



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE**  
**PRODUÇÃO**

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS**  
**PRODUZIDOS COM REAPROVEITAMENTO DE**  
**POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE, REFORÇADOS COM**  
**FIBRAS DE SISAL**

**BRUNO DORNELES DE CASTRO**

**Belo Horizonte, 19 de fevereiro de 2018**

Bruno Dorneles de Castro

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS  
PRODUZIDOS COM REAPROVEITAMENTO DE  
POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE, REFORÇADOS COM  
FIBRAS DE SISAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Processos de Fabricação e Materiais

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Eustáquio de Faria  
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2018

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo aquilo que me proporcionou nesta minha caminhada no mundo, tanto pelas vitórias que me alegraram quanto pelas derrotas que me ensinaram;

Aos meus pais Ailton e Rosilene, pela força, pelo incentivo, pelo amor e por me ensinarem a sempre agradecer por tudo de bom que temos na vida e, ao mesmo tempo, a nunca perder a fé de que podemos, a cada momento, evoluir e que devemos buscar, sempre, o topo.

Ao meu irmão Breno, por todos os momentos prazerosos e divertidos, e por todas as situações que me motivaram a agir exemplarmente em seu detrimento.

Aos meus tios, tias, primos e primas, que me proporcionaram momentos incríveis e aprendizados que me fizeram uma pessoa melhor, tanto no sentido moral quanto no sentido profissional.

Aos meus avôs Petrônio e José (*in memorian*) e às minhas avós Conceição (*in memorian*) e Luzia (*in memorian*), pelo exemplo que representam para mim. Sei que a cada momento difícil em minha vida, há a intervenção positiva de vocês.

À todos os meus amigos, pela parceria, pelos conselhos e por sempre estarem ao meu lado.

Ao professor Paulo Eustáquio de Faria, pela orientação neste trabalho, e aos professores Juan Carlos Campos Rubio, Alexandre Mendes Abrão e Paulo César de Matos Rodrigues, pelo apoio, pelo conhecimento compartilhado e pelo suporte técnico que sempre me foram fornecidos.

Ao Luciano Machado Gomes Vieira e aos parceiros da Universidade Federal de São João del-Rei, pelo auxílio técnico e pela benevolência durante todo o trabalho.

Aos parceiros do mestrado e do doutorado da engenharia de produção e da engenharia mecânica, que sempre me auxiliaram na utilização das máquinas e dos equipamentos.

Às alunas de iniciação científica do curso de Engenharia Ambiental, Júlia Amaral dos Santos e Claudia Victória Campos Rubio, por contribuírem na confecção dos compósitos e em diversas tarefas necessárias à realização deste estudo.

À CAPES, pelo auxílio financeiro que possibilitou os meus estudos neste mestrado.

À todos que, como eu, gostam de ver pessoas perseverantes, honestas e positivas, progredirem na vida e buscarem um mundo melhor para todos.

## EPÍGRAFE

*“Corra, coelho, corra  
Cave aquele buraco, esqueça o sol  
E quando finalmente o trabalho terminar  
Não se sente, é hora de cavar um outro!”*

Roger Waters *in* Breathe

# SUMÁRIO

<b>NOMENCLATURA</b> .....	7
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	9
<b>LISTA DE GRÁFICOS</b> .....	11
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	13
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	14
<b>RESUMO</b> .....	15
<b>ABSTRACT</b> .....	16
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1 Objetivo geral</b> .....	17
<b>1.2 Objetivos específicos</b> .....	18
<b>1.3 Justificativa</b> .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
<b>2.1 Definição e classificação dos compósitos</b> .....	20
<b>2.2 Compósitos com matriz polimérica</b> .....	22
2.2.1 O polietileno.....	30
<b>2.3 Compósitos reforçados com fibras naturais</b> .....	36
2.3.1 As fibras de sisal .....	41
<b>2.4 Compósitos de polietileno reforçados com fibras naturais</b> .....	45
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	48
<b>3.1 Planejamento dos experimentos e fatores de investigação</b> .....	49
<b>3.2 Materiais</b> .....	50
<b>3.3 Caracterização da máquina de prensagem a quente</b> .....	51
<b>3.4 Processo de fabricação dos compósitos</b> .....	52
<b>3.5 Ensaio mecânicos</b> .....	56
3.5.1 Ensaio mecânicos de flexão.....	56
3.5.2 Ensaio mecânicos de tração .....	58
3.5.3 Ensaio mecânicos de impacto.....	60
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	62
<b>4.1 Análise geral dos compósitos de PEAD reforçados com sisal</b> .....	62
4.2.1 Módulo de elasticidade na flexão dos compósitos .....	64
4.2.2 Resistência à flexão dos compósitos .....	67

4.2.3	Análise das fraturas resultantes do esforço de flexão nos compósitos .....	69
4.2.4	Análise de variância dos resultados dos ensaios de flexão.....	71
<b>4.3</b>	<b>Ensaio de tração.....</b>	<b>74</b>
4.3.1	Módulo de elasticidade na tração dos compósitos .....	74
4.3.2	Resistência à tração dos compósitos .....	78
4.3.3	Análise das fraturas resultantes do esforço de tração nos compósitos .....	80
4.3.4	Análise de variância dos resultados dos ensaios de tração.....	82
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de Impacto.....</b>	<b>85</b>
4.4.1	Energia absorvida ao impacto .....	85
4.4.2	Análise da fratura resultante da energia absorvida por impacto nos compósitos .....	86
4.4.3	Análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto.....	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE A - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de flexão .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE B - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de tração.....</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE C - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de impacto.....</b>	<b>113</b>

## NOMENCLATURA

BMI	Bismaleimida
DM/DT	Direção da extrusão/direção transversal à extrusão
$E_c$	Energia absorvida pelo impacto (J)
EP	Epóxi
EVA	Copolímero de etileno e acetato de vinila
$KMnO_4$	Permanganato de potássio
MOE	Módulo de elasticidade (GPa)
$MOE_f$	Módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão (GPa)
$MOE_t$	Módulo de elasticidade obtido no ensaio de tração (GPa)
$MOR_f$	Módulo de resistência obtido no ensaio de flexão (MPa)
$MOR_t$	Módulo de resistência obtido no ensaio de tração (MPa)
NaOH	Hidróxido de sódio
PAI	Poliamida-imida
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
TR/90	Polietileno de alta densidade de origem tradicional, reforçado com tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$
TR/45	Polietileno de alta densidade de origem tradicional, reforçado com tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$
VE/90	Polietileno de alta densidade de origem verde, reforçado com tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$
VE/45	Polietileno de alta densidade de origem verde, reforçado com tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PEBDL	Polietileno de baixa densidade linear
PE-g-MA	Polietileno grafitizado com anidrido maleico
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PET	Tereftalato de polietileno
PMMA	Polimetil metacrilato



PP	Polipropileno
PPS	Sulfeto de polifenileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoroetileno (Teflon)
PVC	Poli[cloreto de vinila]
PUR	Poliuretano
SIL	Silicone

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – As classes de compósitos.....	20
FIGURA 2.2 – Formas de cadeias poliméricas .....	22
FIGURA 2.3 – Defeitos comuns em compósitos: (a) Delaminação, (b) Fratura, (c) Falta de Resina e (d) Rasgamento (pull-out) de fibras.....	26
FIGURA 2.4 – Os símbolos dos plásticos estabelecidos pela NBR 13230.....	28
FIGURA 2.5 – Processamento para a obtenção de plásticos .....	30
FIGURA 2.6 – Representações da estrutura do PE.....	31
FIGURA 2.7 – Estruturação das cadeias moleculares dos PE lineares e ramificados .....	31
FIGURA 2.8 – Processo produtivo do PE verde .....	33
FIGURA 2.9 – Tipos de fibras, conforme a morfologia .....	36
FIGURA 2.10 – Estrutura molecular da (a) celulose, da (b) lignina e da (c) hemicelulose.....	38
FIGURA 2.11 – Estrutura da fibra vegetal.....	38
FIGURA 2.12 – Fibras contínuas (a) unidirecionadas e (b) bidirecionadas .....	39
FIGURA 2.13 – Tecidos tramados do tipo (a) simples, (b) cesto, (c) cetim e (d) sarja.....	40
FIGURA 2.14 – A <i>agave sisalana</i> .....	41
FIGURA 2.15 – Aplicações das fibras de sisal no setor automobilístico .....	43
FIGURA 2.16 – Aplicações da madeira plástica.....	45
FIGURA 3.1 – Máquina usada na prensagem dos compósitos via (a) croqui e (b) foto.....	50
FIGURA 3.2 – Orientação dos tecidos de sisal: (a) $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ e (b) $[\pm 45^\circ]$ .....	51
FIGURA 3.3 – Camadas dos compósito PEAD-sisal .....	52
FIGURA 3.4 – (a) Posicionamento do compósito no centro da parte inferior da máquina e (b) do bloco superior da máquina, realizando a compressão no compósito.....	53
FIGURA 3.5 – Compósito após a prensagem e a retirada de porções laterais.....	54
FIGURA 3.6 – Máquina de ensaios de flexão e dimensão dos corpos de prova ensaiados .....	55
FIGURA 3.7 – Máquina de ensaios de tração e dimensão dos corpos de prova ensaiados .....	57
FIGURA 3.8 – Máquina de ensaios de impacto Charpy e dimensão dos corpos de prova ensaiados.....	59
FIGURA 4.1 – Seção lateral de um compósito de PEAD reforçado com tecido de sisal na orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ .....	61
FIGURA 4.2 – Seção lateral de um compósito de PEAD reforçado com tecido de sisal na orientação $[\pm 45^\circ]$ .....	62

FIGURA 4.3 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de flexão: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/45, (d) TR/90, (e) VE/45 e (f) VE/90 .....	74
FIGURA 4.4 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de tração: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/45, (d) TR/90, (e) VE/45 e (f) VE/90 .....	80
FIGURA 4.5 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de impacto: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/45, (d) TR/90, (e) VE/45 e (f) VE/90 .....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 – Módulo de elasticidade na flexão dos corpos de prova .....	63
GRÁFICO 4.2 – Exemplos de diagramas de força e percurso (deslocamento) na flexão de compósitos de cada condição, com enfoque na reta do regime elástico .....	65
GRÁFICO 4.3 – Resistência à flexão dos corpos de prova.....	66
GRÁFICO 4.4 – Esboço do comportamento dos compósitos no ensaio de flexão, com base na força e no deslocamento (curvas sobrepostas) .....	68
GRÁFICO 4.5 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de $MOE_f$ nos ensaios de flexão .....	72
GRÁFICO 4.6 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de $MOE_f$ nos ensaios de flexão.....	72
GRÁFICO 4.7 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de $MOR_f$ nos ensaios de flexão .....	73
GRÁFICO 4.8 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de $MOR_f$ nos ensaios de flexão.....	73
GRÁFICO 4.9 – Módulo de elasticidade na tração dos corpos de prova .....	74
GRÁFICO 4.10 – Exemplos de diagramas tensão-deformação na tração de compósitos de cada condição, com enfoque na reta do regime elástico .....	76
GRÁFICO 4.11 – Resistência à tração dos corpos de prova .....	77
GRÁFICO 4.12 – Esboço do comportamento dos compósitos no ensaio de tração, com base na tensão e na deformação (curvas sobrepostas).....	78
GRÁFICO 4.13 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de $MOE_t$ nos ensaios de tração .....	82
GRÁFICO 4.14 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de $MOE_t$ nos ensaios de tração.....	83
GRÁFICO 4.15 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de $MOR_t$ nos ensaios de tração .....	83
GRÁFICO 4.16 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de $MOR_t$ nos ensaios de tração.....	84
GRÁFICO 4.17 – Energia absorvida ao impacto dos corpos de prova.....	84
GRÁFICO 4.18 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de $E_c$ nos ensaios de impacto Charpy .....	89

GRÁFICO 4.19 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de $E_c$ nos ensaios de impacto Charpy .....	89
---	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - Tipos de polímeros quanto à estrutura química do monômero .....	23
TABELA 2.2 - Matrizes termorrígidas e termoplásticas utilizadas em compósitos .....	25
TABELA 2.3 - Formas habituais de tratamento de resíduos plásticos.....	27
TABELA 2.4 - Propriedades do PEAD e do PEBD.....	32
TABELA 2.5 - Propriedades do PEAD verde utilizado em sacolas de varejo e embalagens para alimentos congelados.....	34
TABELA 2.6 - Diferenças entre o PE convencional e o PE verde, numa perspectiva mercadológica.....	35
TABELA 2.7 - Propriedades mecânicas de fibras naturais .....	37
TABELA 2.8 - Propriedades mecânicas da fibra de sisal, conforme a posição na fibra.....	41
TABELA 2.9 - Propriedades mecânicas do sisal, conforme diferentes massas específicas ....	42
TABELA 3.1 - Planejamento experimental do estudo .....	48
TABELA 4.1 - Ensaio de flexão: médias do $MOE_f$ , do $MOR_f$ e da deformação até a fratura na flexão dos compósitos .....	70
TABELA 4.2 - Ensaio de flexão: análise de variância do $MOE_f$ e do $MOR_f$ dos compósitos.....	71
TABELA 4.3 - Ensaio de tração: médias amostrais do $MOE_t$ , do $MOR_t$ e da deformação até a tensão máxima dos compósitos .....	81
TABELA 4.4 - Ensaio de tração: análise de variância do $MOE_t$ e do $MOR_t$ dos compósitos	81
TABELA 4.5 - Ensaio de impacto Charpy: análise de variância da $E_c$ dos compósitos .....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
ALMACO	Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos
APAEB	Associação Comunitária de Produção e Comercialização do Sisal
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CITec	Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
COSIBRA	Companhia Sisal do Brasil
MINITAB®	Software estatístico
NBR	Norma Brasileira
TRAPEZIUMX®	Software auxiliador para ensaios mecânicos
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei

## RESUMO

A produção e o consumo de materiais que utilizam plásticos têm sido cada vez mais estudados, uma vez que o uso excessivo de sua matéria-prima, o petróleo, e a sua incorreta destinação final podem trazer sérios danos ao meio ambiente. Por outro lado, percebe-se um crescimento no uso de fibras naturais como reforço de polímeros, em busca de materiais com propriedades superiores aos dois materiais isoladamente, formando os chamados compósitos. Considerando um material amplamente utilizado pelo homem, a sacola plástica, e a possibilidade de reciclar tal material, este estudo tem como objetivo caracterizar o comportamento mecânico de compósitos fabricados com reaproveitamento de sacolas plásticas de polietileno de alta densidade (PEAD), reforçadas com tecidos de fibras de sisal. As sacolas de PEAD desse estudo são do tipo tradicional, obtidas a partir do petróleo, e do tipo verde, originadas do etanol da cana-de-açúcar. Os tecidos de sisal, por sua vez, são dispostos no PEAD, sob duas orientações biaxiais: em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  e em  $[\pm 45^\circ]$ . Foram realizados ensaios de flexão em três pontos, de tração e de impacto Charpy. Os ensaios de flexão em três pontos mostraram que os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$  possuem maior módulo de elasticidade na flexão que os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ . Com base nos ensaios de tração e de impacto Charpy, os compósitos com tecidos na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram maiores módulo de elasticidade na tração, resistência à tração e energia absorvida ao impacto que os compósitos com tecidos de sisal orientados a  $[\pm 45^\circ]$ . Com relação à matriz dos compósitos, os compósitos com PEAD verde apresentaram propriedades mecânicas que qualificam o PEAD verde como substituto ao PEAD tradicional.

**Palavras chaves:** Compósitos, polietileno de alta densidade, tecidos de sisal.



## ABSTRACT

The production and consumption of materials that use plastics have been strongly studied. The use of its raw material, petroleum, and its incorrect disposal, can cause significant damage to environment. There is also a tendency of using natural fibers that can reinforce plastics to provide superior materials, forming composites. Considering a material largely used by man, the plastic bag made of high density polyethylene (HDPE), and the possibility of reusing this material, this study aims to characterize the mechanical behavior of composites made with reuse of HDPE from plastic bags, with woven sisal fibers as reinforcement. Plastic bags with HDPE from traditional type, originated from petroleum, and the green type, originated from ethanol of sugarcane, were investigated as matrix of composites. Woven sisal fibers were arranged in  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  and  $[\pm 45^\circ]$  orientations. Three - point flexural, tensile and Charpy impact tests were performed. Three-point flexural tests showed that composites reinforced with woven sisal fibers in orientation  $[\pm 45^\circ]$  had higher modulus of elasticity in bending than composites reinforced with woven sisal fibers in orientation  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ . Tensile and Charpy impact tests showed that composites reinforced with woven sisal fibers in orientation  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  had higher modulus of elasticity in tensile, tensile strength and energy absorbed by impact than composites reinforced with woven sisal fibers in orientation  $[\pm 45^\circ]$ . Regarding to the matrix composites, results about mechanical behavior of composites with green HDPE showed that this material can be a substitute of traditional HDPE as matrix in composites.

**Keywords:** Composites, high density polyethylene, woven sisal fibers.

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais surge diante das constantes mudanças habituais que a humanidade vivencia ao longo do tempo. Uma vez que muitos dos recursos naturais não são utilizados de forma consciente pelo homem, torna-se essencial a busca por inovações que visam ao atendimento das diversas necessidades humanas. Nesse contexto, os materiais compósitos têm sido uma ótima alternativa, devido à diversidade de materiais que podem constituirlos e as ótimas combinações de propriedades que os mesmos podem apresentar.

Com relação ao meio ambiente, o alinhamento dos materiais compósitos com a visão baseada no objetivo de garantir que os recursos atuais perdurem para as próximas gerações, reflete-se principalmente em seus ciclos de vida, desde as fases iniciais, como extração e fabricação, até as fases finais, como descarte e reciclagem.

Marinelli *et al.* (2008) ressaltam, por exemplo, que tal alinhamento pode trazer, inclusive, ganhos financeiros para a cadeia produtiva, como no caso da utilização de fibras naturais em compósitos poliméricos, que contribuem para a fixação de carbono na natureza e reduzem a quantidade de gás carbônico na atmosfera, gerando vantagens no comércio de carbono, com base no Protocolo de Kyoto.

A produção e venda de compósitos têm movimentado a economia de diversos países, inclusive aqueles considerados subdesenvolvidos. Com relação ao Brasil, por exemplo, segundo dados disponibilizados pela ALMACO - Associação Latino-Americana de Materiais Compósitos (2016) – a produção de materiais compósitos, em 2015, totalizou 162 mil toneladas, gerando um faturamento de R\$ 2,665 bilhões para o setor no período.

Diante desse contexto, este estudo surge em face à grande necessidade de se reutilizar plásticos, como as sacolas plásticas, evitando uma indevida destinação final após sua utilização pelo consumidor.

## 1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral caracterizar o comportamento mecânico de materiais compósitos fabricados com reaproveitamento de polietileno de alta densidade (PEAD), a partir de sacolas plásticas, com reforço de tecidos de fibras de sisal. O estudo busca

definir propriedades mecânicas de tração, de flexão e de impacto desses compósitos, além de investigar a influência nessas propriedades da origem do PEAD (produzido a partir do petróleo e do etanol da cana-de-açúcar) e da orientação dos tecidos de sisal nos compósitos (orientações  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  e  $[\pm 45^\circ]$ ).

## 1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Fabricar e relatar o processo necessário para a construção e a confecção dos compósitos feitos com sacolas plásticas de PEAD, reforçados com tecidos de sisal;
- Analisar e discutir os principais pontos relativos à adesão entre as fases dos compósitos em estudo;
- Realizar ensaios de flexão em três pontos com os compósitos em estudo, a fim de analisar estatisticamente a influência da origem do PEAD e da orientação dos tecidos de sisal no módulo de elasticidade à flexão ( $MOE_f$ ) e na resistência à flexão ( $MOR_f$ ) desses materiais;
- Realizar ensaios de tração com os compósitos em estudo, para analisar estatisticamente a influência da origem do PEAD e da orientação dos tecidos de sisal no módulo de elasticidade à tração ( $MOE_t$ ) e na resistência à tração ( $MOR_t$ ) dos materiais citados;
- Realizar ensaios de impacto Charpy com os compósitos em estudo, para que seja possível analisar estatisticamente a influência da origem do PEAD e da orientação dos tecidos de sisal na energia absorvida ao impacto ( $E_c$ ) desses materiais.
- Analisar a aplicabilidade do PEAD produzido a partir do etanol da cana-de-açúcar (PEAD verde) como matriz de compósitos reforçados com tecidos de fibras de sisal, em comparação aos que utilizam, como matriz, o PEAD originado totalmente do petróleo (PEAD tradicional).

## 1.3 Justificativa

Com o intuito de reaproveitar materiais plásticos, este estudo se justifica como uma forma de produzir, com base em materiais sustentáveis, painéis estruturais que suportem cargas e esforços dentro dos limites relatados pelos resultados alcançados neste trabalho. Assim, dentre as possíveis aplicações, considerando os testes realizados neste trabalho como caracterização mecânica, recomenda-se seu uso na indústria aeronáutica, que têm utilizado maciçamente

materiais compósitos na fabricação de componentes para aeronaves, e na indústria de construção civil, considerando a utilização desse material em placas estruturais, como divisórias e forros. O presente estudo propõe uma metodologia de baixa complexidade, de baixo custo e com diretrizes sustentáveis para a produção desses materiais compósitos, considerando essas aplicações.

