Filme plástico de infusão a vácuo: (a) recebido, sem condicionamento; (b) após condicionamento de 24 h dentro do molde.....	38
FIGURA 12 – Manta de fibra de vidro costurada.....	39
FIGURA 13 – Manta de fibra de vidro aleatória.....	39
FIGURA 14 – Molde metálico utilizado na prensa hidráulica.....	40
FIGURA 15 – Placa do polímero moldada na prensa hidráulica.....	41
FIGURA 16 – Sistema de moldagem por RTM.....	42
FIGURA 17 – Molde RTM.....	42
FIGURA 18 – Placas moldadas para cortar os corpos de prova para: (a) ensaio de flexão, (b) ensaio de tração.....	45
FIGURA 19 – Corpos-de-prova para ensaio de flexão.....	46
FIGURA 20 – Corpos-de-prova para ensaio de flexão.....	46
FIGURA 21 – Corpos-de-prova para ensaio de impacto.....	47
FIGURA 22 – Corpos-de-prova para ensaio de tração.....	48
FIGURA 23 – Análise de MEV: (a) Equipamento de MEV, (b) porta amostras.....	48
FIGURA 24 – Amostras após os ensaios de flexão.....	50

FIGURA 25 – Amostras após os ensaios de impacto.	51
FIGURA 26 – Amostras pós-ensaio de flexão no compósito C RPF.	53
FIGURA 27 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias das tensões de ruptura dos compósitos C RPF no ensaio de flexão.	54
FIGURA 28 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RPF no ensaio de flexão.	55
FIGURA 29 – Amostras pós-ensaio de flexão no compósito C RNC.	56
FIGURA 30 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias das tensões de ruptura dos compósitos C RNC no ensaio de flexão.	57
FIGURA 31 – Fotografia de manta de fibras de vidro costurada não-conforme utilizado nos compósitos C RNC.	58
FIGURA 32 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RNC no ensaio de flexão.	59
FIGURA 33 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias das tensões (resistência) de ruptura dos compósitos C RPF no ensaio de tração.	62
FIGURA 34 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RPF no ensaio de tração.	63
FIGURA 35 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias das tensões (resistência) de ruptura dos compósitos C RNC no ensaio de tração.	66
FIGURA 36 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RNC no ensaio de tração.	67
FIGURA 37 – Comparação dos arranjos RPF x RNC em relação aos valores de tensão de ruptura obtidos.	68
FIGURA 38 – Comparação dos arranjos RPF x RNC em relação aos valores de módulo de elasticidade obtidos.	69
FIGURA 39 – Imagens da fratura de MEV do polímero de bolsa de vácuo ensaiado em flexão.	70
FIGURA 40 – EDS do filme polimérico de bolsa de vácuo.	70
FIGURA 41 – EDS dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro.	71
FIGURA 42 – Imagens por MEV das fraturas dos compósitos reforçados com resíduos de fibras de vidro C RPF ensaiados em flexão.	72
FIGURA 43 – Imagens por MEV das fraturas dos compósitos reforçados com resíduos de fibras de vidro C RNC ensaiados em flexão.	74
FIGURA 44 – Gráfico da análise térmica por DSC do filme polimérico proveniente de bolsa de vácuo.	76

FIGURA 45 – Gráfico da análise térmica de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) do filme polimérico de bolsa de vácuo.	77
FIGURA 46 – Gráficos das análises térmicas de termogravimetria (TG) para os compósitos reforçados com fibras de vidro.	78
FIGURA 47 – Gráficos das análises térmicas de termogravimetria derivada (DTG) para os compósitos reforçados com fibras de vidro.	79
FIGURA 48 - Espectro de FTIR do filme polimérico.	80

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Alternativas de reintegração dos resíduos de pás eólicas em economia circular.	30
TABELA 2 – Características das fibras de vidro dos tipos E e S.	37
TABELA 3 – Características dos tecidos.	39
TABELA 4 – Composição da matriz polimérica.	43
TABELA 5 – Distribuição (arranjo) das mantas de fibras de vidro nos compósitos.	44
TABELA 6 – Resultados do ensaio de flexão realizado no polímero moldado.	50
TABELA 7 – Resultados do ensaio de impacto realizado no polímero moldado.	52
TABELA 8 – Resultados do ensaio de flexão realizado nos compósitos C RPF.	53
TABELA 9 – Resultados do ensaio de flexão realizado nos compósitos C RNC.	56
TABELA 10 – Resultados do ensaio de tração realizado nos compósitos C RPF.	60
TABELA 11 – Amostras pós-ensaio de tração no compósito C RPF.	60
TABELA 12 – Resultados do ensaio de tração realizado nos compósitos C RNC.	64
TABELA 13 – Amostras pós-ensaio de tração no compósito C RNC.	64
TABELA 14 – Principais bandas características do filme polimérico.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	<i>Analysis of variance</i> - Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - Sociedade Americana de Testes e Materiais
DSC	<i>Differential Scanning Calorimeter</i> - Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	<i>Derivative Thermogravimetric</i> - Termogravimetria Derivada
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> - Espectroscopia por dispersão em energia
FBC	<i>Fluidized Bed Combustion</i> - Combustão em Leito Fluidizado
FTIR	<i>Fourier-transform Infrared Spectroscopy</i> - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> - Polímero Reforçado com Fibras de Vidro
GW	Giga Watts
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i> - Conselho Global de Energia Eólica
IDEC	Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MW	Mega Watts
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
PVC	Policloreto de Vinila
RTM	<i>Resin Transfering Moulding</i> - Moldagem por Transferência de Resina
RPI	Resina Poliéster Insaturada
TG	<i>Thermogravimetric</i> - Termogravimetria
UE	União Europeia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVOS GERAIS	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 A ENERGIA EÓLICA NO MUNDO.....	17
3.1.1 Reciclagem de resíduos do segmento eólico	20
3.1.2 Processos de reaproveitamento de resíduos do segmento eólico	22
3.1.2.1 Processo mecânico	23
3.1.2.2 Processo energético	24
3.1.2.3 Processo químico	26
3.1.3 Aplicações para os resíduos de pás eólicas	27
3.1.4 Segmento eólico e perspectivas de economia circular	29
3.2 COMPÓSITOS	31
3.3 POLÍMEROS.....	32
3.3.1 Resina poliéster insaturada (RPI)	34
3.4 FIBRAS DE VIDRO	36
4 MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1 MATERIAIS	38
4.2 MÉTODOS	40
4.3 ENSAIOS DE FLEXÃO	45
4.4 ENSAIO DE IMPACTO	47
4.5 ENSAIOS DE TRAÇÃO	47
4.6 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	48

4.7 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL - DSC.....	49
4.8 TERMOGRAVIMETRIA - TG.....	49
4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 POLÍMEROS MOLDADOS A PARTIR DOS FILMES PLÁSTICOS.....	50
5.1.1 Ensaio de flexão.....	50
5.1.2 Ensaio de impacto.....	51
5.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO.....	52
5.2.1 Ensaio de flexão.....	52
5.2.2 Ensaio de tração.....	60
5.3 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	69
5.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC).....	76
5.5 Termogravimetria.....	76
5.6 Análise de FTIR do filme polimérico de bolsa de vácuo.....	79
6 CONCLUSÕES.....	82
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	84
APÊNDICE - A.....	95
APÊNDICE - B.....	107

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia eólica vem aumentando globalmente a uma taxa acelerada, (YAZDANBAKHSI et al., 2018). Parte dos investimentos feitos nesta área visa suprir o aumento da demanda energética mundial e minimizar os impactos ambientais oriundos dos meios de captação tradicionais de energia, como degradação ao meio ambiente, esgotamento de recursos naturais e aquecimento global. Durante as últimas décadas, o aumento da conscientização sobre questões ambientais tem sido um fator determinante no desenvolvimento de recursos de energia renovável com menor impacto ambiental, tais como hidrelétrica, solar e eólica, (ANDERSEN et al., 2016).

Os investimentos em tecnologias avançadas na busca pela transição das matrizes energéticas implicam no desenvolvimento de novos processos de geração, bem como novos materiais e dispositivos utilizados para este fim. Porém, tais tecnologias carregam consigo alguns tipos de resíduos de fabricação ou pós-consumo, que se não tratados adequadamente podem ser tão maléficos ao meio ambiente quanto àqueles tradicionalmente utilizados (ANDERSEN et al., 2016; GUERRERO et al., 2011).

Apoiando-se no exemplo das indústrias de energia eólica pode ser verificado um crescimento contínuo na utilização desta matriz energética, o que representa aumento na fabricação de pás para as turbinas geradoras e que, por sua vez, constituem um problema ainda complexo, pois são produzidas a partir de compósitos termorrígidos e não-recicláveis (CHERRINGTON et al., 2012; MATIVENGA et al., 2016).

A energia eólica desenvolveu-se rapidamente nas últimas duas décadas para se tornar uma das fontes de energias renováveis mais promissoras e economicamente viáveis para alguns países. Embora a energia eólica seja desenvolvida para fornecer energia renovável limpa com pouca ou nenhuma emissão durante a operação, esta é apenas uma das visões, pois as pás, um dos componentes mais importantes nas turbinas eólicas, feitas com compósitos, são atualmente consideradas não recicláveis, (LIU, BARLOW, 2017).

A herança a ser deixada pelas usinas eólicas durante seu ciclo de vida útil representa um grande desafio ambiental e que necessita de tratativa imediata, caso contrário perderão o intuito ou finalidade de energia limpa. Com as primeiras instalações comerciais de turbinas eólicas que agora se aproximam do fim da vida, o problema da eliminação das pás eólicas está apenas começando a emergir como um fator significativo para o futuro (LIU, BARLOW, 2017).

A estrutura das pás eólicas, em geral, é constituída de compósitos poliméricos termorrígidos reforçados com tecidos de fibras de vidro, que são materiais denominados

estruturais ou avançados. Tais compósitos avançados exibem propriedades físicas e químicas desejáveis para as pás eólicas, porque apresentam alta rigidez e resistências mecânicas à tração, à flexão, compressão, impacto, estabilidade dimensional, resistências química e térmica, além de processamento relativamente fácil (GOREN, ATAS, 2008; WANG et al., 2107).

Os polímeros sintéticos revolucionaram a indústria do século XX de modo geral. Estes materiais produzidos artificialmente surgiram da necessidade humana em encontrar similaridades aos polímeros naturais, às vezes de difícil acesso, altos custos para extração ou, até mesmo, provenientes de fontes finitas. A necessidade de minimizar a dependência de recursos não-renováveis como o petróleo, e assim efetivamente promover o desenvolvimento sustentável vem crescendo ao longo dos anos, (NETO, PARDINI, 2006; OWUSU, SARKODIE, 2016).

Desde o fim da Segunda Guerra Mundial, o campo dos materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento dos polímeros sintéticos. Vários tipos de materiais sintéticos podem ser produzidos a baixos custos e suas propriedades podem ser alteradas até certo ponto, onde muitas delas são superiores às dos materiais naturais. Em algumas aplicações, peças metálicas e de madeira foram substituídas por plásticos (polímeros), que possuem propriedades satisfatórias e podem ser produzidas a custos mais baixos (CALLISTER, 2011; THAKUR, KESSLER, 2015).

O uso do plástico na sociedade moderna trouxe série de vantagens para o campo fabril, em função da facilidade de manipulação deste material. Somados à baixa temperatura de processamento, peso consideravelmente baixo, custos de fabricação menores, os polímeros possibilitam ainda uma variedade de formas, cores e tamanhos muito atrativos à indústria. Em contrapartida, como todo bônus carrega consigo um ônus, a expansão do seu consumo ao longo dos anos tem impactado negativamente no planeta, uma vez que a principal desvantagem associada ao uso dos materiais poliméricos é o tempo com que se degradam no meio ambiente. Segundo dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA, IDEC, 2005), o plástico pode levar mais de 400 anos para se decompor na natureza e, quando descartados indistintamente contribuem para superlotação dos aterros sanitários, exigindo cada vez mais liberação de novas áreas para destinação final.

A produção de polímeros sintéticos tem causado problemas ambientais, e o seu uso em compósitos, principalmente no que concerne às matrizes do tipo polímero termorrígido, tem contribuído para a geração de resíduos que apresentam dificuldades de reutilização e não possibilitam a reciclagem, (NETO, PARDINI, 2006).

A gestão deste tipo de resíduo é um problema recente, visto que a evolução do setor de energia eólica ainda não gerou uma quantidade significativa de material. Estima-se que a vida útil da pá eólica seja em torno de 20 a 30 anos (YAZDANBAKHSH et al., 2018); portanto, os primeiros parques instalados iniciam agora o processo de descomissionamento, com previsão apontando que em 2020 serão gerados, aproximadamente, 50.000 toneladas de resíduos de pás eólicas em fim de ciclo de vida (LIU, BARLOW, 2017).

Neste contexto, o estudo teve como intuito investigar as possibilidades de reaproveitamento de resíduos poliméricos e de fibras de vidro provenientes de processos de fabricação de pás eólicas em um novo compósito. O estudo contemplou o reprocessamento de resíduos provenientes de bolsas poliméricas (plásticos) de infusão a vácuo e tecidos de fibras de vidro descartados pela indústria eólica. Reincorporar total ou parcialmente estes materiais à cadeia produtiva significaria isentar o meio ambiente de cargas malélicas, além do reaproveitamento de materiais, diminuindo a superexploração de recursos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Este trabalho envolveu o aproveitamento de resíduos poliméricos de bolsas de vácuo e tecidos de fibras de vidro provenientes da indústria eólica para a moldagem de materiais poliméricos e compósitos, bem como a avaliação de suas propriedades mecânicas e térmicas. A partir destas, foram sugeridas potenciais possibilidades de aplicação para os materiais desenvolvidos.

2.2 Objetivos específicos

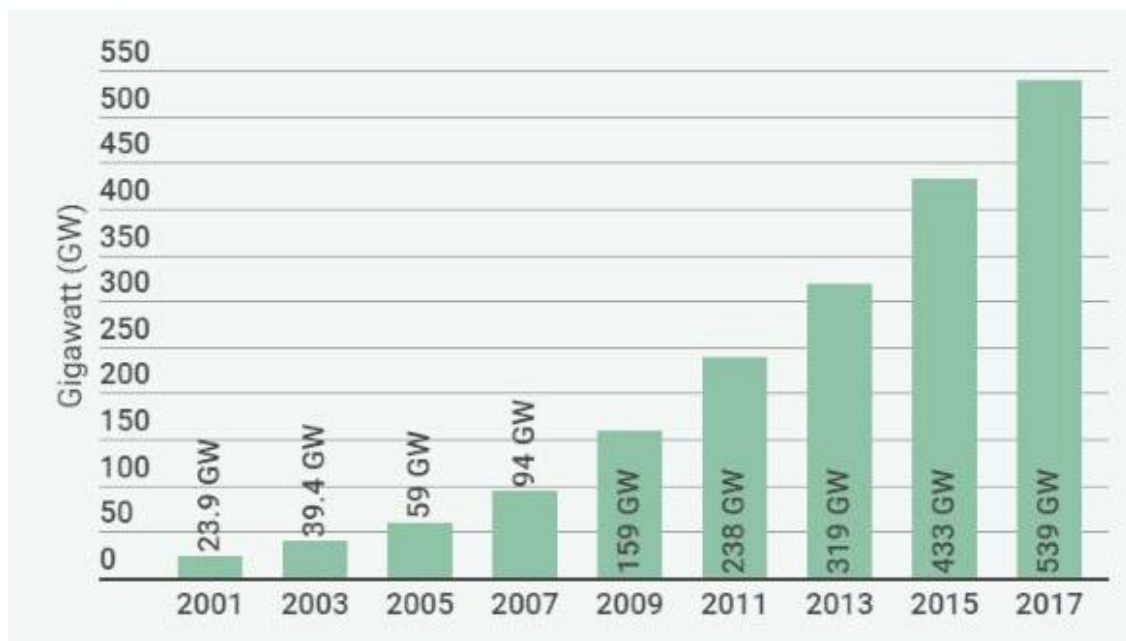
- Definição das condições de moldagens adequadas por compressão a quente, para os resíduos de filmes poliméricos de bolsa de vácuo e, por R.T.M. para os tecidos de fibras de vidro, obtendo-se compósitos.
- Avaliação das propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto do polímero moldado com resíduos de filmes e dos compósitos reforçados com fibras de vidro.
- Avaliação das propriedades térmicas por Termogravimetria (TG) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC – Differential Scanning Calorimetry) dos materiais moldados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A energia eólica no mundo

O segmento de energia eólica tem se apresentado como promissor no século 21. A capacidade instalada desta matriz energética saltou de 7.600 Mega Watts (MW) em 1998 para 364.270 MW em 2014 (LIU, BARLOW, 2017). Estima-se ainda um crescimento médio anual de 12% deste mercado até o ano de 2026 (ANDERSEN et al., 2016). A evolução da capacidade de energia eólica instalada no mundo pode ser observada na Figura 1.

FIGURA 1 – Capacidade anual instalada.



Fonte: GWEC: 2017.

Como pode ser observado (Figura 2), a China é o principal investidor do segmento eólico e responde por cerca de 35% da capacidade mundial instalada. O Brasil atualmente ocupa a oitava posição no ranking representando 2% do total mundial, aproximadamente, 13GW.

A China despontou como potência eólica mundial a partir de 2009, quando expandiu suas instalações buscando a liderança mundial no segmento de energias renováveis. O panorama eólico chinês está dividido entre grandes parques industriais e instalações de pequeno porte que abastecem propriedades rurais (CUNHA, 2017). O programa chinês para energias renováveis conta com políticas governamentais de subsídios que, entre outros

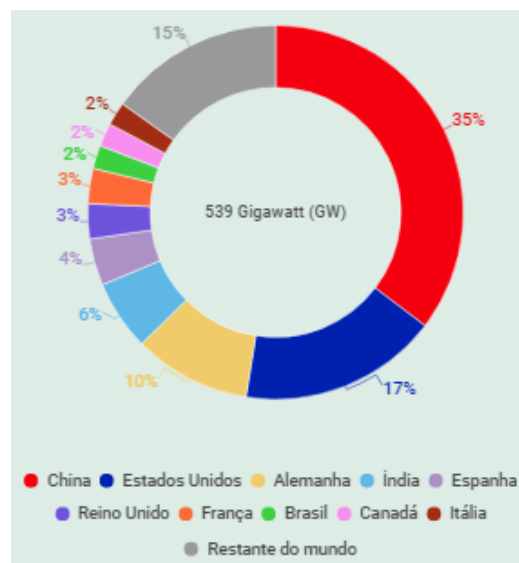
fatores, busca tornar o país mais limpo, com redução de 15% de emissões de carbono e aumentar a eficiência energética a partir da expansão das novas matrizes. Além disso, o potencial eólico chinês é dos maiores do mundo, principalmente nas regiões costeiras pouco exploradas, o que vem aumentando os investimentos de parques eólicos nesses locais, (SAHU, 2018; GUPTA 2016).

No Brasil, o aumento da energia eólica ocorreu pela necessidade de incrementar a capacidade instalada nacional em virtude das crises de abastecimento ocorridas nas últimas décadas, bem como a busca por alternativas mais sustentáveis. Os principais esforços ocorreram em instalações *offshore*, onde o potencial dos ventos é muito grande, com destaque para a região nordeste que detém metade da potência disponível no país (CUNHA, 2017).

As projeções nacionais e internacionais permitem afirmar que a demanda por aerogeradores irá intensificar-se mundo afora. O Conselho Global de Energia Eólica previu que a taxa de crescimento anual global da energia eólica seria superior a 12% entre 2013 e 2018, (LIU, BARLOW, 2017). Porém, associado ao crescimento da energia eólica observou-se também um aumento da quantidade de resíduos gerados na fabricação das pás, assim como no descarte de pás após o final de vida útil (GUERRERO et al., 2011).

Estudos relacionados à pós-utilização calculam que em 2020 serão geradas 50.000 toneladas de resíduos provenientes dos parques eólicos, com pouca ou nenhuma solução que não o descarte final; número que tende a exceder 200.000 toneladas em 2034 (LIU, BARLOW, 2017).

FIGURA 2 – Participação dos mercados de energia eólica.

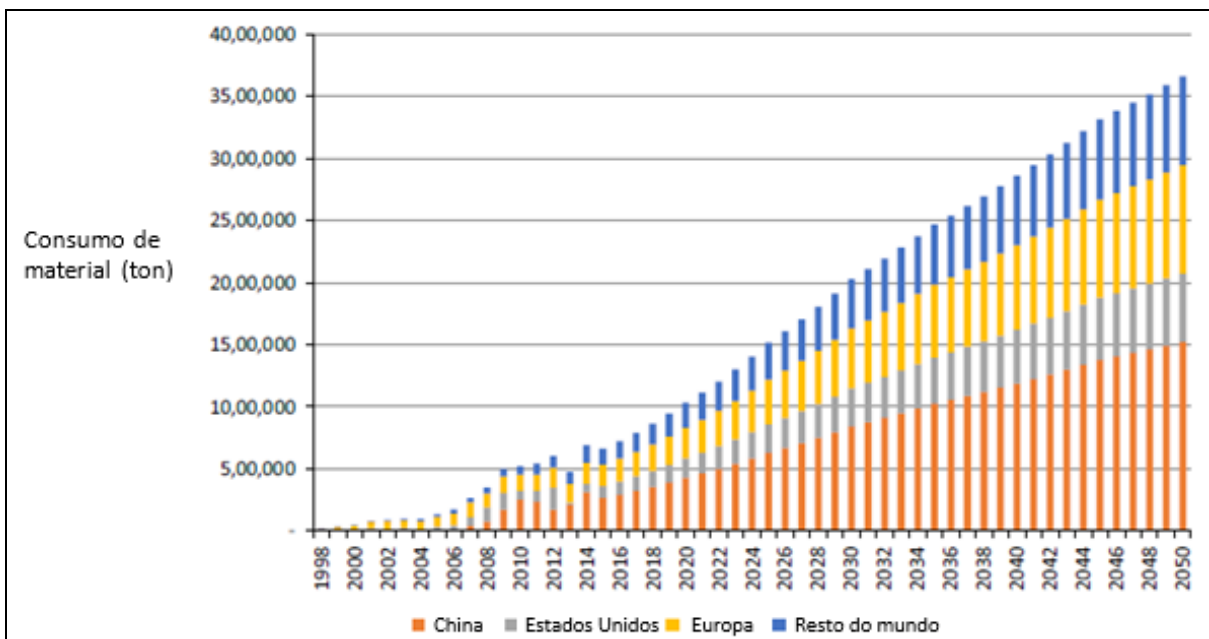


Fonte: GWEC: 2017.

Já as figuras 3 e 4 apresentam respectivamente as estimativas de demanda de material a ser consumido na produção de pás eólicas e de resíduos gerados a partir desta produção, ambas estendidas até o ano de 2050 (LIU, BARLOW, 2017).

No geral, estima-se que em 2050 para cada 1 tonelada de material utilizado na fabricação dos aerogeradores, será produzida em contrapartida 0,7 tonelada de resíduo, ou seja, somente no ano de 2050 está previsto o descarte de 2,5 milhões de toneladas de resíduos provenientes do segmento eólico, contra 3,5 milhões de toneladas de consumo de insumos para a produção e instalação de novos parques eólicos. Diante de um quadro alarmante como este, principalmente se considerada a origem complexa destes materiais, uma vez que possuem estruturas de difícil tratativa, nas seguintes seções deste trabalho será feita análise do cenário atual de reciclagem no segmento.

FIGURA 3 – Consumo de material para fabricação de pás eólicas.

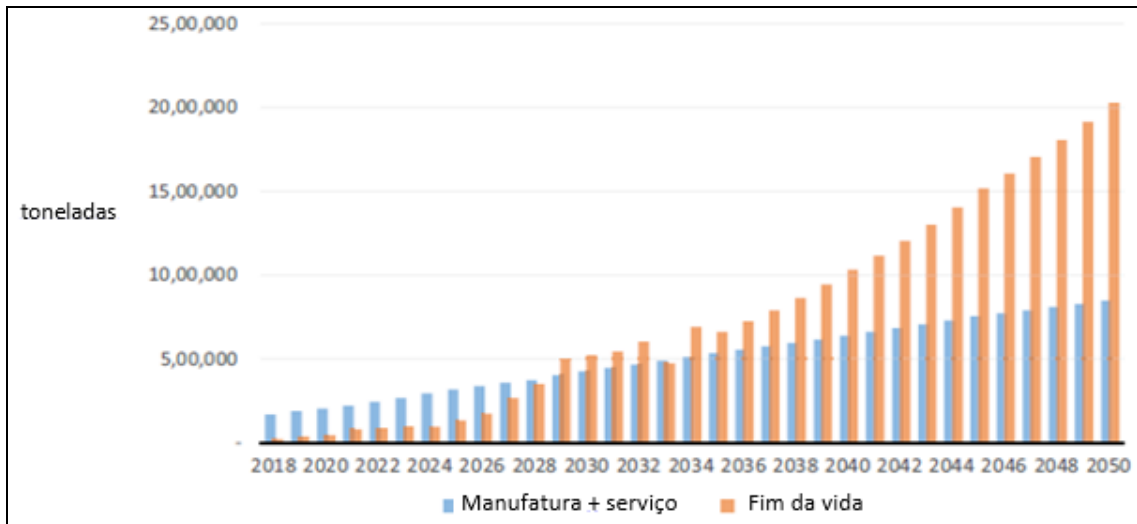


Fonte: LIU, BARLOW: 2017.

Na Figura 4 pode ser observada a natureza da geração dos resíduos de pás eólicas ao longo dos próximos 30 anos. Até o ano de 2020 predominam resíduos provenientes da manufatura e serviços relacionados à instalação e manutenção destes dispositivos, representando 85% do total gerado. Este dado justifica a utilização de resíduos de processos de fabricação nesta pesquisa, visto que até o momento o principal volume de descarte provém das fábricas. No entanto, este quadro tende a mudar e estima-se que em 2029 a quantidade de resíduos pós-consumo se iguale a de resíduos de produção (aproximadamente 500 mil

toneladas de cada tipo), superando-a nos anos seguintes, atingindo um percentual de 40 % do total gerado em 2050 (2,75 milhões de toneladas).

FIGURA 4 – Projeção de resíduos de pás eólicas até 2050.



Fonte: LIU, BARLOW: 2017.

3.1.1 Reciclagem de resíduos do segmento eólico

Através de estudos e pesquisas considera-se como as possibilidades de técnicas de reciclagem mais adequadas para compósitos de matriz polimérica termorrígida (um dos tipos de constituintes das pás eólicas), a reciclagem química, a reciclagem energética e a reciclagem mecânica.

Tanto a reciclagem química quanto a energética podem ser aplicadas em polímeros convencionais, tais como termoplásticos e elastômeros (RAMIREZ et al., 2017). Já a reciclagem mecânica é utilizada para polímeros termoplásticos fusíveis, que são diferentes dos polímeros termorrígidos utilizados na fabricação das pás eólicas.

▪ Reciclagem Energética

A reciclagem energética é a queima controlada de um material, que visa aproveitar a energia que ele oferece após uma reação de combustão, que quando completa, produz dióxido de carbono e água, sendo possível aplicar em qualquer polímero, como em outros materiais que contenham carbono, como papéis, vegetais, etc (CHERRINGTON et al., 2012).. No entanto, além de problemas ambientais causados pelos gases emanados, a queima de pás tem seus inconvenientes econômicos, pois a quantidade de fibras de vidro, equivale a

aproximadamente 70% não-combustível, e isso inviabiliza o retorno econômico de uma usina que visa obter calor para depois produzir eletricidade através do vapor da água, por exemplo.

As pás fabricadas atualmente possuem um potencial calorífico baixo, o que torna inviável sua utilização na reciclagem energética, porém estima-se que o teor de fibra possa diminuir ao longo dos próximos 50 anos, o que ainda representa pouco para tornar esse material um combustível atraente (CHERRINGTON et al., 2012).

▪ Reciclagem Química

A reciclagem química é aquela que emprega calor e agentes químicos com o objetivo de romper ligações intramoleculares ou intermoleculares. De acordo com o polímero e as condições de reação, pode ser gerada uma infinidade de produtos, que com o processo de decomposição química dará origem a moléculas menores, como líquidos combustíveis e gases que podem ser reaproveitados em outro processo químico (BEAUSON et al., 2016).

Para os termorrígidos, como o epóxi das pás de aerogeradores, o número de ligações cruzadas (*crosslinking*) é relativamente alto em relação a um elastômero, o que faz com que o rompimento destas ligações cruzadas dos termorrígidos seja bem mais complexo, quase impossível.

Na tentativa de aproveitamento dos termorrígidos, os esforços estão sendo voltados ao desenvolvimento da pirólise à vácuo, ou seja, onde o calor é o principal responsável pela quebra das ligações cruzadas. Em reações desse tipo, ligações intramoleculares também são quebradas e o produto final dificilmente é um monômero útil, mas geralmente um óleo ou gás de poder calorífico interessante para queimas posteriores (GUERRERO et al., 2011).

As principais vantagens da realização do processo de pirólise são as possibilidades de se recuperar as fibras presentes com maior qualidade, pois não foram submetidas a condições tão críticas de reação, como temperatura, oxigênio e outros reagentes. Já no caso de ser à vácuo, o menor tempo de residência do vapor no reator reduz a ocorrência e intensidade de reações secundárias, como a oxidação (GRECCO, MAFFEZZOLI, BUCCOLIERO, 2012).

▪ Reciclagem Mecânica

A reciclagem mecânica é feita com a trituração de resíduos de materiais compósitos que podem ser utilizados como carga de reforço em novas matrizes poliméricas, ou seja, os materiais reciclados passam por um processo de alteração física, em geral de estruturas sólidas para pó, provenientes de uma série de etapas operacionais de reaproveitamento.

A reciclagem mecânica consiste na conversão dos materiais pós-industriais ou pós-consumo descartados, podendo ser reutilizados na produção de novos produtos, como, pisos, embalagens não-alimentícias, entre outros usos. Para a fabricação de pás eólicas a incorporação de resíduos pode ser vista como uma opção, já que o processo de fabricação gera quantidade significativa de partículas que podem ser capturadas e classificadas. O grande desafio estaria na moagem e fragmentação adequada para redução de pedaços grandes de resíduos, como no caso da reciclagem de uma pá inteira, (BEAUSON et al., 2016).

O processo mecânico para propiciar o uso de um resíduo como carga de reforço é baseado na redução do tamanho ou imposição de grandes partes ou pedaços em frações menores. No caso de compósitos contendo fibras de vidro, o material é normalmente reduzido através do corte em baixa rotação dando origem a partículas que, posteriormente, precisarão ser classificadas pelo tamanho, (NOVAIS et al., 2017).

Este foi o tipo de reciclagem abordado neste trabalho, visto que os resíduos de tecidos de fibras de vidro foram recortados em pedaços menores (de acordo com as dimensões dos moldes) e, então, submetidos a processo de transferência de resina (R.T.M. – Resin Transferring Moulding) à vácuo com a finalidade de produzir um novo compósito.

3.1.2 Processos de reaproveitamento de resíduos do segmento eólico

A diretriz de aterro sanitário da UE (1999) estabelece metas para reduzir progressivamente o nível de resíduos biodegradáveis destinados a aterros sanitários e proíbe o descarte em aterro comum de certos resíduos perigosos, como resíduos líquidos, resíduos clínicos e pneus usados. Cada país interpreta de forma diferente as diretrizes para aplicar critérios e procedimentos para a aceitação de resíduos em aterros sanitários. Dessa maneira, materiais com alto conteúdo orgânico proveniente de resinas poliméricas, como as pás eólicas, que contêm cerca de 30% de conteúdo de matriz epóxi, torna-se necessário encontrar alternativas após o fim das suas vidas úteis, e é aí que surge o interesse na reciclagem deste tipo de material, (CHERRINGTON et al., 2012).

O termo reciclagem pode ser definido como uma operação de recuperação, através da qual os materiais residuais são reprocessados em produtos, materiais ou substâncias para serem utilizados em novas aplicações (ANDERSEN et al., 2014).

A reciclagem pode ser entendida como um processo de renovação, no qual as lâminas são retiradas, reparadas e reutilizadas, ou como uma operação de reprocessamento para extrair e reutilizar os diferentes materiais presentes nas pás em outros processos. A reciclagem

também pode significar a extração das fibras de vidro do compósito, a fim de reutilizar esses resíduos sólidos em novos compósitos poliméricos (ÅKESSON et al., 2012).