Além disso, ao analisar os estudos já realizados com compósitos de polietileno reforçados com fibras de sisal, percebe-se que na maioria das vezes, busca-se um determinado tratamento em ambos os componentes do compósito, através da adição ou da subtração de alguma determinada substância ou grupo funcional molecular, tornando mais propícia a adesão entre as fases. Em muitos casos, os compósitos resultantes possuem componentes não naturais (de origem sustentável), o que sugere um possível dano ao meio ambiente, no caso do descarte indevido desses compósitos, após seu uso.

A adição de elementos compatibilizantes também pode representar um problema em relação à reciclagem desses materiais, uma vez que muitos deles podem interagir quimicamente de forma inesperada em alguma das fases de fabricação do material resultante da reciclagem.

Ressalta-se também que a utilização de materiais com fibras de sisal estimula o desenvolvimento econômico-social de várias famílias que sobrevivem com base em ganhos financeiros relativos ao cultivo dessa planta.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Definição e classificação dos compósitos

A norma ASTM D3878 (2015) define o material compósito como uma substância constituída por dois ou mais materiais, insolúveis entre si, que são combinados a fim de formar um material de engenharia útil, que possua certas propriedades que seus componentes, isoladamente, não possuem. A norma também ressalta que o compósito é inerentemente heterogêneo em uma micro escala, ainda que haja a possibilidade de o compósito se assemelhar, em macro escala, a uma forma homogênea.

Os compósitos atuam com sinergia, ou seja, apresentam propriedades superiores às dos seus constituintes, o que resulta em combinações incomuns de rigidez, resistência mecânica, peso, desempenho em altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza e condutividade (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

De acordo com Meyers e Chawla (2009), os compósitos consistem de uma fase contínua chamada matriz e uma fase distribuída na matriz, chamada de reforço. A quantidade dessas fases e a maneira com que elas são arranjadas são determinantes para as propriedades mecânicas do compósito. Ainda segundo os autores, os materiais utilizados como matriz e como reforço podem ser de origem metálica, cerâmica ou polimérica, e o reforço pode ser na forma de partículas, de fibras contínuas ou de fibras curtas. A FIG. 2.1 mostra algumas das características dos compósitos conforme os materiais constituintes e as possíveis combinações dos mesmos.

Segundo a norma ASTM D3878 (2015), quando um compósito possui um conjunto de fibras que formam lâminas (folhas) com uma ou mais orientações diferentes, com base em uma direção de referência, ele é denominado um laminado. Quando as lâminas são formadas por diferentes materiais, ele é classificado como um compósito híbrido. Essa mesma norma define uma outra classe de compósitos, as “construções em sanduíche” (também chamados de painéis em sanduíche), que são arranjos estruturais que consistem em três ou mais camadas de materiais diferentes ligados, geralmente compostos por duas lâminas finas, com um núcleo espesso e leve.

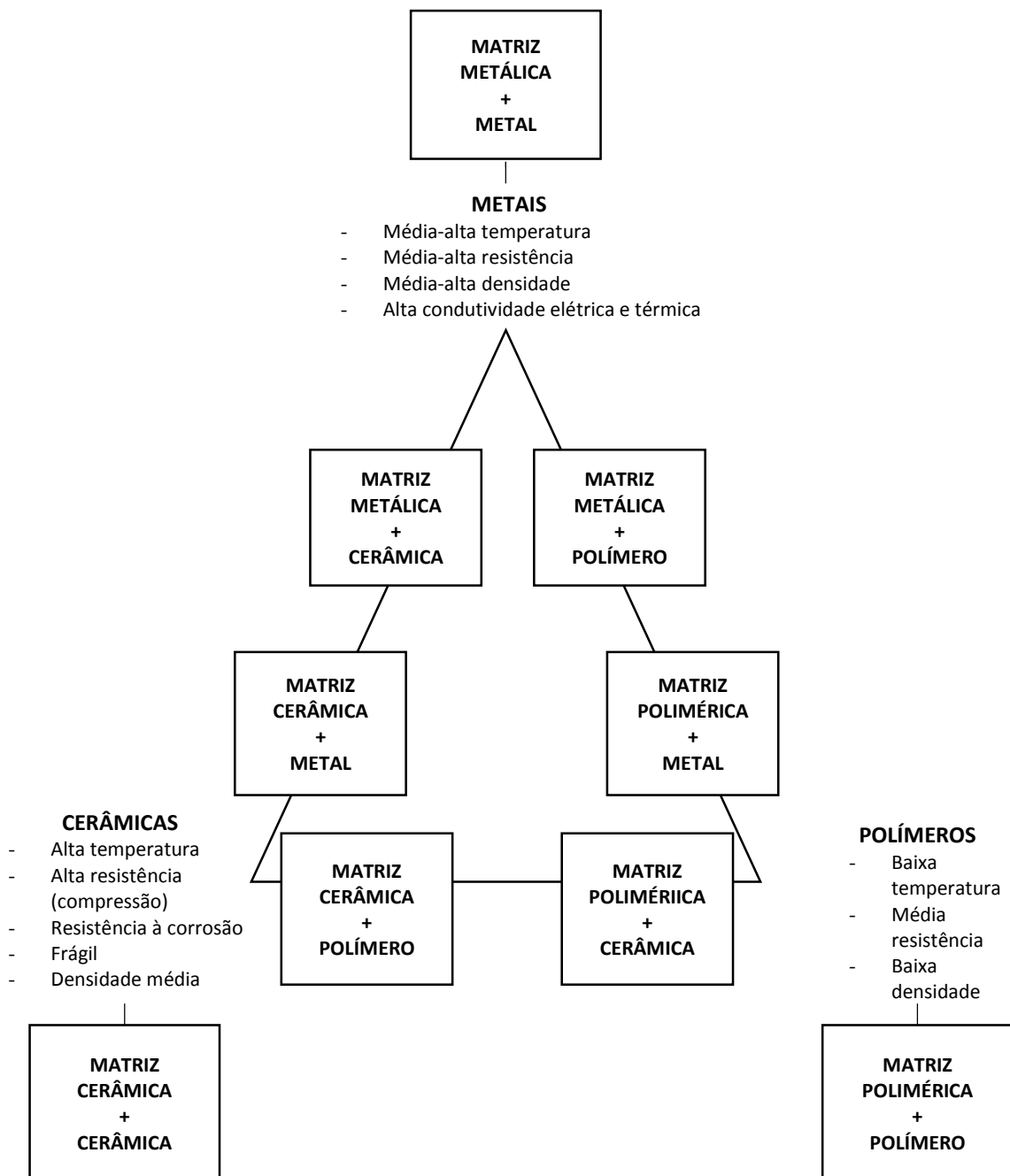


FIGURA 2.1 – As classes de compósitos.

FONTE – ADAPTADO DE MEYERS E CHAWLA, 2009, p. 8

Há ainda os chamados compósitos avançados que, segundo Askeland e Wright (2014), possuem uma aplicação em situações muito críticas, como no caso da indústria aeroespacial. Os autores destacam também a frequente utilização desses compósitos em artigos esportivos, como na produção de raquetes de tênis, esquis e varas de pescar.

Deve-se salientar que a interface entre a matriz e o reforço é de grande importância para o desempenho do compósito, uma vez que esta deve ser forte o suficiente para transmitir a tensão ou deformação devida a uma carga mecânica de uma fase para a outra. Caso essa comunicação não ocorra de forma correta, ao invés de se obter o melhor comportamento de cada componente, pode-se obter o contrário, o pior comportamento de cada um (SHACKELFORD, 2008). A falta de adesão entre as fases de um material compósito pode resultar em colapsos prematuros quando estes são submetidos a esforços mecânicos (SOUZA, 2012)

Chard *et al.* (2013) destacam um tema que tem sido de grande relevância entre os pesquisadores de materiais compósitos, que é o desenvolvimento dos chamados materiais compósitos “verdes”, uma vez que eles constituem uma alternativa sustentável ao uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, que são amplamente utilizados pela indústria. Segundo os autores, tanto a utilização de fibras naturais em substituição à fibra de vidro, quando a utilização de polímeros biodegradáveis em detrimento dos polímeros de base petroquímica, contribuem para a diminuição da degradação pelo compósito ao meio ambiente.

## 2.2 Compósitos com matriz polimérica

Os polímeros são constituídos de macromoléculas, moléculas grandes de elevado peso molecular, cuja classificação pode levar em consideração diversas características. Quanto à origem, os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. Dentre os naturais, pode-se citar as macromoléculas dos polissacarídeos, dos poli-hidrocarbonetos, das proteínas e dos ácidos nucleicos, que formam polímeros como o amido, o algodão, a madeira, a lã e a seda. Os sintéticos, por sua vez, são produzidos pelo homem e são ligados à indústria petroquímica, dentre os quais pode-se citar as macromoléculas do poliestireno e do náilon (MANO; MENDES, 2004).

Segundo Canevarolo Júnior (2006), os polímeros são produzidos através de uma molécula simples, com uma unidade de repetição, chamada monômero (oriundo das palavras gregas *mono*, que significa único, e *mero*, que significa unidade de repetição). Assim, quando a cadeia principal do polímero é formado por apenas um monômero, ele é classificado como homopolímero. Quando há dois meros diferentes, ele é dito copolímero, e quando há três meros diferentes, ele é um terpolímero.

No que diz respeito ao tipo de cadeia, a FIG. 2.2 mostra três configurações básicas: (a) as cadeias lineares, constituídas de apenas uma cadeia principal, formada pela polimerização

de monômeros bifuncionais (com, no mínimo, dois pontos reativos passíveis de reação em condições favoráveis); (b) as cadeias ramificadas, nas quais partem prolongamentos, curtos ou longos, da cadeia principal, formados pelo mesmo mero que compõe a cadeia principal ou por um outro mero; e (c) cadeias com ligações cruzadas, que contém segmentos de cadeia com ligações primárias covalentes fortes, que unem as cadeias poliméricas (CANEVAROLO JÚNIOR, 2006).

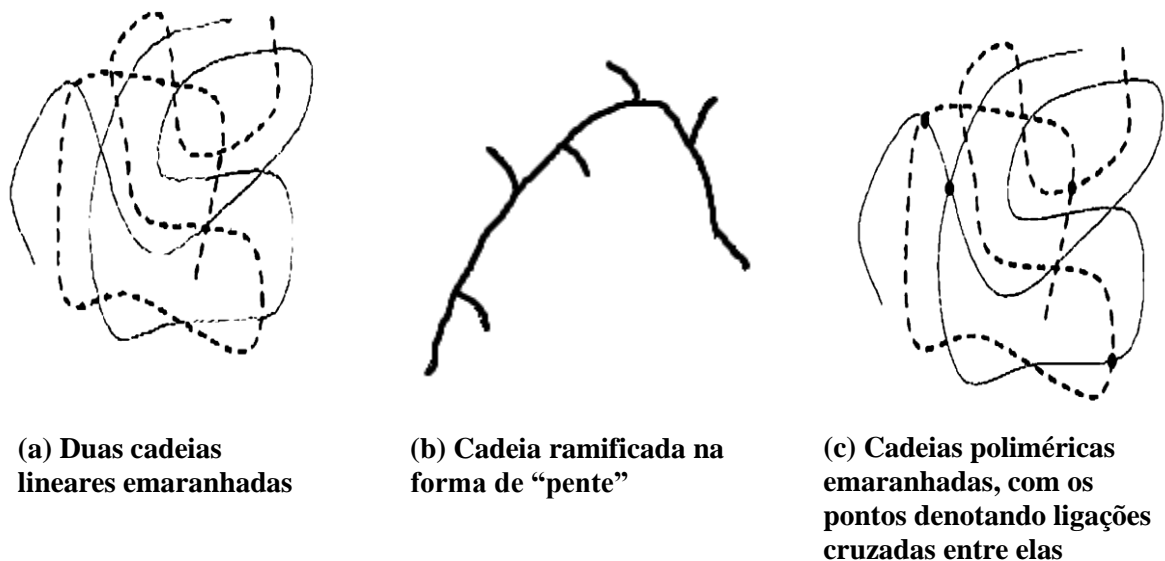


FIGURA 2.2 – Formas de cadeias poliméricas.

FONTE - ADAPTADO DE CANEVAROLO JÚNIOR, 2006, p. 43

Ebewele (2000) classifica os polímeros quanto ao método de polimerização (quebra da ligação dupla de monômeros), como oriundos de mecanismos de adição, de condensação e por abertura de anel.

Segundo o autor, polímeros formados por poliadição são produzidos por reações nas quais monômeros são adicionados um após o outro para um rápido crescimento da cadeia (quebra de ligações duplas). Por outro lado, os polímeros formados por policondensação são formados através de uma série de reações que acontecem em blocos, na qual duas ou mais espécies de monômeros reagem e formam uma molécula maior, liberando outras moléculas, como H<sub>2</sub>O. Por fim, os polímeros formados por abertura de anel são aqueles que derivam da abertura (linearização) de estruturas cíclicas.

Pode-se também classificar os polímeros conforme a estrutura química da cadeia polimérica, isto é, conforme os grupos funcionais presentes na macromolécula. Sob essa perspectiva, pode-se citar inúmeros grupos, como poliamidas, poliésteres e poliuretanos



(MANO; MENDES, 2004). A TAB. 2.1 mostra alguns exemplos com base nessa classificação, além da estrutura química do referente monômero e de aplicações comuns desses polímeros.

TABELA 2.1  
Tipos de polímeros quanto à estrutura química do monômero.

POLÍMERO	MONÔMERO	APLICAÇÕES
Poli(etileno) (PE)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \cdots - \text{C} - \text{C} - \cdots \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Filmes para embalagens, isolamento de fios, garrafas, tubos, objetos domésticos
Poli(cloreto de vinila) (PVC)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ \cdots - \text{C} - \text{C} - \cdots \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Tubos, válvulas, acessórios, pisos, coberturas de vinil de carros
Poli(propileno) (PP)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \cdots - \text{C} - \text{C} - \cdots \\   \quad   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} - \text{C} - \text{H} \\   \\ \text{H} \end{array}$	Tanques, fibras de tapete, cordas, embalagens
Poli(stireno) (PS)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ \cdots - \text{C} - \text{C} - \cdots \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Esquemas para embalagem e isolamento, painéis luminosos, caixas de ovos
Poli(tetrafluoretileno) (PTFE) (Teflon)	$\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\   \quad   \\ \cdots - \text{C} - \text{C} - \cdots \\   \quad   \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array}$	Vedações, válvulas, revestimentos não aderentes

FONTE – ADAPTADO DE ASKELAND E PHULÉ, 2008, p. 490

Mano e Mendes (2004) ressaltam, com relação à organização das moléculas, que os polímeros podem existir em estado amorfo, com uma disposição desordenada das moléculas, ou cristalino, com uma ordenação tridimensional, havendo cristalinidade. Os autores salientam que a cristalinidade depende da estrutura química, do peso molecular e do tratamento físico (temperatura, tempo e forças a que foi submetido o material).

Uma outra classificação, de acordo com Atkins e Jones (2012), leva em consideração a influência da temperatura, dividindo-os em termoplásticos e termorrígidos. Os

polímeros termoplásticos são maleáveis, e podem amolecer novamente após serem moldados, possibilitando a conformação e a reciclagem através da sua fundição. Já os polímeros termorrígidos adquirem uma forma permanente no molde e não amolecem sob aquecimento, devido à ligações cruzadas que, quando quebradas, resultam na degradação do polímero. Padilha (2000) salienta que os termorrígidos são totalmente amorfos, enquanto que os termoplásticos apresentam-se, na maioria das vezes, parcialmente cristalinos, ainda que existam alguns totalmente amorfos.

Ashby, Shercliff e Cebon (2012) destacam os elastômeros como uma outra classe de polímeros, com propriedades mecânicas bem peculiares. De acordo com os autores, os elastômeros possuem rigidez extremamente baixa (cerca de 500 a 5000 vezes menor que a dos metais), sendo capazes de recuperar, em muitas vezes, o seu comprimento inicial quando liberados de um estiramento. Segundo Askeland e Phulé (2008), os elastômeros podem ser termoplásticos ou termorrígidos pouco reticulados, com cadeias moleculares divididas desordenadamente e com poucas ligações cruzadas, o que lhes confere tal capacidade de sofrer uma grande deformação elástica.

Com relação aos polímeros utilizados como a fase matriz de compósitos, Zaman *et al.* (2014) afirmam que eles podem ser tanto uma resina termorrígida quanto uma resina termoplástica. Os autores também ressaltam que a matriz ainda pode conter enchimentos e aditivos, como fibras, entre as quais se destacam as fibras de vidro, as fibras de carbono e as fibras de aramida. O TAB. 2.2 mostra algumas resinas que já foram utilizadas como matriz em compósitos, segundo estudos realizados por diversos autores.

A definição da resina e das fibras a serem utilizadas em um determinado material compósito influencia diretamente na integridade física do material resultante, uma vez que a adesão entre o reforço e a matriz é de extrema importância para a boa resistência do compósito em esforços mecânicos, evitando defeitos que comprometam a qualidade final do material em sua aplicação (KHASHABA, 2012). Dentre os defeitos mais comuns, pode-se citar, conforme a ASTM D2563 (2002): a delaminação (FIG. 2.3a), separação das camadas em um compósito laminado; a fratura (FIG. 2.3b), ruptura na superfície do laminado sem penetração total; a falta de resina (FIG. 2.3c), uma área, geralmente localizada na beira de um plástico laminado, onde o reforço não foi molhado com resina; o rasgamento de fibras, ou *pull-out*, (FIG. 2.3d), quando as fibras são sacadas da matriz, devido a alguma tensão (JOSEPH; MEDEIROS; CARVALHO, 1999).

TABELA 2.2

Matrizes termorrígidas e termoplásticas utilizadas em compósitos.

TIPO DE MATRIZ	POLÍMERO	AUTORES
TERMORRÍGIDA	Bismaleimida (BMI)	Yang <i>et al.</i> (2016)
	Epóxi (EP)	Lian <i>et al.</i> (2016)
	Fenólico	Najafloo, Rezadoust e Latifi (2016)
	Poliéster	Dhandapani, Nayak e Mohanty (2016)
	Poliuretano (PUR)	Han (2016)
	Silicone (SIL)	Racles <i>et al.</i> (2016)
TERMOPLÁSTICA	Polietileno de alta densidade (PEAD)	Zhao, Li e Bai (2014)
	Polietileno de baixa densidade (PEBD)	Marzouk <i>et al.</i> (2015)
	Polycarbonato (PC)	Jang, Cho e Kim (2016)
	Sulfeto de polifenileno (PPS)	Pappadà <i>et al.</i> (2015)
	Poliestireno (PS)	Kourki <i>et al.</i> (2016)
	Poli-éter-éter-cetona (PEEK)	Lin <i>et al.</i> (2016)
	Poliamida-imida (PAI)	Li <i>et al.</i> (2013)

Askeland e Phulé (2008) destacam que os epóxis e os poliésteres insaturados são termorrígidos frequentemente utilizados como matrizes para compósitos com reforço de fibras. Dentre os termoplásticos, destacam-se as aplicações em altas temperaturas de resinas como a PEEK e o PPS (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016).

De acordo com Zaman *et al.* (2014), apesar das inúmeras vantagens dos compósitos poliméricos reforçados com fibras, eles representam uma grande preocupação com relação aos impactos à saúde humana, necessitando de constantes inovações nas suas formas de produção e de reciclagem, e de rigidez no controle e na fiscalização por parte dos órgãos ambientais responsáveis. Segundo os autores, alguns polímeros, como o monômero de estireno, são perigosos para os seres humanos, pois podem liberar gases tóxicos quando queimados, e podem ser cancerígenos.

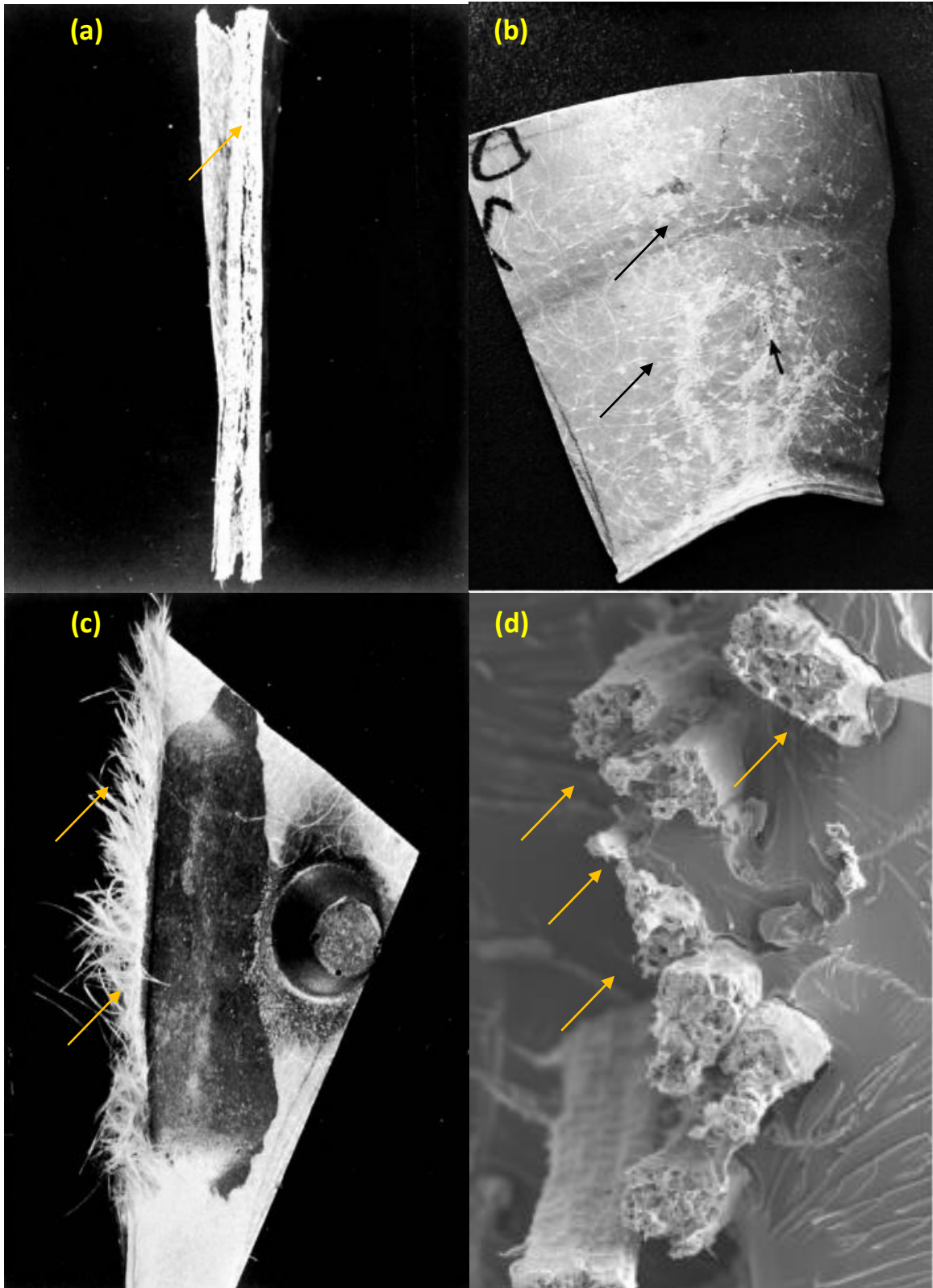


FIGURA 2.3 – Defeitos comuns em compósitos: (a) Delaminação, (b) Fratura, (c) Falta de Resina e (d) Rasgamento (pull-out) de fibras.

FONTE: ASTM D2563 (2002), PIRES, 2009

Franchetti e Marconato (2006) enfatizam a mudança de visão na produção de plásticos, passando de um objetivo em produzir materiais altamente duráveis para uma visão de redução de ciclo de vida dos mesmos, cuja motivação se embasa especialmente no descarte final desses plásticos, após sua utilização. Conforme os autores, os resíduos plásticos tem sido tratados através de quatro estratégias diferentes: a incineração, através da queima dos resíduos em fornos; a reciclagem, com base na reutilização dos resíduos sob a forma de um novo material; os aterros sanitários, nos quais os resíduos são descartados em um local previamente preparado, distante de locais habitáveis; e a biodegradação, através de plásticos compostáveis (que se deterioram através da ação de microrganismos). Tais estratégias possuem tanto pontos positivos quanto negativos, como mostra o TAB. 2.3.

TABELA 2.3  
Formas habituais de tratamento de resíduos plásticos.

<b>Tipo de tratamento</b>	<b>Pontos positivos</b>	<b>Pontos negativos</b>
Incineração	Diminui rapidamente o volume de material descartado	Alto custo dos fornos de aquecimento e poluição, pela liberação de produtos tóxicos
Reciclagem	Redução da quantidade de resíduos sólidos e economia de matéria-prima e energia	Possível inviabilidade econômica, dependendo do contexto em que a empresa está inserida
Aterros sanitários	Possibilidade de aproveitamento dos gases liberados pelos resíduos como fonte energética	Contaminação de lençóis freáticos, se construídos em locais indevidos
Biodegradação	Deterioração por agentes naturais	Quando degradados, liberam gases que contribuem para o efeito estufa

FONTE – FRANCHETTI E MARCONATO, 2006, p. 1-2

A fim de facilitar a triagem e a correta destinação desses resíduos após o uso do consumidor final, a norma ABNT NBR 13230 (1994) estabelece símbolos que identificam os diversos tipos de resinas termoplásticas utilizadas, como mostra a FIG. 2.4. Além dos símbolos,

há uma breve caracterização desses termoplásticos, incluindo exemplos de produtos que os utilizam.

 <p>PET</p>	<p><b>Tereftalato de polietileno - PET</b></p> <p>Os plásticos de tereftalato de polietileno são transparentes, inquebráveis, impermeáveis e leves. O PET é utilizado, principalmente, na fabricação de garrafas de água mineral e refrigerante, embalagens para produtos alimentícios, como óleos e sucos, de limpeza, cosméticos e farmacêuticos. Também está presente em bandejas para micro-ondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis, entre outros.</p>
 <p>PEAD</p>	<p><b>Polietileno de alta densidade - PEAD</b></p> <p>Embalagens para alimentos, produtos têxteis, cosméticos e embalagens descartáveis são produzidas a partir do polietileno de alta densidade. Resistente a baixas temperaturas, leve, impermeável, rígido e com resistência química, o PEAD também é usado na fabricação de tampas de refrigerante, potes para freezer e garrafões de água mineral, além de brinquedos e eletrodomésticos, cerdas de vassoura e escovas, sacarias (revestimento e impermeabilização), fitas adesivas, entre outros.</p>
 <p>V ou PVC</p>	<p><b>Cloreto de polivinila - PVC</b></p> <p>Por suas características como rigidez, impermeabilidade e resistência à temperatura, os cloretos de polivinila são usados principalmente em tubos, conexões, cabos elétricos e materiais de construção como janelas, portas, esquadrias e cabos de energia. O PVC também pode ser aplicado na fabricação de brinquedos, alguns tipos de tecido, chinelos, cartões de crédito, tubos para máquinas de lavar roupa e caixas de alimentos.</p>
 <p>PEBD</p>	<p><b>Polietileno de baixa densidade - PEBD e Polietileno de baixa densidade linear - PEBDL</b></p> <p>São flexíveis, leves, transparentes e impermeáveis. O polietileno de baixa densidade (PEBD) é utilizado na produção de filmes termocontroláveis, como fios e cabos para televisão e telefone, filmes de uso geral, embalagens flexíveis, impermeabilização de papel (embalagens tetrapak), entre outros. O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) é aplicado, principalmente, na produção de embalagens de alimentos, fraldas, absorventes higiênicos e sacaria industrial.</p>
 <p>PP</p>	<p><b>Polipropileno - PP</b></p> <p>Embalagens para alimentos, produtos têxteis e cosméticos, tampas de refrigerante, potes para freezer e garrafões de água mineral são alguns dos produtos fabricados com polipropileno. Esses plásticos conservam o aroma e são resistentes a mudanças de temperatura, brilhantes, rígidos e inquebráveis. Também são utilizados em produtos hospitalares descartáveis, tubos</p>
 <p>PS</p>	<p><b>Poliestireno – PS</b></p> <p>Entre os produtos fabricados com o poliestireno estão os copos descartáveis, eletrodomésticos, produtos para construção civil, autopeças, potes para iogurte, sorvete e doces, frascos, bandejas de supermercados, pratos, tampas, aparelhos de barbear</p>
 <p>OUTROS</p>	<p><b>Copolímero de etileno e acetato de vinila – EVA</b></p> <p>O copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA) é empregado principalmente na fabricação de calçados, colas, adesivos, peças técnicas, fios e cabos.</p>

FIGURA 2.4 – Os símbolos dos plásticos estabelecidos pela NBR 13230.

FONTE - ABIQUIM (2017)

### 2.2.1 O polietileno

O polietileno (PE) é considerado o polímero mais utilizado na vida diária do ser humano. Ele pode ser obtido através de uma série de processamentos, cuja início se dá pelo refino do petróleo (salienta-se também a possibilidade de utilização de gás natural e de etanol de cana-de-açúcar). A partir do refino, têm-se a nafta, um composto volátil e incolor, que serve de base para resinas, solventes e outros produtos. A nafta, por sua vez, serve de matéria-prima para o processo de craqueamento, no qual o nafta se transforma em diversas moléculas, dentre elas o eteno. Em seguida, tem-se a polimerização, na qual as moléculas de eteno se ligam, constituindo longas cadeias moleculares, dando origem ao PE. Por fim, há um processo de transformação (moldagem) por algum processo físico, como termoformagem, a fim de dar forma e cor ao PE, possibilitando, desse modo, a obtenção de um produto pronto a ser destinado ao consumidor (BRASKEM, 2012). A FIG. 2.5 traz um esquema que ilustra a sequência lógica descrita anteriormente.

Constituído por uma longa cadeia semicristalina de átomos de carbono, com átomos de hidrogênio unidos a cada átomo de carbono, o PE é considerado um termoplástico e possui uma estrutura extremamente simples. A FIG. 2.6c mostra o modelo simples bidimensional do PE, que enfatiza as ligações covalentes simples entre os átomos de carbono e de hidrogênio, assim como um modelo tridimensional sólido (FIG. 2.6a) e um modelo esquemático tridimensional (FIG. 2.6b), que mostram as torções presentes na cadeia, por meio dos ângulos de ligações entre os átomos (ASKELAND; PHULÉ, 2008).

Em algumas situações, pode haver a associação de cadeias de PE em alguns dos átomos de carbono, em detrimento de átomos de hidrogênio, criando um PE ramificado (FIG. 2.7a). Quando isso não ocorre, o PE é dito linear (FIG. 2.7b) (WIEBECK; HARADA, 2005).

A estrutura do polímero tem grande influência sobre a sua densidade e suas propriedades mecânicas. De acordo com Coutinho, Mello e Maria (2003), ramificações longas em PE diminuem a densidade, enquanto que as ramificações curtas aumentam a cristalinidade e a resistência à tração ( $MOR_t$ ).

O PE, com base nas ramificações das cadeias moleculares, pode ser dividido em: polietileno de alta densidade (PEAD), que possui apenas ramificações curtas; polietileno de baixa densidade (PEBD), que possui em média três ramificações longas e vinte a trinta ramificações curtas a cada 1000 átomos de carbono; polietileno de baixa densidade linear (PEBDL), que possui somente ligações curtas, porém em maior grau que o PEAD; e polímero reticulado, obtido a partir do entrecruzamento das cadeias do PEBD (AKCELRUD, 2007).



FIGURA 2.5 – Processamento para a obtenção de plásticos.

FONTE – Adaptado de BRASKEM, 2012, p. 6



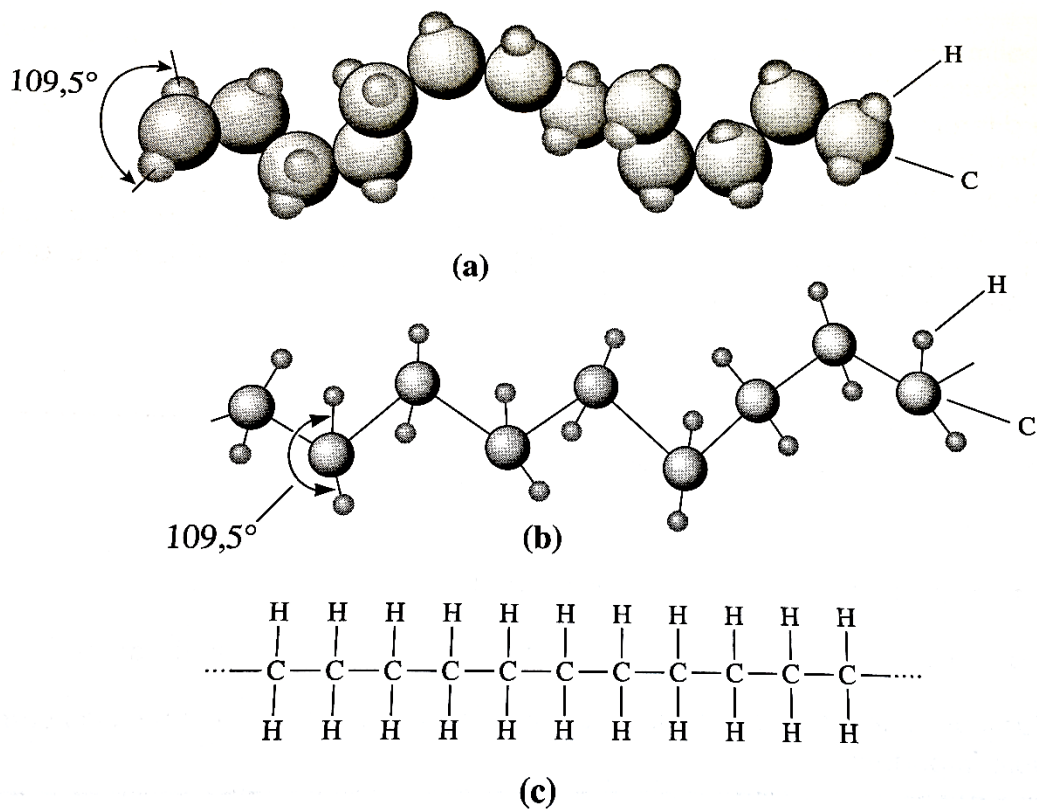


FIGURA 2.6 – Representações da estrutura do PE.

FONTE – ASKELAND E WRIGHT, 2014, p. 482

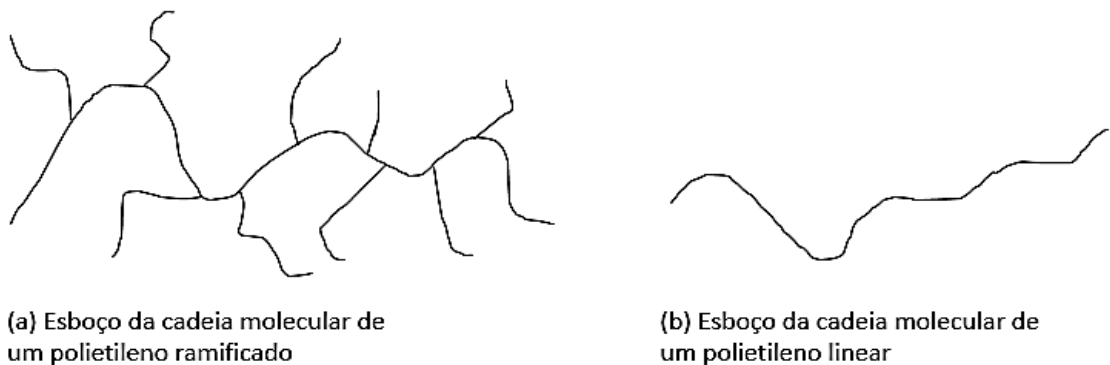


FIGURA 2.7 – Estruturação das cadeias moleculares dos PE lineares e ramificados.

FONTE - ADAPTADO DE WIEBECK E HARADA, 2005, p. 38

O PEAD pode ser obtido a partir do processo de polimerização do eteno, utilizando técnicas de suspensão em solvente, solução e fase gasosa, cuja tecnologia é considerada a mais moderna (APRELINI, 2016).

No que se refere às propriedades mecânicas do PEAD, salienta-se a grande influência exercida pelo peso molecular, pelo teor de ramificações, pela estrutura morfológica e pela orientação das cadeias poliméricas (MILES; BRISTON, 1965 apud COUTINHO; MELLO; MARIA, 2003).

De acordo com Akcelrud (2007), a temperatura de fusão cristalina do PEAD, é de, aproximadamente, 137,5 °C, e o mesmo apresenta alto grau de cristalinidade (entre 65% e 95%), o que lhe confere melhores propriedades mecânicas que o PEBD, que possui baixo grau de cristalinidade.

A TAB. 2.4 mostra alguns valores que caracterizam o PEAD, com base em uma cadeia altamente linear e uma cadeia com baixo grau de ramificação, além de trazer também os valores, relativos ao PEBD. A partir desses valores, percebe-se que o PEAD altamente linear pode apresentar maior módulo de elasticidade na tração ( $MOE_t$ ) e maior resistência à tração ( $MOR_t$ )

TABELA 2.4  
Propriedades do PEAD e do PEBD.

Propriedades	PEAD linear, aproximadamente 1 CH <sub>3</sub> /1000 carbonos		PEAD com poucas ramificações, aproximadamente 3 CH <sub>3</sub> /1000 carbonos		PEBD, altamente ramificado, aproximadamente 20 CH <sub>3</sub> /1000 carbonos	
Índice de fluidez, MFI	5	11	6	0,9	7	1
Densidade, g/cm <sup>3</sup>	0,968	0,966	0,970	0,955	0,918	0,918
Resistência à tração, MPa	20	30	22	30	8,5	10,5
Alongamento limite, %	900	990	1000	1000	500	500
Módulo de elasticidade na tração, MPa	1550	1400	1000	900	500	400
Resistência ao impacto, kJ/m <sup>2</sup>	9	50	20	30	Não quebra	

FONTE – ADAPTADO DE COUTINHO, MELLO E MARIA, 2016, p. 5

Agrela *et al.* (2009) ressaltam uma forte tendência no uso de termoplásticos, como o PE, como matriz polimérica de compósitos reforçados com fibras, principalmente fibras naturais. Os autores salientam que esta tem sido uma ótima medida para a preservação do meio ambiente, devido à possibilidade de reutilização desses materiais após a utilização pelo consumidor final.

Já Candian (2007) afirmou haver possibilidade de uso do PEAD reciclado em elementos estruturais, na indústria civil. Porém, o autor afirma que tal aplicação depende de alguns fatores importantes, como o controle da deformabilidade do PEAD, que pode envolver a utilização de fibras de elevado módulo de elasticidade (MOE) e resistência mecânica (MOR).

Nesse contexto de busca pela utilização (e reutilização) de materiais sustentáveis, o PE produzido a partir do etanol de cana-de-açúcar (também chamado de PE verde) surge como uma ótima alternativa ao PE tradicional. Ele é caracterizado como um polímero inovador, pois captura e fixa gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) da atmosfera durante a sua produção, e não o libera novamente para a atmosfera durante o seu ciclo de vida, contribuindo para uma redução de gases causadores do efeito estufa. Estima-se que para cada quilo de plástico verde produzido, há a captura de 3,09 quilos de  $\text{CO}_2$  (BRASKEM, 2017a).

A produção do PE verde, começa na captação da cana-de-açúcar, que metaboliza dióxido de carbono para a produção de sacarose, que resulta em um tipo de álcool chamado etanol. Em seguida, esse etanol é transformado em eteno, por meio de um processo de desidratação. O eteno, por sua vez, é transformado em PE por meio de um processo de polimerização por adição. A partir disso, o PE verde torna-se aplicável em diversos produtos e já se insere nos segmentos que utilizam o PEAD e o PEBDL (BRASKEM, 2017b). A FIG. 2.8 mostra esquematicamente o processo de transformação que culmina na obtenção do PE verde.

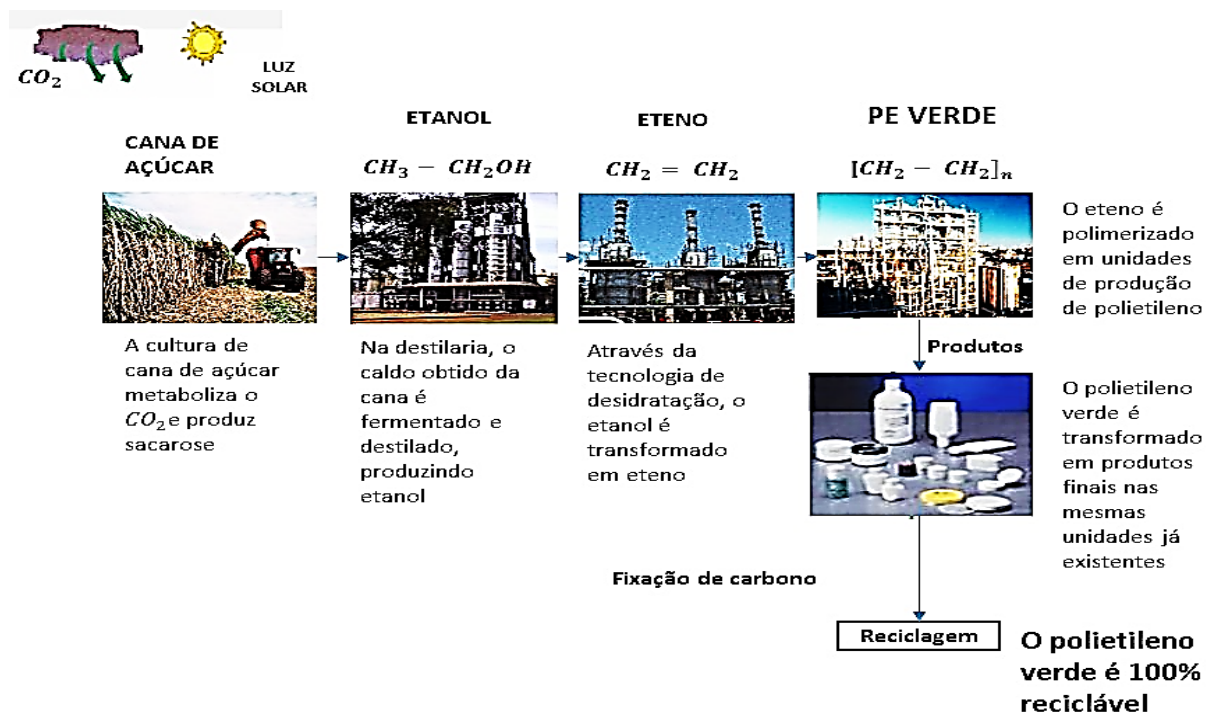


FIGURA 2.8 – Processo produtivo do PE verde.