Técnicas para recuperar as fibras de vidro e a resina epóxi vêm sendo investigadas há cerca de 20 anos, sendo que algumas dessas técnicas já foram aplicadas em maior escala. Porém, sua viabilidade econômica ainda precisa ser provada e colocada em prática. Essas técnicas podem ser divididas em três categorias principais, baseando-se nos tipos de processos envolvidos, que são os processos mecânicos, térmicos e químicos (ANDERSEN et al., 2014).

3.1.2.1 Processo mecânico

O processamento mecânico é um método de descarte e reaproveitamento relativamente simples, que consiste no corte e moagem do material da composição das pás. Este processo demanda uma grande quantidade de energia e resulta em pedaços ou pequenas partículas de fibras de vidro. Porém essas partículas apresentam propriedades mecânicas pobres, devido ao menor comprimento e por terem sido submetidas à tamanha energia e cisalhamento durante seu processamento. Assim, tais partículas acabam sendo utilizadas apenas como material de “enchimento” nas indústrias do cimento e do asfalto. A Figura 5 mostra simplificada o material nas diferentes partes desse processo (RAMIREZ et al., 2017).

O baixo preço de mercado para materiais de reuso, o custo elevado das retificadoras e a grande quantidade de energia necessária para essas operações tem limitado o custo-benefício do uso desses compósitos termorrígidos (ANDERSEN et al., 2014). Além disso, a poeira emitida no processo de moagem das pás eólicas causa riscos à saúde e segurança dos trabalhadores que realizam o processo. O contato com essa poeira pode causar irritações na pele e olhos, em caso de inalação, o trabalhador pode sentir irritação nas membranas mucosas e tosse (BEAUSON, LILHOLT, BRØNDSTED, 2014).

FIGURA 5 – Esquema do processo mecânico.



Fonte: MAMANPUSH et al.: 2018.

A inalação e exposição prolongadas às partículas presentes na poeira podem causar alterações em componentes celulares e enzimáticos dos pulmões humanos, causando uma irritação pulmonar conhecida como alveolite aguda. Apesar de existirem vários recursos tecnológicos para minimizar os impactos negativos dessa exposição humana à poeira, como é o caso de tecnologias de filtração por sucção, umidificação do local de corte e o encapsulamento do processo de moagem, estes recursos tornam o processamento mecânico ainda mais caro, tornando seu custo benefício menor (RAMIREZ et al., 2017).

Por isso ainda é necessário que se realizem mais pesquisas sobre a eficácia dessas tecnologias que minimizam os impactos dessa exposição e sobre o risco de doenças respiratórias que estão relacionadas à exposição a partículas das fibras e da resina resultantes ou descartadas do processo (RAMIREZ et al., 2017).

3.1.2.2 Processo energético

A incineração das pás eólicas é um método de descarte com potencial para recuperação de material e energia, a incineração dos compósitos termorrígidos apresenta algumas vantagens, como economia de espaço físico no processo e de valor econômico, já que durante a queima, a resina age como um gerador de calor durante a recuperação da fibra de vidro. Uma vez que a fibra de vidro não atua como combustível, o valor calorífico irá depender da proporção de resinas poliméricas presentes (RAMIREZ et al., 2017).

Apesar de apresentar tais vantagens, há importantes fatores ambientais envolvidos nesse processo, a combustão dos compósitos reforçados com fibras de vidro é especialmente problemática, pois pode produzir gases tóxicos, fumaça e fuligem, que são prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos. Isso ocorre devido a problemas na etapa de limpeza dos gases, e é causado pela presença de pequenas frações de fibras de vidro e outros poluentes (CHERRINGTON et al., 2012).

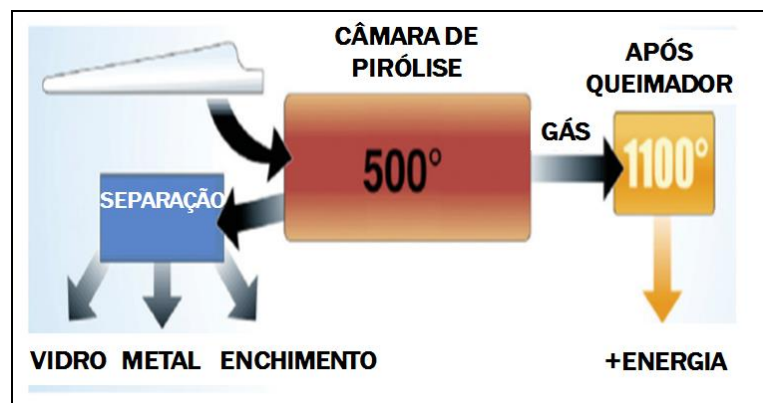
O monóxido de carbono e o formaldeído são resíduos da degradação térmica da resina epóxi, outro resíduo é o dióxido de carbono, apesar deste não ser tóxico, quando liberado na atmosfera pode contribuir para o aquecimento global, através do efeito estufa. Além disso, cerca de 60% da sucata permanece como cinzas poluentes após o processo de incineração, tendo que ser enviados para aterros adequados (RAMIREZ et al., 2017).

Outros métodos de processamento energéticos conhecidos são a Pirólise e a Combustão em Leito Fluidizado (FBC), estes processos visam a recuperação de ambos componentes, a fibra de reforço e a resina, porém também pode recuperar o calor de combustão através de um sistema de recuperação. O processo de pirólise decompõe a resina

ou matriz polimérica em substâncias de baixa massa molar, e isso ocorre em um ambiente sob condições controladas, onde não há presença de oxigênio (LARSEN, 2009).

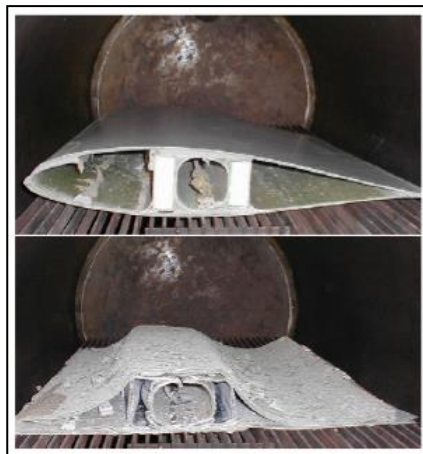
Na Figura 6 está apresentado um esquema do processo de pirólise, enquanto na Figura 7 é mostrado o “antes e depois” de uma pá eólica que passa por esse processo (LARSEN, 2009). A resina ou polímero degradado, que agora está em forma de moléculas menores, podendo ser um óleo, gás ou carvão sólido, poderá ser utilizado como fonte de energia em outros processos, enquanto a fibra de vidro é recuperada. A Combustão em Leito Fluidizado (FBC) é outro método que consiste em misturar o combustível e ar em uma proporção específica para obter a combustão (ANDERSEN et al., 2014).

FIGURA 6 – Esquema do processo de pirólise.



Fonte: LARSEN: 2009.

FIGURA 7 – Fotografias do “antes e depois” de uma pá eólica que passa pelo processo de pirólise.



Fonte: LARSEN: 2009.

Ambos processos recuperam fibras de vidro e de carbono (se for o caso) com certa degradação, no entanto, ainda podem ser utilizados para aplicações onde há menor demanda de resistência mecânica, como é o caso da aplicação como material de isolamento térmico. Porém existem certas limitações na viabilidade econômica, pois a FBC necessita de um mínimo de capacidade de produção de 10.000 toneladas/ano para ser economicamente viável. (ÅKESSON et al., 2012).

Comparando estes dois últimos processos descritos, o processo de pirólise apresenta melhores resultados quanto às propriedades mecânicas das fibras de vidro e carbono, pois há menor degradação delas, em relação ao processo de FBC, mas também produz resíduos e gases prejudiciais ao meio ambiente, incluindo o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), (ÅKESSON et al., 2012).

No entanto, esse processo ainda não é rentável, uma vez que todas essas técnicas de processamento térmico para as pás eólicas ainda exigem que haja a fragmentação do material em partes menores através de processamento mecânico antes de serem alimentadas nos reatores; aumentando dessa forma o custo, o consumo de energia e as emissões de dióxido de carbono durante todo o processo (RAMIREZ et al., 2017).

3.1.2.3 Processo químico

A reciclagem química consiste na despolimerização, com formação de monômeros ou outros tipos de radicais úteis em decorrência de degradações planejadas, apresentando como resultado a diminuição da massa molar dos produtos formados. Geralmente, esse processo pode ser dividido em dois tipos, a termólise e a solvólise. Sendo que a solvólise ocorre, principalmente, com o emprego de solventes para gerar a despolimerização. Enquanto na termólise, a estrutura química do polímero é degradada através do calor (GUERRERO et al., 2011).

A recuperação da fibra de vidro e da resina epóxi ocorre com a utilização de fluidos supercríticos. São fluidos que se encontram em temperatura e pressão logo acima do ponto crítico, no qual o fluido se apresenta em uma única fase, com características combinadas, como a massa específica do tipo de líquido, poder de dissolução, difusividade e viscosidade gasosa (BEAUSON et al., 2016).

As principais vantagens dessa abordagem são o potencial de recuperação da resina epóxi e a capacidade de preservar as propriedades mecânicas das fibras de vidro ao final do processo. Embora ainda não ocorram reciclagens químicas de polímeros termorrígidos em

nível industrial, alguns produtos químicos perigosos têm sido usados em desenvolvimento de testes, como é o caso do ácido nítrico e do paraformaldeído. A exposição a esses produtos químicos pode causar doenças respiratórias, em casos mais sérios, até cancer nasal, além de causar distúrbios dermatológicos graves. Apesar desse processo conseguir manter a propriedade mecânica dos materiais reaproveitados, os gases tóxicos que são liberados no processo acabam limitando sua atratividade (RAMIREZ et al., 2017).

3.1.3 Aplicações para os resíduos de pás eólicas

A maioria dos métodos para reciclagem de resíduos de pás eólicas foram desenvolvidos envolvendo processos químicos, térmicos ou mecânicos para a recuperação das fibras, como a trituração das fibras de vidro em pó ou pequenos fragmentos, para uso como enchimento na produção de novos materiais. Além disso, os resíduos de compósitos contendo fibras de vidro podem ser queimados a alta temperatura para produzir energia ou reduzir o volume de resíduos (YAZDANBAKHSI et al., 2018).

Entre os processos acima mencionados, a reciclagem mecânica das fibras de vidro é uma opção, pois tem a menor demanda de energia dentre os processos e não envolve processos químicos. A energia necessária para a reciclagem mecânica é entre 0,5% e 5% do que é necessário para reciclagem química e entre 0,4% e 16% da energia usada para reciclagem térmica (pirólise) (YAZDANBAKHSI et al., 2018).

Entre as alternativas propostas para a reciclagem dos resíduos de pás eólicas também apresenta-se a reutilização dos compósitos das lâminas trituradas implementadas para o reforço de novos compósitos poliméricos termorrígidos (BEAUSON et al., 2016).

No estudo inicial de BEAUSON (2014), os resíduos triturados das turbinas eólicas foram incorporados na fabricação de novos compósitos poliméricos termorrígidos, com matriz do tipo poliéster insaturado, através de um processo de infusão de vácuo, para que fosse permitida a fabricação de compósitos com uma quantidade controlada dos resíduos triturados.

Porém, esses compósitos apresentaram falhas prematuras como, por exemplo, grandes fissuras de descolamento na interface matriz / fibras das superfícies dos compósitos triturados. Indicou-se, então, que as baixas resistência e força de ruptura das composições foi devida à ligação insuficiente entre os componentes dos resíduos triturados e a nova matriz de poliéster. Para resolver este problema, a aplicação de um tratamento físico ou químico dos resíduos triturados ou o uso de uma resina alternativa, como epóxi, para melhorar a ligação pode ser investigada (BEAUSON et al., 2014). Com relação às fibras de vidro recuperadas, a extração em larga escala para recuperar todas as camadas de tecidos ou mantas de fibras de vidro e

transformar em um novo composto laminado pode ser relevante, especialmente se o redimensionamento for possível (BEAUSON et al., 2014).

Os resíduos das pás eólicas também podem ser utilizados como agentes de reforço na fabricação de polímeros inorgânicos, reduzindo assim os custos da produção de geopolímeros em comparação à utilização de outras fibras comerciais. O uso da fibra de vidro reciclada consegue controlar o desempenho mecânico dos polímeros inorgânicos, por exemplo, com maiores quantidades aumentando a resistência à compressão e à tração. Além disso, as fibras de vidro aumentam a ductilidade pós-fissuração dos polímeros inorgânicos, impedindo seu completo colapso, o que pode ampliar a faixa de aplicação do polímero inorgânico (NOVAIS et al., 2017).

Os resultados de um estudo da incorporação de partes de pás de turbinas eólicas mecanicamente recicladas em concreto, realizado por YAZDANBAKHSI, obteve materiais compostos de polímero reforçado com fibras de vidro processados mecanicamente em elementos delgados denominados “Agulhas”. Neste estudo, carcaças de pás eólicas foram usinadas originando pequenos corpos cilíndricos utilizados, posteriormente, como reforços na matriz de concreto. Na Figura 8 está apresentada uma fotografia de várias destas “agulhas” com diâmetro médio de 6mm e largura de 100mm. “Agulhas” eficientes podem ser produzidas selecionando materiais com alto módulo de Young e resistência à tração e ao cisalhamento; quando comparadas às fibras, constituem um número muito menor de elementos por volume; e possuem alta rigidez. Portanto, estas “agulhas” são menos propensas a se aglomerar e podem ser usadas em altas proporções volumétricas (YAZDANBAKHSI et al., 2018).

FIGURA 8 – “Agulhas” de compósitos, com as dimensões de 6mm de diâmetro e 100mm de comprimento, usinadas a partir de placas de pás eólicas.



Fonte: YAZDANBAKHSI et al.: 2018.

Estas “agulhas” foram usadas para substituir 5% e 10% do agregado graúdo, em volume, em misturas de concreto, as quais foram testadas para investigar uma série de propriedades importantes do concreto fresco e endurecido. Foi descoberto que as “agulhas” não afetam negativamente a estabilidade e a capacidade de trabalho do concreto fresco. Embora a incorporação das “agulhas” não tenha um efeito notável na resistência à compressão, tração e flexibilidade do concreto, resultaram em um aumento significativo na capacidade de absorção de energia (tenacidade) (YAZDANBAKHSH et al., 2018).

3.1.4 Segmento eólico e perspectivas de economia circular

O modelo tradicional de produção e serviços segue uma lógica linear ou “take-make-dispose”, em que os recursos naturais fornecem os insumos de fábrica para a conversão em produtos, geralmente, descartados após um único uso, muitas vezes de maneira inapropriada (ESPOSITO et al., 2018).

Neste cenário, a Economia Circular se apresenta como modelo alternativo de sustentabilidade que busca manter o fluxo de materiais e produtos em sua maior utilidade e valor por meio do redesign dos produtos e novos modelos de negócios. Utilizando uma abordagem mais holística, busca transformar os resíduos em novos recursos, o uso de energias renováveis, e a eliminação ou minimização de componentes tóxicos (BORSCHIVER, TAVARES, 2018).

Na indústria eólica os principais desafios no reaproveitamento dos resíduos concentram-se nas pás devido ao tipo de material utilizado em sua composição. No entanto, no estudo de economia circular devem ser considerados três parâmetros para tornar o negócio possível: desenvolver / possuir a tecnologia para a reciclagem, encontrar solução de desmonte e mercado para os componentes reciclados e identificação dos materiais e seleção do método de reciclagem (PERRY et al., 2012).

Os três principais caminhos identificados para tratativa dos resíduos da indústria eólica após fim do ciclo de vida são descarte em aterros sanitários, incineração ou reciclagem, este último pode ser dividido ainda em reciclagem mecânica, reciclagem química ou pirólise (PICKERING, 2006). Dentre estes métodos, descarte em aterro é o menos indicado por não possuir característica sustentável, seguido pela incineração, pois este também gera resíduos provenientes da queima das pás eólicas (cinzas) e muitas vezes acabam parando em aterros (JENSEN, SKELTON, 2018). Uma outra alternativa seria o reaproveitamento das pás em sua própria forma, ou seja, sem necessidade de reprocessamento ou transformação, nos casos de

substituição dos equipamentos ainda em seu tempo de vida útil por motivos de readequação tecnológica.

Embora estas soluções venham sido debatidas, grande parte trata-se de projetos, estudos ou testes pilotos de parcerias entre indústria, academia e instituições de pesquisa. Um estudo realizado entre os anos de 2012 a 2016, denominado Consórcio GENVIND – projeto apoiado pela Agência Nacional Dinamarquesa de Pesquisa e Inovação – teve como objetivo avaliar diferentes tecnologias de reciclagem de resíduos compósitos e demonstrar como podem ser reutilizados em uma nova gama de produtos e aplicações secundárias. A partir desta ideia, cinco possibilidades foram levantadas, conforme descrito na Tabela 1.

TABELA 1 – Alternativas de reintegração dos resíduos de pás eólicas em economia circular.

Alternativa	Escopo
Reuso	Demonstração de como a pá eólica pode ser reutilizada em sua forma original
Redimensionamento	Demonstração de como componentes padronizados ou customizados podem ser confeccionados a partir de pás eólicas numa aplicação secundária
Reciclagem	Demonstração de como material reciclado pode ser utilizado em aplicações secundárias como agregados
Recuperação	Demonstração de como processos de tratamento de resíduos, como glicólise e solvólise, podem ser utilizados para extrair fibras e resina mantendo certa qualidade
Conversão	Demonstração de como converter o material compósito em novos materiais para outras aplicações

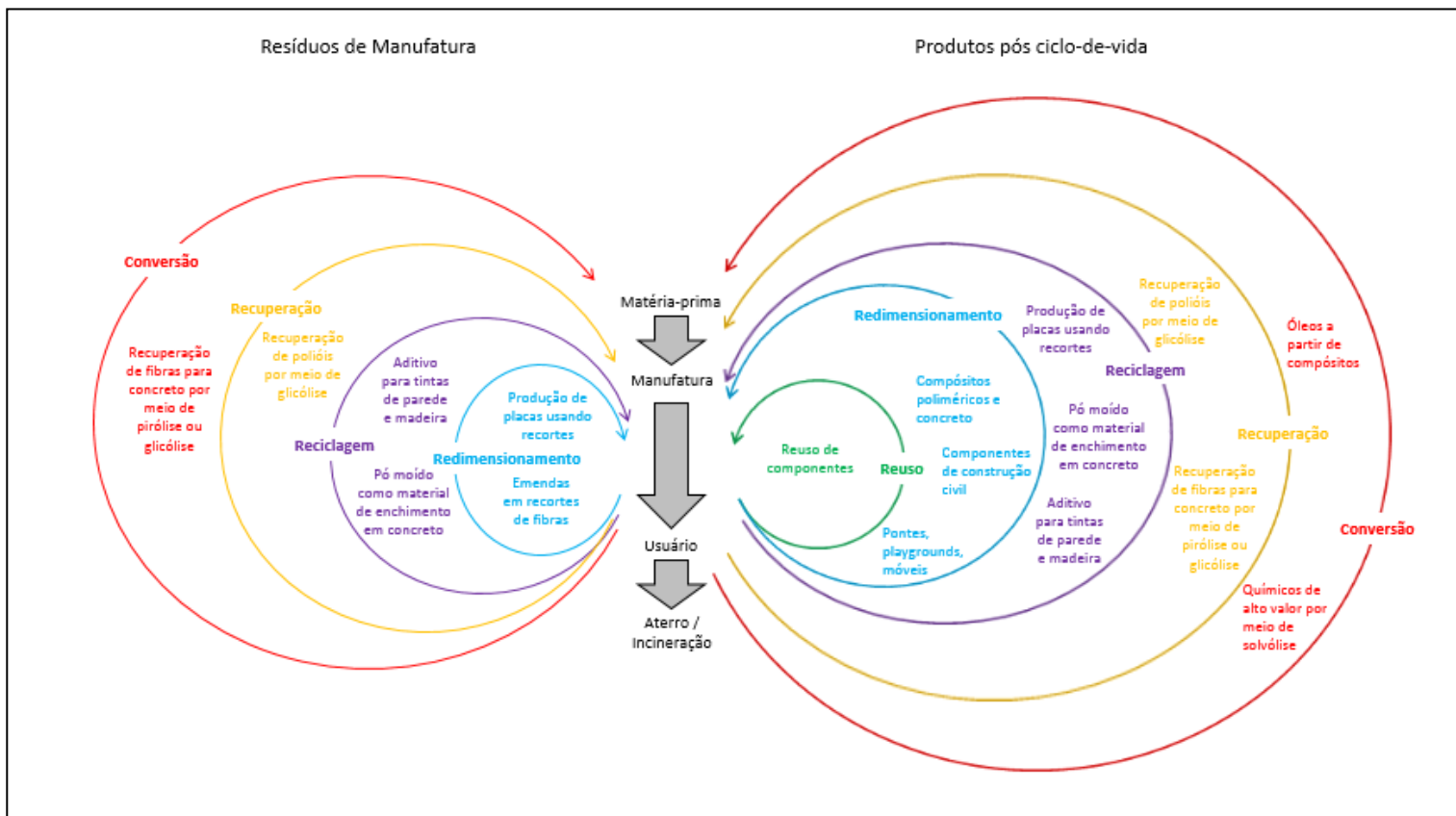
Fonte: Adaptado de JENSEN, SKELTON: 2018.

A Figura 9 propõe um esquema de economia circular para os resíduos provenientes do segmento eólico, considerando as alternativas de reintegração destes à cadeia produtiva. O esquema divide os resíduos em dois tipos: manufatura e fim de ciclo-de-vida. Aqui será dada ênfase ao primeiro tipo, visto que os materiais utilizados nesta pesquisa provêm desta origem.

Resumidamente, a Figura 9 descreve os quatro caminhos que os resíduos podem percorrer após a manufatura primária na economia circular. O primeiro deles é o redimensionamento, onde novos componentes são originados a partir do corte e usinagem das

pás eólicas. A segunda alternativa é a reciclagem, onde os resíduos (geralmente triturados) podem ser utilizados como enchimento em compósitos ou aditivos em tintas. A terceira opção é a recuperação, em que há extração das fibras e resina por processos de tratamento, possibilitando novo uso. E, a última possibilidade é a conversão, em que o compósito é convertido em produtos químicos e materiais secundários como um subproduto para uma nova finalidade.

FIGURA 9 – Esquema de economia circular para GFRP.



Fonte: Adaptado de JENSEN, SKELTON: 2018.

Nas seções seguintes, serão contextualizados alguns materiais utilizados na produção de pás eólicas e que são objetos de estudo desta pesquisa.

3.2 Compósitos

Os compósitos destacam-se entre os materiais de engenharia em razão de características como facilidade de processamento, elevada rigidez, resistência mecânica e o baixo peso específico dos compósitos de matriz polimérica. Material compósito,

conceitualmente, resulta da combinação de dois ou mais materiais em escala macroscópica que dão origem a um terceiro material. Alguns exemplos tradicionais são os compósitos fibrosos, que resultam da dispersão de fibras numa matriz. Um dos principais motivos para as excelentes propriedades dos compósitos fundamenta-se no fato de que as fibras adicionadas a uma matriz polimérica qualquer, geralmente, promovem propriedades mecânicas superiores aos materiais constituídos apenas pelo polímero, (LOPES, 2009; BANDYOPADHYAYA et al., 2011; BEDON, LOUTER, 2019).

A maioria dos compósitos consiste num material base, designado por matriz, que confere estrutura ao compósito e preenche os espaços vazios, e um material de reforço que promove as propriedades mecânicas, apresentando-se geralmente na forma de fibras. As principais propriedades que podem ser alcançadas com um material compósito caracterizam-se por uma elevada resistência, rigidez, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, baixo peso, resistência à fadiga, isolamento térmico, condutividade térmica e isolamento acústico. Nos casos das pás eólicas, o material base é uma matriz polimérica e o material de reforço geralmente é constituído por fibras de vidro, (BALOKAS, THEOTOGLOKOGLOU, 2017).

3.3 Polímeros

Polímeros são agrupamentos de monômeros (pequenas moléculas, contendo carbono, hidrogênio, além de outros elementos químicos) que ao se ligarem através do processo de polimerização originam macromoléculas. Os polímeros podem ser naturais – aqueles derivados de animais e plantas – ou podem ser sintetizados artificialmente através da manipulação de moléculas orgânicas, sendo denominados polímeros sintéticos. Assim, os polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, sua estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas que são unidas por ligações covalentes, que se repetem ao longo da cadeia. Eles podem ser naturais, como a seda, a celulose, as fibras de algodão, etc., ou sintéticos, como o polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET), o polietileno (PE), o poli (cloreto de vinila) (PVC), etc., (SPINACÉ, DE PAOLI, 2005).

Os polímeros são classificados em duas categorias: termoplásticos e termorrígidos, em função do comportamento apresentado quando submetidos à elevação de temperatura.

Os termoplásticos amolecem e fundem quando são aquecidos e endurecem quando são submetidos ao resfriamento – processos que para os termoplásticos são reversíveis. No entanto, os polímeros termorrígidos são polímeros que formam uma espécie de rede tridimensional, com ligações entrecruzadas (PITT, BOING, BARROS, 2011). Eles se tornam

permanentemente rígidos após a polimerização e não amolecem com um aquecimento subsequente, (CALLISTER, 2011).

Do mesmo modo que o advento dos polímeros sintéticos na sociedade moderna impulsionou a indústria como um todo, trazendo consigo diversos benefícios para o desenvolvimento das nações, inclusive com significativa melhora na qualidade de vida da população, a utilização em larga escala destes materiais deixa rastros no meio ambiente. Milhares de toneladas de “plástico” são produzidas diariamente com o intuito de substituir outras milhares já consumidas e que serão descartadas, abarrotando os aterros sanitários mundo afora e, na pior das hipóteses, os rios, mares, matas e afins. A partir do descarte inadequado de lixo, mais especificamente dos resíduos sólidos, muitos impactos negativos são gerados ao meio ambiente. O descarte desses resíduos em fundos de vale, margens de rua ou cursos d’água podem ocasionar a contaminação dos corpos hídricos, enchentes, assoreamento, proliferação de vetores transmissores de doenças, etc., (MUCELIN, BELLINI, 2008).

O consumo mundial de polímeros sintéticos cresceu exponencialmente desde o início de sua utilização expressiva em meados de 1950 até a última década, partindo de 1,7 milhão de toneladas para atuais 350 milhões fato que põe o planeta em estado de alerta, (LEBRETON, ANDRADY 2019; BOUCHER, BILLARD, 2019; HEIDBREDER et al., 2019).

O grande problema concentra-se no descarte dos polímeros sintéticos, uma vez que não são biodegradáveis e quando lançados na natureza, permanecem por aproximadamente 400 anos. Tais polímeros são apontados como um dos “vilões” do impacto sobre o meio ambiente, por serem, principalmente, oriundos de fontes não renováveis e de reduzida capacidade de degradação biológica, uma vez que o tempo de degradação destes é muito longo (PITT, BOING, BARROS, 2011). Com isso, a preocupação com a poluição causada pelos polímeros tornou-se assunto recorrente em diversos fóruns ambientais internacionais. E, utilizar-se da reciclagem como destinação pós-consumo para estes produtos é uma forma eficaz de minimizar os impactos ambientais atrelados ao seu consumo.

A reciclagem dos polímeros pode ser realizada mecânica ou quimicamente. A reciclagem mecânica é feita por processo de moagem do resíduo plástico que será convertido em grânulos a serem reinseridos nos processos fabris dando origem a novos produtos. A transformação mecânica em novos materiais ou produtos, consiste em submeter os materiais plásticos a processos mecânicos, moldando-os fisicamente em uma forma diferente da original, (FORLIN, FARIA, 2002). A reciclagem química, por sua vez, é realizada pela inserção de reagentes químicos nos polímeros a fim de recuperarem-se as resinas que os

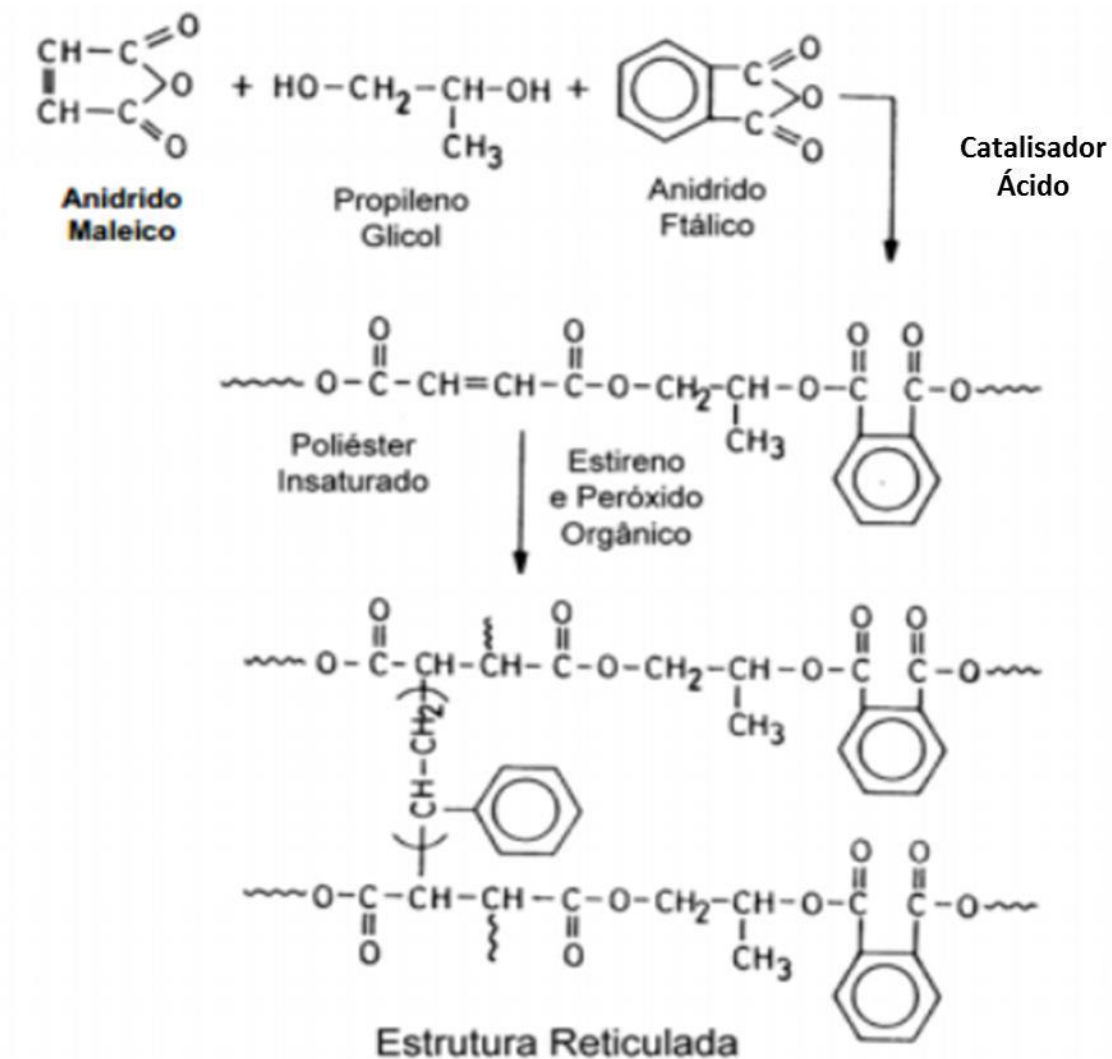
compõem. Estes se mostram como uma alternativa bastante interessante, pois permitem obter novos materiais variando o teor de cada componente, modificando as propriedades mecânicas, térmicas e a taxa de biodegradabilidade, (BALDISSERA, PEZZIN, 2005).