FONTE – ADAPTADO DE MORSCHBACKER, 2006, p. 9

Segundo a BRASKEM (2017a), o PEAD verde mantém as mesmas propriedades, desempenho e versatilidade dos aplicações dos PEAD de origem fóssil (tradicional), o que facilita o seu uso imediato na cadeia produtiva do plástico. Assim, ele também é reciclável dentro da mesma cadeia de reciclagem do PE tradicional.

Batista (2013) afirma que a grande diferença entre o PEAD tradicional, oriundo da nafta, e o PEAD verde, oriundo do etanol, está nas etapas anteriores à produção dos mesmos, uma vez que o etanol é mais barato e menos poluente. O autor salienta que certos resíduos na produção do etanol necessitam de alguns cuidados quanto ao descarte, o que pode ser resolvido com a utilização dos mesmos como fertilizantes.

A TAB. 2.5 mostra as propriedades do PEAD verde, na sua aplicação em sacolas de varejo, sacolas promocionais, bobinas picotadas e embalagens para alimentos congelados, fabricadas através de extrusão. Os valores foram determinados com base em métodos e testes normalizados pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Os valores do PEAD tradicional, segundo a BRASKEM (2015), são semelhantes aos do PEAD verde.

TABELA 2.5

Propriedades do PEAD verde utilizado em sacolas de varejo e embalagens para alimentos congelados.

<b>Propriedade</b>	<b>Método ASTM</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade	D1505-10/ D792-13	0,952	g/cm <sup>3</sup>
Tensão de ruptura (Direção de extrusão/ Direção transversal à extrusão)	D882-12	85/45	MPa
Alongamento de ruptura (Direção de extrusão/ Direção transversal à extrusão)	D882-12	590/740	%

FONTE – ADAPTADO DE BRASKEM, 2015, p. 31

Deve-se ressaltar também que uma visão que tem sido comum no mercado, por parte das empresas, é a de incentivar as pessoas a consumirem produtos de origem “verde”, ou seja, que causem menor impacto negativo ao meio ambiente, e de transformar essa ideia em um diferencial para o seu produto, em relação aos produtos concorrentes (BELLOLI, 2010). O TAB. 2.6 faz uma comparação, numa perspectiva mercadológica, entre o PE convencional (tradicional) e o PE verde, englobando tanto a visão citada anteriormente, quanto a diferença entre as relações entre consumidor e fornecedor.

Salienta-se que o PE verde não é biodegradável, pois não há a decomposição do polímero em compostos orgânicos, como metano e dióxido de carbono, por mecanismos de ações enzimáticas (WIEBECK, 2007).

TABELA 2.6

Diferenças entre o PE convencional e o PE verde, numa perspectiva mercadológica.

<b>PE tradicional</b>	<b>VS</b>	<b>PE verde</b>
Vendido na grande maioria para transformadores de plástico		Vendido na maioria para empresas de contato direto com o consumidor final
Comprado por empresas em busca de um produto padrão (disponível também de outros concorrentes)		Comprado por empresas que buscam diferenciação
Grande número de clientes de diversos tamanhos		Número limitado de clientes que possuem diretrizes de sustentabilidade
Demanda influenciada por tendências macroeconômicas, como o crescimento chinês		Demanda influenciada por iniciativas próprias e/ou regulamentações específicas
Vasta quantidade de produtores e fornecedores		Baixa disponibilidade

FONTE – ADAPTADO DE BRASKEM, s.d. apud BELLOLI, 2010, p. 30

Conforme Belloli (2010), a não biodegradabilidade do PE verde não é uma desvantagem, visto que a reciclagem dele é de grande importância, uma vez que o PE possui alto valor agregado e pode ser reutilizado inúmeras vezes. Além disso, o autor ressalta que a durabilidade dele é necessária em diversas aplicações e o fato de não liberar dióxido de carbono na atmosfera é benéfico no combate aos problemas oriundos do efeito estufa.

### 2.3 Compósitos reforçados com fibras naturais

De acordo com Picanço (2005), tendo como a base a morfologia, as fibras podem ser artificiais ou naturais. As fibras artificiais são compostas por materiais poliméricos,

metálicos ou cerâmicos, enquanto que as fibras naturais são oriundas de minerais, vegetais e animais. A FIG. 2.9 traz o esquema que divide e exemplifica tais classes.

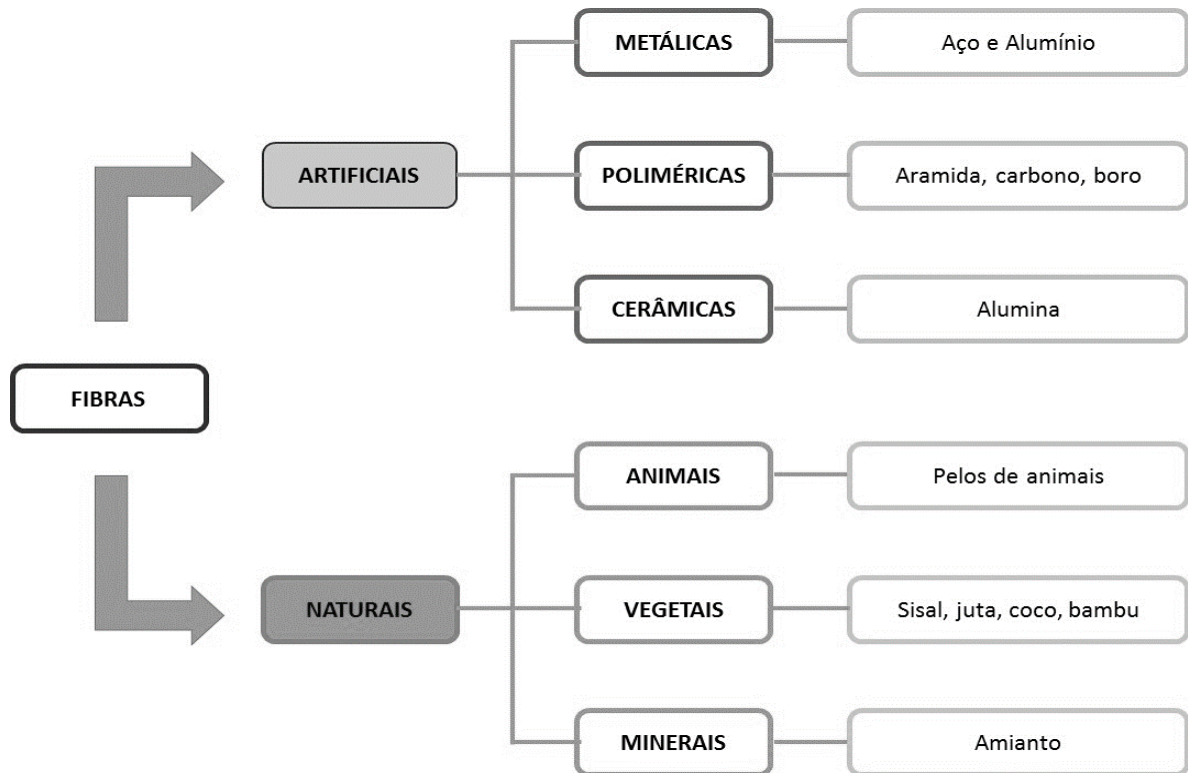


FIGURA 2.9 – Tipos de fibras, conforme a morfologia.

FONTE - IZQUIERDO, 2011, p. 29.

As fibras naturais são consideradas como uma alternativa para as fibras artificiais, uma vez que possuem vantagens como o fato de serem de baixo custo e baixo peso, além de serem renováveis (CHATTOPADHYAY *et al.*, 2011). Além disso, percebe-se uma forte pressão dos grupos ambientalistas para uma preferência na utilização de fibras naturais, pois as fibras artificiais demoram até 150 anos para se decompor no solo. A fibra do sisal, por exemplo, apenas em alguns meses, torna-se um fertilizante natural (COSIBRA, 2016). A TAB. 2.7 mostra alguns exemplos de fibras naturais, além de algumas propriedades delas, como a resistência à tração ( $MOR_t$ ), o módulo de elasticidade à tração ( $MOE_t$ ), o módulo específico (que considera a influência da densidade relativa das fibras na rigidez), a tenacidade, a densidade e absorção de umidade. A partir da tabela, nota-se a boa resistência à tração dessas fibras, alcançando valores próximos a 1000 MPa, como nos casos das fibras de kenaf, de rami, de linho e de sisal.

TABELA 2.7  
Propriedades mecânicas de fibras naturais.

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Módulo específico (GPa)</b>	<b>Tenacidade (MN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de umidade (%)</b>
Algodão	400 - 700	6 - 10	4 - 6,5	-	1,55	8,5
Paina	93,2	4	12,9	-	0,45	10,9
Bambu	571	27	18	-	1,52	-
Linho	510 - 910	50 - 70	34 - 48	-	1,45	12
Cânhamo	300 - 760	30 - 60	20 - 41	-	1,43	12
Juta	200 - 460	20 - 55	14 - 39	440 - 553	1,34	12
Kenaf	300 - 1200	22 - 60	-	-	1,30	17
Rami	915	23	15	-	1,55	8,5
Abacá	14	41	-	-	1,52	14
Fibra de Banana	530	27 - 32	20 - 24	529 - 754	1,35	-
Fibra de Abacaxi	414	60 - 82	42 - 57	413 - 162	1,44	-
Sisal	100 - 800	9 - 22	6 - 15	568 - 640	1,45	11
Fibra de coco	100 - 200	6	5,2	131 - 175	1,15	13

FONTE - ALI *et al.*, 2016, p. 4

As fibras vegetais, especificamente, são constituídas por células individuais, compostas de microfibrilas dispostas em camadas de distintas espessuras. Tais microfibrilas são ricas em celulose (FIG 2.10a), um polímero vegetal de cadeias longas, e estão aglomeradas por hemicelulose (FIG 2.10c) amorfa. Dentro das camadas, há uma cavidade central de seção elíptica, denominada lúmen. As células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e principalmente lignina (FIG 2.10b). No centro da macrofibra (o feixe de filamentos), pode haver cavidades, chamadas de lacunas. Tanto as lacunas quanto o lúmen são responsáveis pela grande incidência de poros permeáveis nas fibras, acarretando em uma elevada absorção de água (SAVASTANO JÚNIOR, 2000).

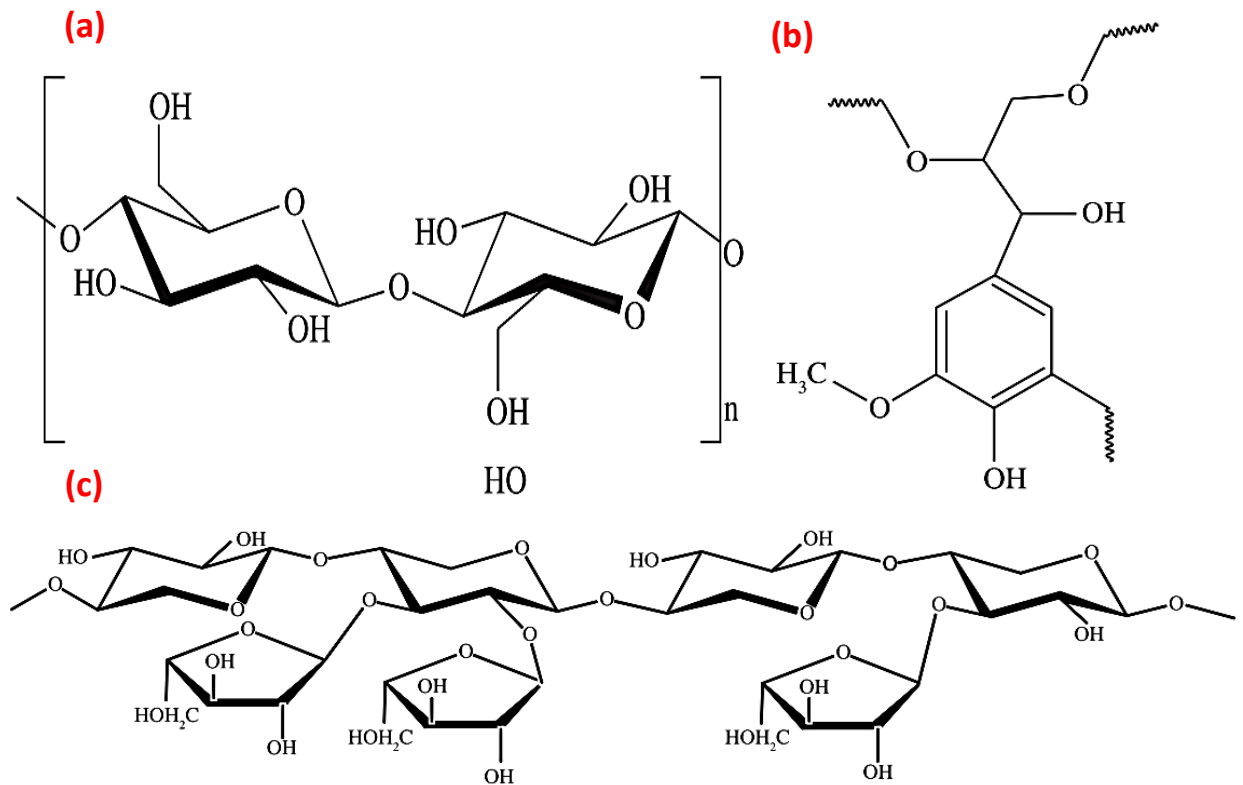


FIGURA 2.10 – Estrutura molecular da (a) celulose, da (b) lignina e da (c) hemicelulose.  
 FONTE – COMA, 2013 e ALBINANTE *et al.*, 2012.

A FIG. 2.11 mostra a estrutura básica de uma fibra vegetal, na qual a parede celular é composta por várias camadas: uma parede primária fina e três paredes secundárias (S1, S2 e S3). Tais camadas são compostas de microfibras orientadas em um determinado arranjo (PEREIRA *et al.*, 2015).

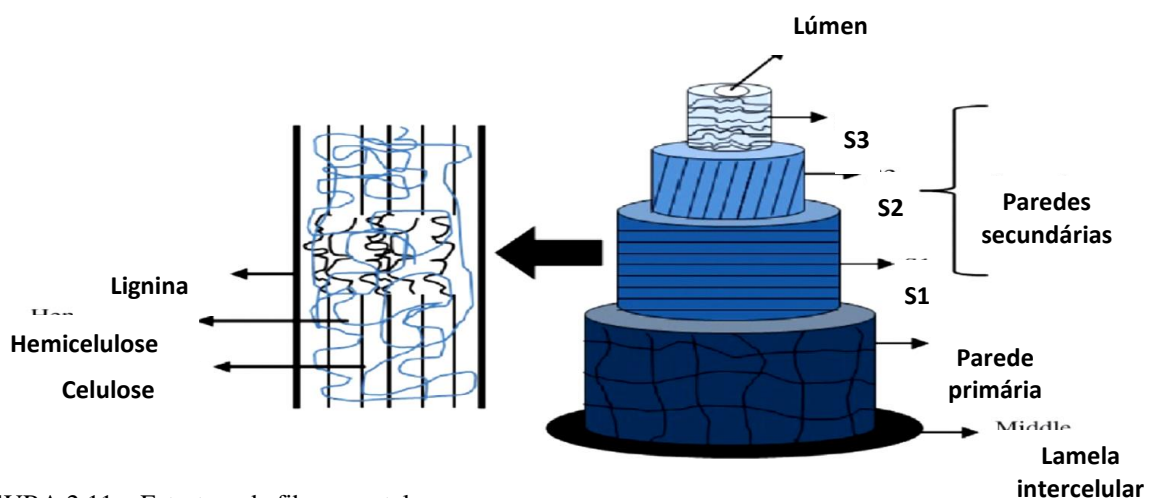


FIGURA 2.11 – Estrutura da fibra vegetal.  
 FONTE - PEREIRA *et al.*, 2015, p. 10



Como visto na FIG. 2.10, as fibras naturais possuem grupos funcionais do tipo hidroxilas (ligações O-H), o que lhes conferem uma característica hidrofílica (caráter polar através das ligações de hidrogênio), ou seja, possuem grande afinidade em absorver água. Esse fato pode causar problemas de adesão, quando essas fibras são usadas como reforço de polímeros, cuja característica é hidrofóbica, com caráter apolar nas ligações das cadeias de carbono (LI; MAI; YE, 2000).

De acordo com Lopes *et al.* (2010), a confecção de compósitos com a utilização de fibras vegetais tem grande viabilidade, no que diz respeito ao uso de materiais provenientes de fontes renováveis, à biodegradabilidade e aos benefícios socioeconômicos gerados na produção de matéria-prima vegetal.

Trombetta (2010), por outro lado, ressalta a importância da orientação das fibras no que se refere ao sinergismo, ou seja, na busca de um compósito com melhores propriedades mecânicas que a matriz e a fibra, isoladamente. Desse modo, quando se têm fibras contínuas, pode-se utilizá-las, por exemplo, em uma única direção (unidirecional), na qual elas são todas paralelas, ou em mais direções, como no caso bidirecional (ou biaxial). A FIG. 2.12 mostra um exemplo de fibras unidirecionais de sisal e de fibras bidirecionais de linho.

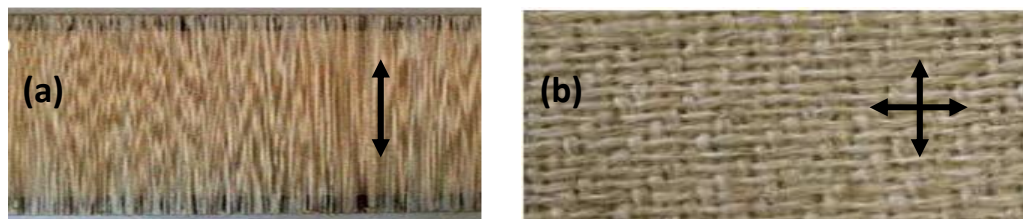


FIGURA 2.12 – Fibras contínuas (a) unidirecionadas e (b) bidirecionadas.

FONTE - VIEIRA *et al.*, 2016, p. 3; CICALA *et al.*, 2010, p. 10

Kox e Flanagan (1997, apud Pardini, 2000) também salientam a importância da orientação das fibras, principalmente na resistência mecânica ao cisalhamento interlaminar e na tenacidade à fratura interlaminar dos compósitos poliméricos reforçados com fibras. Segundo os autores, o uso de reforços multidirecionais (preformas) de fibras, em detrimento dos arranjos unidirecionais e bidirecionais, permite um balanceamento na orientação e na interconexão das fibras, resultando em propriedades praticamente isotrópicas, ou seja, apresentam propriedades físicas semelhantes em todas as direções.

John e Thomas (2008) citam diversas configurações para tecidos bidirecionais (ou tramados), dentre os quais se destacam o simples, o cesto, e o cetim e a sarja (FIG. 2.13).

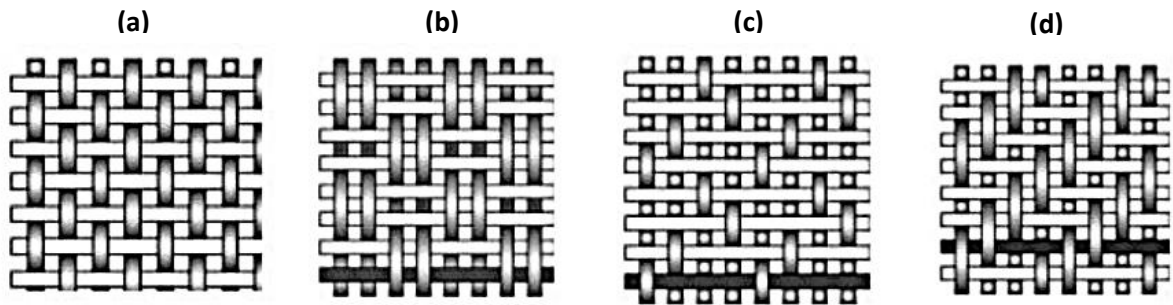


FIGURA 2.13 – Tecidos tramados do tipo (a) simples, (b) cesto, (c) cetim e (d) sarja.

FONTE – JOHN e THOMAS, 2008, p. 354

Segundo Cerchiaro (2010), os tecidos tramados possuem fios (ou cordões) em duas direções: a trama (cor branca na FIG. 2.13) composta por fios no sentido longitudinal; e o urdume (cor cinza na FIG. 2.13), no sentido transversal.

Salienta-se, também, a importância em estabelecer corretamente as quantidades relativas das fibras e do material da matriz, uma vez que estas influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do compósito, como no limite de resistência à tração e no módulo de elasticidade (SHACKELFORD, 2008).

### 2.3.1 As fibras de sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é uma planta de folhas pontiagudas e lanceoladas dispostas na forma de roseta (FIG. 2.14), com uma largura de 8 a 10 cm e um comprimento de 150 a 250 cm. As folhas são compostas por microfibras, com uma média de 1.100 fibras por folha, resistentes a tração, duráveis e com um comprimento individual que varia de 1,5 a 4,0 mm e uma largura individual entre 10 a 30  $\mu\text{m}$  (ROSÁRIO *et al.*, 2011).

A fibra de sisal é um polímero natural que engloba, em sua composição química, a celulose (entre 65,85% e 73%), a hemicelulose (entre 12% e 13%), a lignina (entre 9,9% e 11%) e a pectina (entre 0,8% e 2%) (MARTIN *et al.*, 2009). A celulose, principal componente, possui alto grau de polimerização e é responsável pela boa resistência à tração das fibras. Já a lignina é uma substância hidrofóbica que atua como adesivo, unindo as fibras de sisal. A hemicelulose, por sua vez, é estruturalmente semelhante à celulose e participa da estabilização da parede celular com a celulose. Em menor quantidade, a pectina ajuda na ligação das paredes celulares de células adjacentes (OGATA, 2013).



FIGURA 2.14 – A *agave sisalana*.

FONTE – COSIBRA, 2016

Martin *et al.* (2009) averiguaram diferenças entre as propriedades do sisal ao longo do comprimento da fibra da folha, e a dividiram em quatro partes: de 0 a 30 cm (parte chamada de basal), de 30 a 60 cm, de 60 a 90 cm e de 90 a 120 cm (componentes da parte denominada apical). A TAB. 2.8 mostra os resultados obtidos por esses autores, que mostraram a boa aplicabilidade industrial das fibras de sisal como reforço de materiais compósitos poliméricos.

TABELA 2.8

Propriedades mecânicas da fibra de sisal, conforme a posição na fibra.

Posição na fibra	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento (%)	Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )
0-30 cm	$448 \pm 113$	$10 \pm 3$	$5 \pm 1$	$465 \pm 20$
30-60 cm	$671 \pm 274$	$25 \pm 4$	$3 \pm 1$	$430 \pm 9$
60-90 cm	$565 \pm 146$	$22 \pm 4$	$3 \pm 1$	$440 \pm 20$
90-120 cm	$369 \pm 129$	$17 \pm 3$	$2 \pm 1$	$143 \pm 14$

FONTE – MARTIN *et al.*, 2009, p. 42

O trabalho de Li, Mai e Ye (2000), exposto na TAB. 2.9, traz alguns atributos da fibra de sisal, com base em estudos de diversos autores, mostrando claramente a variabilidade dos resultados, que é inerente aos estudos das fibras de sisal.

Com relação ao processamento pelo qual o sisal passa no campo, após o corte, cita-se o desfibramento (retirada das fibras da folha de sisal), a lavagem (em tanques com água) e a

secagem, e o batimento, no qual o parênquima (tecido) que envolve a fibra do sisal é removido (CARVALHO, 2005).

TABELA 2.9  
Propriedades mecânicas do sisal, conforme diferentes massas específicas.

<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Limite de resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (GPa)</b>	<b>Deformação à ruptura (%)</b>	<b>Diâmetro (µm)</b>
1030	500 - 600	16 - 21	3,6 - 5,1	-
1400	450 - 700	7 - 13	4 - 9	-
1410	400 - 700	9 - 20	5 - 14	100 - 300
1450	450 - 700	7 - 13	4 - 9	-
1450	604	9,4 - 15,8	-	50 - 200
1450	530 - 640	9,4 - 22	3 - 7	50 - 300

FONTE - ADAPTADO DE LI, MAI E YE, 2000, p. 2040

Oriundo do México, o sisal é cultivado em vários países em desenvolvimento e, de acordo com a Conab – Companhia Nacional de Abastecimento (2015) - o Brasil é o maior produtor e exportador mundial de sisal, totalizando, em 2015, o valor de US\$ 123,9 milhões de dólares em exportações dessa fibra. No país, as plantações de sisal estão concentradas nos estados da Bahia e da Paraíba (VASCONCELOS, 2009).

Dentre os principais produtos que utilizam as fibras de sisal, pode-se destacar os fios biodegradáveis utilizados em artesanato, cordas de várias utilidades, produção de estofados, pasta para indústria de celulose, produção de tequila, tapetes decorativos, remédios, biofertilizantes, ração animal, adubo orgânico e sacarias (COSIBRA, 2016).

De acordo com Mattoso *et al.* (1996), a fibra de sisal se destaca, entre as fibras foliares (como curauá, rami e fibra de coco), como reforço de plásticos e borrachas, uma vez que apresentam maior qualidade e maior aplicação comercial, além de possuir um dos maiores valores de módulo de elasticidade em seu grupo.

Vieira *et al.* (2016) investigaram compósitos híbridos de matriz de resina epóxi, com a adição de nano partículas de sílica (por dispersão), reforçados com fibras de sisal tratadas (mercerizadas e acetiladas). As fibras foram dispostas na matriz em cinco camadas, nas formas unidirecional e bidirecional [0°/90°/0°]. Segundo os autores, o tratamento químico das fibras

melhorou a adesão interfacial e os compósitos com orientação bidirecional tiveram uma resistência à flexão e ao impacto inferior quando comparados aos unidirecionais.

Os compósitos reforçados com fibras de sisal tem ganhado muito importância no setor automobilístico, principalmente como substituta da fibra de vidro. Dentre as aplicações dessas fibras nesse setor, pode-se citar o uso como reforços de plásticos para a confecção de painéis, porta-luvas, consoles centrais e outras partes internas de automóveis (SISAL, 2009). A FIG. 2.15 mostra alguns painéis localizados no interior de um automóvel, compostos por polipropileno, reforçados com fibras de sisal. A FIG. 2.15a e a FIG. 2.15d trazem painéis frontais utilizados em automóveis, enquanto que a FIG. 2.15b traz a aplicação do compósito em um painel de câmbio de marcha e a FIG. 2.15c, um painel lateral de um automóvel.

Dentre as vantagens em se utilizar a fibra de sisal em automóveis, pode-se citar a redução do peso do veículo (que influencia diretamente no consumo de combustível), a redução na emissão de dióxido de carbono (devido ao incentivo ao cultivo da planta) e os benefícios econômicos que a comercialização da fibra gera para pequenos agricultores, que são os principais produtores da planta (FAO, 2011).



FIGURA 2.15 – Aplicações das fibras de sisal no setor automobilístico.

FONTE - FAO, 2011, p. 11

## 2.4 Compósitos de polietileno reforçados com fibras naturais

De acordo com Araújo (2009), as fibras naturais usadas como reforço em matrizes poliméricas, como o PEAD, melhoram as propriedades mecânicas dos polímeros e servem como substitutos para reforços de fontes não-renováveis, como a fibra de vidro. Em seu estudo, a autora verificou o comportamento de um compósito de PEAD reforçado com fibras de curauá, que apresentou resultados semelhantes com os do PEAD reforçado com fibras de vidro. Contando também com um agente acoplador (polietileno grafitizado com anidrido maleico – PE-g-MA), houve melhoria, com a adição da fibra, na resistência mecânica e no módulo de elasticidade, comparado ao PEAD isoladamente.

Vargas *et al.* (2015) investigaram a importância de manter intactas as propriedades físico-químicas de fibras de fique, através de um controle rigoroso de temperatura e de pressão durante a fabricação do compósito. Nesse estudo, as fibras foram utilizadas como reforço de PEAD, no qual o compósito final foi obtido por meio de prensagem a quente, um método que, segundo os autores, reduziu custos de produção e eliminou fatores como vibrações, comuns em outros processos de fabricação de compósitos.

Mulinari (2009) utilizou o PEAD como matriz em um compósito reforçado com fibras de celulose do bagaço da cana-de-açúcar, e verificou que o tratamento superficial realizado nas fibras, o tipo de processamento para a obtenção do compósito e o uso de um agente compatibilizante (PE-g-MA) influenciaram fortemente nas propriedades mecânicas do compósito. Além disso, destaca-se a adição de óxido de zircônia na matriz de PEAD, que promoveu um aumento na resistência à tração, à flexão e ao impacto do compósito.

Lima *et al.* (2014) estudaram o comportamento mecânico de um compósito de PEAD reforçado com fibras de quitosana (em 5 e 10% de fibra), modificado com PE-g-MA. Os autores explicam que, devido à natureza hidrofóbica (insolúvel em água) do PEAD e hidrofílica (solúvel em água) da quitosana, o uso do PE-g-MA faz-se necessário, a fim de melhorar a compatibilidade e a adesão entre as fases. O uso desse agente proporcionou uma redução do alongamento na ruptura e na resistência ao impacto do compósito. Já a resistência à tração, foi reduzida na incorporação de 10% de quitosana e sem o uso do agente. O módulo de elasticidade, por sua vez, não foi alterado, independente do teor de quitosana e do uso do agente.

O estudo de Spinacé *et al.* (2011) analisou as propriedades de compósitos de PEAD e de polipropileno com reforço de 20% em massa de fibras curtas de sisal ou de curauá, com ou sem agente de acoplamento. Foi possível concluir que os compósitos, tanto de PEAD quanto



de polipropileno, reforçados com curauá, apresentaram propriedades mecânicas de tração e flexão superiores aos reforçados com fibras de sisal. A única exceção foi vista nos testes de impacto, com superioridade dos compósitos reforçados com fibras de sisal.

Com base na possibilidade de se reciclar o PEAD, Bonelli, Elzubair e Suarez (2005) investigaram o uso do PEAD reciclado reforçado com fibras de piaçava (com tratamento superficial com silano e sem tratamento), com diferentes proporções (5, 10 e 15% de fibra). Os autores encontraram um melhor desempenho mecânico (resistência à tração e à flexão) com o PEAD reciclado reforçado com fibras tratadas com silano, com a proporção de 15% de fibra.

Percebe-se claramente a importância em se obter uma boa interação entre a matriz e o reforço, dado que as características finais do compósito dependem totalmente dessa interface. Por isso, além do uso de agentes acopladores, são constantes os tratamentos superficiais nas fibras a serem utilizadas nos compósitos com PEAD (LI; HU; YU, 2008).

Dentre os exemplos de aplicações de compósitos que possuem o PEAD, pode-se citar as madeiras plásticas, que são constituídas por diversos polímeros reciclados. A FIG. 2.16 mostra alguns exemplos desse tipo de compósito (FIBROMIX, 2016).

A madeira plástica tem sido considerada uma grande substituta da madeira natural e tem sido utilizada, dentre outras áreas, na arquitetura, na construção civil (como em blocos e divisórias, como mostra a FIG. 2.16a), na decoração de áreas externas (na construção de bancos e cercas, vistos na FIG. 2.16c e na FIG. 2.16d, respectivamente) e até como dormentes em ferrovias, como mostra a FIG. 2.16b (OLIVEIRA, Evelyn; OLIVEIRA, Emilly; COSTA, 2013).



FIGURA 2.16 – Aplicações da madeira plástica.

FONTE – QUARTIM e HAUS, 2012 apud EVELYN OLIVEIRA, EMILLY OLIVEIRA e COSTA, 2013, p. 6

O estudo de Fávoro *et al.* (2010) analisou a fibra de sisal como reforço de um PEAD reciclado. Para melhorar a compatibilidade entre as fases, as fibras de sisal (utilizadas com 5 ou 10% do volume final) foram mercerizadas com uma solução de NaOH (para a retirada de impurezas na superfície da fibra) e acetiladas (diminuição da hidrofília da fibra), enquanto que o PEAD foi oxidado em uma solução de  $\text{KMnO}_4$  (para a diminuição de sua hidrofobia). Segundo o estudo dos autores, o tratamento do sisal melhorou a adesão das fases e a oxidação do PEAD não influenciou nesse quesito. A incorporação das fibras de sisal no PEAD, na proporção de 10% do volume, aumentou sua resistência à tração, à flexão e, principalmente, ao impacto, que apresentou um aumento de 40%, comparado ao PEAD puro.

Choudhury (2008) investigou as propriedades mecânicas de tração, flexão e impacto de compósitos de PEAD reforçados com fibras de sisal em diferentes teores. Foi utilizado também um ionômero (Surlyn) como agente acoplador. De acordo com os resultados apresentados pelo estudo, conforme aumentou-se o teor de fibras (de 5% a 20% do peso do compósito), houve aproximadamente um aumento de 16% na resistência à tração e de 17% na resistência à flexão do compósito, e um aumento aproximado de 28% no módulo de elasticidade à tração e de 30% no módulo de elasticidade na flexão dos mesmos.

O trabalho de Li, Hu e Yu (2008) buscou melhorar a ligação interfacial entre o PEAD e as fibras de sisal por meio de uso de dois silanos, (3-aminopropil) trietoxisilano e gamma-metacriloxipropiltrimetoxisilano, e por meio de oxidação via permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) e peróxido de dicumilo ( $\text{C}_{18}\text{H}_{22}\text{O}_2$ ). Os silanos reagem com os grupos hidroxilas, o que acarretou na diminuição da polaridade da parede celular da fibra e, conseqüentemente, a hidrofílicidade da mesma. Já a oxidação deixou a superfície da fibra bastante áspera. Os autores verificaram que o tratamento melhorou a resistência mecânica ao cisalhamento interno do compósito, sobretudo após o uso do  $\text{KMnO}_4$ , com um aumento de resistência em 100% (de 1,6 MPa para 3,2 MPa), se comparado ao compósito sem tratamento.

Zhao, Li e Bai (2014) investigaram, com base nas propriedades mecânicas, a influência do teor de fibra de sisal, do acoplamento entre as fases e do processo de produção em PEAD reforçados com tais fibras. Segundo os autores do estudo, um aumento de teor de fibra de sisal, com o auxílio de um agente acoplador (no caso, o PE-g-MA) melhorou propriedades mecânicas do compósito, como a resistência à tração e à fluência.

Ahmad e Luyt (2012) estudaram o PEAD, o PEBD e PEBDL como matrizes de compósitos reforçados com fibras de sisal, sem tratamento e com a uso de peróxido de dicumila. O compósito de PEAD com as fibras de sisal tratadas obtiveram menores módulos de elasticidade, e sua resistência à tração foi um pouco menor do que no compósito com as fibras



sem tratamento. Os autores relataram que o tratamento reduziu a cristalinidade do PEAD, o que influenciou negativamente na adesão entre a matriz e a fibra.

Joseph, Thomas e Pavithran (1992) estudaram as propriedades viscoelásticas do PEBD, reforçado com fibras de sisal. Os autores verificaram a influência da orientação e do comprimento das fibras utilizadas. Em um mesmo comprimento de fibra (5,8 mm) e um mesmo teor mássico de fibras (30% do peso total do compósito), a orientação longitudinal das fibras apresentou maiores valores de resistência à tração e de módulo de elasticidade (31,1 MPa e 3086 MPa, respectivamente) que a orientação aleatória (14,7 MPa e 781 MPa) e que a orientação transversal de fibras (6,1 MPa e 590 MPa).

Hong *et al.* (2015) utilizaram copolímeros graftizados de polietileno em compósitos de polietileno reciclado reforçados com fibras de sisal, a fim de melhorar a adesão interfacial desses materiais. Ensaio mecânicos foram realizados pelos pesquisadores para verificar a influência desses compatibilizantes, nos quais foram constatados aumento de 153% na resistência à tração desses compósitos com 7% (por peso de PE) de compatibilizantes nos compósitos, e também um aumento de 65% na resistência à flexão dos mesmos com o uso de 9% (por peso de PE) de compatibilizantes.

O estudo de Martin *et al.* (2003) investigou as propriedades mecânicas de compósitos de PEAD com sisal, após um tratamento de seus componentes com diclorosilano com reação por plasma a rádio frequência. Os autores verificaram que, ainda que os compósitos com tratamento no PEAD e no sisal tenham apresentado maiores valores de resistência à tração que os não-tratados e que aqueles que tiveram apenas uma das fases tratadas, os melhores resultados, em geral, foram alcançados pelos compósitos que tiveram apenas o PEAD tratado, fato este que é explicado pelo início de degradação nas camadas superficiais de fibras lignocelulósicas, quando estas são submetidas a tratamentos por plasma.

Mokhena e Luyt (2014) utilizaram nanowhiskers de sisal (com comprimento de 197 nm e diâmetro de 12 nm) como material de reforço para o PEAD e o PEBD. Os nanocompósitos foram fabricados por moldagem em uma solução de tolueno, onde foram fundidos e prensados. Além disso, usou-se vinil-trietoxisilano na superfície dos nanowhiskers de sisal, a fim de melhorar a dispersibilidade e a compatibilidade dos mesmos entre a matriz. A presença dos nanowhiskers influenciou claramente o módulo de armazenamento do PEBD, o que não ocorreu com o PEAD. A cristalinidade dos polímeros no processo de manufatura foi muito dependente de suas morfologias. Dentre os resultados de testes mecânicos de tração, destaca-se uma maior deformação na ruptura no caso dos compósitos com PEAD.

### 3 METODOLOGIA

### 3.1 Planejamento dos experimentos e fatores de investigação

Neste estudo, utilizou-se um planejamento fatorial completo do tipo  $2^13^1$ , uma vez que foram estudadas as combinações de um fator com dois níveis (tipo de PEAD, nos níveis tradicional e verde) e um fator com três níveis (tipo de reforço, nos níveis “sem reforço”, “tecidos de sisal com orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ ” e “tecidos de sisal com orientação  $[\pm 45^\circ]$ ”), totalizando seis combinações (TAB. 3.1). Segundo Montgomery e Runger (2016), nos experimentos fatoriais deve-se testar todas as combinações possíveis dentre os níveis de cada fator.

TABELA 3.1  
Planejamento experimental do estudo.

<b>Combinação</b>	<b>Tipo de Polietileno</b>	<b>Tipo de Reforço</b>
<b>TR/PURO</b>	Tradicional	Sem reforço
<b>VE/PURO</b>	Verde	Sem reforço
<b>TR/90</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$
<b>VE/90</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$
<b>TR/45</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$
<b>VE/45</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$

Para a realização de ensaios mecânicos de tração, flexão e impacto Charpy de cada condição definida no planejamento fatorial definido neste trabalho, foram construídos, para cada ensaio, cinco corpos de prova de cada condição, com a adoção de duas réplicas, totalizando dez amostras para cada combinação do experimento. Desse modo, adotando seis combinações, cinco corpos de prova, duas réplicas e três ensaios mecânicos, atinge-se o total de 180 corpos de prova. Tal definição foi baseada nas normas utilizadas para a orientação nos ensaios, que são: a ASTM D790 (2015), para os ensaios de flexão; a ASTM D3039 (2014), para os ensaios de tração; e as normas ASTM D6110 (2010) e BS EN ISO 179-1 (2010), para os ensaios de

Impacto Charpy. Salienta-se que os experimentos foram realizados em uma ordem completamente aleatorizada, e que os valores *outliers* encontrados nos resultados foram retirados das análises estatísticas, a fim de evitar distorções nas inferências estatísticas.

Neste trabalho, foram analisadas as estatísticas descritivas dos ensaios, que conforme Montgomery e Runger (2016), é um método muito utilizado para a tomada de decisões na engenharia, uma vez que organiza e resume dados de forma a facilitar a interpretação e avaliar os mesmos. Além disso, foram realizadas análises das variâncias (ANOVA), a fim de verificar o efeito de cada fator nos resultados encontrados, além da interação entre os mesmos, definindo uma forma de comparação entre os vários grupos de interesse do estudo, que controla os erros e evita conclusões errôneas (WERKEMA, 2004). As análises estatísticas deste trabalho foram realizadas com o auxílio do software estatístico Minitab®, versão 17.