3.3.1 Resina poliéster insaturada (RPI)

De acordo com o ácido adicionado durante a síntese da resina poliéster, elas podem ser classificadas como insaturadas ou saturadas. As RPIs possuem em sua estrutura química geométrica cadeias curtas de poliésteres, que contém duplas ligações polimerizáveis e de um diluente reativo (monômero vinílico), e pertencem ao grupo dos termofixos ou termorrígidos (MAZUMDAR, 2002). As RPIs são polímeros de condensação, que são formadas através da reação entre glicóis com o ácido ftálico e o ácido maleico. Nesse processo há a produção de água como subproduto da reação de esterificação, porém ela é removida durante a reação. O estireno é o monômero vinílico mais utilizado para obter um poliéster insaturado; e atua como solvente na reação para o poliéster, reduzindo dessa forma a viscosidade do produto. Além disto, o estireno também atua como agente de copolimerização no processo da cura. A reação de cura consiste na copolimerização do monômero vinil com a dupla ligação do poliéster que forma uma rede tridimensional (FINK, 2006). Esse esquema da reação é apresentado na Figura 10.

As RPIs são os termorrígidos de maior abrangência no que se diz respeito às aplicações industriais, estando presentes nos mais variados ramos da indústria, como na aviação, marinha, automobilística, onde atuam como substitutos de outros materiais convencionais. Também estão presentes em construções industriais devido as suas ótimas propriedades mecânicas, especialmente quando são reforçadas com fibras ou cargas, pois seu custo é baixo e apresenta uma processabilidade muito mais eficaz (BASKARAN, SAROJADEVI, VIJAYAKUMAR, 2011; LEE, 2004; ROT et al., 2001).

FIGURA 10 - Esquema representativo de uma estrutura reticulada da RPI sintetizada a partir de um glicol e anidridos.



Fonte: REIS: 2016.

Um dos desafios na utilização da RPI está relacionado ao acabamento superficial dos componentes fabricados não atingirem um nível desejado de qualidade, pois durante o processo da cura das resinas termorrígidas ocorre a contração da peça. Algumas alternativas para tentar contornar essa situação e impedir que haja essa contração decorrente da cura é adotar o uso de aditivos de baixa contração, além de utilizar materiais termoplásticos adicionais nas resinas termorrígidas de maneira inerte, ou seja, não reativa (HAIDER, HUBERT, LESSARD, 2007).

3.4 Fibras de vidro

As fibras de vidro são conhecidas por seus diversos tipos de componentes, entre eles estão a sílica, o oxinitrito e o fosfato. Dentre os tipos citados, a sílica é a mais usual e importante para obter fibras para utilização em compósitos, já que suas fibras são produzidas com certa facilidade. Isso geralmente ocorre através do aquecimento do vidro somado à moldagem por forças gravitacionais com o auxílio de um mandril de platina ou feira. O mandril contém aproximadamente 200 canais, onde são feitas simultaneamente 200 fibras com 10 microns de diâmetro (MATTHEWS, RAWLINGS, 1994).

A fibra de vidro é amplamente utilizada por motivos variados (CALLISTER, 2002), como por exemplo: pela facilidade de obtenção de fibras de alta-resistência a partir do estado fundido, devido a sua obtenção a partir de diversas técnicas industriais, que são economicamente viáveis; devido as fibras possuírem considerável resistência, e quando são embutidas em matrizes de plástico geram compósitos com alta resistência à tração, além de inércia química.

Os compósitos poliméricos que são reforçados com fibras de vidro são normalmente denominados por PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) e possuem as seguintes características: baixo peso, custo inferior ao de ligas metálicas, propriedades mecânicas satisfatórias para aplicações estruturais, resistência química a ambientes agressivos, dispensando revestimento ou qualquer proteção anticorrosiva. Além disto, os PRFVs apresentam manutenção simples e de baixo custo, podendo ser moldados com detalhes complexos, sem emendas e ainda podem ser modificados em campo com ferramentas simples (BIRYUKOVICH, 1994). LOPES (2009) destaca ainda outras características das fibras de vidro, em relação às elevadas propriedades mecânicas, como resistência à tração, à flexão, ao impacto, elevada dureza, baixo coeficiente de dilatação térmica, baixa absorção de água, elevadas resistências à oxidação e, geralmente, nenhuma restrição quanto ao tamanho e ao formato da peça, além de ótimo acabamento superficial.

O PRFV tem alta resistência à tração, flexão e impacto, sendo muito empregado em aplicações estruturais. É leve e não conduz corrente elétrica, sendo utilizado também como isolante elétrico e estrutural. Permite ampla flexibilidade de projeto, possibilitando a moldagem de peças complexas, grandes ou pequenas, sem emendas e com grande valor funcional e estético. Assim, as fibras de vidro representam um dos materiais industriais mais versáteis, ocupando uma posição distinta devido à sua alta resistência e baixo custo de produção (ITAM et al., 2018).

A direção particular dada à fibra no compósito, será responsável pela determinação do comportamento das propriedades da peça como, por exemplo, se as fibras de vidro forem inseridas na direção onde há a aplicação da carga, gera um aumento em sua resistência a cargas específicas. Já se forem inseridas aleatoriamente (*randomly*) na composição, serão responsáveis por distribuir a resistência mecânica de maneira uniforme em todas as direções do compósito (CHEREMISINOFF, 1995).

Dentre os tipos de fibras de vidro existentes, os mais utilizados são do tipo E (E-glass) e do tipo S (S-glass). A fibra do tipo E é obtida através de uma mistura de óxidos de Si, Al, B, Ca e Mg resultando, por exemplo, em borossilicato de alumina, cálcio e magnésio. Tais fibras são comumente utilizadas como reforços em termoplásticos, devido ao baixo custo, se comparados a aramida e o carbono, e apresentando resultados com a melhoria de algumas propriedades dos materiais, como a resistência ao impacto e rigidez (WAMBUA et al., 2003; LARENA et al., 1992). Já as fibras do tipo S são baseadas no sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ e possuem alta resistência, se comparados com as fibras do tipo E, além de suas propriedades serem mantidas em altas temperaturas (MATTHEWS; RAWLINGS, 1994). A Tabela 2 apresenta algumas propriedades das fibras do tipo E e do tipo S.

TABELA 2 – Características das fibras de vidro dos tipos E e S.

Tipo	Resistência à tração MPa	Módulo elasticidade GPa	Massa específica (g/cm³)
E-glass	3450	72,5	2,54
S-glass	4480	85,6	2,49

Fonte: DANIEL, ISHIA: 1994.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

A pesquisa foi realizada com materiais provenientes da indústria Wobben, localizada na cidade de Sorocaba, que é uma das fabricantes de pás para turbinas eólicas. A empresa forneceu alguns resíduos gerados em seus processos de fabricação, dentre eles filmes poliméricos de bolsas de infusão à vácuo, utilizadas para infusão da matriz polimérica constituinte das pás eólicas; e também resíduos de fibras de vidro.

O estudo contemplou três tipos de resíduos oriundos do processo de fabricação de pás eólicas, sendo um deles resíduo de processo – filme plástico (com espessura de aproximadamente 0,05mm) de bolsa de vácuo – e os demais, resíduos de matéria-prima – manta de fibras de vidro costurada e manta de fibra de vidro aleatória.

A identificação do resíduo de filme plástico (Figura 11) foi feita em princípio pela avaliação de *data sheet* de um fornecedor deste tipo de matéria-prima encontrado por mecanismo de busca da Internet. Isto se deve ao fato de que a empresa doadora dos resíduos não disponibilizou informação técnica do filme polimérico.

A pesquisa retornou dois tipos de filme plástico (polimérico): um para operação em temperaturas de até 180°C e outro para temperaturas de até 240°C, ambos caracterizados como poliamida (nylon). Estas informações foram utilizadas para planejamento dos testes de moldagem com a finalidade de identificar se resíduo polimérico pertencia a algum dos tipos encontrados no *data sheet*.

FIGURA 11 – Filme plástico de infusão a vácuo: (a) recebido, sem condicionamento; (b) após condicionamento de 24 h dentro do molde.



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

Os resíduos de manta de fibras de vidro costuradas (Figura 12) utilizadas na preparação dos compósitos foram de dois tipos: resíduos de processo de fabricação (rebarbas de tecidos com dimensões inadequadas ao uso) e resíduos de material recusado por não-conformidade técnica.

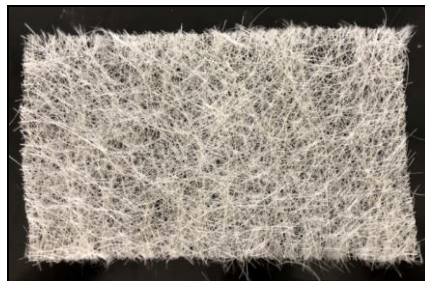
FIGURA 12 – Manta de fibra de vidro costurada.



Fonte: próprio autor.

Os resíduos de manta de fibras de vidros aleatórias utilizadas (Figura 13) também se originaram de sobras de processo da produção das pás eólicas.

FIGURA 13 – Manta de fibra de vidro aleatória.



Fonte: próprio autor.

TABELA 3 – Características dos tecidos.

Tecido	Dimensões dos tecidos		Gramatura	Sentido das fibras
	Flexão	Tração		
Costurado	190 x 165mm	300 x 300mm	1200 g/m ²	unidirecional
Aleatório	190 x 165mm	300 x 300mm	300 g/m ²	aleatório

Fonte: próprio autor.

O sistema de resina polimérica escolhido para a confecção dos compósitos foi a resina poliéster Arazyn 13.0, indicada para aplicação no processo RTM (Resin Transferring Moulding) light (sem pressurização).

Adicionalmente foi utilizado o catalisador do tipo Butanox 1150 como agente de cura no compósito, na proporção de 1,2% na mistura.

4.2 Métodos

Em razão dos diferentes tipos de resíduos de produção de pás eólicas coletados, o estudo foi dividido em duas formas de moldagem:

- Moldagem a quente em prensa hidráulica, para o filme polimérico de bolsa de vácuo;
- Moldagem RTM, para as mantas de fibras de vidro.

Os resultados são apresentados distintamente uma vez que não foi encontrada solução para utilizá-los em conjunto, pois o filme polimérico e as fibras de vidro não apresentaram adesão adequada um ao outro.

As placas do filme plástico foram processadas em moldagem por compressão a quente, utilizando molde metálico retangular padronizado (Figura 14) para utilização em uma prensa hidráulica Marconi modelo MA 098/A, disponível no laboratório LECSMat da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.

FIGURA 14 – Molde metálico utilizado na prensa hidráulica.



Fonte: próprio autor.

Inicialmente foi necessário o cálculo do volume do molde para identificar a quantidade de material a ser utilizada para seu preenchimento. As dimensões do molde são 180mm de

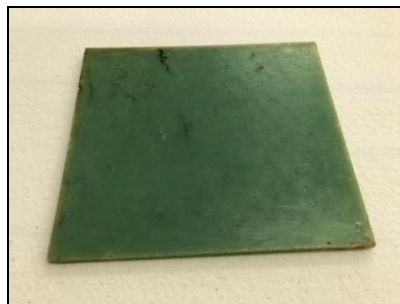
comprimento x 160mm de largura x 5mm de profundidade. O resultado obtido foi de aproximadamente 144cm³.

A partir deste dado foi possível calcular o volume de material necessário a ser colocado na moldagem. Como a massa específica conhecida do filme era de 1,0g/cm³, foram necessárias 144g para preenchimento do molde. Sendo assim, utilizou-se aproximadamente 150g de resíduo em cada teste.

Os resíduos de filmes poliméricos foram cortados nas dimensões do molde, distribuídos em camadas dentro dele e processados em moldagem por compressão a quente. Para a moldagem das placas foi utilizada uma prensa hidráulica, marca Marconi, modelo MA 098/A, disponível no laboratório LECMat da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.

Foram realizados diversos testes de moldagem. O primeiro teste de moldagem por compressão a quente foi realizado à temperatura de 200°C±5°C a fim de identificar se o resíduo de filme plástico correspondia ao produto da classe 180°C registrado em um *Data Sheet*. O teste retornou um resultado inadequado, pois o filme não fundiu. Posteriormente, a temperatura de moldagem foi regulada em 260±5°C, considerando o produto da classe 240°C, e desta vez o resultado foi adequado. O tempo total de moldagem foi de 40 minutos, onde durante os 20 primeiros minutos manteve-se o molde semiaberto (cerca de 10mm do fechamento completo) e nos minutos restantes o molde foi fechado totalmente, com a força de moldagem de 6 toneladas.

FIGURA 15 – Placa do polímero moldada na prensa hidráulica.



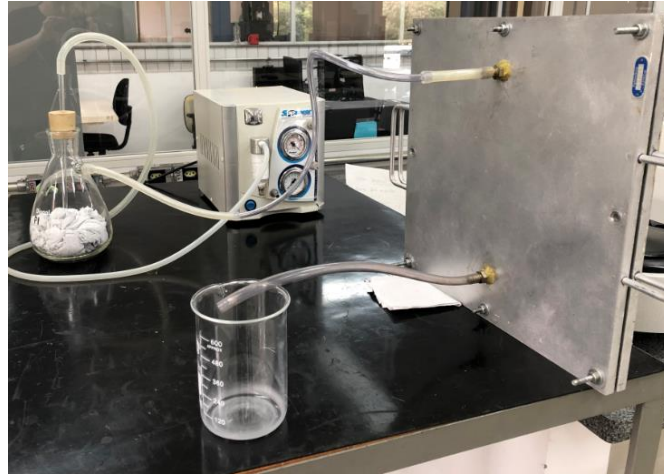
Fonte: próprio autor.

Após as moldagens, as placas foram cortadas com serra fita em corpos de prova para a realização de ensaios mecânicos de flexão e de impacto.

A moldagem do tipo RTM foi realizada por transferência de resina com uso de bomba de vácuo (Figura 16). Nos processos foram utilizados dois tamanhos de moldes, sendo um

para confecção das placas para cortar corpos de prova para os ensaios de flexão e o outro para cortar corpos de prova para ensaio de tração.

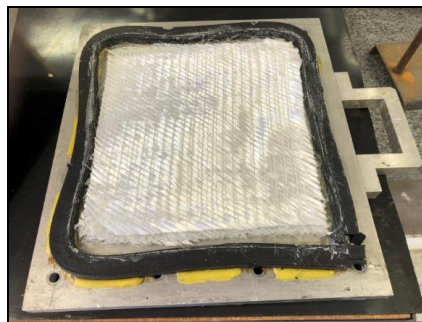
FIGURA 16 – Sistema de moldagem por RTM.



Fonte: próprio autor.

Neste caso, as laterais dos moldes RTM (Figura 17) não são padronizadas e suas dimensões são delimitadas manualmente por fita selante e borracha do tipo vedação.

FIGURA 17 – Molde RTM.



Fonte: próprio autor.

A próxima etapa envolveu os cálculos das dimensões e volume do molde para identificar as medidas dos tecidos de fibra de vidro e quantidade de matriz polimérica a serem utilizadas para seu preenchimento. As dimensões delimitadas no molde foram:

- Molde para ensaio de flexão: 190mm de comprimento x 165mm de largura x 4mm de profundidade;

- Molde para ensaio de tração: 300mm de comprimento x 300mm de largura x 4mm de profundidade;

Os resultados obtidos foram de aproximadamente 125,4cm³ e 360cm³, para os moldes de flexão e tração, respectivamente.

A partir destes dados foi possível calcular o volume de matriz polimérica necessária para a moldagem. Como a massa específica conhecida da resina era de 1,1g/cm³, foram necessárias 137,9g para preenchimento do molde de flexão e 396g para tração. Foi utilizado, em todos os casos, um fator de segurança de 15% sobre estas medidas a fim de evitar possíveis erros e perdas durante o processo de moldagem por R.T.M. Assim, a composição da matriz polimérica ficou definida como citada na Tabela 4.

TABELA 4 – Composição da matriz polimérica.

Matriz polimérica				
Molde	Quantidade (g)	+15% (g)	Resina (g)	Catalisador (1,2%) (g)
Flexão	137,9	160	158,08	1,92
Tração	396	460	454,48	5,52

Fonte: próprio autor.

O percentual de catalisador indicado para compor a matriz polimérica foi definido a partir de testes de polimerização feito em béqueres nas proporções de 0,8%, 1,0% e 1,2%. O melhor resultado apresentado foi com a utilização de 1,2% de catalisador, pois o tempo aproximado de polimerização foi de 1,5h. Os demais testes demoraram mais de 2,5h para polimerizar, além disso apresentaram superfície não totalmente polimerizada.

Adicionalmente, os tecidos de fibras de vidro costurados e aleatórios foram cortados nas dimensões definidas dos moldes, ou seja, 190mm x 165mm e 300mm x 300mm e, posteriormente, arranjados segundo critérios estabelecidos no estudo e descritos nas seções seguintes.

A obtenção das placas de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro iniciou-se com o corte das mantas costurados e aleatórias nas dimensões dos moldes. As mantas utilizadas não sofreram qualquer espécie de tratamento ou secagem para evitar adição de mais etapas no processo de moldagem.

As mantas foram posicionadas nos moldes em camadas intercaladas em cinco arranjos distintos, cada formação representando um compósito diferente (Tabela 5). Visando atender as normas técnicas de ensaio mecânico foram utilizadas 3 e 4 camadas de tecidos, limitadas pela espessura da placa.

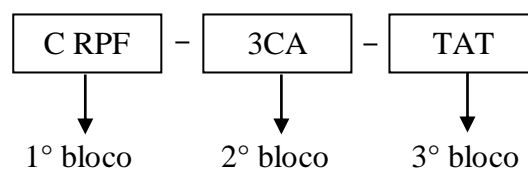
TABELA 5 – Distribuição (arranjo) das mantas de fibras de vidro nos compósitos.

Distribuição das camadas de fibras de vidro					
Tipo	Nº camadas	1ª camada	2ª camada	3ª camada	4ª camada
Arranjo 1	3	costurado	aleatório	costurado	---
Arranjo 2	3	aleatório	costurado	aleatório	---
Arranjo 3	4	costurado	aleatório	costurado	aleatório
Arranjo 4	4	costurado	aleatório	aleatório	costurado
Arranjo 5	4	aleatório	costurado	costurado	aleatório

Fonte: próprio autor.

Para cada condição da Tabela 5 foram confeccionados e testados dois tipos de compósitos: um deles utilizando resíduos de manta de fibras de vidro costuradas provenientes de sobras de processo de fabricação (denominados de C RPF no estudo), e o outro, de material não-conforme (denominados de C RNC).

Para melhor elucidação, a nomenclatura dos corpos-de-prova das diferentes combinações está descrita por três blocos de letra + número que indicam a qual arranjo e compósito se referem, conforme exemplo a seguir:



Onde:

- 1º bloco: indica o tipo de compósito quanto à natureza do resíduo, se de processo de fabricação (C RPF) ou não-conforme (C RNC);
- 2º bloco: indica o número de camadas utilizado no compósito, se 3 camadas (3CA) ou 4 camadas (4CA);
- 3º bloco: indica posição (arranjo) dos tecidos de fibras de vidro no compósito, em que T representa tecido costurado e A, manta aleatória.

Estes arranjos foram elaborados a fim de se verificar o comportamento mecânico dos compósitos mediante variação do posicionamento dos tecidos dentro dele, bem como desempenho no processo de RTM.

A matriz polimérica em forma líquida (resina poliéster) foi pesada de acordo com o volume útil dos moldes e aplicada nas mantas de fibras de vidro pelo processo de transferência de resina (RTM), que consistiu na sucção de uma resina polimérica para dentro do molde, com utilização do valor de vácuo de, aproximadamente, 200 mm Hg, infiltrando o reforço fibroso disposto dentro dele.

O tempo de cura da matriz (resina poliéster) dos compósitos foi de 24h dentro do molde RTM fechado em temperatura ambiente, resultando em placas (Figura 18).

FIGURA 18 – Placas moldadas para cortar os corpos de prova para: (a) ensaio de flexão, (b) ensaio de tração.



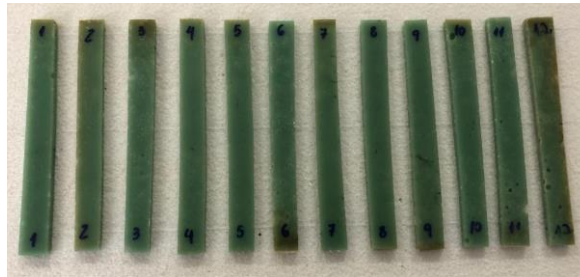
Fonte: próprio autor.

4.3 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram realizados nas amostras de placas do polímero de bolsa de vácuo e nos compósitos reforçados com fibras de vidro, segundo critérios da norma ASTM 790 (2002), em equipamento de ensaios mecânicos da marca EMIC, modelo DL 10000, com célula de carga de 500 kgf, no laboratório LECMat da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.

As placas de polímero moldadas foram cortadas, com serra fita, em 12 corpos-de-prova (cdp) de dimensões 127mm x 12,7mm (Figura 19) para realização dos ensaios de flexão.

FIGURA 19 – Corpos-de-prova para ensaio de flexão.



Fonte: próprio autor.

O cálculo da velocidade de ensaio foi feito de acordo com a Equação 1.

$$R = \frac{Z \cdot L^2}{6d} \quad (1)$$

onde:

R = velocidade (mm/min)

Z = constante = 0,01

L = distância entre apoio = 16 x espessura da amostra (mm)

d = espessura média (mm).

A espessura média encontrada com uso de paquímetro digital foi de 5,0mm. Sendo assim, a velocidade de deslocamento no equipamento EMIC foi de 2,13 mm/min.

As placas dos compósitos foram cortadas, com serra fita, em 9 corpos-de-prova (cdp) de dimensões 127mm x 12,7mm (Figura 20).

FIGURA 20 – Corpos-de-prova para ensaio de flexão.



Fonte: próprio autor.

O cálculo da velocidade de ensaio foi realizado utilizando-se a Equação 1. A espessura média encontrada com uso de paquímetro digital foi de 3,9mm. Sendo assim, a velocidade de deslocamento no equipamento EMIC foi de 1,65 mm/min.

4.4 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi realizado nas amostras do polímero de bolsa de vácuo em equipamento de impacto pendular da marca Instron, modelo CEAST 9050, com martelo de 1J na configuração IZOD segundo critérios da norma ASTM D256 (2008), no laboratório da empresa Sinctronics, em Sorocaba.

As placas de polímero moldadas foram cortadas, com serra fita, em 10 corpos-de-prova (cdp) de dimensões 63,5mm x 12,7mm (Figura 21). Na sequência os cdps foram submetidos a usinagem para reduzir a espessura de 5mm (padrão do molde) para 4mm (limitação do equipamento de impacto). Após isso, os corpos de prova foram entalhados em 2,54mm no formato “V”.

FIGURA 21 – Corpos-de-prova para ensaio de impacto.



Fonte: próprio autor.

4.5 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados nas amostras dos compósitos reforçados com fibras de vidro, segundo critérios da norma ASTM D3039 (2002), em equipamento da marca EMIC, modelo DL 30000, com célula de carga de 2.000 kgf no laboratório LECMat da Universidade Federal de São Carlos / campus Sorocaba.

As placas dos compósitos foram cortadas, com serra fita, em 7 corpos-de-prova (cdp) de dimensões 250mm x 25mm (Figura 22).

FIGURA 22 – Corpos-de-prova para ensaio de tração.



Fonte: próprio autor.

4.6 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A caracterização morfológica dos corpos de prova do polímero de bolsa de vácuo e dos compósitos reforçados com fibras de vidro foi realizada por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca HITACHI, modelo TM3000 (Figura 23). A preparação das amostras foi realizada fixando-se os *cdps* com fita de carbono no suporte. As amostras dos compósitos com fibras de vidro foram parcialmente recobertas por fita de cobre, a fim de evitar efeito de carregamento no ensaio, situação em que ocorre dissipação de energia do filamento do dispositivo de teste pela amostra. As análises foram realizadas com tensão de aceleração de 15kV (modo Analy) utilizando filamento de tungstênio.

FIGURA 23 – Análise de MEV: (a) Equipamento de MEV, (b) porta amostras.



(a)



(b)

Fonte: próprio autor.

4.7 Calorimetria exploratória diferencial - DSC

A análise por calorimetria exploratória diferencial (DSC – Differential Scanning Calorimetry) foi realizada para avaliar a estabilidade térmica das composições, presença de voláteis e resíduos não orgânicos, conforme norma ASTM D3418 (2015).

A análise foi realizada com amostras de, aproximadamente, 10 mg em cadinhos de teflon, razão de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, em um intervalo de temperatura de 30 a $320\text{ }^{\circ}\text{C}$, com atmosfera de nitrogênio, fluxo de $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, em um analisador termogravimétrico da marca Mettler Toledo, modelo DSC1, localizado na empresa Sinctronics.

4.8 Termogravimetria - TG

A análise por termogravimetria (TG ou TGA – Thermogravimetric Analysis) foi realizada para avaliar a estabilidade térmica dos moldados, presença de voláteis e resíduos não orgânicos, conforme norma ASTM D6370 (2014).

A análise foi realizada com amostras de, aproximadamente, 10 mg em cadinhos de teflon, razão de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, em um intervalo de temperatura de 30 a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, com atmosfera de nitrogênio, fluxo de $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, em um analisador termogravimétrico da marca Mettler Toledo, modelo TGA1, localizado no laboratório da empresa Sinctronics.

4.9 Análise estatística

Para tratamento estatístico dos resultados dos ensaios mecânicos dos compósitos reforçados com resíduos de fibras de vidro foi utilizada a análise de variância ANOVA com metodologia Tukey e confiança de 95% no software Minitab versão 2018. Neste estudo foram consideradas as variáveis, força máxima de ruptura, resistência (tensão) de ruptura e módulo de elasticidade. Os resultados foram classificados em diferentes grupos: a, b, c, etc., de acordo com os resultados médios encontrados nos ensaios mecânicos entre todos os compósitos avaliados. Compósitos com médias variando até 5% entre si são considerados iguais e, portanto, são classificadas num mesmo grupo. Quando há variação superior a 5% são classificadas em grupos distintos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Polímeros moldados a partir dos filmes plásticos

Serão apresentados aqui os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas placas moldadas com filmes plásticos (poliméricos) provenientes de resíduos de bolsas de vácuo do processo de fabricação de pás eólicas.

5.1.1 Ensaio de flexão

A Tabela 6 apresenta os resultados médios encontrados no ensaio de flexão das amostras do polímero moldado a partir dos filmes plásticos. Foram cortados e ensaiados 12 cdps.

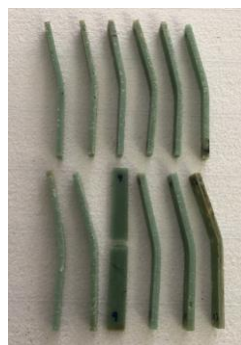
TABELA 6 – Resultados do ensaio de flexão realizado no polímero moldado.

Resultados	Médias e desvio	Coefficiente de variação
Força (N)	176,1 ± 35,20	19,9%
Resistência Max. (MPa)	66,54 ± 13,31	20,0%
Deformação (mm)	13,77 ± 1,43	10,3%
M. Elasticidade (MPa)	1703,0 ± 325,4	19,1%

Fonte: próprio autor.

As amostras apresentaram regularidade no ensaio, pois de 12 cdps testados apenas 1 apresentou ruptura completa, como pode ser observado na Figura 24.

FIGURA 24 – Amostras após os ensaios de flexão.



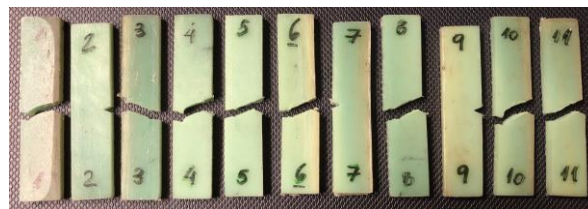
Fonte: próprio autor.

A partir dos dados da tabela 6 pode ser observada que a resistência à flexão média do polímero moldado foi de 66,54 MPa com desvio de 13,31 MPa e seu módulo de elasticidade foi 1.703 MPa com desvio de 325,4 MPa. Em estudo da literatura, MUNGUIA et al. (2013), analisou o comportamento de estruturas feitas em poliamida (nylon) no ensaio de flexibilidade, e os resultados obtidos demonstram similaridades com o polímero deste trabalho. MUNGUIA et al (2013) encontraram medidas variando entre 60 e 70 MPa para resistência à flexão e medidas próximas de 1.750 MPa de módulo de elasticidade. Por sua vez, LEITE et al. (2010), analisaram a flexibilidade do material nylon 6 e os resultados foram 64,97 MPa para resistência à flexão e 2.100 MPa para módulo de elasticidade. Embora o módulo de elasticidade apresente média superior ao do material deste estudo, considerando-se o desvio padrão das amostras, a medida está dentro do intervalo de resultados.

5.1.2 Ensaio de impacto

Na figura 25 estão representados os corpos-de-prova da placa moldada do filme de bolsa de vácuo após o ensaio de impacto Izod. Na Figura 25 pode ser observado o rompimento de 8 entre 11 amostras do polímero moldado.

FIGURA 25 – Amostras após os ensaios de impacto.



Fonte: próprio autor.

A tabela 7 apresenta os resultados médios do ensaio de impacto realizado nas 11 amostras do polímero moldado a partir dos filmes plásticos.

TABELA 7 – Resultados do ensaio de impacto realizado no polímero moldado.

Força (N)	Médias e desvio	Coefficiente de variação
Energia Absorvida (%)	79,67 ± 23,36	29,2%
Resistência Impacto (kJ/m²)	19,59 ± 5,75	29,3%
Resistência Impacto (J/m)	248,84 ± 72,96	29,3%
Energia Absorvida (J)	0,80 ± 0,23	29,7%

Fonte: próprio autor.

A partir dos dados da Tabela 7 observa-se que a resistência média ao impacto foi de 19,59 kJ/m², ou 248,84 J/m. Se considerados apenas os cdps que fraturam no ensaio, as medidas passam a 17,81 kJ/m² e 226,13 J/m respectivamente. Em estudo da literatura, DIJKSTRA et al. (1994) fizeram uma análise do comportamento do polímero *nylon 6* no ensaio de impacto Izod e encontraram valores entre 10 e 60 kJ/m². No entanto, consideraram a variável velocidade de ensaio (pêndulo) na análise e este dado não foi medido no presente estudo. A configuração utilizada por DIJKSTRA et al. (1994) que apresentou resultados mais próximos desta pesquisa, com a velocidade do pêndulo em 1m/s, resultou em resistência ao impacto de aproximadamente 15 kJ/m².

5.2 Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro

Estão apresentados aqui os resultados dos ensaios mecânicos realizados nos compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, provenientes dos dois tipos de resíduos: material de processo de fabricação e não-conforme.

5.2.1 Ensaio de flexão

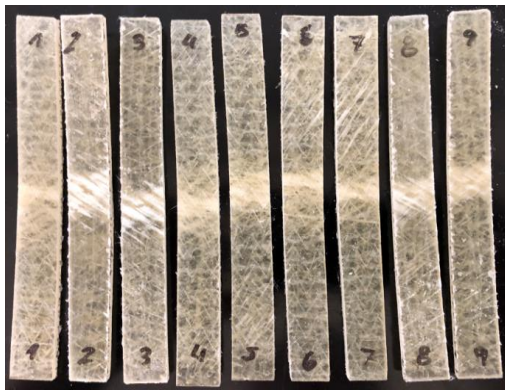
A Tabela 8 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de flexão dos compósitos moldados com resíduos de processo de fabricação (C RPF). Cada compósito foi confeccionado com cinco combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 5. No Apêndice A estão apresentadas as tabelas completas com resultados de cada corpo de prova (cdp) testado, bem como os gráficos de tensão x deformação que ilustram o comportamento dos cdps durante o teste (Apêndice B).

TABELA 8 – Resultados do ensaio de flexão realizado nos compósitos C RPF.

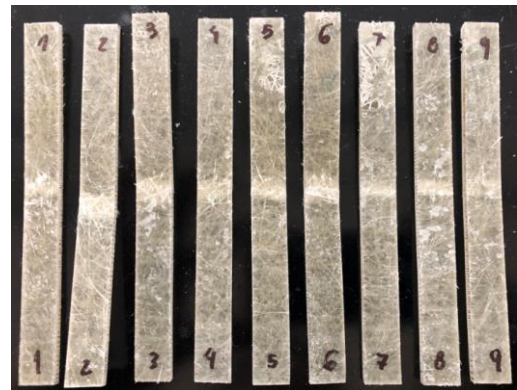
Compósito	Força máxima (N)	Resistência (tensão) máxima (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
C RPF-3CA-TAT	292,2 ± 56,2; b	140,7 ± 27,1; b	7431 ± 317,6; c
C RPF-3CA-ATA	263,6 ± 25,1; b	126,9 ± 12,1; b	4648,4 ± 261,9; d
C RPF-4CA-TATA	426,7 ± 34,8; a	205,4 ± 16,8; a	8456,0 ± 491,8; b
C RPF-4CA-TAAT	432,1 ± 24,1; a	208,1 ± 11,6; a	11230,0 ± 624,4; a
C RPF-4CA-ATTA	464,0 ± 29,1; a	223,4 ± 14,0; a	8157,0 ± 338,3; b

Fonte: próprio autor.