### **3.2 Materiais**

Os compósitos fabricados foram compostos por sacolas plásticas de PEAD e tecidos simples de fibras de sisal. As sacolas plásticas de PEAD tradicional foram fornecidas pela empresa Pack-Fort Embalagens e as sacolas plásticas de PEAD verde foram fornecidas pela empresa Unisold e produzidas pela empresa petroquímica Braskem. Os tecidos de sisal, por sua vez, foram fornecidos pela Associação Comunitária de Produção e Comercialização do Sisal (APAEB), situada na cidade de Valente, Bahia (Brasil), polo forte de produção de tecidos de sisal no país. Segundo o fabricante, o tecido apresenta um fio do tipo 530/1, espessura do tecido de aproximadamente 2 mm (composição 100% de fibra de sisal) e lacunas entre os fios com área aproximada em 1 mm<sup>2</sup>.

Deve-se enfatizar que, por parte dos pesquisadores, esses materiais não receberam nenhum tratamento ou modificação química em sua estrutura molecular após sua aquisição, uma vez que o objetivo do estudo busca, ao máximo, um caráter sustentável para a origem dos insumos que serão usados nos compósitos.

Com relação às fibras de sisal, salienta-se que foram realizados ensaios preliminares com fibras em forma de manta (dispersos). Porém, a fraca adesão interfacial influenciou negativamente na consistência dos compósitos e, conseqüentemente, em seus resultados nos testes mecânicos.

### 3.3 Caracterização da máquina de prensagem a quente

Para a compressão e compactação dos compósitos, uma máquina de prensagem a quente (FIG. 3.1) foi construída pelos pesquisadores do Grupo de Inovação e Tecnologia em Materiais (GITEM), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Duas resistências com uma potência de 2000 W em cada uma, foram anexadas dentro de blocos de material refratário de aproximadamente 60 mm de espessura, revestidos por placas metálicas. Para a boa compactação e homogeneidade do compósito, foram utilizadas duas placas de alumínio, com espessura de 10 mm, para moldar os compósitos na forma de placas, com uma compressão realizada com o uso do bloco superior da máquina. Houve uma pressão de aproximadamente 12,39 KPa, valor encontrado com base na divisão da força exercida pelo peso da placa superior, concentrada na área compreendida pela placa do compósito. Além disso, para evitar a interação química entre os compósitos e as placas de alumínio, foi utilizado um tecido desmoldante do tipo Teflon®, chamado Armalon®, o que também contribuiu para com um melhor acabamento dos corpos de prova.

Em relação ao controle da temperatura do sistema, utilizou-se um termopar do tipo k, que foi anexado a um multímetro Icel, modelo MD-5660C (FIG 3.1b), que mediu a temperatura alcançada na região localizada entre as placas moldantes de alumínio da máquina. Ressalta-se que o termopar foi utilizado na região da máquina mais próxima possível dos compósitos.

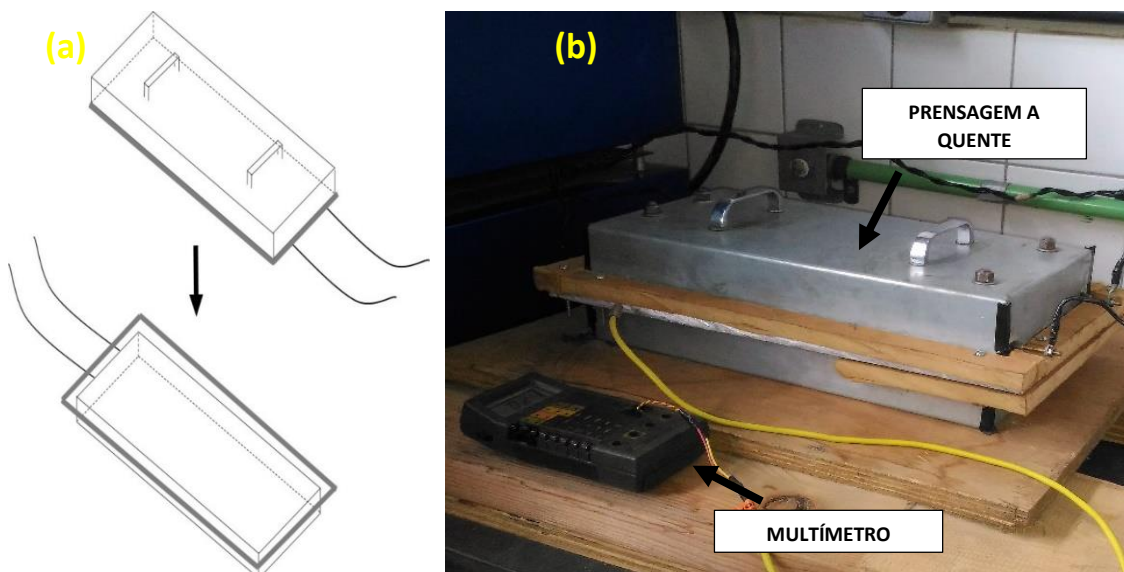


FIGURA 3.1 – Máquina usada na prensagem dos compósitos via (a) croqui e (b) foto.

### 3.4 Processo de fabricação dos compósitos

Os compósitos foram fabricados sob a forma de placas, com o envolvimento de tecidos de sisal por camadas de sacolas e uma moldagem por compressão com aquecimento controlado. Os tecidos de sisal utilizados possuem configuração biaxial (tipo simples) e foram utilizados considerando duas orientações nos compósitos,  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  e  $[\pm 45^\circ]$ , como mostra a FIG. 3.2. Salienta-se que no caso dos compósitos reforçados com tecidos na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , adotou-se como a seção longitudinal das placas, a direção do urdume do tecido. Assim como a máquina de prensagem a quente, todos os compósitos também foram fabricados no laboratório do GITEM.

As placas de tecidos de sisal tiveram um comprimento de 190 mm e uma largura de 140 mm, apresentando aproximadamente 34 gramas cada uma. Calculou-se aproximadamente 79 gramas de sacolas para serem utilizadas em cada placa, para se obter na massa total do compósito (que foi de aproximadamente 113 gramas), uma relação em massa (gramas) de 30% de fibra e 70% de sacolas plásticas, como foi utilizado nos estudos de Ahmad e Luyt (2012).

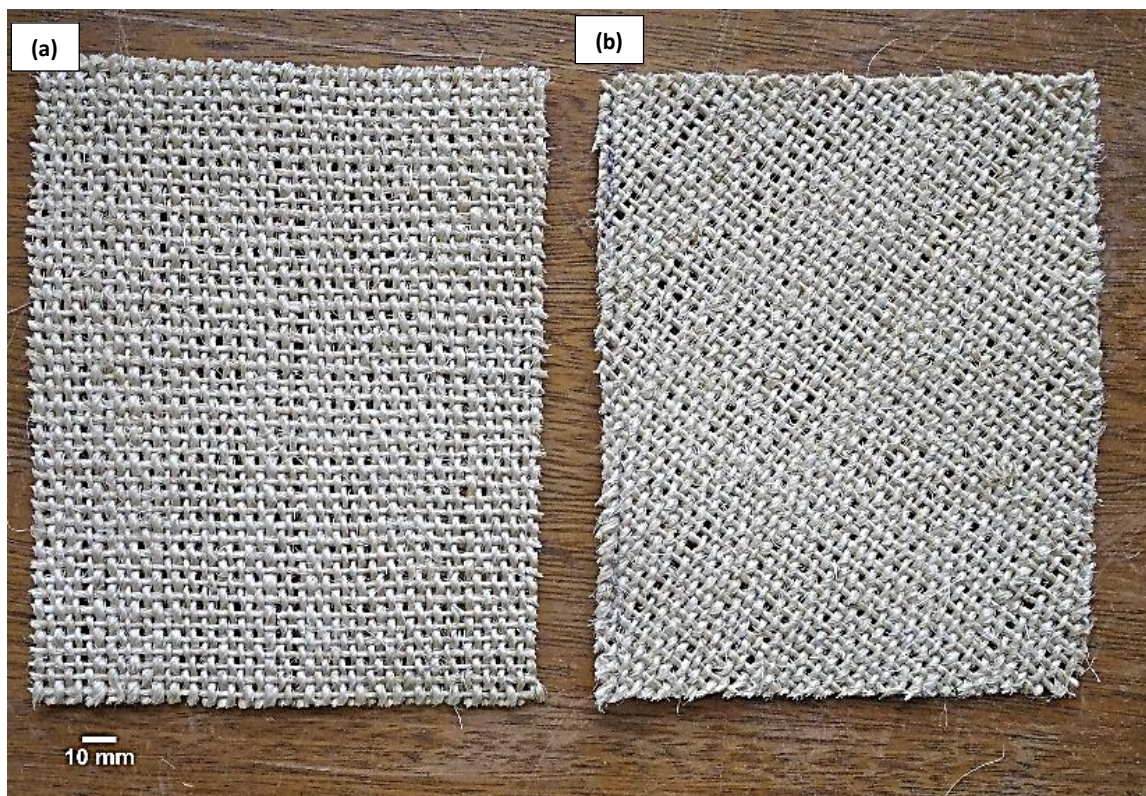


FIGURA 3.2 – Orientação dos tecidos de sisal: (a)  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  e (b)  $[\pm 45^\circ]$ .



Com base nessa relação mássica, foram utilizadas aproximadamente 220 camadas de plástico em ambos os lados dos tecidos de sisal, cortadas nas mesmas dimensões do tecido de sisal, citadas anteriormente. A FIG 3.3 mostra as camadas que compõem o compósito de sacolas plásticas de PEAD e tecidos de sisal.

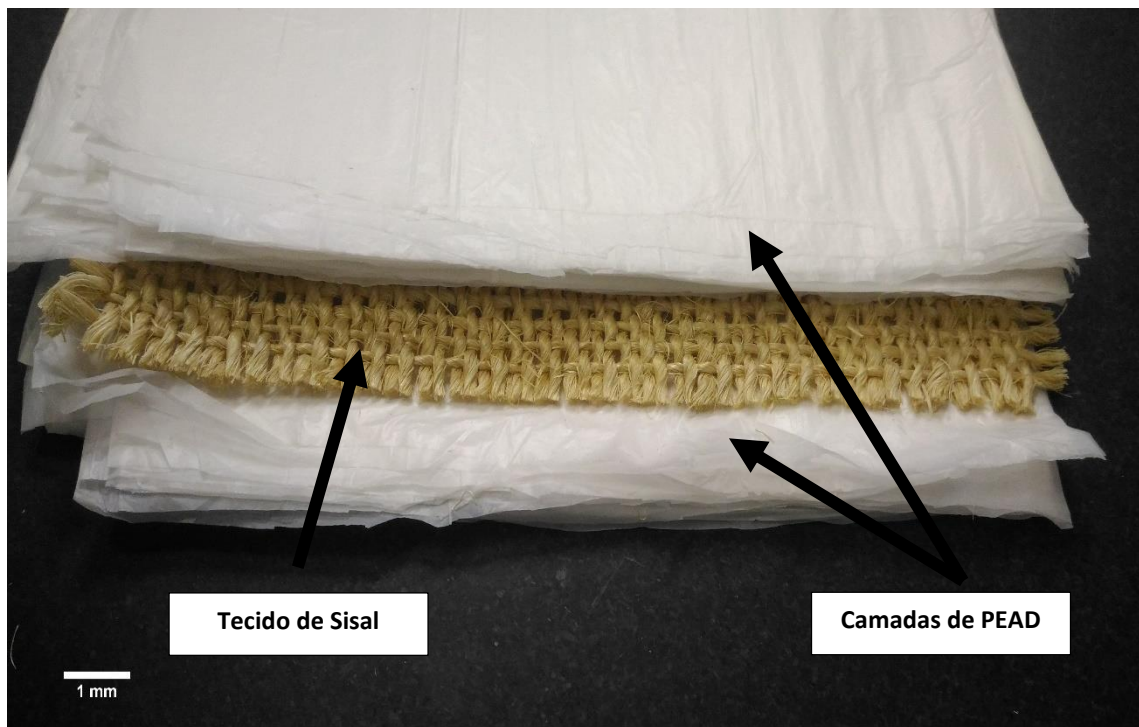


FIGURA 3.3 – Camadas dos compósito PEAD-sisal.

Além disso, foram feitas placas de PEAD puro (sem reforço) para a construção de corpos de prova, com o objetivo de comparar suas propriedades mecânicas com os compósitos de PEAD reforçados com tecidos de sisal. Para esse procedimento, foi necessário considerar as densidades dos dois tipos de PEAD utilizados para obter placas com espessuras aproximadas às das placas dos compósitos (aproximadamente 4 mm), pois grandes diferenças de espessura podem influenciar fortemente os resultados dos ensaios mecânicos (JANSSON; THUVANDER, 2004).

De acordo com a BRASKEM (2015), o PEAD verde e o PEAD tradicional possuem uma densidade de aproximadamente  $0,95 \text{ g / cm}^3$ . A EQUAÇÃO 3.1 foi usada para determinar a massa  $m$  (em gramas) em camadas de sacolas para as placas de PEAD sem reforço, na qual fixou-se um volume com base nas dimensões da placa (190 x 140 x 4 mm). Desse modo, a massa final de cada placa de PEAD sem reforço foi de 101,1 gramas.

$$m = dv \quad (3.1)$$

Onde:

m = massa do material (g)

d = densidade do material (g/cm<sup>3</sup>)

v = volume do material (cm<sup>3</sup>)

Após a montagem das camadas dos compósitos, realizou-se a prensagem a quente (FIG. 3.4), induzindo uma compressão para a compactação e o escoamento uniforme do plástico pelas lacunas dos tecidos do sisal. O aumento da temperatura foi controlado de modo a atingir aproximadamente  $185 \pm 5$  °C. A definição dessa temperatura baseou-se em experimentos com variadas temperaturas, realizados pelos pesquisadores deste estudo, e em estudos de literatura. Antes do início do aquecimento, a máquina se encontrava à temperatura ambiente (25 °C), e a taxa de aquecimento média apresentada pela máquina foi de 12,3 °C / min.

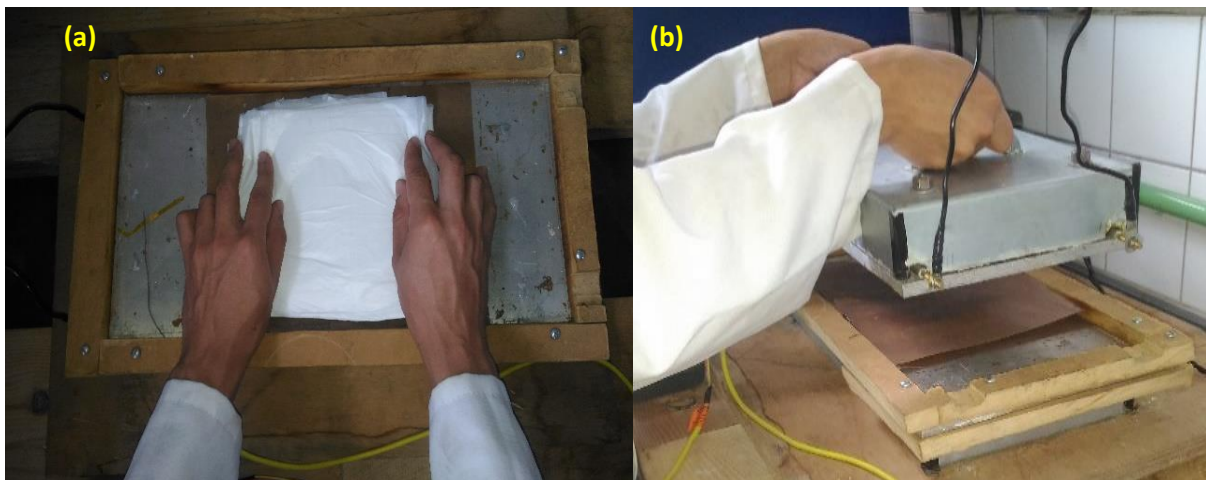


FIGURA 3.4 – (a) Posicionamento do compósito no centro da parte inferior da máquina e (b) do bloco superior da máquina, realizando a compressão no compósito.

Experimentos com aquecimentos até temperaturas inferiores a 180 °C não resultaram em uma fusão uniforme do PEAD, e experimentos com aquecimentos acima de 190 °C apresentaram um início de deterioração do PEAD. Além disso, os estudos de Coutinho, Mello e Maria (2003) apontam que o ponto de fusão do PEAD é de, aproximadamente 135 °C, e o trabalho de Fávares *et al.* (2010), traz experimentos semelhantes com a temperatura ajustada, na extrusão de compósitos com fibras de PEAD e sisal. Assim, foi possível perceber, por meio das condições experimentais, que a temperatura média de 130 °C foi caracterizada por um início de amolecimento da fase polimérica do compósito, e que a temperatura média de 195 °C marcou o início da degradação (quebra de ligações covalentes) do polímero.

Uma vez alcançada a temperatura definida para o aquecimento da máquina, as resistências eram desligadas e iniciava-se o processo de resfriamento. As placas eram resfriadas dentro da máquina até atingirem a uma temperatura de 100 °C, na qual o material compósito já se encontrava totalmente em estado sólido e abaixo da temperatura média de cristalização, como afirma Choudhury (2008), em seu estudo sobre compósitos de PEAD e sisal. Por fim, as placas eram removidas da máquina e mantidas até estabilizarem termicamente à temperatura ambiente (25 °C). O tempo total para a confecção de cada placa foi de aproximadamente 60 minutos.

Antecedendo o corte dos corpos de prova, as porções laterais das placas (cerca de 15 mm de cada lado) foram removidas, uma vez que apresentavam irregularidades em sua estrutura física, e não foram utilizadas nos ensaios mecânicos. Os cortes laterais, bem como os cortes dos corpos de prova, foram executados com o uso de uma serra do tipo “tico tico” Black & Decker KS400. A FIG. 3.5 mostra o exemplo de uma placa fabricada do compósito de PEAD com tecido de sisal, com as porções laterais retiradas.

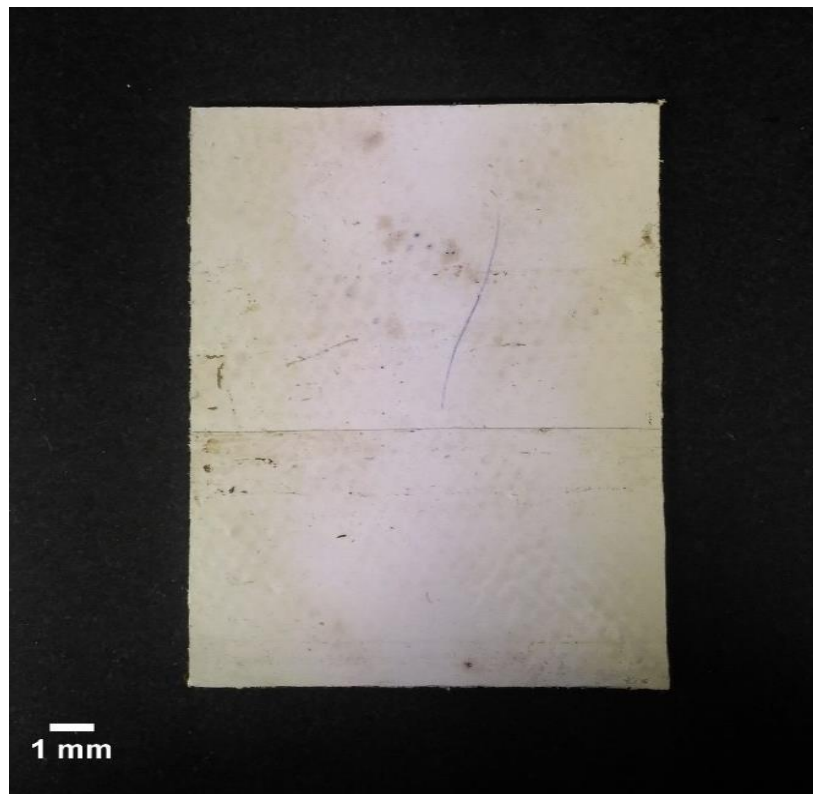


FIGURA 3.5 – Compósito após a prensagem e a retirada de porções laterais.



### 3.5 Ensaios mecânicos

#### 3.5.1 Ensaios mecânicos de flexão

Os testes de flexão deste estudo foram do tipo “flexão em três pontos”, no qual a peça a ser testada é biapoada nas extremidades a uma determinada distância, e uma determinada carga é aplicada no centro do comprimento do corpo de prova, gerando um deslocamento no ponto central, também chamado de flecha (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012).

Os ensaios foram realizados no Centro de Inovação e Tecnologia em Compósitos (CITeC) da UFSJ, em uma máquina universal de ensaios da Shimadzu, modelo AG-X Plus, com capacidade de 100 kN, como mostra a FIG. 3.6.

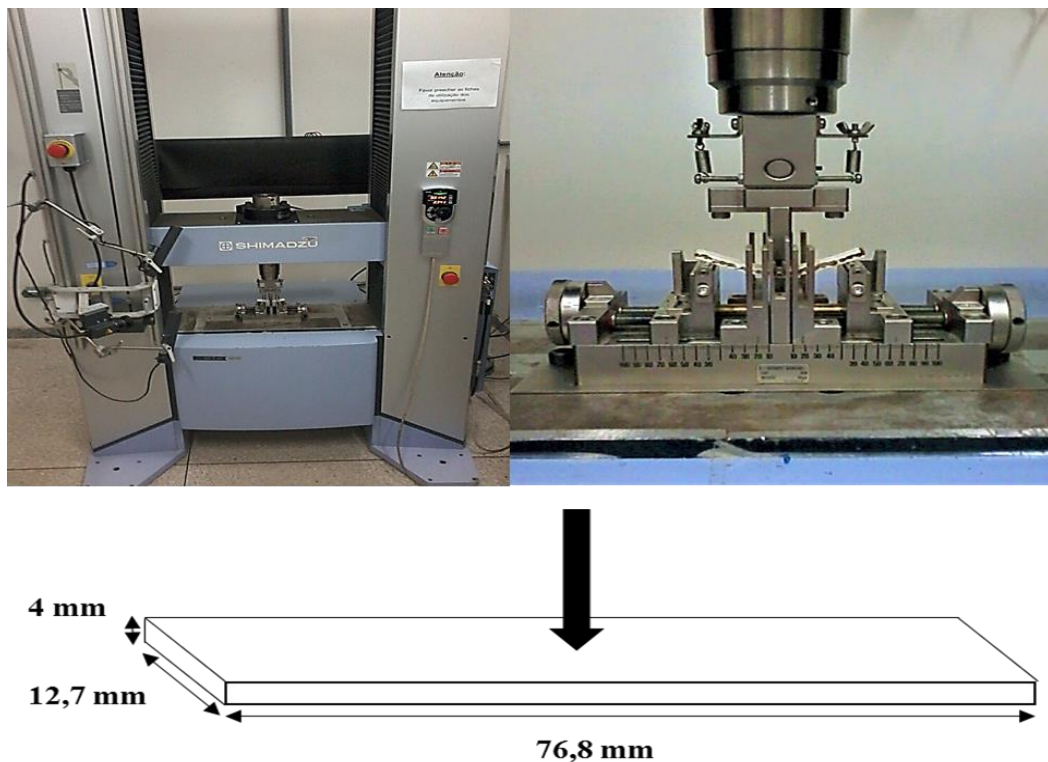


FIGURA 3.6 – Máquina de ensaios de flexão e dimensão dos corpos de prova ensaiados.

As dimensões dos corpos de prova e os procedimentos adotados para a realização dos testes de flexão, foram baseados na norma ASTM D790 (2015). Os corpos de prova tiveram uma espessura média de 4 mm, o que determinou, por meio da referida norma, que os mesmos tivessem um comprimento de 76,8 mm e uma largura de 12,7 mm. Ainda conforme essa norma,

a velocidade do ensaio foi de 2 mm/min e a distância entre os vãos de apoio laterais foi de 64 mm.

Os testes foram realizados com o auxílio do software TrapeziumX<sup>®</sup> e foram investigadas as seguintes propriedades: módulo de elasticidade na flexão ( $MOE_f$ ), considerando o período elástico compreendido entre 0 e 4 N de aplicação de força; e resistência à flexão ( $MOR_f$ ). Ambos foram calculados, respectivamente, pela EQ. 3.2 e pela EQ. 3.3, presentes na referida norma.

$$MOE_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.2)$$

Onde:

$MOE_f$  = módulo de elasticidade na flexão (MPa);

$\Delta\sigma$  = diferença entre duas tensões predefinidas na curva de deflexão (MPa);

$\Delta\varepsilon$  = diferença entre duas deformações correspondentes às tensões predefinidas anteriormente, na curva de deflexão (mm/mm).

$$MOR_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.3)$$

Onde:

$MOR_f$  = resistência à flexão (MPa);

P = carga limite suportada pelo corpo de prova na flexão (N);

L = distancia entre os vãos de apoio laterais (mm);

b = largura do corpo flexionado (mm);

d = espessura do corpo flexionado (mm).

### 3.5.2 Ensaio mecânicos de tração

Os ensaios de tensão foram realizados no Laboratório de Usinagem e Automação, da UFMG, em uma máquina universal da Shimadzu, modelo AG-X Plus (FIG. 3.7).

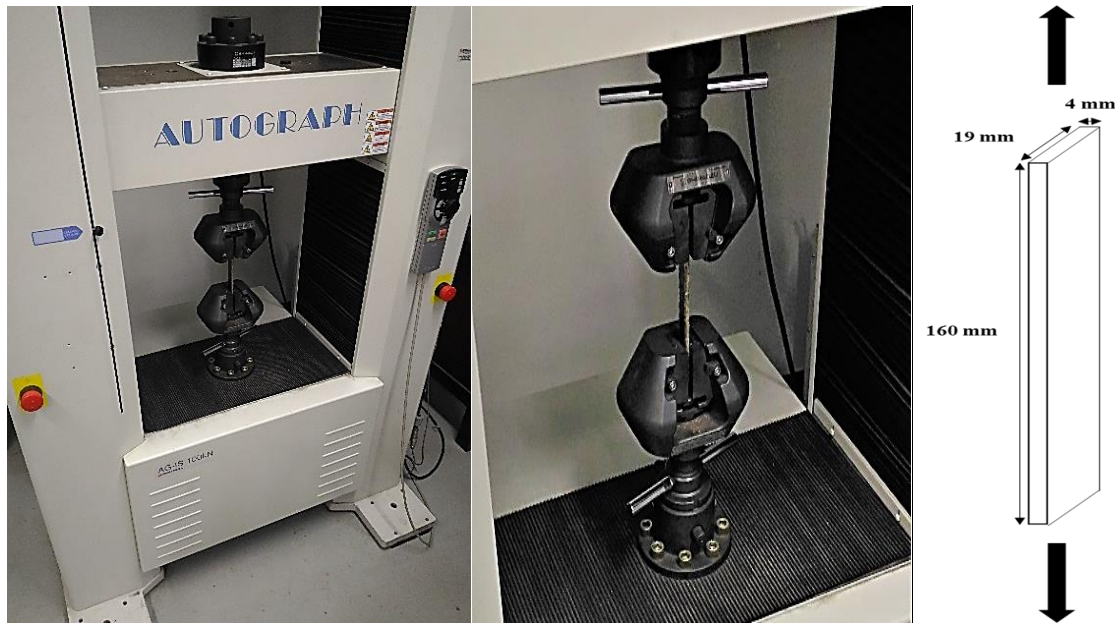


FIGURA 3.7 – Máquina de ensaios de tração e dimensão dos corpos de prova ensaiados.

A dimensão dos corpos de prova e os procedimentos adotados para a realização dos ensaios foram de acordo com a norma ASTM D3039 (2014). Os corpos de prova tiveram uma seção retangular, com um comprimento de 160 mm, uma largura de 19 mm e uma espessura de 4 mm. A velocidade do teste foi de 2 mm/min e foi adotado um comprimento útil de 80 mm.

Com o auxílio do software TrapeziumX<sup>®</sup>, obteve-se respectivamente: o módulo de elasticidade na tração ( $MOE_t$ ), até uma deformação de 0,002 (EQ. 3.4); a tensão verdadeira no momento da fratura, ou seja, a resistência à tração dos compósitos ( $MOR_t$ ), considerando a redução da área na região do pescoço, utilizando as EQ. 5 e EQ. 7; a deformação verdadeira no momento da fratura ( $\epsilon_v$ ), utilizando as EQ. 6 e EQ. 8 (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016).

$$MOE_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.4)$$

Onde:

$MOE_t$  = módulo de elasticidade na tração (MPa);

$\Delta\sigma$  = diferença entre duas tensões predefinidas no diagrama de tensão-deformação (MPa);

$\Delta\varepsilon$  = deformações correspondentes às tensões predefinidas anteriormente, no diagrama de tensão-deformação (mm/mm).

$$MOR_{tE} = \frac{F}{A_0} \quad (3.5)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.6)$$

$$MOR_t = MOR_{tE}(1 + e) \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + e) \quad (3.8)$$

Onde:

$MOR_{tE}$  = limite de resistência à tração, considerando a tensão de engenharia (MPa);

F = máxima força antes da falha (N);

$A_0$  = área inicial da seção transversal compreendida pelo comprimento útil (mm<sup>2</sup>);

$e$  = deformação de engenharia na tensão máxima (mm/mm);

$\Delta l$  = variação do comprimento inicial até a ruptura (mm);

$l_0$  = comprimento original antes de qualquer aplicação de carga (mm);

$MOR_t$  = limite de resistência à tração, considerando a tensão verdadeira (MPa).

$\varepsilon_v$  = deformação verdadeira na tensão máxima (mm/mm).

### 3.5.3 Ensaio mecânico de impacto

Ensaio de Impacto Charpy foram realizados em uma máquina XJJ-50 Series, da empresa Jinjan Testing Instrument Co Ltd (FIG. 3.8), localizada no CITEC (UFSJ), com objetivo de avaliar a energia absorvida ao impacto ( $E_c$ ) dos compósitos em estudo. Os ensaios consistem na aplicação de esforços por choque (dinâmicos), onde o impacto é obtido por meio de uma queda, a uma determinada altura, de uma martelo ou de um pêndulo sobre o corpo de prova (GARCIA; SPIN; SANTOS, 2012). O impacto foi realizado na direção paralela às faces dos corpos de prova.

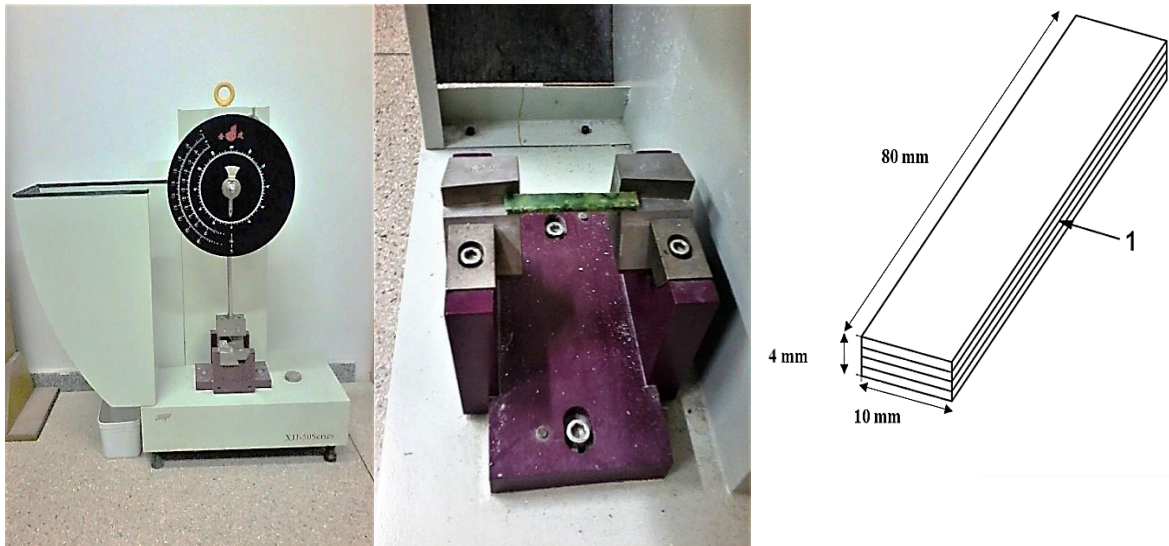


FIGURA 3.8 – Máquina de ensaios de impacto Charpy e dimensão dos corpos de prova ensaiados.

Os procedimentos e as dimensões dos corpos de prova foram definidas utilizando as normas ASTM D6110 (2010) e ISO 179-1 (2010). Os corpos de prova não foram entalhados, e tiveram comprimento de 80 mm, largura de 10 mm e espessura de 4 mm.

Conforme especificações do fabricante da máquina, o impacto se deu com 3,8 m/s de velocidade e 15 J no impacto. Para o cálculo da  $E_c$ , os fabricantes da máquina recomendam a EQ. 3.9, caso a energia registrada pela máquina seja acima de 5 J. Nesse caso, pode-se negligenciar a energia perdida pela resistência e atrito no ar. Caso a energia seja abaixo de 5 J, não se pode negligenciar tais fatores, sugerindo assim o uso da EQ. 3.10.

$$E_c = Pd(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (3.9)$$

$$E_c = E - Pd[(\cos \alpha' - \cos \alpha)(\alpha + \beta/\alpha + \alpha')] \quad (3.10)$$

Onde:

$E_c$  = Energia absorvida ao impacto, corrigida (J);

$Pd$  = momento do martelo (N.M);

$E$  = energia mostrada pela máquina (J);

$\alpha = 150$ ;

$\beta$  = ângulo após o impacto no corpo de prova (°);

$\alpha'$  = ângulo elevado após o impacto ocioso (°).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise geral dos compósitos de PEAD reforçados com sisal

A partir da construção dos corpos de prova destinados aos ensaios a serem realizados neste trabalho, foi possível observar, por meio de um microscópio Olympus SZ61, a interação entre o PEAD e os tecidos de sisal. As FIG 4.1 e FIG. 4.2 mostram a seção lateral dos compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  e na orientação  $[\pm 45^\circ]$ , respectivamente.



FIGURA 4.1 – Seção lateral de um compósito de PEAD reforçado com tecido de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ .

A espessura média obtida nos experimentos foi de, aproximadamente, 4 mm, a qual se explica pela pressão exercida pela parte superior da máquina nas placas de compósitos, além do processo de aquecimento e resfriamento adotado nos experimentos, que direcionam o escoamento e a formação de ligações intermoleculares do PEAD (PISTOR; CHIESA; ZATTERA, 2010).



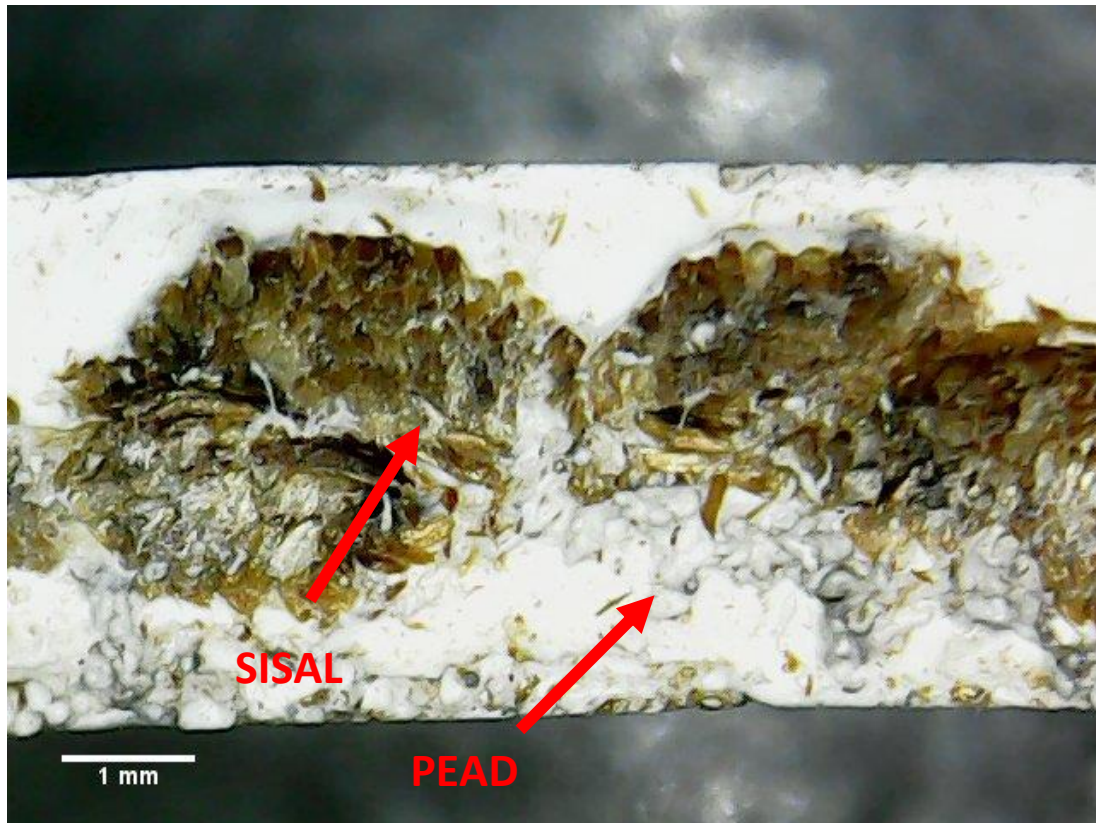


FIGURA 4.2 – Seção lateral de um compósito de PEAD reforçado com tecido de sisal na orientação [ $\pm 45^\circ$ ].

Com base nessas imagens, no manuseio, na confecção e no corte por cisalhamento dos compósitos, foi possível perceber que os compósitos apresentaram uma boa consistência física. O comportamento do PEAD foi característico de um polímero termoplástico, que quando aquecido, tem suas ligações moleculares enfraquecidas, tornando possível a movimentação relativa, fluindo ao interior das lacunas do tecido. Quando resfriado, as forças de ligação são reestabelecidas, provocando um enrijecimento na estrutura do compósito.

Quando a distribuição espacial das fases dentro do compósitos ocorre de forma uniforme, acontece transferência das cargas aplicadas entre as fases do compósito, favorecendo uma boa resistência para esses materiais (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2016).

Em relação ao corte desses materiais, com base na confecção dos corpos de prova, os compósitos apresentaram aspectos que indicaram uma distribuição homogênea das fases e não apresentaram grandes rejeições quanto às vibrações e às forças cisalhantes impostas pela serra usada no corte.



#### 4.2.1 Módulo de elasticidade na flexão dos compósitos

O GRA. 4,1 traz os valores médios obtidos para os módulos de elasticidade na flexão ( $MOE_f$ ) dos compósitos, que inclui o valor médio e o desvio-padrão. Informações adicionais da estatística descritiva dos resultados obtidos podem ser visualizados no Anexo 1 deste trabalho.

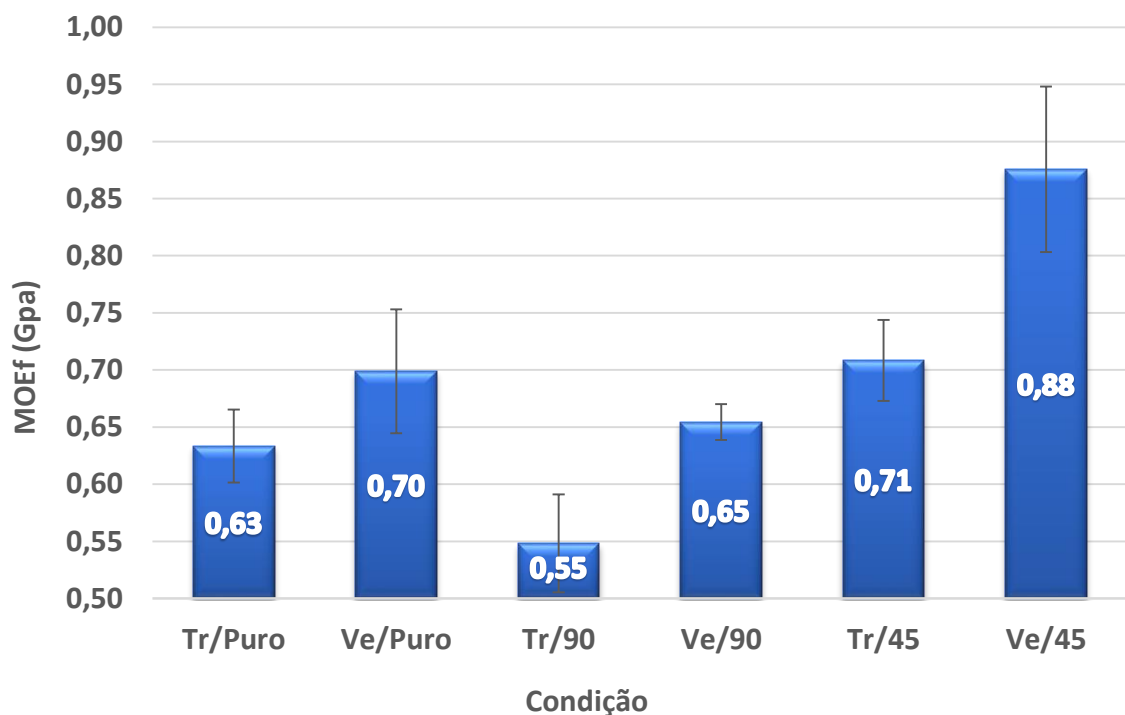


GRÁFICO 4.1 - Módulo de elasticidade na flexão dos corpos de prova.

Comparando-se os tipos de PEAD para um mesmo tipo de reforço, percebe-se que os compósitos que foram fabricados com PEAD verde como matriz, apresentaram médias amostrais de  $MOE_f$  superiores à aqueles que possuíam PEAD tradicional, conferindo maior rigidez a esses materiais no esforço à flexão. Tal fato pode ser explicado por possíveis diferenças causadas por alguns fatores moleculares dos PEAD do estudo, que influenciam nas propriedades mecânicas desses polímeros, e que apresentam variações em cada amostra ensaiada. Wolf (2004) destaca dois fatores:

- O peso molecular, que influencia na viscosidade do polímero, ou seja, na resistência ao escoamento causada pelo atrito do PEAD fundido na superfície de contato com as fibras. A viscosidade, que também pode ser influenciada pela tensão e pela velocidade de cisalhamento, tende a diminuir quando o peso molecular é menor;

- O grau de cristalinidade dos polímeros, ou seja, o grau de organização das cadeias moleculares, que é afetado pelos processos de aquecimento e resfriamento realizados na manufatura das amostras, e influencia diretamente na densidade final dos polímeros. Em geral, quanto maior a densidade, maior é a rigidez do PEAD.