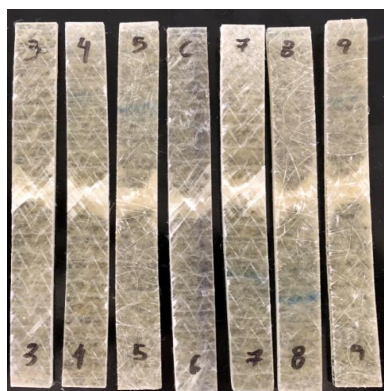
FIGURA 26 – Amostras pós-ensaio de flexão no compósito C RPF.



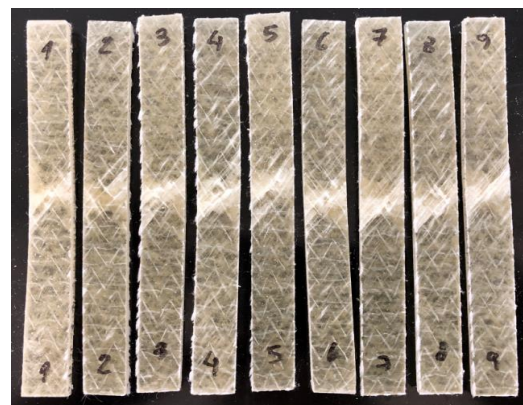
C RPF-3CA-TAT



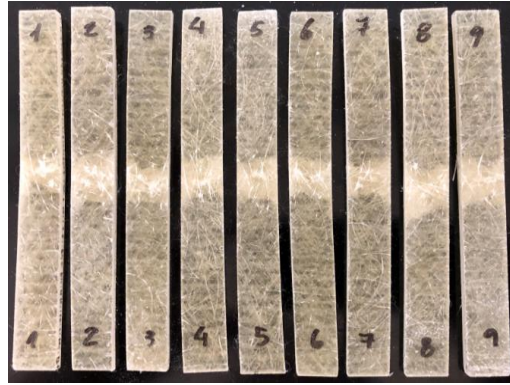
C RPF-3CA-ATA



C RPF-4CA-TATA



C RPF-4CA-TAAT

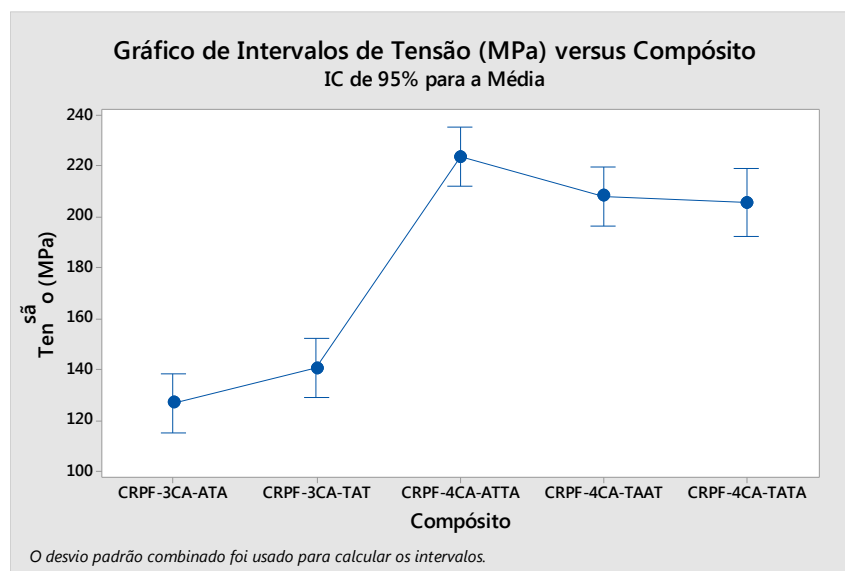


C RPF-4CA-ATTA

Fonte: próprio autor.

Para tratamento estatístico dos resultados foi utilizada a análise de variância ANOVA com metodologia Tukey e confiança de 95% no software Minitab. Neste estudo foram consideradas as variáveis resistência (tensão) de ruptura (Figura 27) e módulo de elasticidade (Figura 28).

FIGURA 27 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias das tensões de ruptura dos compósitos C RPF no ensaio de flexão.

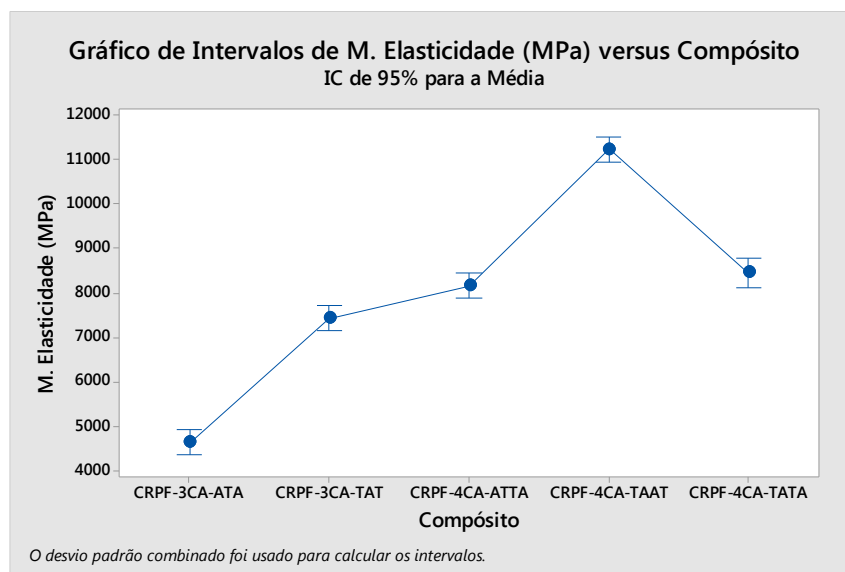


Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados (Tabela 8 e Figura 27) e comparados revela a presença de 2 grupos (A e B) em decorrência das medidas de tensão de ruptura encontradas. O grupo A contém os compósitos C RPF-4CA-TATA, C RPF-4CA-

TAAT e C RPF-4CA-ATTA (todos com 4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém os compósitos C RPF-3CA-TAT e C RPF-3CA-ATA, de 3 camadas de reforço. Isso infere que a quantidade de camadas de reforço presente nos compósitos é determinante para suas propriedades mecânicas, em contrapartida, a forma como são dispostos nestes não tem muita representatividade nas propriedades visto que as medidas encontradas dentro de cada grupo de amostra não diferem muito.

FIGURA 28 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RPF no ensaio de flexão.



Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e comparados (Tabela 8 e Figura 28) revela a presença de 4 grupos (A, B, C e D) em decorrência das medidas módulo de elasticidade encontradas. O grupo A contém o compósito C RPF-4CA-TAAT (4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém os compósitos C RPF-4CA-TATA e C RPF-4CA-ATTA (4 camadas de reforço), o grupo C apenas o compósito C RPF-3CA-TAT (3 camadas de reforço) e o grupo D apenas o compósito C RPF-3CA-ATA (3 camadas). Isso infere que a quantidade de camadas de reforço presente nos compósitos também é determinante para suas propriedades mecânicas, e desta vez, a forma como são dispostos nestes tem relevância nas propriedades, isto porque o surgimento de um terceiro grupo, contendo apenas o arranjo 3, revela propriedades acima dos demais grupos. Analisando isoladamente este compósito, nas duas superfícies foram colocados os tecidos costurados e no

meio deles os tecidos aleatórios, o que permitiu preenchimento superficial mais uniforme pela resina, provável razão do resultado diferenciado.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados de flexão para os compósitos confeccionados a partir dos resíduos não-conformes (C RNC). A Tabela 9 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de flexão destes compósitos. Cada compósito foi confeccionado com cinco combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 5. No final do trabalho estão apresentadas as tabelas completas com resultados de cada cdp testado (Apêndice A), bem como os gráficos de tensão x deformação que ilustram o comportamento deles durante o teste (Apêndice B).

TABELA 9 – Resultados do ensaio de flexão realizado nos compósitos C RNC.

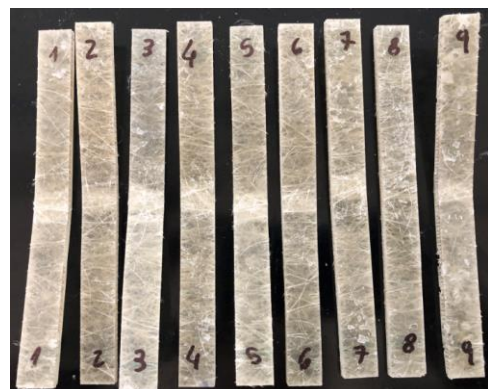
Compósito	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
C RNC-3CA-TAT	343,9 ± 28,3; b	168,8 ± 13,9; b	5227,0 ± 478,0; b
C RNC-3CA-ATA	164,7 ± 6,5; d	78,6 ± 3,8; d	2996,2 ± 210,4; c
C RNC-4CA-TATA	389,3 ± 14,2; a	191,0 ± 6,9; a	5900,0 ± 223,1; a
C RNC-4CA-TAAT	339,4 ± 11,4; b	166,5 ± 5,6; b	6135,0 ± 236,0; a
C RNC-4CA-ATTA	282,5 ± 38,2; c	138,7 ± 18,7; c	4827,0 ± 560,9; b

Fonte: próprio autor.

FIGURA 29 – Amostras pós-ensaio de flexão no compósito C RNC.



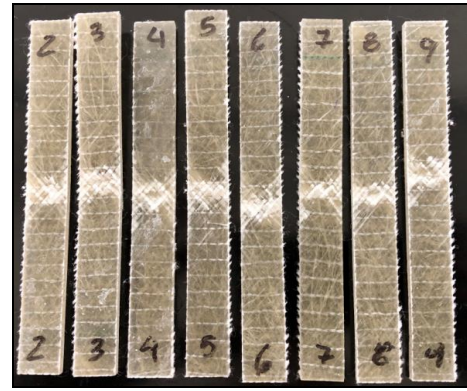
C RNC-3CA-TAT



C RNC-3CA-ATA



C RNC-4CA-TATA



C RNC-4CA-TAAT

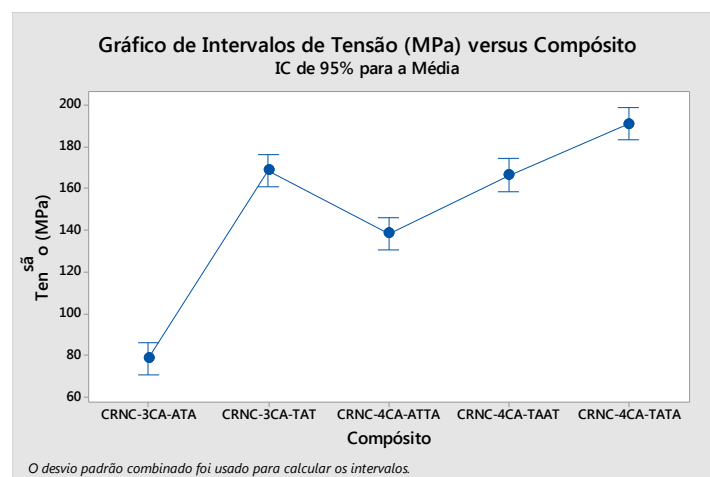


C RNC-4CA-ATTA

Fonte: próprio autor.

Para a análise de variância ANOVA foram consideradas as variáveis de resistência (tensão) de ruptura (Figura 30) e módulo de elasticidade (Figura 32).

FIGURA 30 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias das tensões de ruptura dos compósitos C RNC no ensaio de flexão.

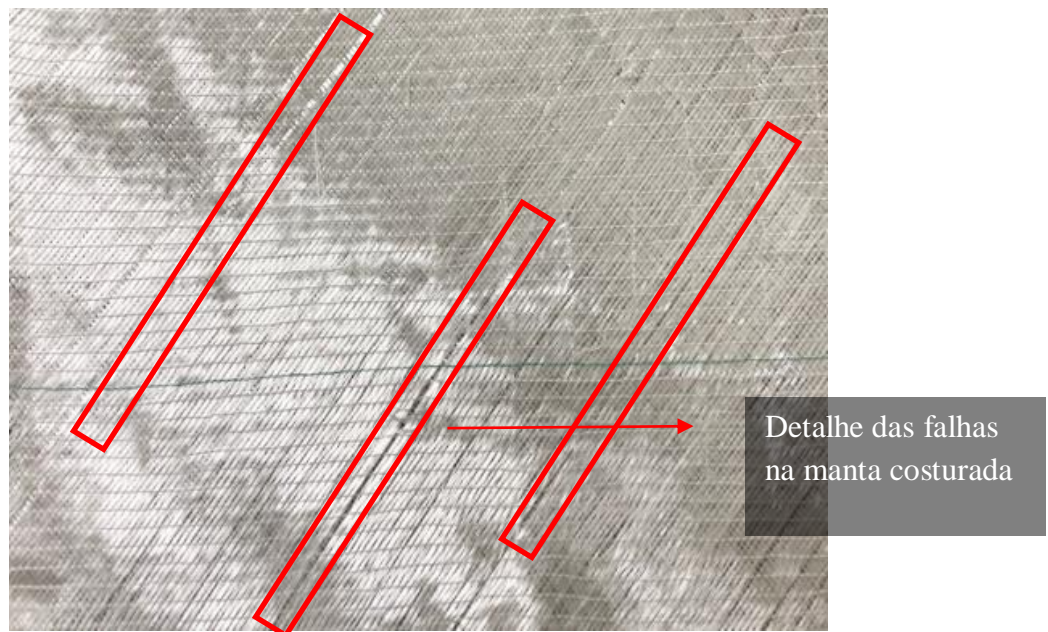


Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e confrontados (Tabela 9 e Figura 30) revela a presença de 4 grupos (A, B, C e D) em decorrência das medidas de tensão de ruptura encontradas. O grupo A contém o compósito C RNC-4CA-TATA (4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém os compósitos C RNC-3CA-TAT e C RNC-4CA-TAAT, de 3 camadas e 4 camadas de reforço respectivamente, o grupo C contém o compósito C RNC-4CA-ATTA (4 camadas) e o grupo D contém o compósito C RNC-3CA-ATA (3 camadas).

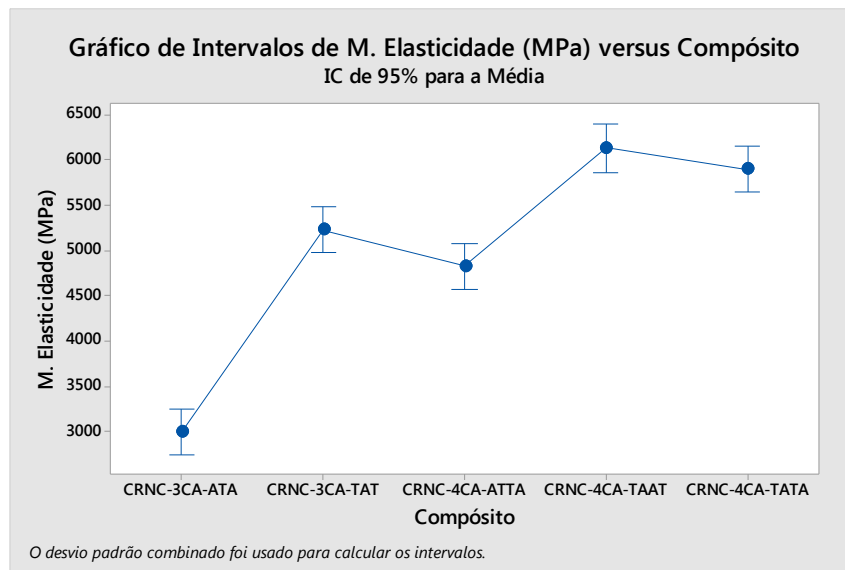
Neste caso, a classificação dos compósitos nos grupos ANOVA é feita de modo aleatório, não seguindo um padrão definido como no compósito C RPF. Uma provável razão para o ocorrido é a irregularidade da costura das mantas, que apresenta falhas visíveis (Figura 31) que interferem no resultado mecânico das amostras.

FIGURA 31 – Fotografia de manta de fibras de vidro costurada não-conforme utilizado nos compósitos C RNC.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 32 – Gráfico de análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RNC no ensaio de flexão.



Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e comparados (Tabela 9 e Figura 32) revela a presença de 3 grupos (A, B e C) em decorrência das medidas módulo de elasticidade encontradas. O grupo A contém os compósitos C RNC-4CA-TATA e C RNC-4CA-TAAT (4 camadas de reforço), enquanto que o grupo B contém os compósitos C RNC-3CA-TAT e C RNC-4CA-ATTA (3 camadas e 4 camadas de reforço), já o grupo C abriga o compósito C RNC-3CA-ATA (3camadas). Uma vez mais, a classificação dos grupos ANOVA parece seguir um padrão de aleatoriedade, em função das irregularidades dos tecidos de fibra de vidro.

Em um estudo realizado por PEREIRA (2012), foi realizado ensaio de flexão em amostras de compósitos de resina poliéster reforçados com fibras de vidro na proporção de 15% em massa, e a resistência à flexão encontrada foi de 93,2 MPa, este valor é inferior aos resultados encontrados neste estudo, cuja menor medida foi 126,9 MPa. Fato similar ocorreu com o módulo de elasticidade, pois no trabalho da literatura (PEREIRA, 2012) foi encontrado um módulo de, aproximadamente, 5500 MPa, inferior às medidas de 4 tipos de compósitos desta pesquisa (7431 - 11230 MPa), superando apenas as amostras do compósito de 3CA-ATA (4648 MPa).

5.2.2 Ensaio de tração

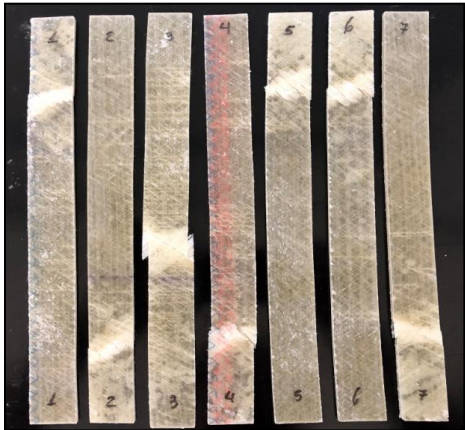
A Tabela 10 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de tração dos compósitos moldados com resíduos de processo de fabricação (C RPF). Cada compósito foi confeccionado com quatro combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 5. Ao final do trabalho serão apresentadas as tabelas completas com resultados de cada cdp testado (Apêndice A), bem como os gráficos de tensão x deformação que ilustram o comportamento deles durante o teste (Apêndice B).

TABELA 10 – Resultados do ensaio de tração realizado nos compósitos C RPF.

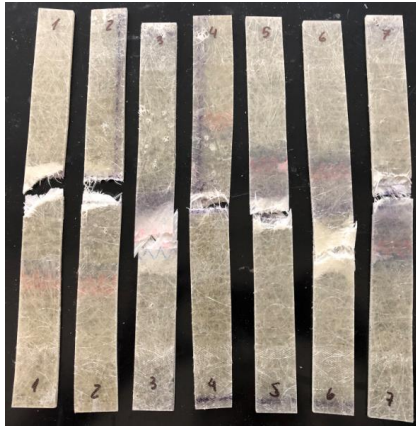
Compósito	Força máxima	Tensão máxima	Deformação	M. Elasticidade
	N	MPa	mm	MPa
C RPF-3CA-TAT	4387,0 ± 202,6; c	37,3 ± 1,7; c	4,75 ± 0,8; b	1968,0 ± 642,4; b
C RPF-3CA-ATA	8047,0 ± 1179; b	76,1 ± 11,2; b	5,7 ± 0,7; b	2540,0 ± 102,8; a
C RPF-4CA-TATA	14960,0 ± 1386; a	127,3 ± 11,8; a	7,7 ± 0,7; a	2904,0 ± 125,9; a
C RPF-4CA-TAAT	13550 ± 883,2; a	115,3 ± 7,5; a	7,1 ± 0,4; a	2788,0 ± 91,8; a
C RPF-4CA-ATTA	13780,0 ± 1135; a	117,2 ± 9,6; a	7,6 ± 0,6; a	2706,0 ± 129,7; a

Fonte: próprio autor.

TABELA 11 – Amostras pós-ensaio de tração no compósito C RPF.

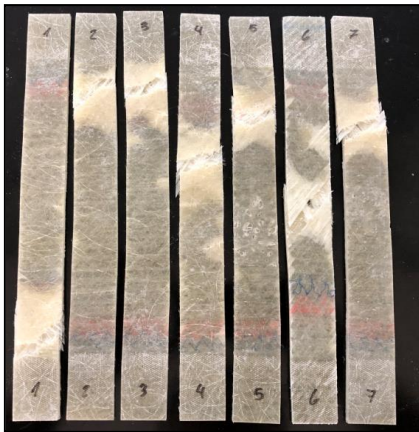
C RPF-3CA-TAT	
	<p>Tipo de fratura:</p> <p>AGV – fraturas angulares a 45° distribuídas pelas extremidades dos cdps.</p>

C RPF-3CA-ATA

**Tipo de fratura:**

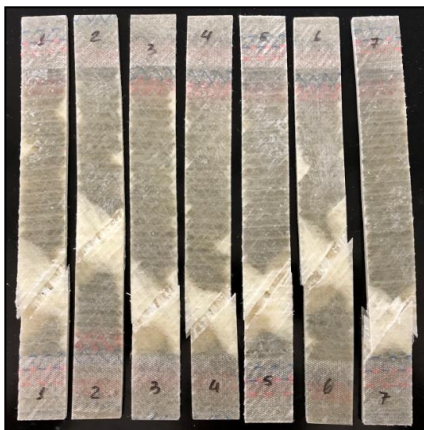
LGM – fraturas retilíneas concentradas na região central dos cdps.

C RPF-4CA-TATA

**Tipo de fratura:**

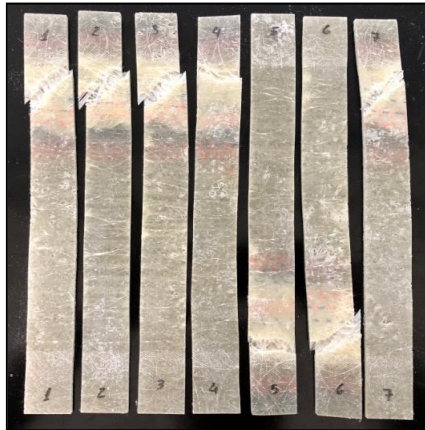
AGV – fraturas angulares a 45° distribuídas por várias regiões dos cdps.

C RPF-4CA-TAAT

**Tipo de fratura:**

AGB – fraturas angulares a 45° concentradas na região inferior dos cdps.

 C RPF-4CA-ATTA

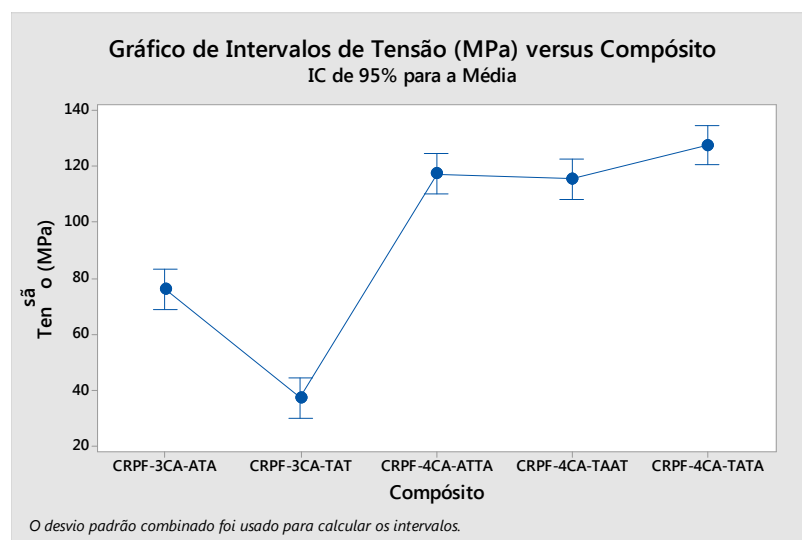
**Tipo de fratura:**

AGV – fraturas angulares a 45° distribuídas pelas extremidades dos cdps.

Fonte: próprio autor.

Para análise de variância ANOVA foram consideradas as variáveis tensão de ruptura (Figura 33) e módulo de elasticidade (Figura 34).

FIGURA 33 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias das tensões (resistência) de ruptura dos compósitos C RPF no ensaio de tração.

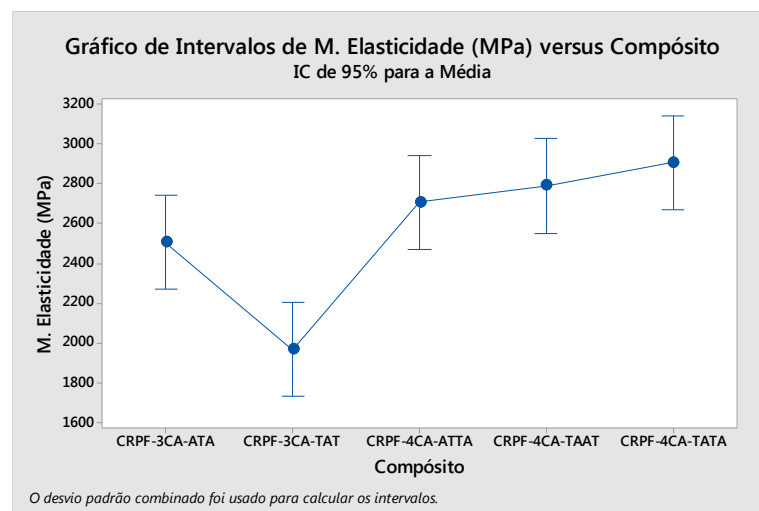


Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e confrontados (Tabela 10 e Figura 33) revelou a presença de 3 grupos (A, B e C) em decorrência das medidas de tensão de ruptura encontradas. O grupo A contém compósitos reforçados com 4 camadas, enquanto os compostos grupo B e grupo C com 3 camadas. Neste caso, o compósito 3CA-TAT teve um

desempenho muito inferior aos demais, indo para o grupo C com 37,3 MPa, enquanto o segundo valor mais baixo foi 76,1 MPa (3CA-ATA) e o mais alto foi de 127,3MPa (4CA-TATA). A análise aqui realizada é semelhante à análise do teste de flexão, uma vez que os resultados sugerem que a quantidade de camadas de reforço presentes nos compósitos é determinante para suas propriedades mecânicas, em contrapartida, a maneira como elas são organizadas não interfere tanto.

FIGURA 34 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RPF no ensaio de tração.



Fonte: próprio autor.

Em relação ao módulo de elasticidade, todos os compósitos, com exceção do 3CA-TAT, apresentaram resultados semelhantes variando de 2540 MPa a 2904 MPa, sendo classificados como grupo A. A medida do grupo B neste caso foi de 1968MPa.

Em estudo da literatura YOO et al (2011), encontrou tensão de ruptura de aproximadamente 120 MPa utilizando 20% de reforço de fibras curtas de vidro no material analisado. No caso, o compósito foi confeccionado a partir de matriz polimérica de nylon 6 misturada com argila organofílica montmorilonita (na proporção de 5% em massa). Estes valores aproximam-se dos resultados encontrados nos compósitos do grupo A (115 MPa a 127 MPa). No entanto, o módulo de elasticidade encontrado por YOO apresentou valores de 6000 a 8000 MPa, muito superiores aos desta pesquisa (1968 - 2904 MPa). No trabalho de PEREIRA, os compósitos de poliéster reforçado com fibra de vidro, na taxa de 15% em massa, apresentaram resistência à tração de 31,90 MPa, resultado semelhante ao “Grupo c” deste estudo (37,3 MPa).

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados de tração para os compósitos confeccionados a partir dos resíduos não-conformes (C RNC). A Tabela 12 apresenta os resultados médios encontrados nos ensaios de tração destes compósitos. Cada compósito foi confeccionado com quatro combinações diferentes denominadas de Arranjo, conforme descritos na Tabela 5. Ao final do trabalho estão apresentadas as tabelas completas com resultados de cada cdp testado (Apêndice A), e os gráficos de tensão x deformação que ilustram o comportamento dos cdps durante o teste (Apêndice B).

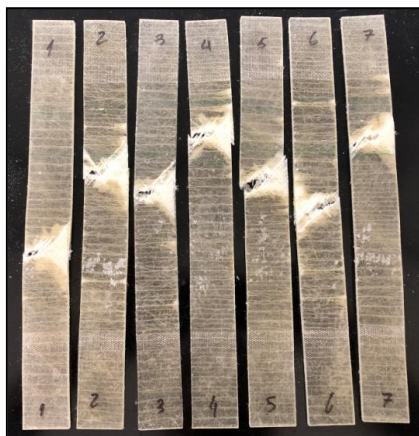
TABELA 12 – Resultados do ensaio de tração realizado nos compósitos C RNC.

Compósito	Força máxima	Resistência (Tensão) máxima	Deformação	M. Elasticidade
	N	MPa	mm	MPa
C RNC-3CA-TAT	7557,0 ± 533,4; a	72,84 ± 5,1; a	5,3 ± 0,4; b	2264,0 ± 330,9; a
C RNC-3CA-ATA	5052,0 ± 455,0; b	51,2 ± 4,6; b	6,3 ± 0,5; a	1607,8 ± 81,3; b
C RNC-4CA-TATA	8344,0 ± 294,5; a	80,4 ± 2,8; a	5,4 ± 0,3; b	2360,0 ± 31,2; a
C RNC-4CA-TAAT	7995,0 ± 582,9; a	77,1 ± 5,6; a	5,6 ± 0,7; a,b	2367,0 ± 291,5; a
C RNC-4CA-ATTA	8229,0 ± 641,6; a	79,3 ± 6,1; a	6,1 ± 0,5; a	2356,0 ± 69,5; a

Fonte: próprio autor.

TABELA 13 – Amostras pós-ensaio de tração no compósito C RNC.

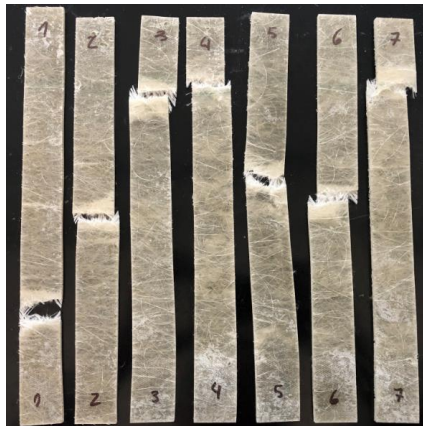
C RNC-3CA-TAT



Tipo de fratura:

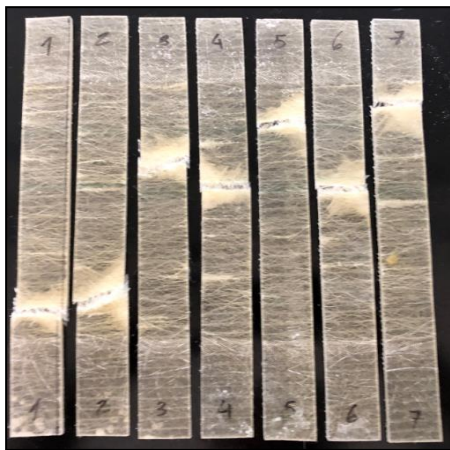
AGM – fraturas angulares a 45° próximas à região central dos cdps.

 C RNC-3CA-ATA

**Tipo de fratura:**

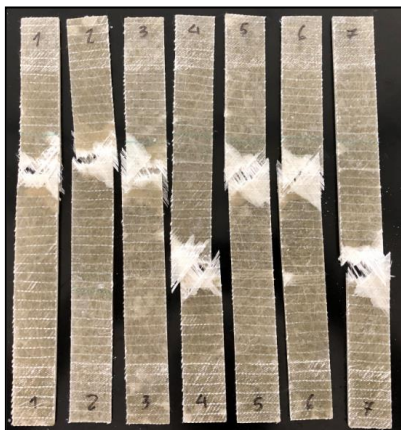
LGV – fraturas retilíneas distribuídas por várias regiões dos cdps.

 C RNC-4CA-TATA

**Tipo de fratura:**

LGV – fraturas retilíneas distribuídas por várias regiões dos cdps.

 C RNC-4CA-TAAT

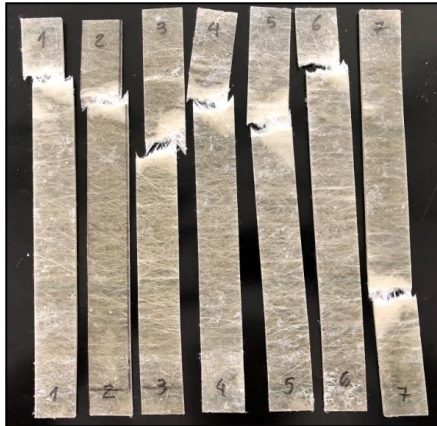
**Tipo de fratura:**

Fraturas mistas:

LGV – fraturas retilíneas distribuídas por várias regiões dos cdps.

AGV – fraturas angulares a 45° distribuídas por várias regiões dos cdps.

 C RNC-4CA-ATTA

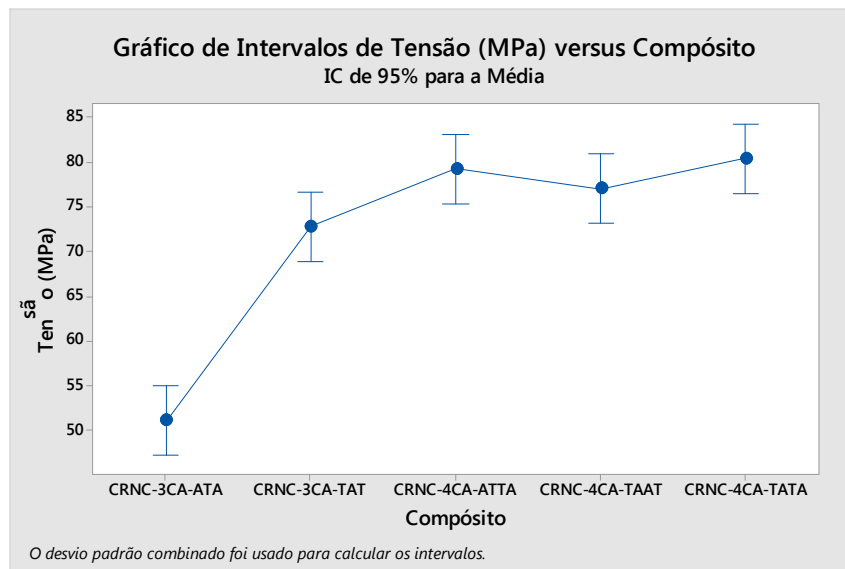
**Tipo de fratura:**

MGT – fraturas com perfis variados concentradas majoritariamente na parte superior dos cdps.

 Fonte: próprio autor.

Para a análise de variância ANOVA foram consideradas as variáveis de tensão (resistência) de ruptura (Figura 35) e módulo de elasticidade (Figura 36).

FIGURA 35 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias das tensões (resistência) de ruptura dos compósitos C RNC no ensaio de tração.

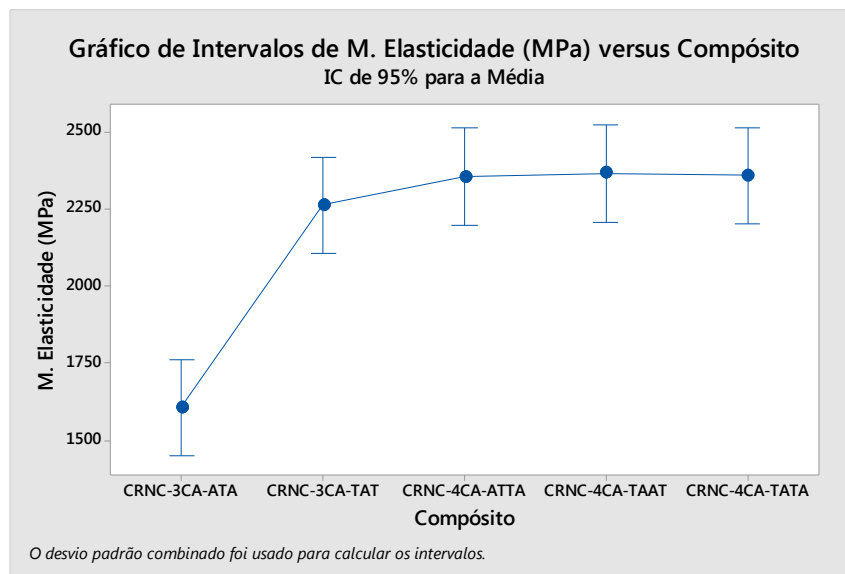


Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e confrontados (Tabela 12 e Figura 35) revela a presença de 2 grupos (A e B) em decorrência das medidas de tensão de ruptura encontradas. O grupo B contém o compósito 3CA-ATA isoladamente, e os demais compósitos correspondem todos ao grupo A. Embora a diferença entre os grupos seja menor nesta comparação de resultados, observa-se mais uma vez que os compósitos de arranjos com

3 camadas apresentam medidas inferiores aos demais, reiterando a informação de que o número de camadas é o principal fator determinante das propriedades mecânicas dos compósitos.

FIGURA 36 – Gráfico análise de variância ANOVA das médias dos módulos de elasticidade dos compósitos C RNC no ensaio de tração.



Fonte: próprio autor.

A análise de variância dos 5 tipos de compósitos testados e confrontados (Tabela 12 e Figura 36) também dividiu os compósitos em grupos A e B em decorrência das medidas módulo de elasticidade encontradas. O panorama é o mesmo que em tensão de ruptura, onde o único representante de B é o compósito C RNC-3CA-ATA.

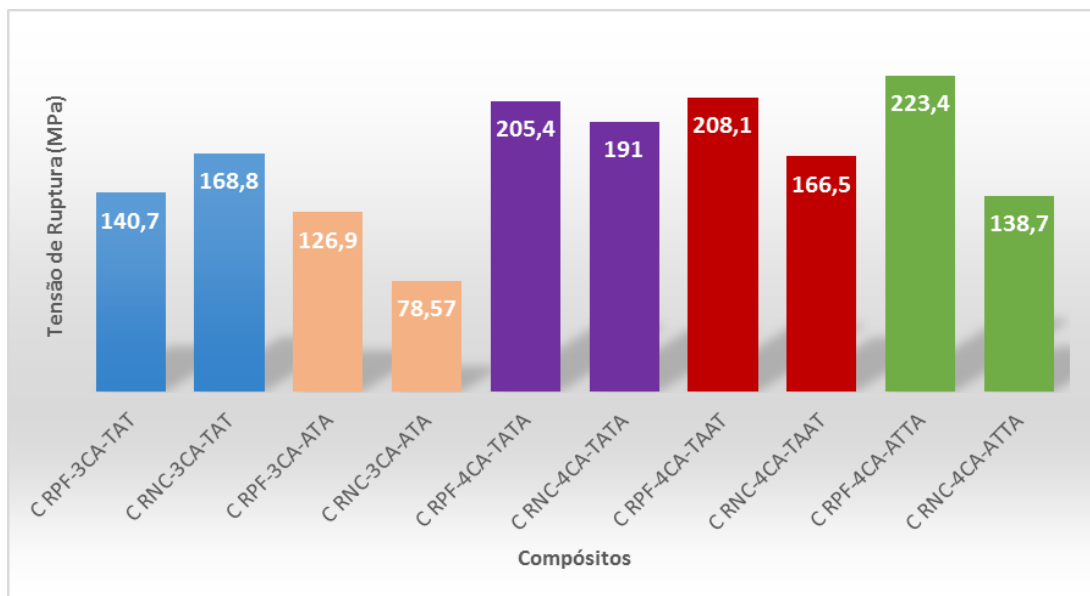
Em estudo da literatura, YOO et al. (2010), encontraram medidas de módulo de elasticidade variando entre 2.000 MPa e 6.000 MPa, enquanto que nos compósitos deste trabalho, as medidas vão de 6.000 MPa a 11.000 MPa para configuração C RPF e de 1600 MPa a 3.000 MPa para a configuração C RNC. Já LAURA et al. (2000), encontraram na análise dos módulos de elasticidade variando entre 2.000 MPa e 6.000 MPa, a depender do percentual de reforço de fibra de vidro adicionado ao compósito (5 a 20 %).

Os resultados da literatura demonstram faixas de equivalência com os compósitos confeccionados a partir de resíduos de produção (2.000 a 6.000 MPa), o que a princípio pode qualificá-los para aplicações afins às dos autores. Nos compósitos deste trabalho não foi proposto investigar as características mecânicas em função da concentração de fibras de vidro

ou resina polimérica que os constituem, mas é algo que pode ser estudado a fim de identificar-se estas correlações.

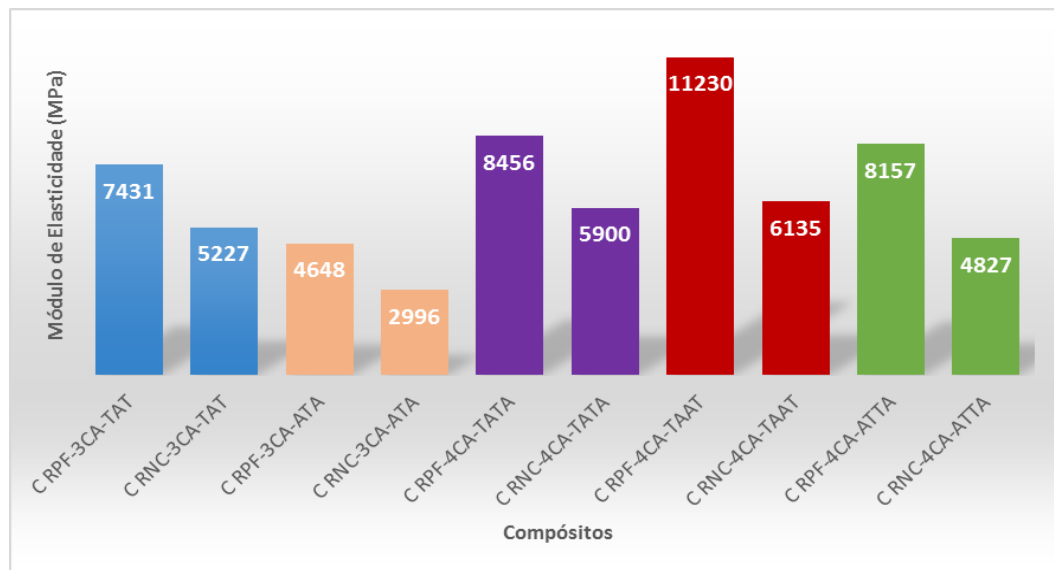
A seguir foram comparadas as características mecânicas das amostras por tipo de arranjo, isto é, dos compósitos C RPF com seu equivalente C RNC, como ilustrado nas Figuras 37 e 38. Os resultados revelaram que os resíduos provenientes de processos de fabricação fornecem propriedades superiores aos resíduos não-conformes. As medidas de tensão de ruptura do material C RPF são superiores em 4 dos 5 casos, a exceção ocorre no compósito 3CA-TAT que apresentou valor cerca de 16% mais baixo em relação ao material C RNC. Já nas medidas de módulo de elasticidade, os resíduos de processo se sobressaíram em todos os casos, sendo de 40 a 80% superiores ao outro tipo.

FIGURA 37 – Comparação dos arranjos RPF x RNC em relação aos valores de tensão de ruptura obtidos.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 38 – Comparação dos arranjos RPF x RNC em relação aos valores de módulo de elasticidade obtidos.



Fonte: próprio autor

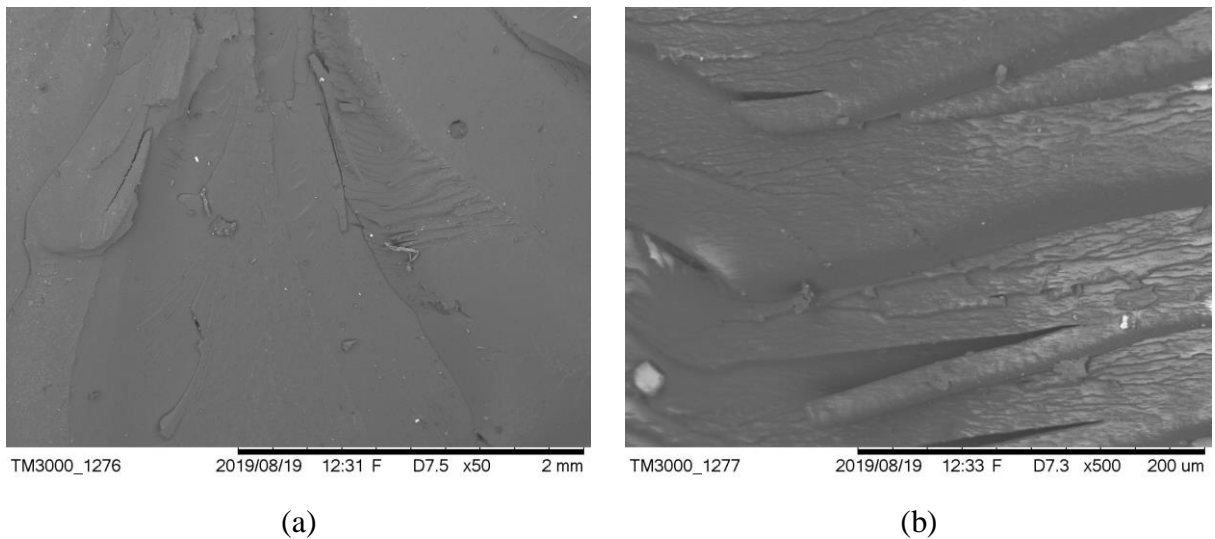
Em linhas gerais, analisando os “conjuntos” de compósitos moldados, a relação entre tensão de ruptura e módulo de elasticidade apresentada nas figuras 37 e 38 indica uma determinada linearidade nos resultados dos compósitos, uma vez que quanto maior a tensão de ruptura, maior o módulo de elasticidade. Porém, ocorre exceção no conjunto 3CA-TAT, em que o compósito CRNC exibiu valores superiores ao compósito CRPF na avaliação de tensão de ruptura e inferiores em módulo de elasticidade. A razão disto pode estar relacionada às características das amostras, como a qualidade dos reforços, já que na moldagem do compósito CRPF foram usadas mantas provenientes de sobras de processo de fabricação das pás eólicas, fato que pode ter influenciado significativamente na diminuição dos valores destas propriedades mecânicas do compósito testado. Analisando os dados das tabelas 9 e 10, observa-se que a força máxima em tração atingida nas amostras CRNC superaram em aproximadamente 70% as amostras CRPF, enquanto que em todos os outros conjuntos ocorre o oposto.

5.3 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A figuras 39 (a e b) apresenta imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) que revelam o aspecto das fraturas dos cdps do polímero de bolsa de vácuo após os ensaios de flexão. Foram utilizadas ampliações de 50x (Figura 39a) e 500x (Figura 39b) nas análises.

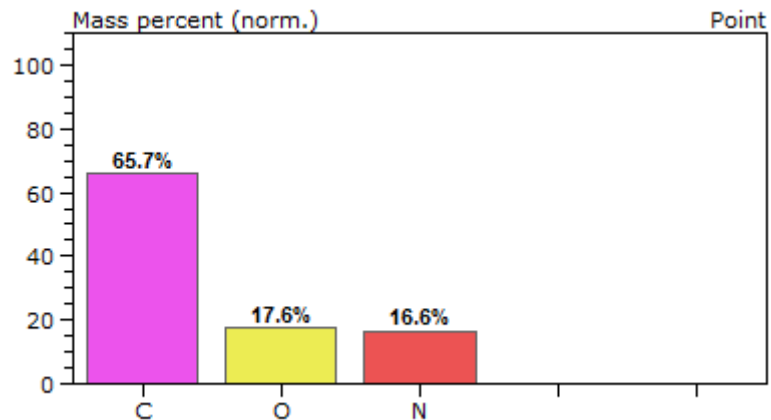
As imagens revelaram superfície linear com presença de pequenos vazios (bolhas) decorrentes do processo de moldagem. Apesar de se tratar de material reaproveitado não há presença significativa de elementos contaminantes, pois pela análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram apenas identificadas as presenças de Carbono (65,8%), Oxigênio (17,6%) e Nitrogênio (16,6%) (Figura 40). Assim, foi também evidenciado que o filme polimérico da bolsa de vácuo é um polímero de poliamida.

FIGURA 39 – Imagens da fratura de MEV do polímero de bolsa de vácuo ensaiado em flexão.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 40 – EDS do filme polimérico de bolsa de vácuo.

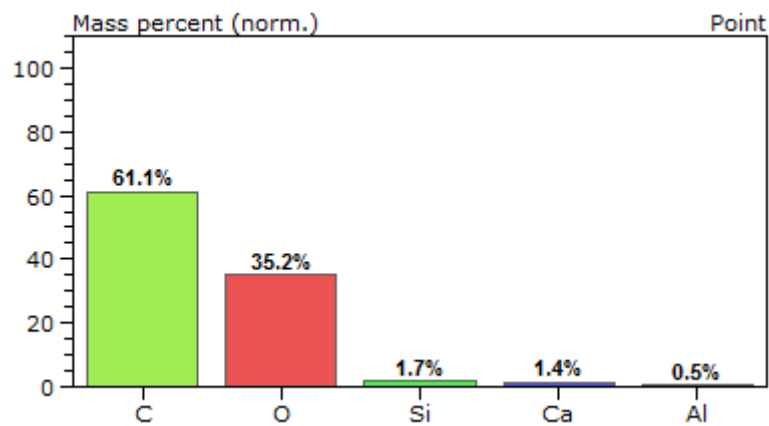


Fonte: próprio autor.

As figuras 41, 42 e 43 apresentam imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e mostram o aspecto das fraturas dos cdps dos compósitos reforçados com fibras de vidro após os ensaios de flexão.

A análise de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) das amostras do compósitos (Figura 41) revelou as presenças de Carbono (61,1%), Oxigênio (35,2%), Silício (1,7%), Cálcio (1,4%) e Alumínio (0,5%); portanto, não há presença contaminantes, visto que os elementos encontrados são constituintes dos materiais utilizados nos compósitos.

FIGURA 41 – EDS dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro.



Fonte: próprio autor.

As imagens de MEV (Figuras 42 e 43) revelaram o aspecto usual de fraturas de amostras testadas em flexão, exibindo as marcas das fraturas das amostras e a acomodação das fibras dentro da matriz polimérica (resina). Como pode ser observado, a resina se infiltrou nos tecidos fibrosos e não ocorreram espaços vazios nos compósitos que poderiam prejudicar o desempenho mecânico.

É possível observar o tecido de fibra de vidro cercado pela matriz polimérica cujas fibras estão orientadas paralelamente à superfície de fratura da amostra. No entanto, não é possível avaliar a dispersão da fibra através da matriz, pois é um tecido posicionado no meio do material moldado.

FIGURA 42 – Imagens por MEV das fraturas dos compósitos reforçados com resíduos de fibras de vidro C RPF ensaiados em flexão.



TM3000_1245 2019/08/19 09:49 H D5.4 x50 2 mm

C RPF-3CA-TAT (50x)



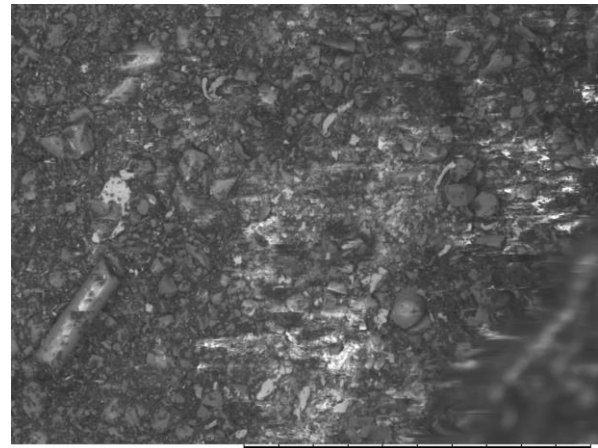
TM3000_1247 2019/08/19 09:52 F D5.3 x500 200 um

C RPF-3CA-TAT (500x)



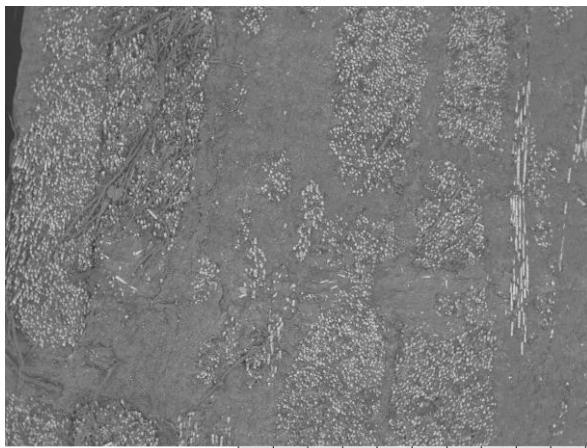
TM3000_1270 2019/08/19 12:01 F D8.9 x50 2 mm

C RPF-3CA-ATA (50x)



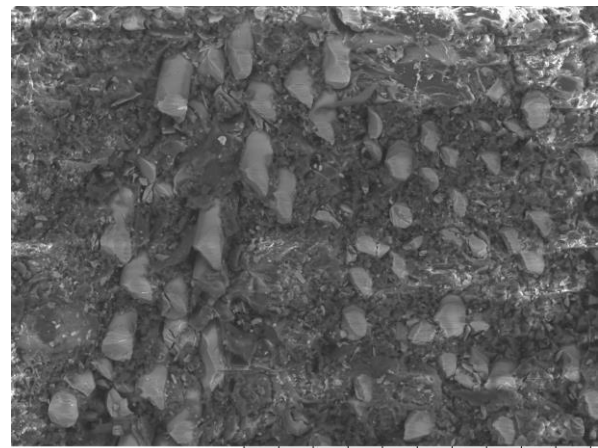
TM3000_1271 2019/08/19 12:03 F D8.9 x500 200 um

C RPF-3CA-ATA (500x)



TM3000_1252 2019/08/19 10:24 F D6.2 x50 2 mm

C RPF-4CA-TATA (50x)



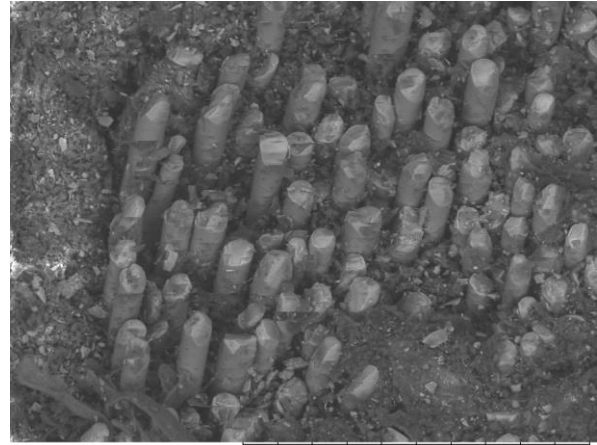
TM3000_1254 2019/08/19 10:28 H D6.1 x500 200 um

C RPF-4CA-TATA (500x)



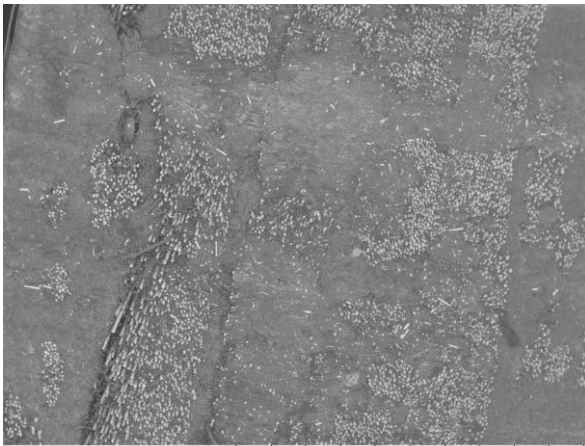
TM3000_1258 2019/08/19 10:54 F D7.3 x50 2 mm

C RPF-4CA-TAAT (50x)



TM3000_1260 2019/08/19 10:57 H D7.3 x500 200 um

C RPF-4CA-TAAT (500x)



TM3000_1264 2019/08/19 11:27 F D7.2 x50 2 mm

C RPF-4CA-ATTA (50x)

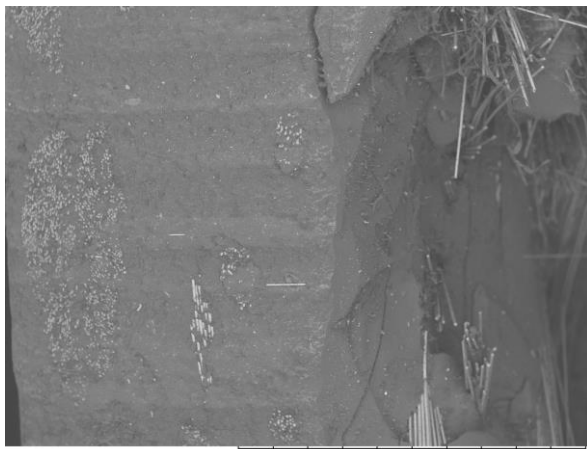


TM3000_1266 2019/08/19 11:32 H D7.1 x500 200 um

C RPF-4CA-ATTA (500x)

Fonte: próprio autor.

FIGURA 43 – Imagens por MEV das fraturas dos compósitos reforçados com resíduos de fibras de vidro C RNC ensaiados em flexão.



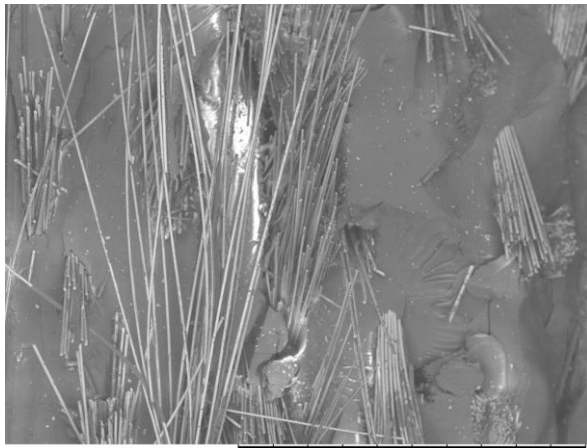
TM3000_1248 2019/08/19 10:05 F D7.4 x50 2 mm

C RNC-3CA-TAT (50x)



TM3000_1250 2019/08/19 10:11 F D7.5 x500 200 um

C RNC-3CA-TAT (500x)



TM3000_1273 2019/08/19 12:16 F D8.7 x50 2 mm

C RNC-3CA-ATA (50x)



TM3000_1274 2019/08/19 12:18 F D9.5 x500 200 um

C RNC-3CA-ATA (500x)



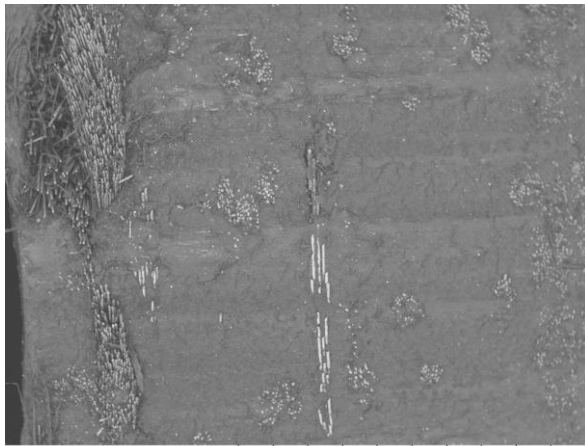
TM3000_1255 2019/08/19 10:39 F D7.5 x50 2 mm

C RNC-4CA-TATA (50x)



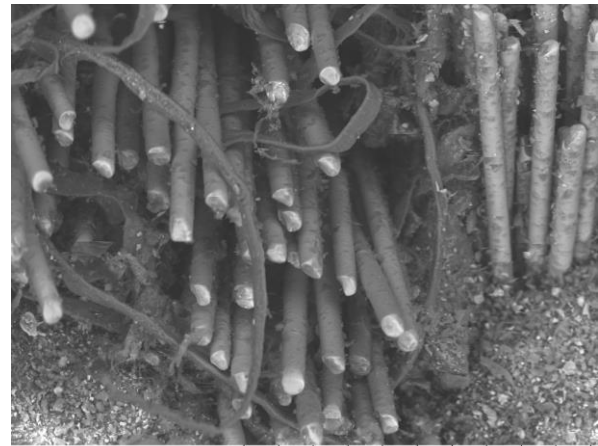
TM3000_1257 2019/08/19 10:42 H D7.2 x500 200 um

C RNC-4CA-TATA (500x)



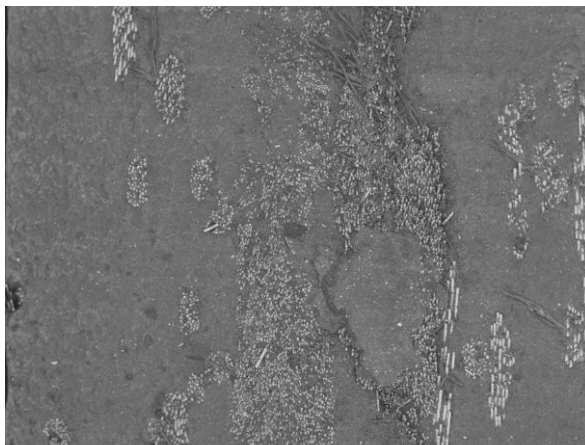
TM3000_1261 2019/08/19 11:09 F D6.4 x50 2 mm

C RNC-4CA-TAAT (50x)



TM3000_1263 2019/08/19 11:13 H D6.4 x500 200 um

C RNC-4CA-TAAT (500x)



TM3000_1267 2019/08/19 11:45 F D7.6 x50 2 mm

C RNC-4CA-ATTA (50x)



TM3000_1269 2019/08/19 11:48 H D7.5 x500 200 um

C RNC-4CA-ATTA (500x)

Fonte: próprio autor.

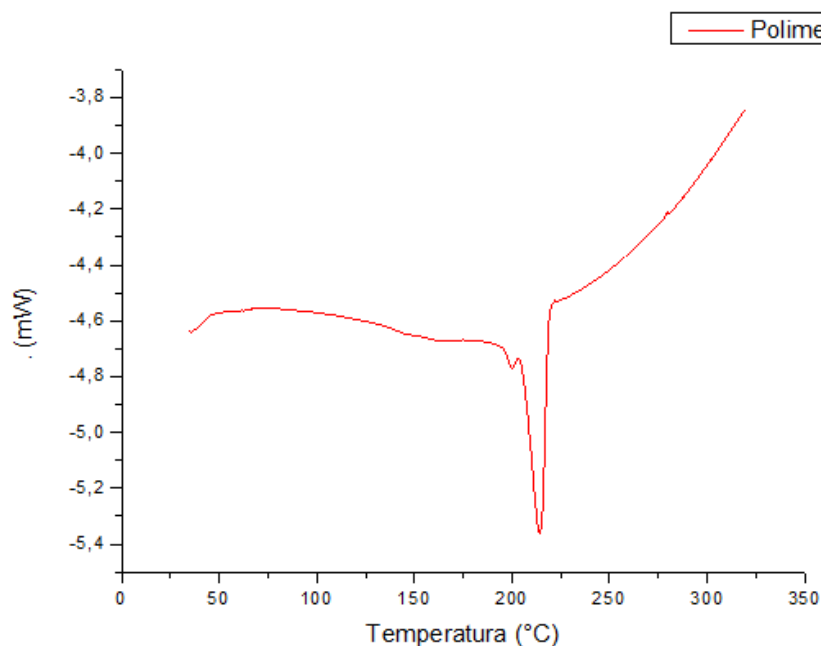
As imagens com ampliações de 50x (Figura 42 e 43) ilustram camadas de tecidos de fibras de vidro imersos em matriz polimérica, não alinhados com perfeição, provavelmente devido a ação da bomba de vácuo e movimento da resina dentro do molde durante o processo. Mesmo assim, o compósito exibe boa aderência na interface entre matriz e reforço. Já as imagens com ampliações de 500x (Figura 42 e 43) revelaram detalhes de filamentos de fibras e fraturas na base da matriz polimérica. Algo importante verificado em ambos os casos é a ausência de defeitos como bolhas ou vazios nos compósitos que possam interferir nos resultados finais.

5.4 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A curva da análise térmica de DSC apresentada na Figura 44 refere-se à amostra de polímero de bolsa de vácuo, após moldagem de placas na prensa hidráulica, com aquecimento a 260°C por 40 minutos.

Os resultados obtidos na curva da Figura 44 indicam um pico endotérmico em 220°C, caracterizando o ponto de fusão da poliamida. Este valor ficou abaixo da literatura que informa que os picos de fusão da poliamida (nylon) ocorrem a 254,1 e 263,4°C (ZHANG et al., 2002; HARPER, 2004). No entanto, assemelha aos resultados encontrados na literatura (YAN et al., 2017), o qual determinou o ponto de fusão de uma poliamida (nylon) em 222,6°C.

FIGURA 44 – Gráfico da análise térmica por DSC do filme polimérico proveniente de bolsa de vácuo.



Fonte: próprio autor.

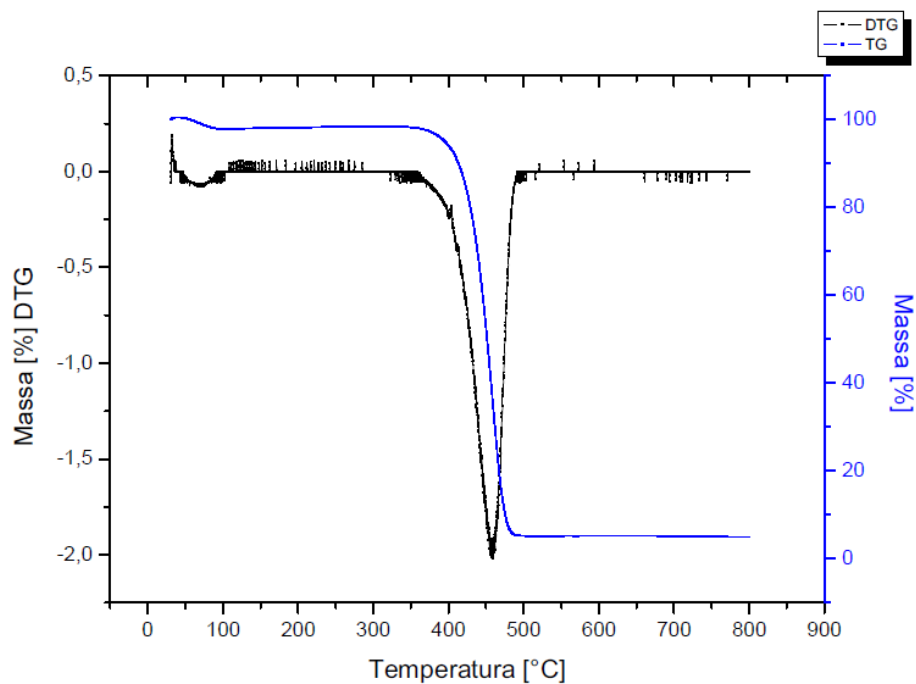
5.5 Termogravimetria

As curvas das análises térmicas de termogravimetria (TG ou TGA-Termogravimetric Analysis) apresentadas nas Figuras 45, 46 e 47 são referentes ao polímero de bolsa de vácuo e aos quatro arranjos de compósitos de fibras de vidro. Para os compósitos, foram escolhidas amostras que apresentaram destaque nos ensaios mecânicos, sendo um exemplar de 3

camadas e um exemplar de 4 camadas para cada tipo de resíduo (sobras de produção e não-conforme).

A Figura 45 mostra a curva de TGA do polímero moldado por compressão a quente. Como pode ser observado, o polímero apresentou duas regiões de perda de massa: uma que se iniciou a 400°C e se prolongou até 500°C, onde ocorreu uma perda de aproximadamente 80% da massa inicial, provavelmente, proveniente da perda de monômeros e umidade absorvida, ainda presentes no polímero e outra entre 500°C e 800°C, onde ocorreu perda de 5% da massa residual. Deste modo, verifica-se que o nylon inicia sua degradação a 390°C com pico de DTG a 422°C e exibe perda de massa superior a 99,0% (BARAN, 2017).

FIGURA 45 – Gráfico da análise térmica de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) do filme polimérico de bolsa de vácuo.



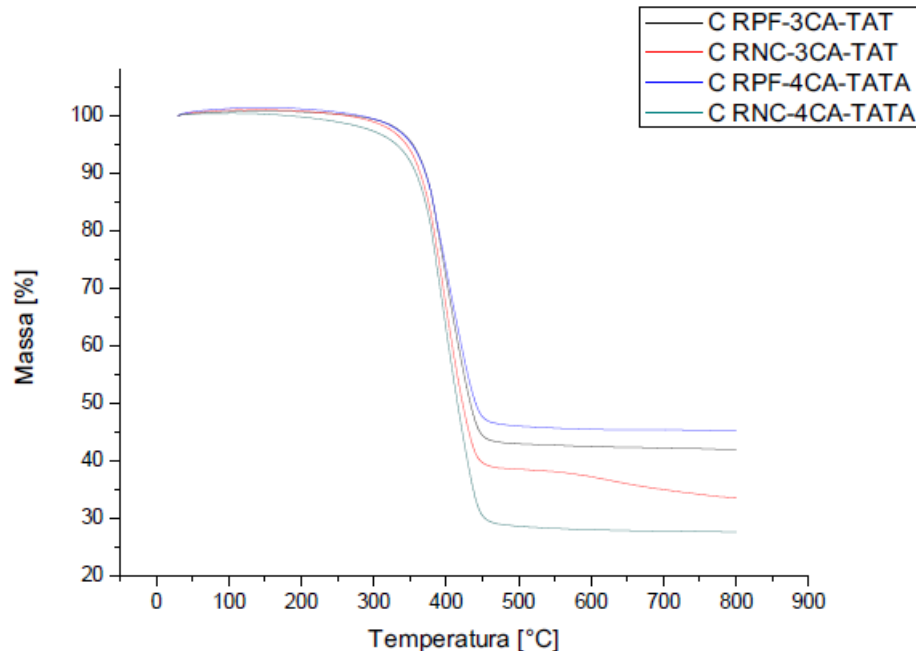
Fonte: próprio autor.

Nas Figuras 46 e 47 estão apresentadas as curvas de termogravimetria (TG) dos compósitos reforçados com fibras de vidro. Como pode ser observado, os compósitos apresentaram uma região de perda de massa que se iniciou a 400°C e se prolongou até 500°C, onde ocorreu uma perda de aproximadamente 70% da massa inicial, provavelmente, proveniente da degradação térmica da cadeia polimérica da matriz (resina poliéster do tipo

insaturada). Até a temperatura de 400°C não foi observada variação significativa na relação perda de massa x temperatura entre os compósitos testados, isto porque são constituídos quimicamente pelos mesmos tipos de reforço (fibras de vidro) e matriz polimérica. A partir de 500°C praticamente não há mais perda de massa; resultando em uma massa residual de cerca de 20% em aproximadamente 800°C.

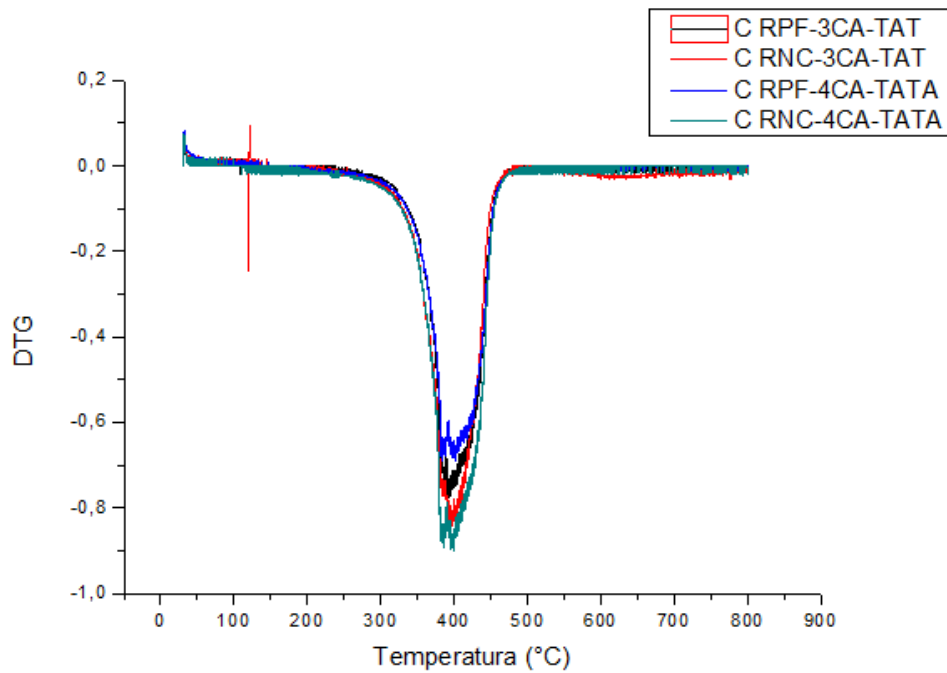
De acordo com a literatura, compósitos do tipo GFRC completam o processo de degradação da resina (matriz polimérica) entre 450 a 500 °C (NAQVI et al., 2018). Deste modo, no intervalo de 500 a 800°C praticamente não há mais variação na perda de massa dos compósitos, resultando em massas residuais de 20 até 30%, as quais podem ser explicadas pela variação no percentual de fibras de vidro que cada tipo de compósito e, portanto, cada amostra analisada continha.

FIGURA 46 – Gráficos das análises térmicas de termogravimetria (TG) para os compósitos reforçados com fibras de vidro.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 47 – Gráficos das análises térmicas de termogravimetria derivada (DTG) para os compósitos reforçados com fibras de vidro.

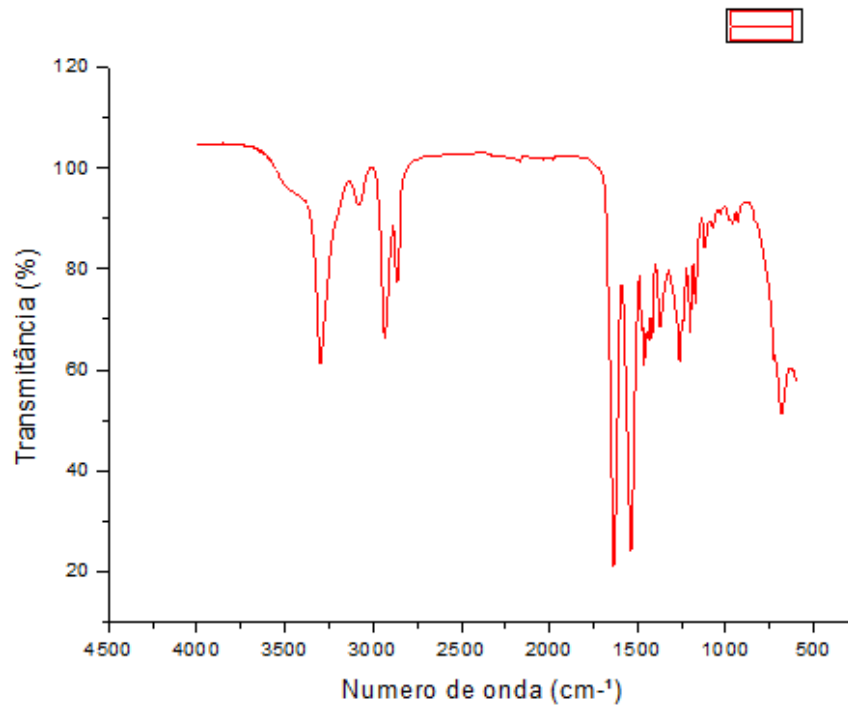


Fonte: próprio autor.

5.6 Análise de FTIR do filme polimérico de bolsa de vácuo

A análise de FTIR foi aplicada ao filme polimérico de bolsa de vácuo com o objetivo de determinar seus principais grupos funcionais buscando identificar o tipo de polímero do qual é constituído. O espectro do FTIR está apresentado na Figura 48. Os espectros foram registrados em um número de onda entre 4000 a 500 cm^{-1} .

FIGURA 48 - Espectro de FTIR do filme polimérico.



Fonte: próprio autor.

TABELA 14 – Principais bandas características do filme polimérico.

Atribuição	Número de onda (cm ⁻¹)
Ligação peptídica do grupo NH	3285
Ressonância de Fermi (δ NH amida II)	3066
Estiramento assimétrico de CH ₂	2932
Ligação peptídica do grupo CO (amida I)	1634
Ligação peptídica do grupo NH + CN (amida II)	1535
Bending de C=O e N- vicinal CH ₂	1460
Estiramento O=C-N	1170
Amida IV – δ (CONH)	937
Poliamida Grupo NH	690
Poliamida Grupo C=O	650

Fonte: próprio autor.

Ao analisar a Figura 48 e a Tabela 14, identificam-se algumas bandas que caracterizam o material como tipo de poliamida. As bandas do FTIR que caracterizam as poliamidas são devidas à ligação peptídica 3285 cm^{-1} (ν do grupo NH), 1634 cm^{-1} (ν do grupo CO – amida I), 1535 cm^{-1} (δ do grupo NH + ν do CN – amida II), (GONÇALEZ et al., 2002). As bandas remanescentes exibem diferenças características, especialmente na região de 800 a 500 cm^{-1} , permitindo a diferenciação de tipos de poliamidas (Poliamida Grupo NH em 690 cm^{-1} e Poliamida Grupo C=O em 650 cm^{-1}).

As bandas em 1170 cm^{-1} e 937 cm^{-1} têm sido atribuídas às regiões amorfas e cristalinas. A banda em 1170 cm^{-1} provavelmente, deve ser atribuída à vibração complexa de grupo amida e cadeia metilênica e/ou combinação da deformação (δ)NH e estiramento (ν) O=C-N, e a de 934 cm^{-1} , relativa à δ NH, (DOMINGOS et al., 2013).

6 CONCLUSÕES

Diversos estudos sobre aproveitamento de resíduos industriais vêm sendo conduzidos ao longo dos anos e um campo ainda pouco explorado é o do segmento de produção de equipamentos para geração de energia eólica. A expansão na fabricação destes dispositivos, haja visto aumento da procura por fontes renováveis de energia, requer atenção especial para o descarte dos resíduos de produção a fim de diminuir-se os impactos ambientais causados por eles.

Este trabalho propôs uma alternativa de reciclagem de dois tipos de resíduos provenientes da fabricação de pás eólicas: filmes poliméricos de bolsa de vácuo e tecidos de fibra de vidro. Devido a incompatibilidade dos materiais, não foi possível o reaproveitamento deles em conjunto, sendo assim, os estudos foram conduzidos separadamente para cada tipo, com processos de moldagem e análises distintas.

No caso dos filmes poliméricos foi utilizado o processo de moldagem por compressão a quente em prensa hidráulica laboratorial. Na indústria de pá eólica, estes filmes são utilizados apenas uma vez no processo de infusão à vácuo e depois descartados. Os resultados revelaram que o material é uma poliamida (nylon) de boa qualidade, sem contaminantes, e que pode ser fundida novamente, com utilização de moldes metálicos simples. Se as moldagens forem replicadas em equipamentos de porte industrial também será possível moldar placas de maiores dimensões e que podem, posteriormente, ser utilizadas para usinagem de diversas peças ou dispositivos. As propriedades mecânicas de resistência à flexão e resistência ao impacto encontradas para o material moldado neste trabalho foram consideradas satisfatórias, pois apresentaram valores próximos a outros trabalhos com poliamidas encontrados na literatura.

Assim, a similaridade dos resultados indica que os resíduos de filme polimérico moldados por compressão à quente podem ser utilizados em aplicações afins às do nylon, como moldagem e/ou usinagem de objetos como mancais, engrenagens, roletes, guias e diversas peças de equipamentos industriais.

No caso dos resíduos de fibras de vidro (costurado e aleatório), foi utilizado processo de moldagem por transferência de resina (R.T.M.) para a confecção de novos compósitos, cujo diferencial foi a aplicação das fibras de vidro residuais no formato de mantas e não partículas, como é comum se encontrar em relação à reutilização de resíduos industriais. As placas moldadas foram divididas em quatro categorias, diferenciando-se pelo número de

camadas e posição das fibras dentro do arranjo. Cada tipo foi avaliado mecanicamente em flexão e tração e seus resultados comparados a fim de se identificar a influência dessas variáveis nas propriedades dos compósitos. Os resultados revelam a presença de 2 grupos de compósitos A e B, identificados segundo metodologia Tukey, onde o Grupo A contém os compósitos com 4 camadas de fibra de vidro e o Grupo B, 3 camadas. Isso infere que a quantidade de camadas foi determinante para as propriedades mecânicas do material, pois aqueles pertencente ao Grupo A apresentaram resistência mecânica superiores ao Grupo B. Em contrapartida, a posição dos tecidos nos compósitos não afetou significativamente tais propriedades, já que os resultados apresentados entre os compósitos do Grupo A foram próximos. Dependendo da aplicação dos compósitos, se requer maior ou menor resistência mecânica, e outros arranjos também podem ser analisados a fim de obterem-se as propriedades desejadas.

No caso dos compósitos desenvolvidos neste trabalho, podem ser indicadas algumas possibilidades para uso na obtenção de novos produtos como paredes, portas, pisos, divisórias de escritório e outros móveis com superfície plana.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diversas análises ainda podem ser feitas a partir dos materiais utilizados e compósitos moldados. A seguir sugerem-se alguns estudos complementares.

- Realização de análises de DMTA em amostras dos compósitos desenvolvidos;
- Moldagem do filme polimérico em moldes de porte industrial, a fim de se obter placas maiores ou blocos para usinagem de peças, possibilitando mais aplicações;
- Avaliação das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de vidro, a partir da maior variação no número de camadas e consequente volume de reforço;
- Investigação do uso dos compósitos em algumas aplicações sugeridas;
- Busca por solução que possibilite utilizar os resíduos de filme polimérico e fibras de vidro em conjunto.

REFERÊNCIAS

- ÅKESSON, D. et al. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 31, n. 17, p. 1136–1142, 2012.
- ALVES, José Leandro Correia. **Obtenção e caracterização de laminados de compósitos poliméricos híbridos de fibras de juta a partir de laminados de fibras de vidro utilizados na fabricação de pás eólicas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.
- ANDERSEN, N. et al. Wind turbines' end-of-life: Quantification and characterisation of future waste materials on a national level. **Energies**, v. 9, n. 12, 2016.
- ANDERSEN, P. D. et al. Recycling of wind turbines. **DTU International Energy Report 2014**, p. 91–98, 2014.
- ANGRIZANI, C. C. et al. Influência da Espessura nas Propriedades Mecânicas de Compósitos Híbridos Interlaminares de Curauá / Vidro / Poliéster. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, v. 24, n. 2, p. 184–189, 2014.
- APARECIDA, M.; AURELIO, M. A tecnologia de reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65–72, 2005.
- ASTM D256. **Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. Pennsylvania, 2008.
- ASTM D3039. **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. United States, 2002.
- ASTM D3418-15. **Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry**, United States, 2015.
- ASTM D6370. **Standard Test Method for Rubber—Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA)**, United States, 2014.
- ASTM D790. **Standard Test Methods: Flexural properties of reinforced plastics and electrical insulating materials**. United States, 2002.
- BAGNI, R.; CESAR, J.; HALLAK, T. Hybrid glass fibre reinforced composites containing silica and cement microparticles based on a design of experiment. **Polymer Testing**, v. 57, p. 87-93, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.012>.
- Baldissera, A. F., Pezzin, A. P. T., Duek, E. A. R., Tessier, M., Fradet, A., Einloft, S. Reciclagem Química de PET Pós-Consumo: Síntese de Copolímeros Alifático-Aromáticos (PET-co-PEA). **Revista Matéria**, v. 10 (4), 577-585, 2005. <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10669/>

BASKARAN, R.; SAROJADEVI, M.; VIJAYAKUMAR, C. T. Unsaturated polyester nanocomposites filled with nano alumina. **J Mater Sci**, v. 46, n. 14, p. 4864-4871, 2011.

BEAUSON, J. et al. Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 90, p. 390–399, 2016.

BEAUSON, J.; LILHOLT, H.; BRØNDSTED, P. Recycling solid residues recovered from glass fibre-reinforced composites - A review applied to wind turbine blade materials. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 33, n. 16, p. 1542–1556, 2014.

BEDON, C.; LOUTER, C. Structural glass beams with embedded GFRP, CFRP or steel reinforcement rods: comparative experimental, analytical and numerical investigations. **Journal of building engineering**, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.12.008>.

BIRYKOVICK, K. L. Glassfibre Reinforced Cement. Budivel'nik, Kiev, 1994.

BORSCHIVER, S., TAVARES, A. Economia circular e o setor energético. **FGV Energia**, Junho, 2018.

BOUCHER, J., BILLARD, G. The Challenges of Measuring Plastic Pollution. **Facts Reports**, n. 19, p. 68-75, 2019.

CALLISTER Jr, William D. **Ciência e engenharia de matérias: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CASADO, J. A. et al. Analysis of fatigue behaviour of notched specimens made of fibre glass reinforced polyamide by means of a cohesive model. **Polymer Testing**, v. 64, n. October, p. 337–344, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.10.021>.

CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N. Fiberglass Reinforced Plastics. New Jersey: Noyes Publications, 1995.

CHERRINGTON, R. et al. Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. **Energy Policy**, v. 47, p. 13–21, 2012.

CIMMINO, S. et al. Ternary nylon-6 / rubber / modified rubber blends : Effect of the mixing procedure on morphology , mechanical and impact properties. **Polymer**, v. 27, p. 1874–1884, 1986.

CONSUL, Thiago Bueno. **Avaliação da utilização de argilas em poliestireno de alto impacto reciclado de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

Consumo sustentável: manual de educação. Brasília: Consumers International/ MMA/ MEC/ IDEC, 2005.

COSATE DE ANDRADE, M. F. et al. Life Cycle Assessment of Poly(Lactic Acid) (PLA): Comparison Between Chemical Recycling, Mechanical Recycling and Composting. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 24, n. 4, p. 372–384, 2016.

CRIPPA, A.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; AMICO, S. C. Desempenho de filmes multicamadas em embalagens termoformadas. **Polímeros**, v. 17, n. 3, p. 188–193, 2007.

CRUZ-RODRIGUES, C. et al. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Ambiente e Água**, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 2017.

CUNHA, E. E. A., SIQUEIRA, J. A. C., NOGUEIRA, C. E. C., DINIZ, A. M. Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Energia Renováveis**, v.8 (4), p.689- 697, 2019.

CUNHA, R. A. D. DA et al. Comportamento Mecânico Do Compósito Prfv Quando Imerso Em Água Do Mar Por Tempo Prolongado. **Holos**, v. 4, p. 78, 2017.

DANIEL, I. M.; ISHA, O., Engineering Mechanics of Composite Materials. New York: Oxford, University Press, 1994.

De Compósitos De Matriz Polimérica. **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, p. 8205–8212, 2015.

DIJKSTRA, K.; TER LAAK, J.; GAYMANS, R. J. Nylon-6/rubber blends: 6. Notched tensile impact testing of nylon-6/(ethylene-propylene rubber) blends. **Polymer**, v. 35, n. 2, p. 315–322, 1994.

DOMINGOS, E., PEREIRA, T. M. C., CASTRO, E. V. R., ROMÃO, W., SENA, G. L. Monitorando a degradação da poliamida 11 (PA-11) via espectroscopia na região do infravermelho médio com transformada de fourier (FTIR). **Polímeros**, v. 23, n.1 , p. 37-41, 2013.

ESPOSITO, M., TSE, T., SOUFANI, K. Introducing a circular economy: new thinking with new managerial and policy implications. **California Management Review**, 60 (3), 5-19, 2018. <https://doi.org/10.1177/0008125618764691>

FELTON, D. A. Flexural properties of acrylic resin polymers reinforced with unidirectional and woven glass fibers. **Research and Education**. v. 81, n. 3, p. 1–9, 2014.

FILHO, R. S. S. et al. Desempenho Da Fibra Natural De Piaçava Nas Propriedades Mecânicas

FINK, J. K. Reactive Polymers Fundamentals and Applications: A Concise Guide to Industrial. **Polymers**. 1 ed. Oxford: Elsevier, 2006.

FORLIN, F. J., FARIA, J. A. F.. Considerações sobre a reciclagem em embalagens plásticas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 12 (1), 1-10, 2002.

<http://www.scielo.br/pdf/po/v12n1/9876>

GALERA, P., MAIA, A.A.D., FAULSTICH, J.M.P. Effect of high pressure laminate residue on the mechanical properties of recycled polypropylene blends. **Polymer testing**, v. 80, n. September, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106104>.

GALLAGHER, J., BASU, B., BROWNE, M., KENNA, A. MCCORMACK, S., PILLA, F., STYLES, D. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23 (1), p. 133-140, 2017.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GONÇALEZ, O. L., EVORA, M. C. Comparação de técnicas de FTIR de transmissão, reflexão e fotoacústica na análise de poliamida-6, reciclada e irradiada. **Polímeros**, v. 12, n.1 , p. 60-68, 2002.

GONCHAROVA, G.; COSSON, B.; DELÉGLISE LAGARDÈRE, M. Analytical modeling of composite manufacturing by vacuum assisted infusion with minimal experimental characterization of random fabrics. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 219, p. 173–180, 2015.

GOPINATH, A.; SENTHIL KUMAR, M.; ELAYAPERUMAL, A. Experimental investigations on mechanical properties of jute fiber reinforced composites with polyester and epoxy resin matrices. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 2052–2063, 2014.

GOREN, A.; ATAS, C. Manufacturing of polymer matrix composites using vacuum assisted resin infusion molding. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 34, n. 2, p. 117–120, 2008.

GUERRERO, P. C.; MANCINI, S. D.; TOUBIA, C. M. Caracterização E Reciclagem Química Via Pirólise De Resíduos Da Fabricação De Pás Eólicas Characterization and Chemical Recycling By Pyrolysis of Waste From Wind Blades Manufacturing. **HOLOS Environment**, v. 147, n. 112, p. 1519–8634, 2011.

GUPTA, N. A review on the inclusion of wind generation in power system studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 59, p. 530-543, 2016.

HAIDER, M.; HUBERT, P.; LESSARD, L. Cure shrinkage characterization and modeling of a polyester resin containing low profile additives. **Composites Part A**, v. 38, n. 3, p. 994-1009, 2007.

HARPER, Charles A. **Handbook of plastics, elastomers & composites**. 4. ed. McGraw-Hill, 2004.

HOSOKAWA, Meire Noriko. **Aproveitamento do copolímero ABS reciclado na moldagem de compósitos com fibras de juta e avaliação de propriedades**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

HUNG, P., LAU K., CHENG, L., LENG, J., HUI, D. Impact Response of Hybrid Carbon/Glass Fibre Reinforced Polymer Composites Designed for Engineering Application. **Composites Part B**, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.026>.

ITAM, Z., ISHAK, Z.A.M., YUSOF, Z.M., SALWI, N., ZAINOODIN, M. Effect on the temperature behavior of glass fiber reinforced polymer (GFRP) in various application - A

review. **AIP Conference Proceedings**, v. 2031, p. 020026, 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5066982>.

Jensen JP, Kastbjerg S, Lei M, Hansen MK, Genvind.net, Siemens Gamesa Renewable Energy. 01 November 2016. [Online].

JENSEN, J. P., SKELTONA, K. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, 165-176, 2018.

JOHN J, GANGADHAR SA, SHAH I. Flexural strength of heat-polymerized PMMA denture resin reinforced with glass, aramid, or nylon fibers. **J Prosthet Dent**, v. 86, n. 4, p. 424–427, 2001.

KERSTING, D. Reciclagem de Compósitos Termofixos Estruturais com Fibra de Carbono e Fibra de Vidro, **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais** p. 3837–3844, 2016.

KERSTING, D. F.; WIEBECK, H.; ESPER, F. J. Estudo sobre o tratamento de resíduos de compósitos estruturais produzidos com fibra de vidro e fibra de carbono - uma revisão. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, p. 4243–4250, 2016.

KOEFOED, M. S. Modeling and Simulation of the VARTM Process for Wind Turbine Blades. **Review Literature And Arts Of The Americas**, n. 50, p. 245, 2003.

KOTIBA, H.; MOSAB, K.; FAWAZ, D. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, 2013.

LACAL-AR, R. Globalization in the wind energy industry: contribution and economic impact of European companies. **Renewable Energy**, v. 134, p. 612–628, 2019.

LARENA, A. DE LA; ORDEM, M. U.; URREAGE, J. M. Effect of E-glass short fibre on the degradation of polypropylene. Spain: Elsevier Science, 1992.

LARSEN, K. Recycling wind. **Reinforced Plastics**, v. 53, n. 1, p. 20- 23,25, 2009.

LAURA, D. M. et al. Effect of glass fiber and maleated ethylene-propylene rubber content on tensile and impact properties of Nylon 6. **Polymer**, v. 41, n. 19, p. 7165–7174, 2000.

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, p. 1–11, 2019.

LEE, X. L. Effect of nanoclay on shrinkage control of low profile unsaturated polyester (UP) resin cured at room temperature. **Polymer**, v. 45, n. 21, p. 7325-34, 2004.

LEITE, A. M. D. et al. Mechanical properties of nylon 6/Brazilian clay nanocomposites. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 495, n. 2, p. 596–597, 2010.

LI, L., LI, B., HOOD, M. A., LI, C. Y. Carbon nanotube induced polymer crystallization: The formation of nanohybrid shish-kebabs. **Polymer**, v. 50, p. 953-965, 2009.

LISBOA, J. S.; BINI, M. P. M.; ANTUNES, M. L. P. III-006–Estudo da incorporação de resíduos da fabricação de pás eólicas para aerogeradores em cimento Portland. **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 1, p. 1–6, 2011.

LIU, P., & BARLOW, C. Y. Wind turbine blade waste in 2050. **Waste Management**, v. 62, p. 229–240, 2017.

LOPES, Inês Abreu Freire. **Estudo do Processo de Infusão a Vácuo em Materiais Compósitos**: Produção de tampa de bagageira para autocarro. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2009.

MACIEL, Natália de Oliveira Roque. **Análise comparativa de tração, flexão e impacto entre compósitos reforçados com fibra de curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2012.

MAMANPUSH, S. H. et al. Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites. **Waste Management**, v. 76, p. 708–714, 2018.

MARIE, L. et al. Science of the total environment tackling the plastic problem : A review on perceptions , behaviors , and interventions. **Science of the Total Environment**, v. 668, p. 1077–1093, 2019.

MATIVENGA, P. T., SHUAIB, N. A., HOWARTH, J., PESTALOZZI, F., WOIDASKY, J. High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 65, p. 45-48, 2016.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. *Composite Materials: Engineering and Science*. UK: Chapman and Hall, 1994.

MAZUMDAR, S. K. *Composites Manufacturing: Materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002.

Megavind. *Strategies for extending the useful lifetime of a wind turbine*. Copenhagen: Danish Wind Association; 2016.

MOLGAARD, C. 96/01166 Environmental impacts by disposal of plastic from municipal solid waste. **Fuel and Energy Abstracts**, v. 37, n. 1, p. 70, 2002.

MUCELIN, C. A., BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & Natureza**, v. 1(20), p.111-124, 2008.
<http://www.scielo.br/pdf/sn/v20n1/a08v20n1.pdf>

MUNGUIA, J.; AKANDE, S.; DALGARNO, K. W. Compliant flexural behaviour in laser sintered nylon structures: Experimental test and Finite Element Analysis - correlation. **Materials and Design**, v. 54, p. 652–659, 2014.

NAQVIA, S.R., PRABHAKARAA H. M., BRAMERA, E.A., DIERKESA, W., AKKERMANB, R., BREMA, G. A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy. **Resources, Conservation & Recycling**, v.136, p. 118-129, 2018.

NETO, Flamínio Levy, Pardini, Luiz Claudio. **Compósitos estruturais**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2006.

NOOROLLAHI, Y.; BINA, S. M.; RAHMANI, K. Life Cycle Energy and Greenhouse Gas Emission Assessment of a Wind Turbine Installed in Northeast of Iran. **International journal of energy policy and management**, v. 3, n. 1, p. 8–15, 2018, <http://www.aascit.org/journal/ijepm>.

NOVAIS, R. M. et al. Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 343–349, 2017.

ODEGARD, G. M.; BANDYOPADHYAY, A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites. **Polymer physics**, p. 1695–1716, 2011, <https://doi.org/10.1002/polb.22384>.

Oliveira, M. C. B. R. **Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil**. 2012. Dissertação (Pós-Graduação em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OWUSU, P. A., SARKODIE, S. A. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. **Cogent Engineering**, v. 3, 2016.

PATIL, R.; ENGINEERING, M.; BANTAKAL, S. Natural Fiber Reinforced Polymer Composite Materials for Wind Turbine Blade Applications. **IJSDR**, v. 1, n. 9, p. 28–37, 2016.

PEREIRA, N. C. Caracterização de compósitos de resina poliéster, fibra de vidro e wollastonita moldados pelo processo RTM light. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v.11(1), p. 23–37, [s.d.].

PERRY, N., BERNARD, A., LAROCHE, F., POMPIDOU, S. Improving design for recycling – Application to composites. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, p. 151-154, 2012.

PICKERING S. Recycling technologies for thermoset composite materials - current status. *Compos Part A: Appl Sci Manuf* 2006:1206–15.

PINTO, R. J. Energia eólica no Brasil : evolução, desafios e perspectivas. **Journal on Innovation and Sustainability**, v. 10, p. 124–142, 2019.

PITT, F. D., BOING, D., BARROS, A. A. C. Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis. **Revista da Unifebe** 9, 2009. <http://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/revistaeletronicadaunifebe/article/view/47/38>

PIVA, A. M., NETO, M. B. & WIEBECK, H. A reciclagem de PVC no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9 (4), p. 195-200, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14281999000400032>

PLASTICSEUROPE. Plastics – the Facts. p. 59, 2018.

RAFIQ, A. et al. Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay composite. **Polymer Testing**, v. 57, n. November, p. 1–11, 2017.

RAJA, V. L.; KUMARAVEL, A. Studies on physical and mechanical properties of silica fume-filled Nylon 66 polymer composites for mechanical components. **Polymers and Polymer Composites**, v. 23, n. 6, p. 427–433, 2015.

RAMIREZ-TEJEDA, K.; TURCOTTE, D. A.; PIKE, S. Unsustainable Wind Turbine Blade Disposal Practices in the United States. **New solutions : a journal of environmental and occupational health policy : NS**, v. 26, n. 4, p. 581–598, 2017.

REIS, Ligia Reghin. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina poliéster insaturada moldados pelo processo de infusão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

RODRIGUES, Jean da Silva. **Estudo da técnica de infusão de resina aplicada à fabricação de compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras naturais da Amazônia**. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Instituto Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

ROT, K, et al. Interfacial effects in glass fibre composites as a function of unsaturated polyester resin composition. **Compos Part A**, v. 32; n. 3-4, p. 511-516, 2001.

SABA, N., PARIDAH, M.T., JAWAID, M. Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 87-96, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043>.

SAHU, B. K. Wind energy developments and policies in China: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1393-1405, 2018.

SAPUAN, S.M, PURUSHOTHMAN, K.R., SAYANG, M.L., MANSOR, M.R. Design and Fabrication of Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composites for Portable Laptop Table. **Lignocellulosic Composite Materials**, p. 323-356, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68696-7>.

SHIVANAGERE, A.; SHARMA, S. K.; GOYAL, P. Modelling of glass fiber reinforced polymer (GFRP) for aerospace applications. v. 13, n. 11, p. 3710–3728, 2018, <http://jestec.taylors.edu.my/>.

SIKDAR, S.; OSTACHOWICZ, W. Nondestructive analysis of core-junction and joint-debond effects in advanced composite structure. **Polymer Testing**, v. 73, n. November 2018, p. 31–38, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.011>.

SINGH, N., HUI, D., SINGH, R., AHUJA, I.P.S., FEO, L., FRATERNALI, F. Recycling of plastic solid waste : A state of art review and future applications. **Composites Part B**, v. 115, p. 409-422, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>.

SÓLIDOS, D. E. R. **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS 2ª edição 2012**. [s.l: s.n.].

SONER, M.; YAGLIKCI, M.; KHOSRAVI, F. Subcritical water extraction derived lignin for creation of sustainable reinforced composite materials. **Polymer Testing**, v. 77, n. May, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105918>.

SPAGNUOLO, S., MEDA, A., RINALDI, Z., NANNI, A. Curvilinear GFRP bars for tunnel segments applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 141, p. 137-147, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.038>.

SPINACÉ, M. A. S., DE PAOLI, M. A. (2004). A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**. 28 (1), 65-72. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000100014>

STEIN, R. S. (1992). Polymer recycling: opportunities and limitations. **Proc Natl Acad Sci USA**. 89 (3), 835-838. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC48336/>

TAJ, S.; MUNAWAR, M. A. Natural fiber-reinforced polymer composites. **Proc. Pakistan Acad.**, v. 44(2), 129-144, 2007.

THAKUR, V. K., KESSLER, M. R. Self-healing polymer nanocomposite materials: A review. **Polymer**, v. 69, p. 369-383, 2015.

THEOTOKOGLU, E. E.; BALOKAS, G. A. Computational analysis and material selection in cross-section of a composite wind turbine blade. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 34(2), p. 101–115, 2015, <https://doi.org/10.1177/0731684414565224>.

TOUBIA, Carim Miguel. **Estudo sobre as possibilidades de recuperação de resíduos provenientes da fabricação de pás eólicas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2011.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.

VATANI, A. et al. Flexural and web crippling properties of GFRP pultruded profiles subjected to wetting and drying cycles in different sea water conditions. **Polymer Testing**, v. 69, n. May, p. 417–430, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.038>.

VIJAY, N., RAJKUMARA, V. P. B. Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries. **Procedia environmental sciences**, v. 35, 563-570, 2016, www.sciencedirect.com.

VISVANATHAN, C. Hazardous waste disposal. **Resources, conservation and recycling**, v. 16, n. May, p. 201–212, 1996.

WAMBUA, P.; IVENS, J.; VERPOEST, I. Natural fibers: can they replace glass in fibre reinforced plastics? **Compos Sci Technol**, v. 63, n. 9, p. 1259-1264, 2003.

- WANG, L., WANG, T., WU, J., CHEN, G. Multi-objective differential evolution optimization based on uniform decomposition for wind turbine blade design. **Energy**, v. 120, p. 346-361, 2017.
- WOJTYŁA, S., KLAMA, P., BARAN, T. Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**. v.14, p. 80-85, 2017.
- YAN, R., HUANG, S., HUANG, C., HSIEH, C., LOU, C., LIN, J. Effects of needle-punched nonwoven structure on the properties of sandwich flexible composites under static loading and low-velocity impact. **Journal of Composite Materials**, v. 51 (8), 1045-1056, 2016.
- YAZDANBAKHSI, A. et al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, n. June 2017, p. 11–21, 2018.
- YOO, Y.; SPENCER, M. W.; PAUL, D. R. Morphology and mechanical properties of glass fiber reinforced Nylon 6 nanocomposites. **Polymer**, v. 52, n. 1, p. 180–190, 2011.
- ZHANG, G., WATANABE, T., YOSHIDA, H., KAWAI, T. Phase Transition Behavior of Nylon-66, Nylon-48, and Blends. **Polymer Journal**, v. 35, p.173-177, 2003.

APÊNDICE - A

Tabelas com resultados dos ensaios mecânicos realizados em cada corpo de prova nos materiais analisados.

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do filme polimérico.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	Deformação Max. (mm)	M. Elasticidade (MPa)
1	234,22	88,52	15,21	2239,16
2	127,66	48,25	14,42	1179,88
3	195,38	73,84	14,57	1687,18
4	151,30	57,19	14,38	1479,03
5	167,68	63,38	14,13	1629,40
6	197,07	74,48	14,00	1697,48
7	157,38	59,48	14,15	1525,96
8	161,27	60,95	15,00	1612,15
9	167,01	63,12	10,02	1750,94
10	214,29	80,99	13,77	2143,13
11	215,64	81,50	13,59	2138,10
12	123,78	46,78	12,06	1352,61
Média	176,1	66,54	13,77	1703
Mediana	167,3	63,25	14,14	1658
Desvio	35,20	13,31	1,425	325,4

Tabela de resultados do ensaio de impacto realizado nos corpos de prova do filme plástico.

Cdp	Energia Absorvida (%)	Resistência Impacto (kJ/m²)	Resistência Impacto (J/m)	Energia Absorvida (J)
1	41,50	10,20	129,59	0,415
2	99,07	24,37	309,44	0,990
3	99,06	24,36	309,34	0,990
4	52,17	12,83	162,91	0,521
5	99,06	24,37	309,44	0,990
6	99,06	24,37	309,44	0,990
7	99,06	24,36	309,44	0,990
8	70,45	17,33	220,06	0,704
9	99,07	24,36	309,38	0,990
10	63,49	15,61	198,25	0,634
11	54,41	13,38	169,97	0,544
Média	79,67	19,59	248,84	0,80
Mediana	99,06	24,36	309,34	0,99
Desvio	23,36	5,75	72,96	0,23

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-TAT.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	247,72	119,27	7631,11
2	336,55	162,03	7621,26
3	351,58	169,27	7480,45
4	251,61	121,14	7447,33
5	243,67	117,32	6729,49
6	242,32	116,67	7090,17
7	240,46	115,77	7672,87
8	358,84	172,76	7584,06
9	356,98	171,87	7625,98
Média	292,2	140,7	7431
Mediana	251,6	121,1	7584
Desvio	56,21	27,06	317,6

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-ATA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	307,5	148,05	5017,67
2	259,71	125,04	4679,21
3	255,83	123,17	4578,05
4	259,38	124,88	4769,94
5	269,51	129,75	4777,34
6	253,47	122,03	4405,47
7	267,31	128,7	4406,74
8	214,63	103,33	4244,96
9	285,04	137,23	4956,25
Média	263,6	126,9	4648
Mediana	259,7	125	4679
Desvio	25,08	12,07	261,9

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TATA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	390,75	188,13	7837,37
2	397,68	191,46	8378,28
3	471,81	227,15	8643,63
4	406,12	195,53	7892,81
5	477,89	230,08	9224,37
6	423,01	203,66	8799,40
7	419,63	202,03	8416,64
Média	426,7	205,4	8456
Mediana	419,6	202,0	8417
Desvio	34,82	16,77	491,8

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TAAT.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	415,24	199,92	10867,97
2	456,27	219,67	11848,87
3	434,83	209,35	11518,52
4	423,68	203,98	10362,92
5	456,95	220,00	12145,07
6	464,04	223,41	11786,56
7	419,46	201,95	10923,50
8	430,44	207,23	11055,95
9	388,39	186,99	10523,91
Média	432,1	208,1	11230
Mediana	430,4	207,2	11060
Desvio	24,13	11,62	624,4

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-ATTA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	513,01	246,99	8637,36
2	484,64	233,33	8404,56
3	448,67	216,01	8162,74
4	444,96	214,22	8284,44
5	490,72	236,26	8297,48
6	446,48	214,96	8120,75
7	464,88	223,82	7925,74
8	415,58	200,08	7427,13
9	466,74	224,71	8152,46
Média	464,0	223,4	8157
Mediana	464,9	223,8	8163
Desvio	29,15	14,04	338,3

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-TAT.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	362,78	178,04	5426,67
2	369,07	181,13	5814,39
3	329,43	161,67	4840,72
4	366,18	179,71	5580,66
5	317,86	155,99	4684,94
6	332,66	163,26	4966,08
7	383,03	187,97	5840,78
8	295,22	144,89	4577,14
9	338,79	166,26	5313,28
Média	343,9	168,8	5227
Mediana	338,8	166,3	5313
Desvio	28,34	13,91	478,0

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-ATA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	163,97	78,94	2752,77
2	163,97	72,6	3160,69
3	169,88	81,79	2902,6
4	165,15	79,51	2953,96
5	166,16	80	2950,97
6	149,45	71,95	3257,24
7	167,35	80,57	2888,19
8	172,75	83,17	3340,69
9	163,29	78,62	2758,25
Média	163,2	78,57	2996
Mediana	165,1	79,51	2951
Desvio	7,978	3,841	210,4

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TATA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	391,02	191,90	5729,48
2	387,62	190,23	5774,13
3	380,30	186,64	6007,59
4	397,49	195,07	5961,84
5	386,43	189,65	5888,49
6	399,87	196,24	6158,03
7	411,27	201,84	6129,18
8	389,49	191,15	6007,44
9	360,05	176,70	5444,82
Média	389,3	191,0	5900
Mediana	389,5	191,1	5962
Desvio	14,19	6,966	223,1

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TAAT.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	-	-	-
2	340,94	167,32	6136,81
3	323,88	158,95	5654,53
4	353,27	173,37	6191,72
5	350,23	171,88	6298,33
6	324,56	159,28	5961,57
7	341,11	167,4	6401,87
8	332,33	163,09	6136,29
9	348,54	171,05	6301,83
Média	339,4	166,5	6135
Mediana	341	167,4	6164
Desvio	11,4	5,593	236

Tabela de resultados do ensaio de flexão realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-ATTA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	M. Elasticidade (MPa)
1	231,01	113,37	3818,91
2	295,01	144,78	5267,39
3	357,15	175,28	5486,24
4	241,81	118,67	4075,06
5	260,73	127,96	4866,19
6	276,09	135,5	4612,29
7	305,65	150	5020,46
8	271,7	133,34	5230,04
9	303,79	149,09	5070,15
Média	282,5	138,7	4827
Mediana	276,1	135,5	5020
Desvio	38,17	18,73	560,9

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-TAT.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	Deformação Max. (mm)	M. Elasticidade (MPa)
1	4209,02	35,82	3,97	3011,30
2	4342,36	36,96	3,93	2760,09
3	4828,78	41,10	6,17	1727,91
4	4283,85	36,46	4,49	1530,51
5	4326,03	36,82	4,43	1551,76
6	4389,98	37,36	5,42	1419,12
7	4331,48	36,86	4,85	1776,34
Média	4387	37,34	4,752	1968
Mediana	4331	36,86	4,487	1728
Desvio	202,6	1,724	0,8092	642,4

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-ATA.

Cdp	Força Max. (N)	Tensão Max. (MPa)	Deformação Max. (mm)	M. Elasticidade (MPa)
1	6918,66	65,42	---	2369,8
2	7292,82	68,96	---	2504,04
3	7960,88	75,28	---	2406,17
4	6910,5	65,35	4,91	2535,03
5	8450,7	79,91	5,93	2552,53
6	10229,68	96,73	---	2682,77
7	8565,67	81	6,19	2479,27
Média	8047	76,09	5,849	2504
Mediana	7961	75,28	5,927	2504
Desvio	1179	11,15	0,6989	102,9

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TATA.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	15871,42	135,08	8,62	2885,95
2	13876,10	118,09	6,84	2921,00
3	14192,44	120,79	7,77	2772,01
4	16419,74	139,74	8,45	2978,05
5	13206,00	112,39	6,82	2756,01
6	16795,95	142,94	7,98	3126,54
7	14367,27	122,27	7,43	2891,13
Média	14960	127,3	7,702	2904
Mediana	14370	122,3	7,766	2891
Desvio	1386	11,79	0,7140	125,9

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TAAT.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	14261,15	121,37	7,59	2788,44
2	14155,70	120,47	7,38	2823,59
3	13854,33	117,91	7,34	2794,31
4	13048,85	111,05	6,97	2760,01
5	13974,06	118,93	7,04	2871,36
6	13778,81	117,27	7,02	2872,56
7	11752,20	100,02	6,50	2602,62
Média	13550	115,3	7,119	2788
Mediana	13850	117,9	7,042	2794
Desvio	883,2	7,517	0,3569	91,79

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-ATTA.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	13042,05	111,00	7,04	2691,00
2	15053,02	128,11	7,96	2826,59
3	14449,59	122,98	8,18	2704,53
4	12556,31	106,86	7,01	2605,66
5	15328,54	130,46	8,27	2872,71
6	12954,97	110,26	7,87	2491,16
7	13048,17	111,05	6,93	2751,95
Média	13780	117,2	7,606	2706
Mediana	13050	111,0	7,866	2705
Desvio	1135	9,657	0,5917	129,7

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-TAT.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	7061,21	68,06	4,57	2682,11
2	8228,04	79,31	5,63	2788,16
3	6693,40	64,51	5,22	1925,84
4	7508,28	72,37	5,29	2097,63
5	7752,43	74,72	5,52	2115,75
6	8025,11	77,35	6,01	2094,28
7	7631,94	73,56	5,25	2142,58
Média	7557	72,84	5,355	2264
Mediana	7632	73,56	5,295	2116
Desvio	533,4	5,141	0,4451	330,9

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-ATA.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	5266,21	53,33	6,3	1620,7
2	5265,53	53,32	6,26	1648,34
3	5683,91	57,56	6,54	1735,54
4	4306,3	43,61	5,54	1462,58
5	4667,54	47,27	7,02	1592,08
6	4934,22	49,97	5,89	1597,7
7	5237,64	53,04	6,62	1597,69
Média	5052	51,16	6,308	1608
Mediana	5238	53,04	6,299	1598
Desvio	455,2	4,609	0,4876	81,31

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TATA.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	7780,96	75,00	4,98	2309,53
2	8516,57	82,09	5,79	2337,32
3	8364,38	80,62	5,50	2359,03
4	8630,72	83,19	5,53	2393,78
5	8443,65	81,38	5,18	2391,61
6	8538,77	82,30	5,53	2381,10
7	8136,08	78,42	5,26	2346,15
Média	8344	80,43	5,396	2360
Mediana	8444	81,38	5,499	2359
Desvio	294,5	2,839	0,2690	31,20

Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TAAT.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	7649,98	73,73	-	2452,3
2	7052	67,97	4,82	2533,75
3	8450,02	81,45	6,12	2379,25
4	7599,64	73,25	-	1725,55
5	8090,14	77,98	-	2393,03
6	8467,02	81,61	5,84	2545,02
7	8654,79	83,42	-	2542,8
Média	7995	77,06	5,608	2367
Mediana	8090	77,98	5,84	2452
Desvio	582,9	5,619	0,699	291,5

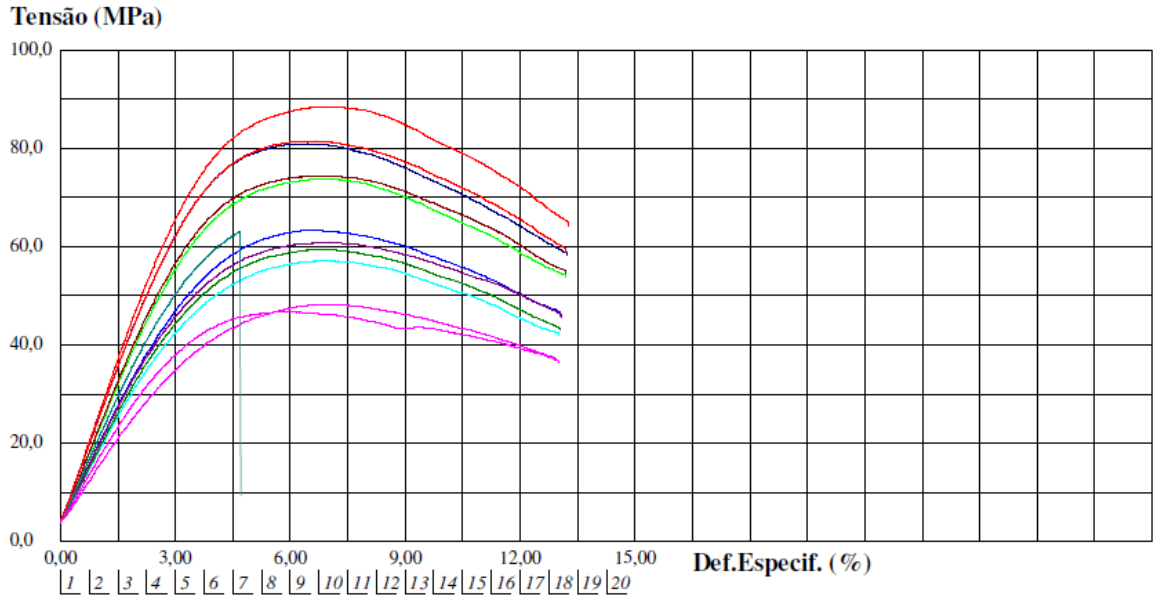
Tabela de resultados do ensaio de tração realizado nos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-ATTA.

Cdp	Força Max.	Tensão Max.	Deformação Max.	M. Elasticidade
	(N)	(MPa)	(mm)	(MPa)
1	8673,84	83,6	6,3	2360,22
2	7137,72	68,8	5,35	2311,99
3	8764,32	84,48	7,01	2383,01
4	7813,94	75,32	6,03	2295,72
5	8088,1	77,96	6,08	2279,08
6	8998,34	86,73	6,44	2483,37
7	8125,51	78,32	6,14	2379,56
Média	8229	79,31	6,192	2356
Mediana	8126	78,32	6,139	2360
Desvio	641,6	6,184	0,5	69,54

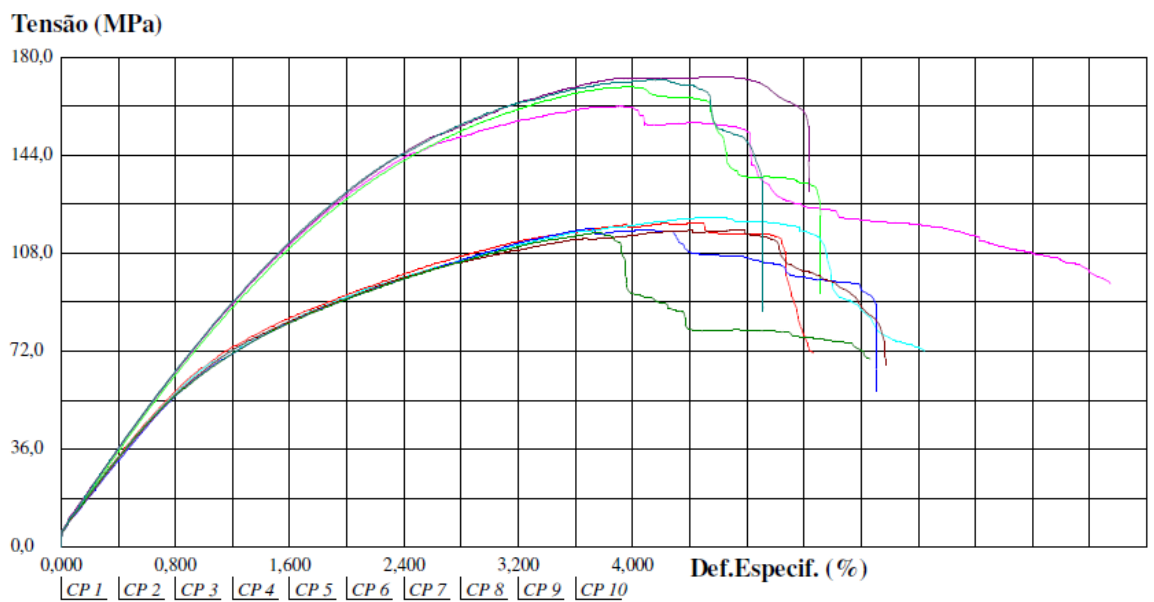
APÊNDICE - B

Gráficos dos ensaios mecânicos realizados nos materiais analisados.

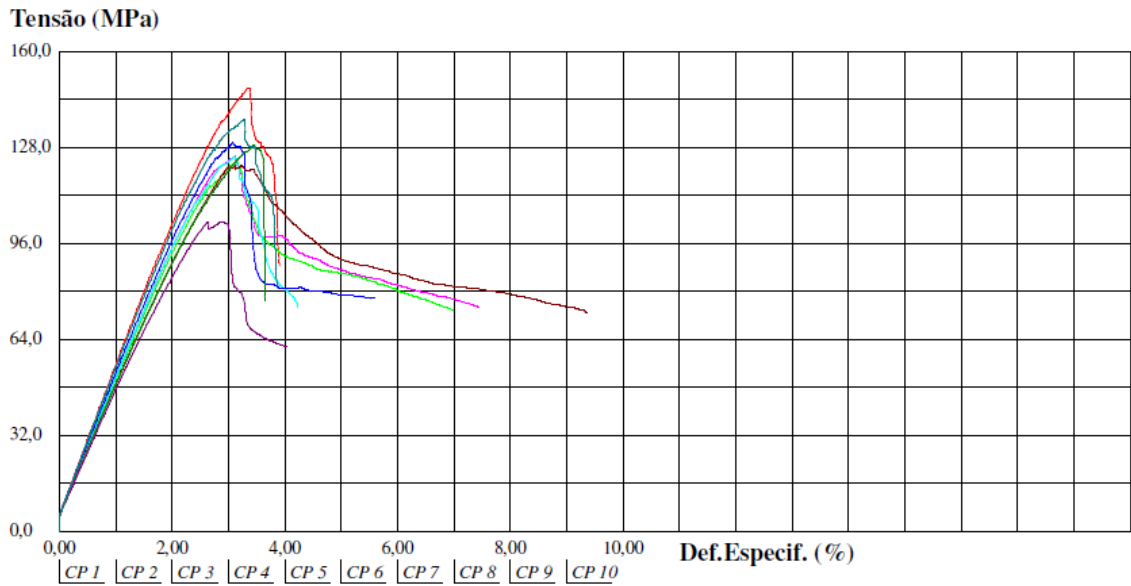
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do filme polimérico em ensaio de flexão.



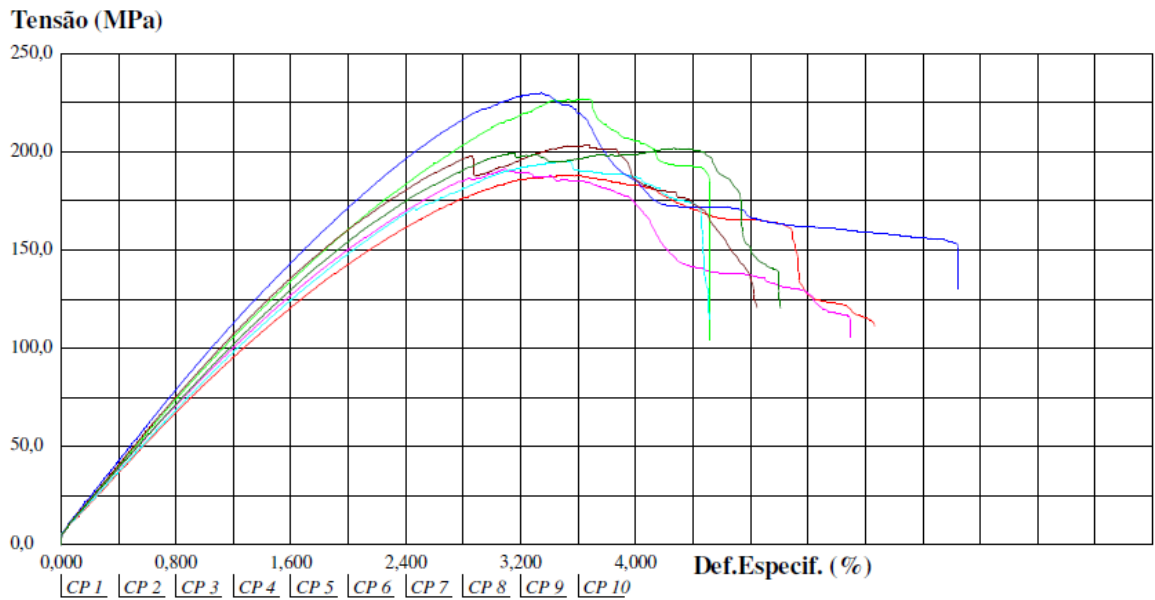
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-TAT em ensaio de flexão.



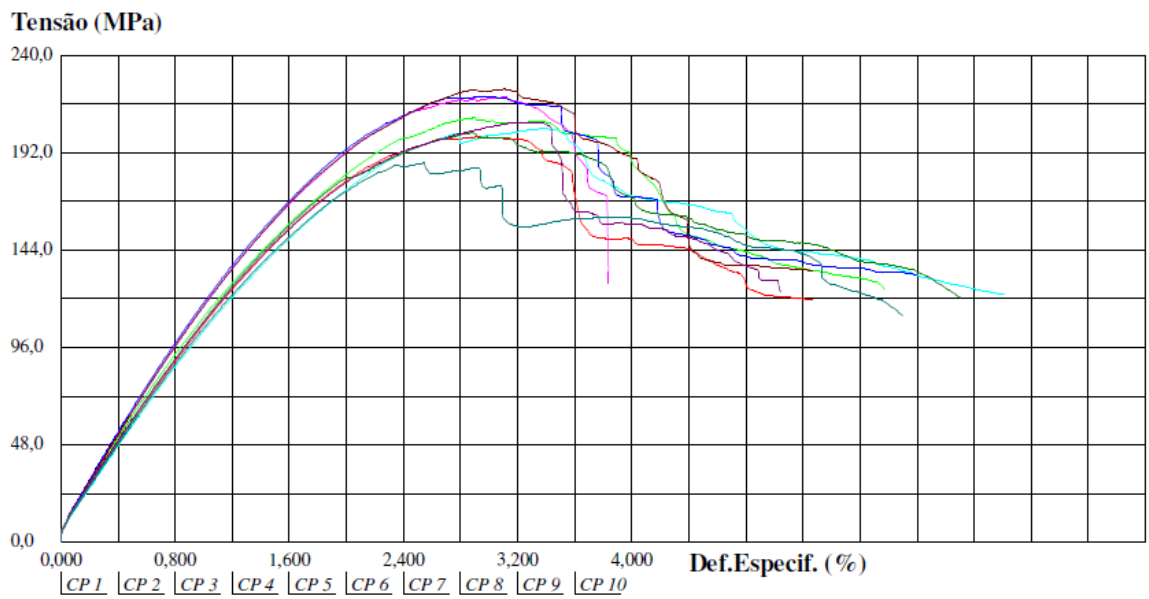
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-ATA em ensaio de flexão.



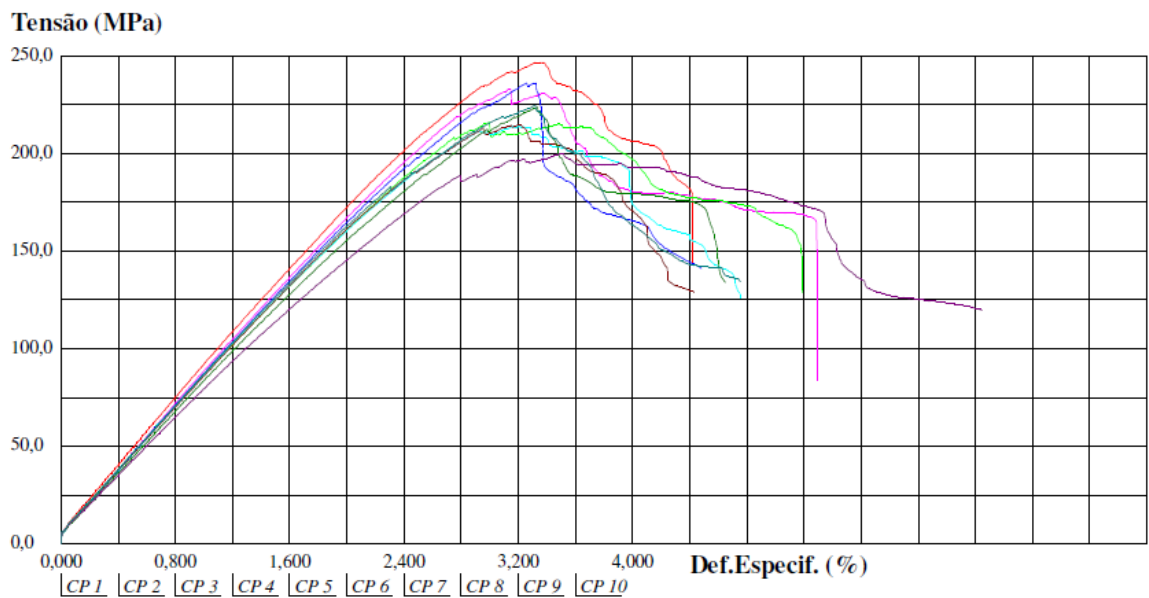
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TATA em ensaio de flexão.



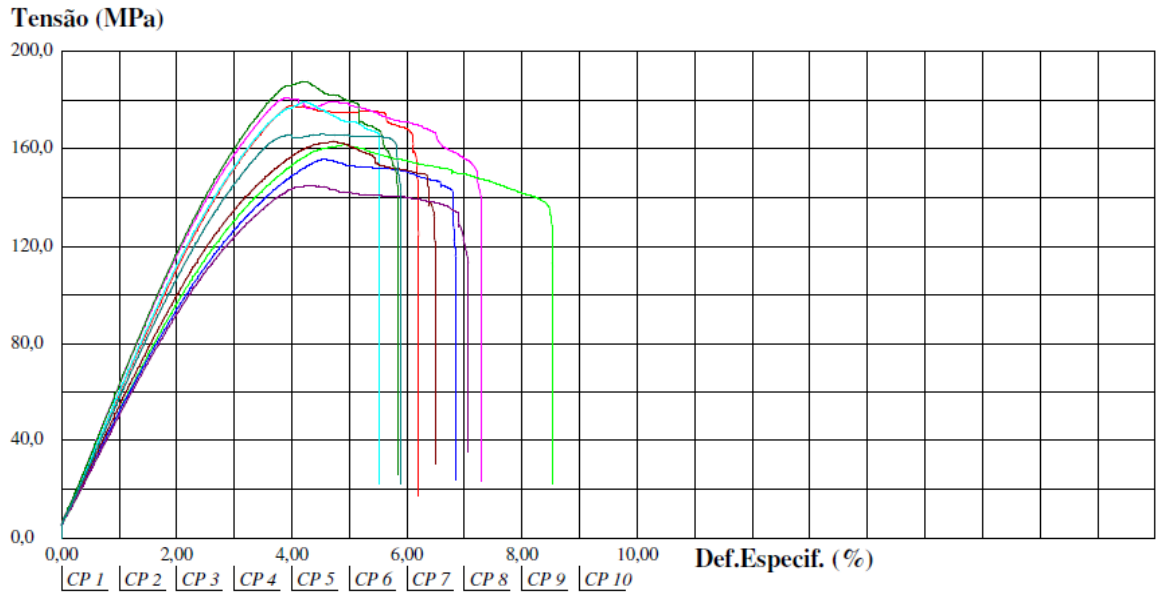
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TAAT em ensaio de flexão.



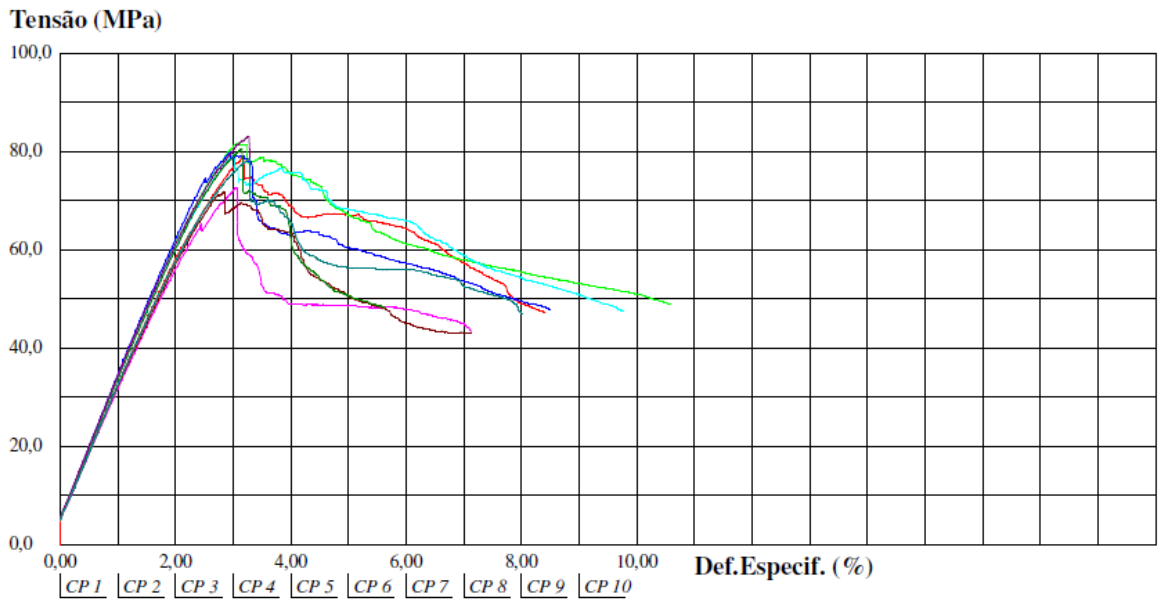
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-ATTA em ensaio de flexão.



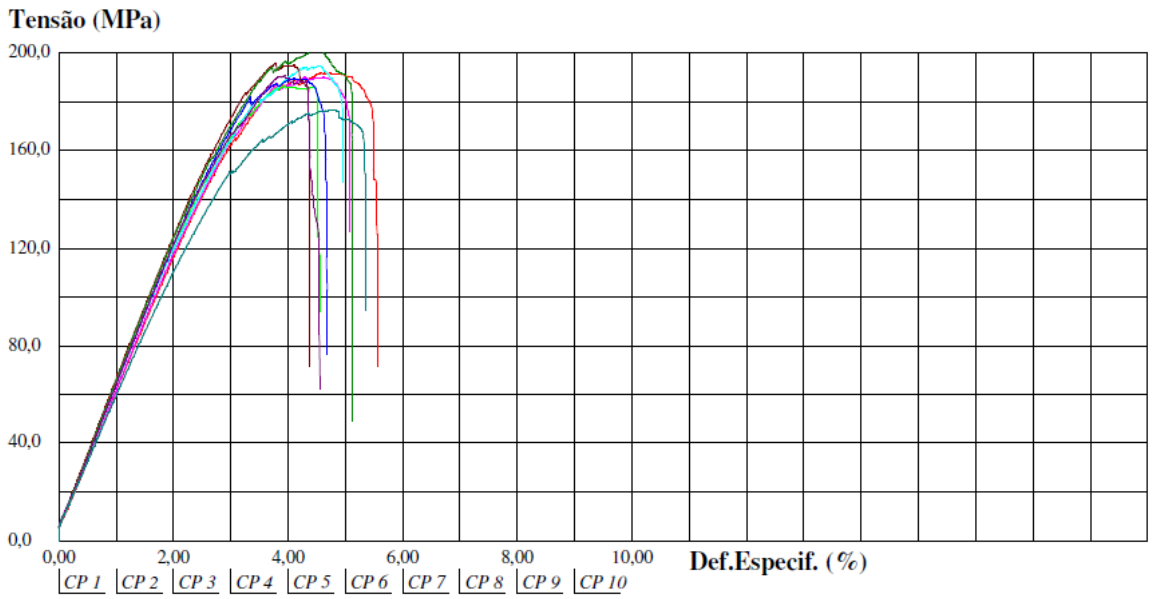
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-TAT em ensaio de flexão.



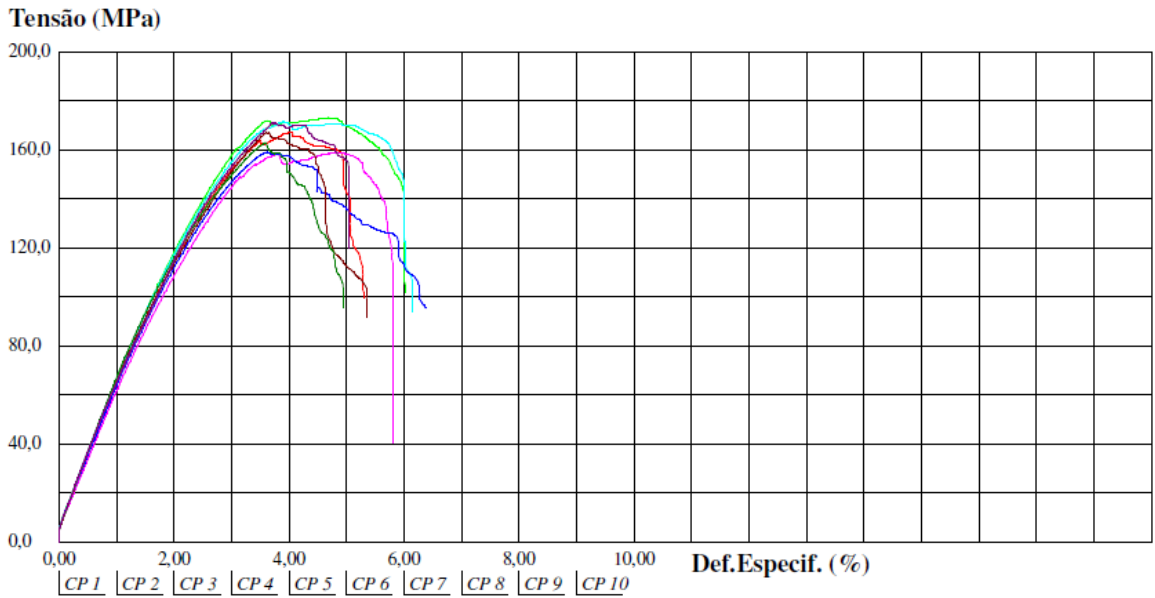
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-ATA em ensaio de flexão.



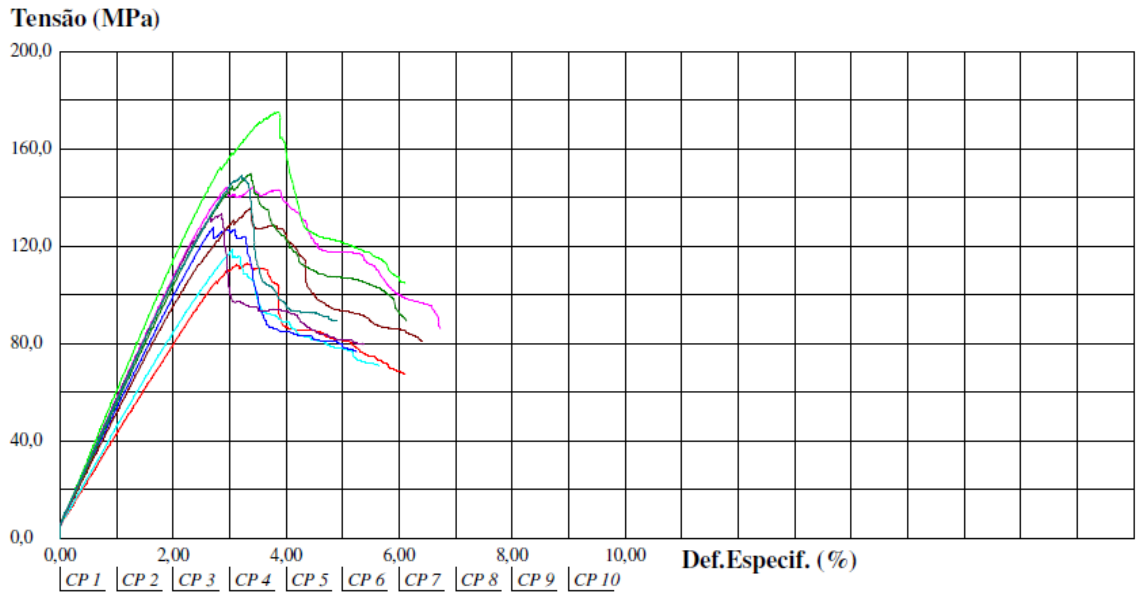
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TATA em ensaio de flexão.



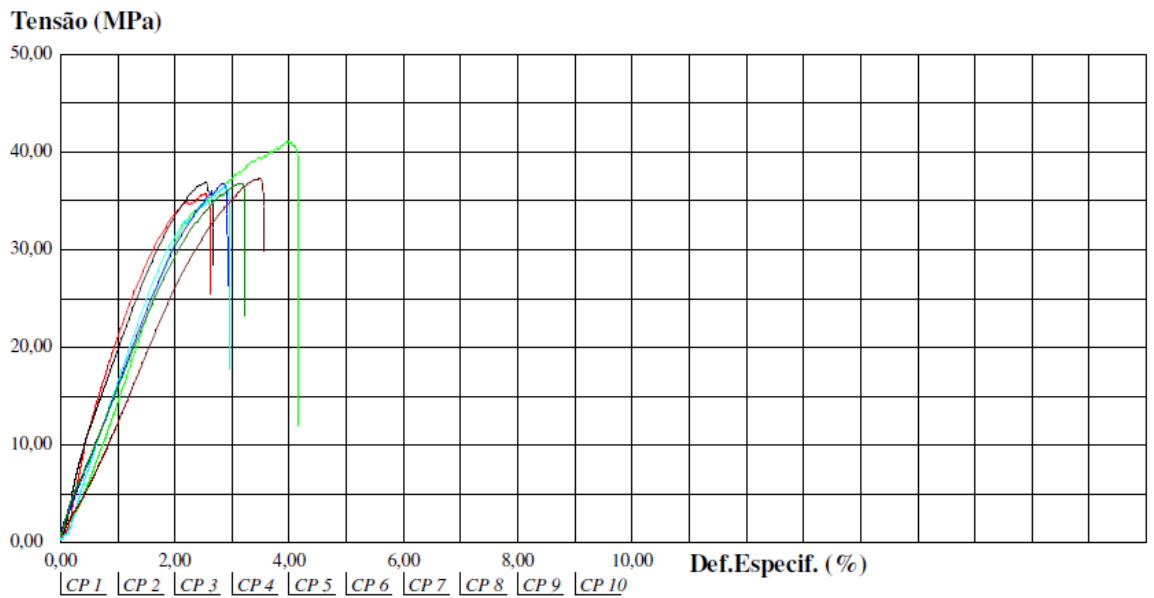
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TAAT em ensaio de flexão.



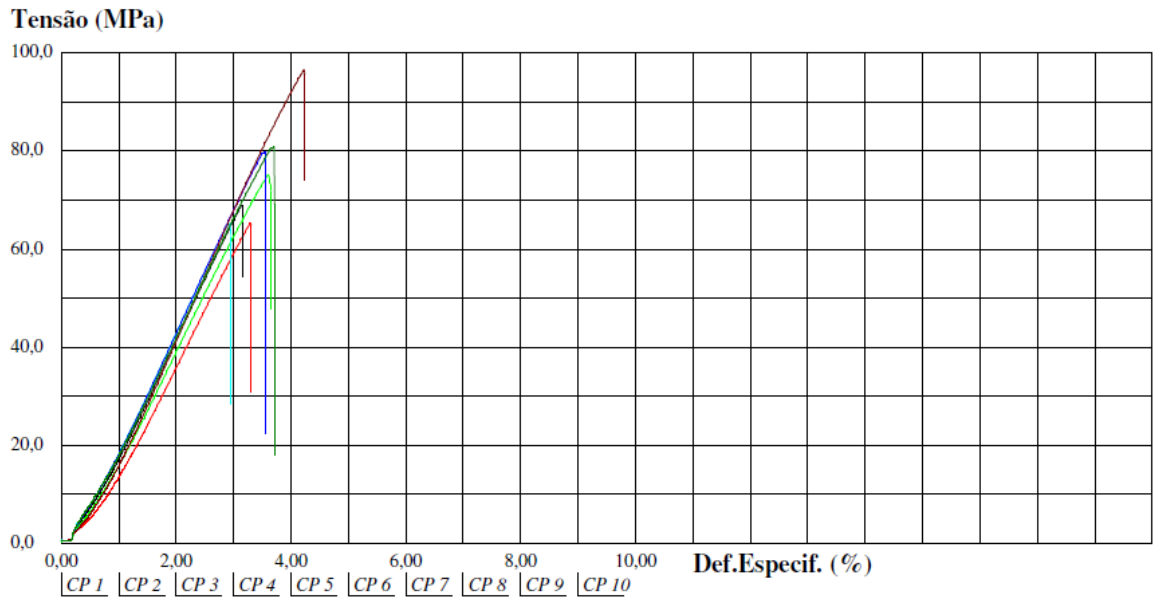
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-ATTA em ensaio de flexão.



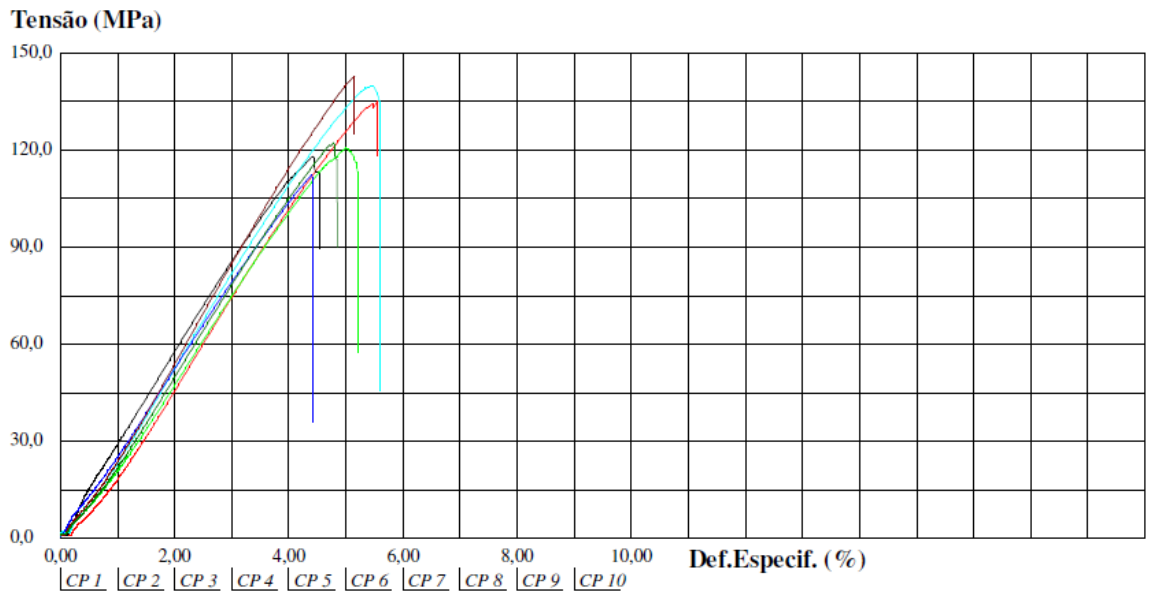
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-TAT em ensaio de tração.



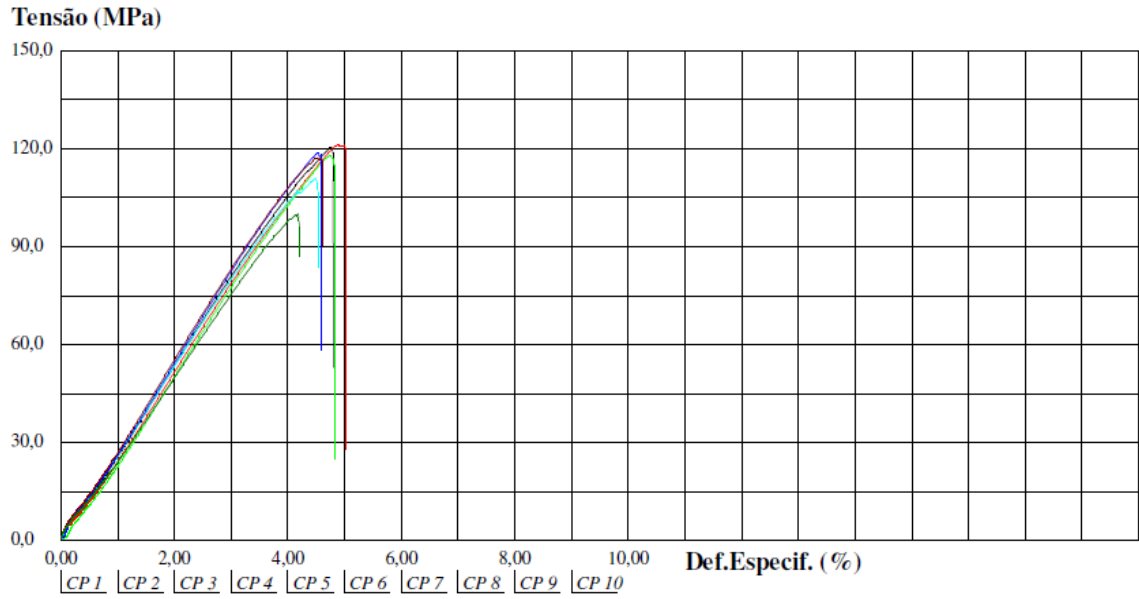
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-3CA-ATA em ensaio de tração.



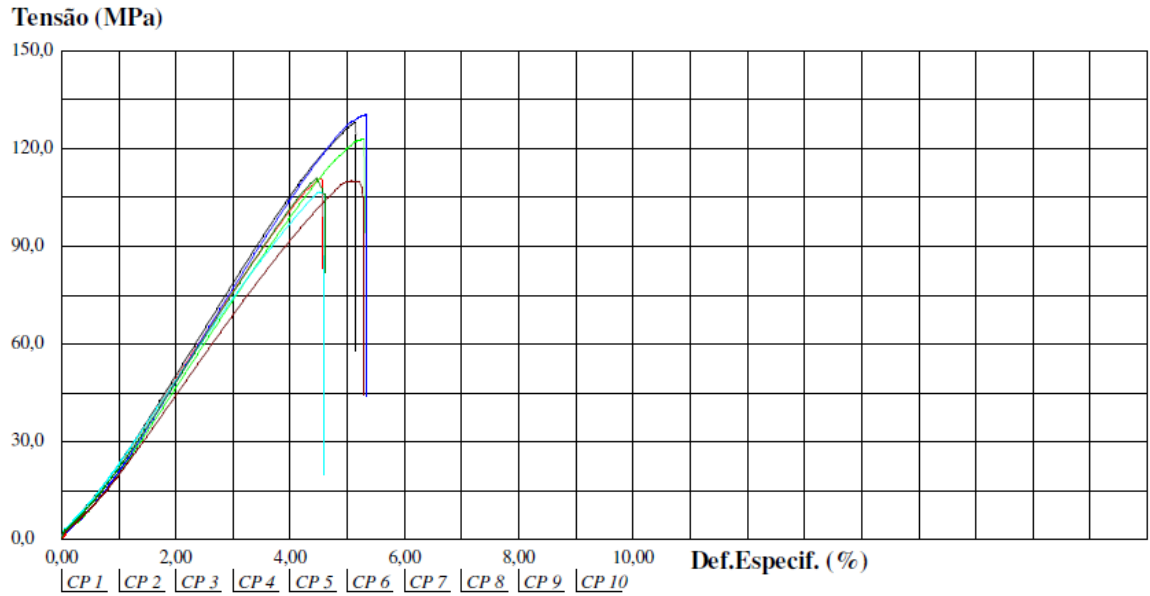
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TATA em ensaio de tração.



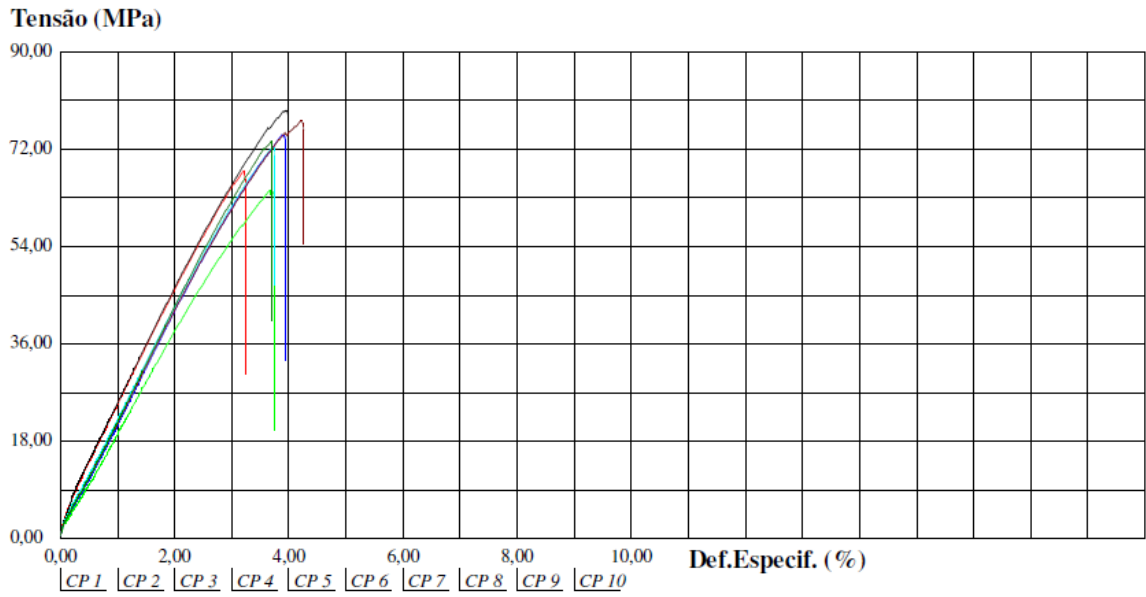
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-TAAT em ensaio de tração.



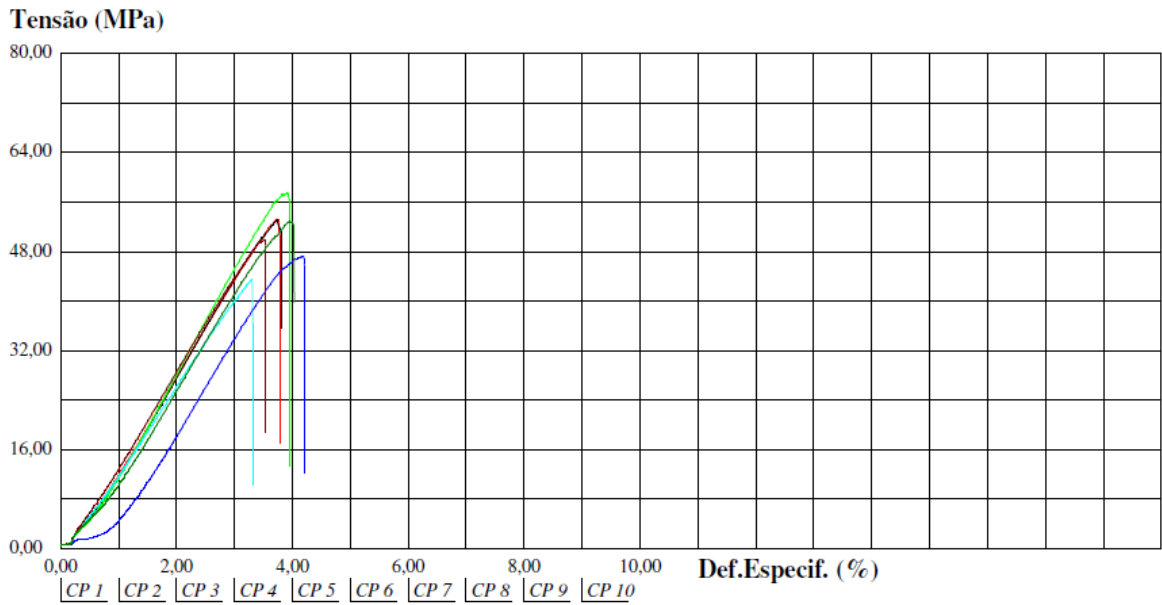
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RPF-4CA-ATTA em ensaio de tração.



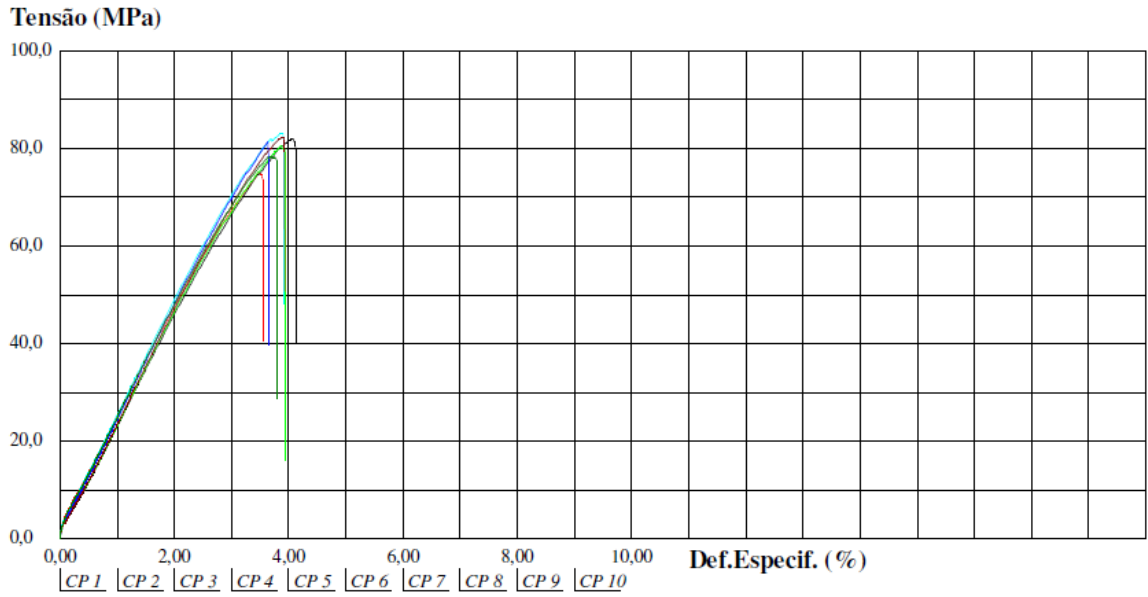
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-TAT em ensaio de tração.



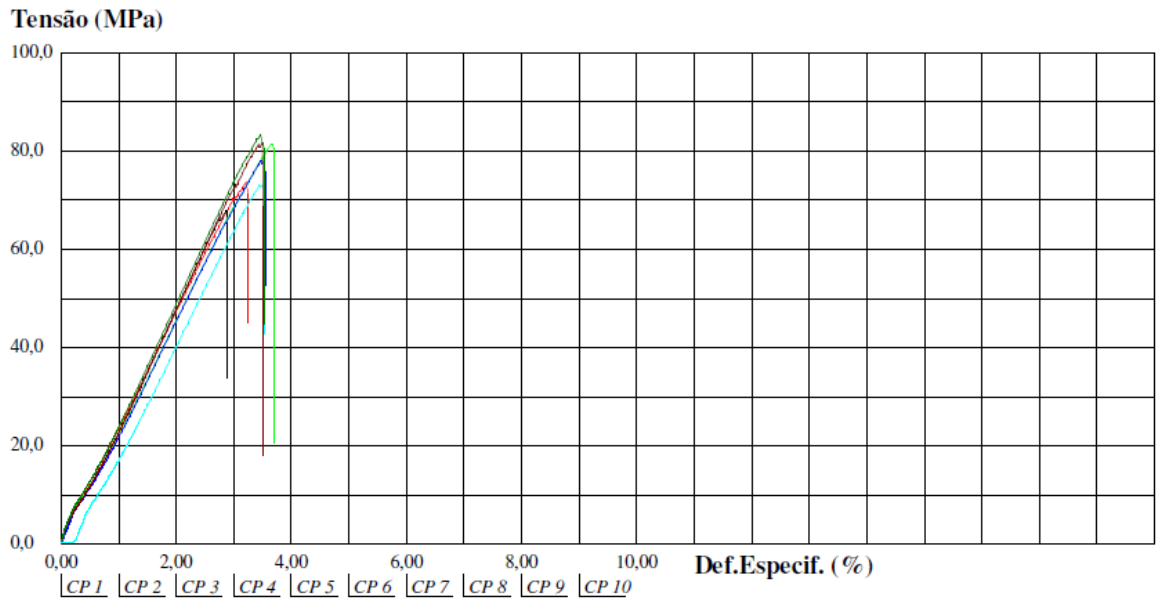
Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-3CA-ATA em ensaio de tração.



Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TATA em ensaio de tração.



Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-TAAT em ensaio de tração.



Curva tensão x deformação dos corpos de prova do compósito C RNC-4CA-ATTA em ensaio de tração.