Com base nas possíveis influências desse fatores nas médias amostrais encontradas, sugere-se que o PEAD verde tenha apresentado amostras com um maior grau de cristalinidade que as amostras de PEAD tradicional. Porém, ressalta-se a necessidade de se realizar análises térmicas para confirmar tais constatações. Dentre essas análises, a calorimetria exploratória diferencial (“differential scanning calorimetry”, DSC) surge como uma ótima alternativa, pois é uma técnica direta e quantitativa de medição de transferência de calor e mudança de entalpia, em função do tempo e da temperatura (MICHAELI *et al.*, 1995).

Mohanty e Nayak (2007) ressaltam a importância de uma caracterização reológica de compósitos de PEAD e sisal, a fim de entender a sensibilidade desses compósitos durante um determinado processamento, com base em suas propriedades viscoelásticas.

Além disso, em razão de se tratar de reutilização de materiais, ressalta-se também a influência de fatores atuantes na fase de consumo e utilização das sacolas, como exposição a temperaturas mais elevadas que a temperatura ambiente, exposição à umidade e a presença de resíduos em geral (SPINACÉ; PAOLI, 2005).

Em relação ao tipo de reforço, inferiu-se que, tanto pra os compósitos com PEAD tradicional quanto para os compósitos com PEAD verde, a utilização do reforço do tecido de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$  resultou em materiais com maior rigidez à flexão (maiores médias amostrais de  $MOE_f$ ) que aqueles com PEAD sem reforço. Isso pode ser explicado devido à possíveis influências do módulo de cisalhamento final do compósito, uma vez que submetidos a esforços de cisalhamento (torção), os compósitos reforçados com tecidos na orientação  $[\pm 45^\circ]$  tendem a ter maior rigidez.

O GRA. 4.2 apresenta exemplos, de cada condição, de  $MOE_f$  encontrados no ensaios realizados sob cada condição dos experimentos. Os exemplos mostram, aproximadamente, as inclinações das retas do regime de deformação elástica, que determinam o cálculo do  $MOE_f$ , assim como os pontos que representam a força máxima que os compósitos suportaram até atingir a fratura.

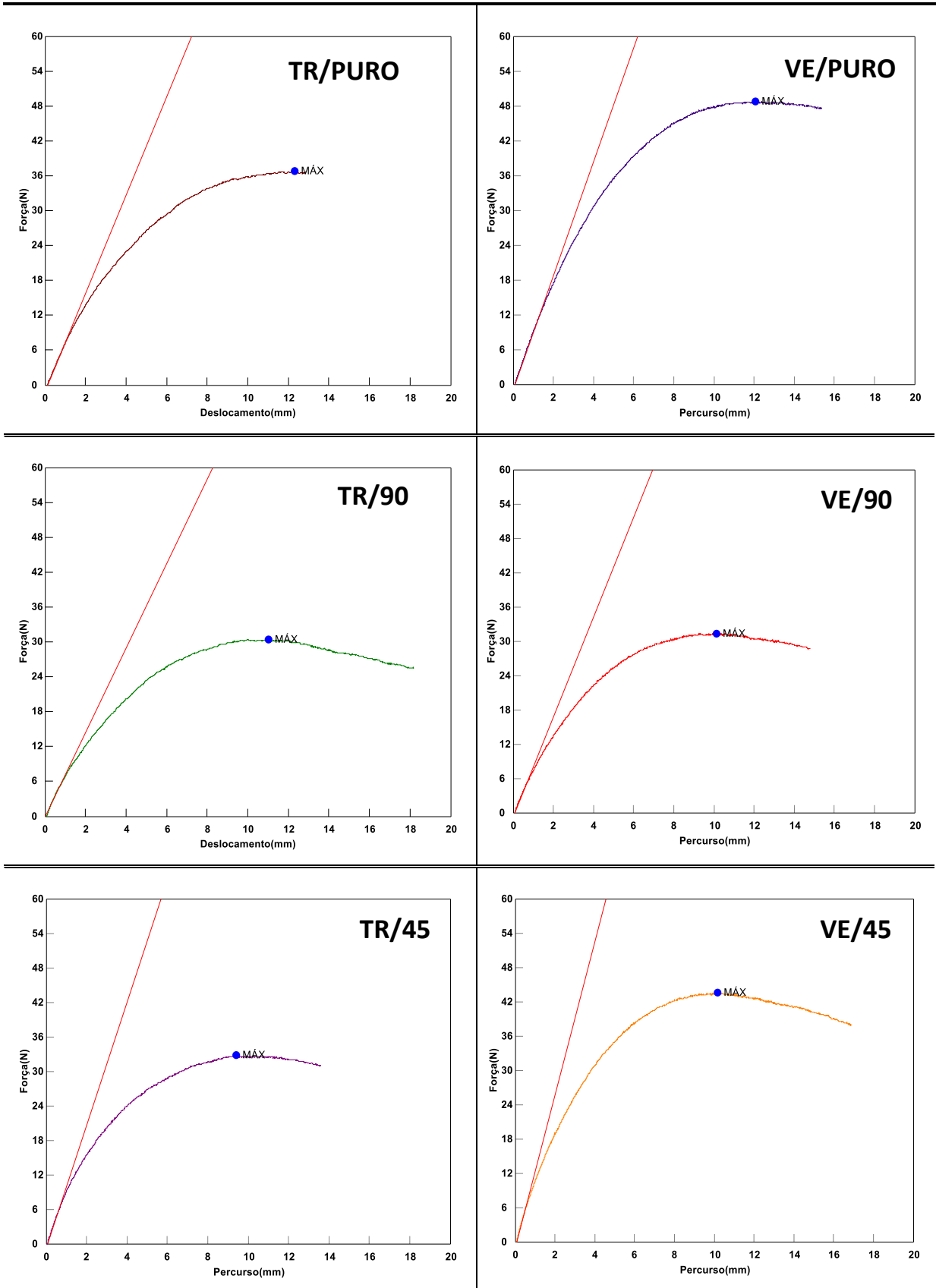


GRÁFICO 4.2 – Exemplos de diagramas de força e percurso (deslocamento) na flexão de compósitos de cada condição, com enfoque na reta do regime elástico.

As retas que sobrepõem, aproximadamente, o regime elástico dos compósitos na flexão, evidenciam uma maior inclinação nos compósitos com tecido de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$ , comparado aos corpos de prova com PEAD sem reforço e aos compósitos reforçados com tecidos orientados em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , comprovando os resultados obtidos na estatística descritiva.

Salienta-se, também, a boa aplicabilidade do PEAD Verde em esforços de flexão, em substituição ao PEAD tradicional, como matriz em compósitos reforçados com fibras de sisal, devido às semelhanças nos atributos alcançados nos ensaios, confirmando a tese de que o PEAD verde pode substituir o PEAD tradicional, por causa de suas propriedades similares e pelo fato de poder ser reciclado juntamente com o mesmo, não interferindo nos processos já vigentes de reciclagem (CARMO; BELLOLI; MORSCHBACKER, 2012).

#### 4.2.2 Resistência à flexão dos compósitos

O GRA. 4.3 mostra as médias obtidas os resultados obtidos para a obtenção do  $MOR_f$  sob cada condição.

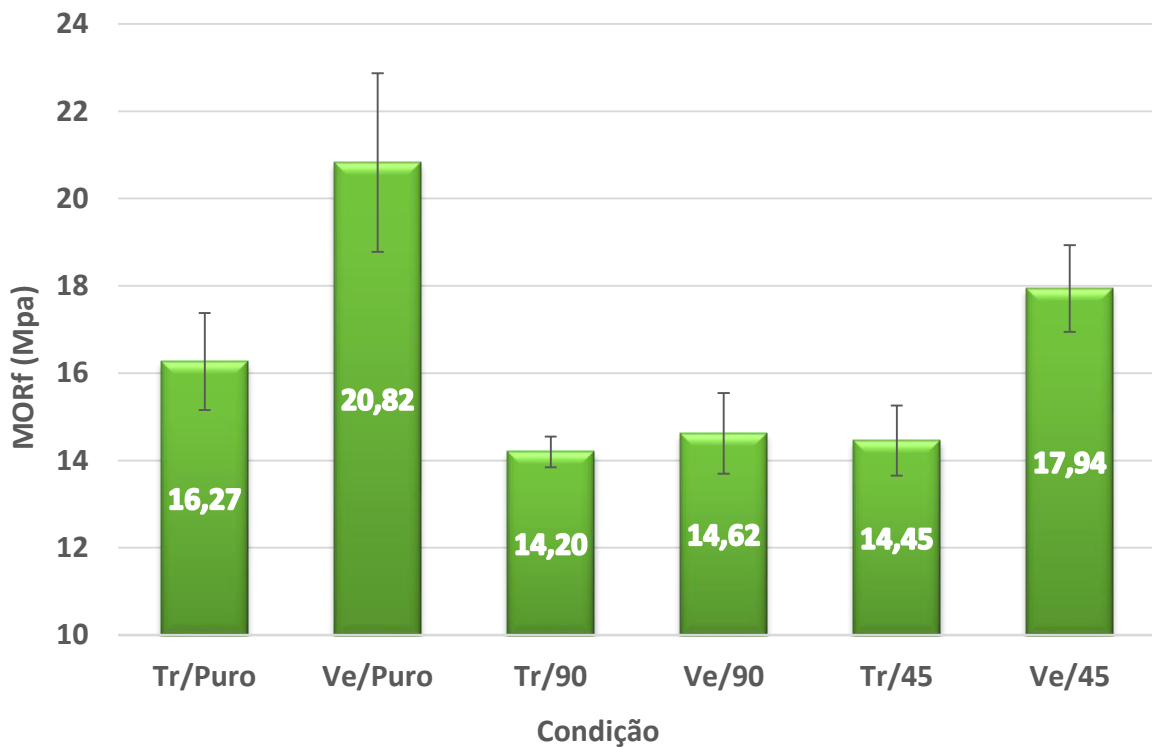


GRÁFICO 4.3 - Resistência à flexão dos corpos de prova.

O resultado encontrado nos ensaios de flexão para o PEAD tradicional sem reforço para a média amostral de  $MOR_f$  ( $16,27 \pm 1,11$  MPa) foi semelhante ao obtido no estudo de Candian e Dias (2009), que apresentaram um valor de  $MOR_f$  de  $17,64 \pm 0,35$  MPa para o PEAD reciclado.

As médias amostrais obtidas pelos experimentos com PEAD verde, comparando cada tipo de reforço, foram superiores àquelas obtidas pelos experimentos com PEAD tradicional. Conforme citado anteriormente, fatores como o grau de cristalinidade e o peso molecular são fontes potenciais de influência na resistência mecânica das amostras de PEAD utilizadas no estudo (WOLF, 2004).

Salienta-se também que o valor médio amostral para o  $MOR_f$  dos compósitos de PEAD verde reforçados com tecidos [ $\pm 45^\circ$ ] foi expressivamente maior que o valor médio dos compósitos reforçados com tecidos orientados a [ $0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ$ ]. Tal fato não ocorreu no caso desses reforços com o PEAD tradicional, uma vez que os valores médios obtidos ( $14,45 \pm 0,80$  MPa e  $14,20 \pm 0,35$  MPa, respectivamente), foram muito próximos e tiveram consideráveis coeficientes de variação. Tais constatações reforçam a forte influência do tipo de PEAD nos resultados obtidos. Além disso, deve-se considerar a direção da aplicação da carga, que é perpendicular às direções de maior resistência mecânica dos fios que compõem os tecidos dos compósitos (YAN *et al.*, 2015).

As médias amostrais de  $MOR_f$  dos compósitos foram inferiores às apresentadas pelos PEAD sem reforço, considerando um mesmo tipo de PEAD. A variação negativa dessa propriedade em compósitos é frequentemente atribuída às proporções mássicas ou volumétricas entre polímeros e fibras, como relatam Ayrilmis, Buyuksari e Dundar (2010) em um estudo com compósitos de polipropileno reforçados com pinha moída, em que o  $MOR_f$  foi negativamente afetado com teores maiores de reforço.

O GRA. 4.4, por sua vez, apresenta um esboço do comportamento dos compósitos nos ensaios de flexão, relacionando a força e o deslocamento do compósito na flexão em três pontos. As curvas dos gráficos Força em função do Deslocamento indicam que os compósitos com matriz de PEAD verde, em cada tipo de reforço, necessitaram de uma maior força para flexionar, e sofrer a conseqüente fratura.

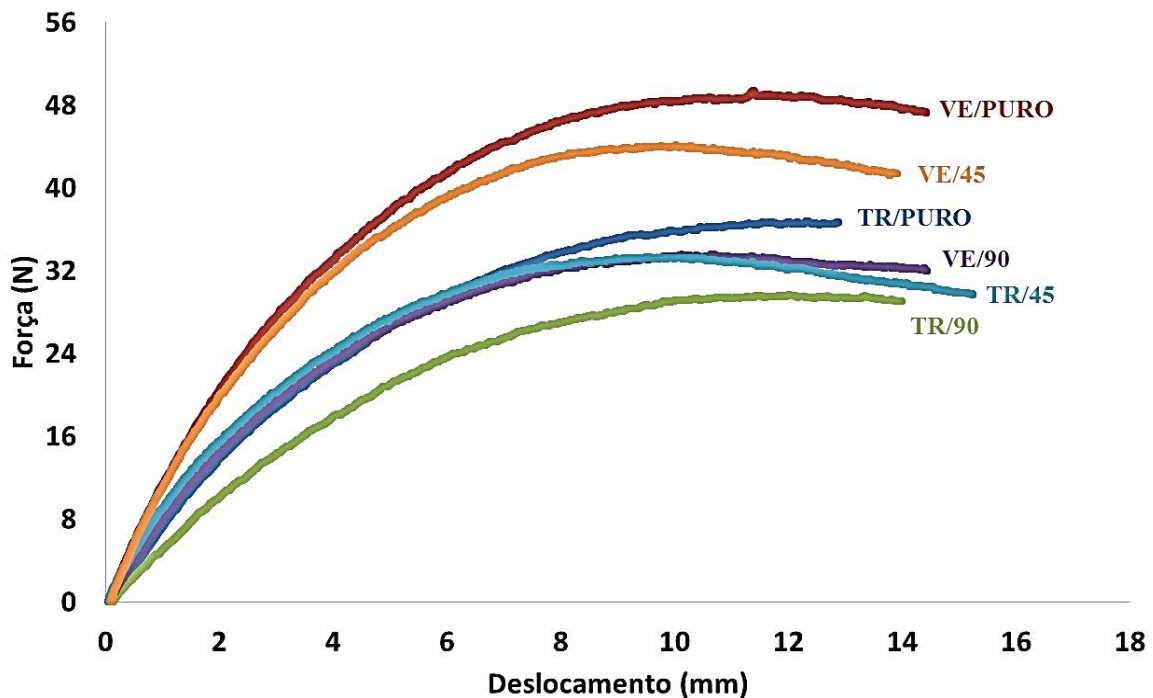


GRÁFICO 4.4 – Esboço do comportamento dos compósitos no ensaio de flexão, com base na força e no deslocamento (curvas sobrepostas).

#### 4.2.3 Análise das fraturas resultantes do esforço de flexão nos compósitos

A FIG. 4.3 mostra a região fraturada dos materiais em estudo, após o esforço de flexão exercido.

Os corpos de prova de PEAD sem reforço apresentaram em sua estrutura física uma curvatura característica de um ensaio de dobramento. O comportamento apresentado pelo PEAD nesse presente trabalho é característico de alguns polímeros flexíveis, no qual o material sofre uma deformação plástica e posteriormente apresenta delaminações (LIMA *et al.*, 2008).

Os compósitos reforçados com tecidos de sisal orientados a  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram médias inferiores de  $MOE_f$  e de  $MOR_f$  que aqueles com reforço na orientação  $[\pm 45^\circ]$ . Em ambos os casos, as fraturas podem ser explicadas pela ocorrência de delaminações internas e *pull-out* das fibras no interior desses compósitos, as quais Li, Mai e Ye (2005) afirmam ser oriundas de problemas de adesão interfacial, uma vez que as trincas se propagam de maneira mais severa quando a adesão não é suficiente para evitar tais propagações. Além disso, os autores ressaltaram a influência de forças cisalhantes no interior desses compósitos, sendo que no caso dos compósitos com tecidos na orientação  $[\pm 45^\circ]$ , a configuração dos fios entrelaçados de seus tecidos trouxe maior resistência ao cisalhamento, nos esforços impostos pela flexão.



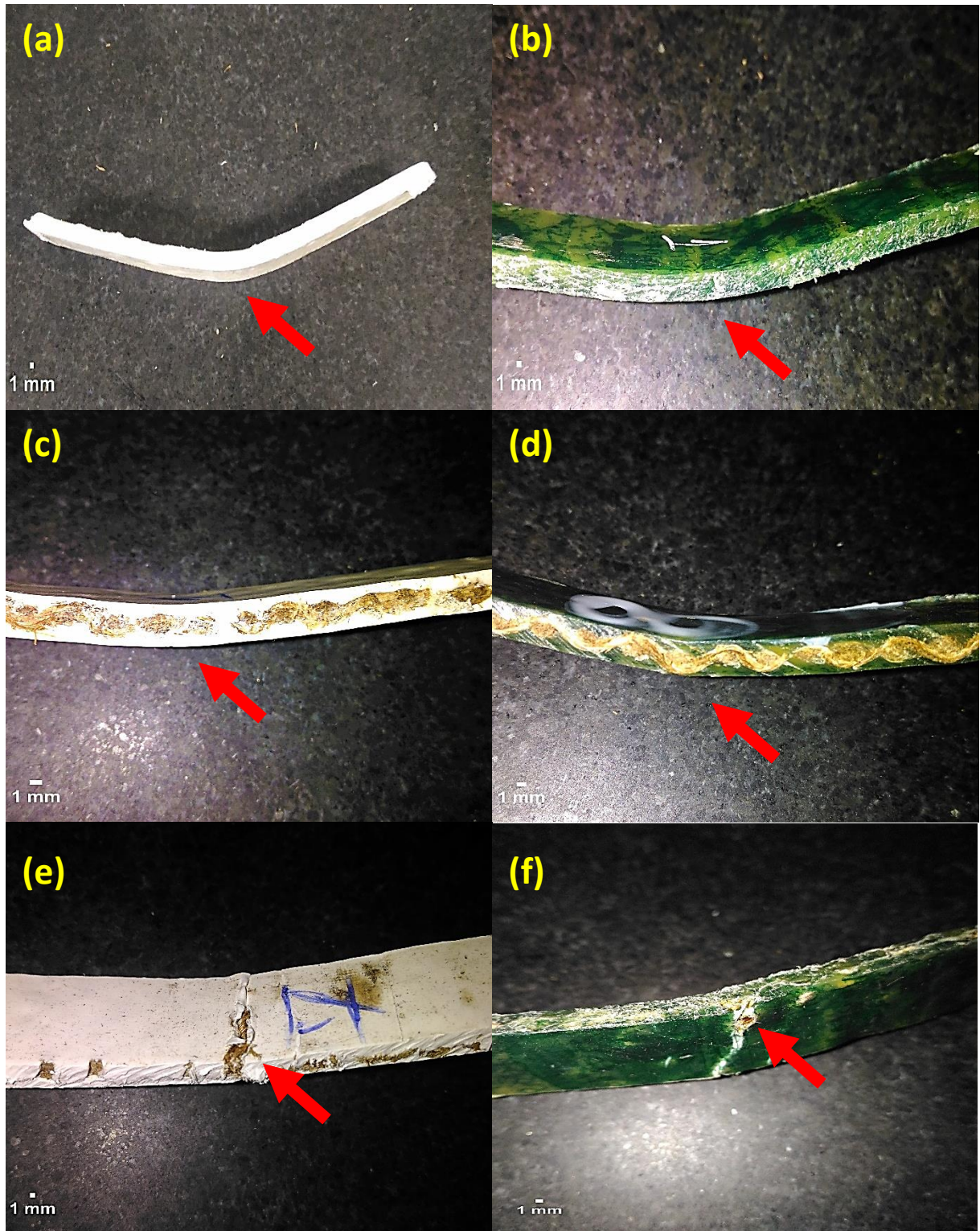


FIGURA 4.3 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de flexão: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/90, (d) VE/90, (e) TR/45 e (f) VE/45.

Zhao, Li e Bai (2014) afirmaram, com relação aos problemas de adesão interfacial, que a hipótese mais provável para essa ocorrência é a natureza hidrofílica (polar) das fibras e a

natureza hidrofóbica (apolar) de PEAD, que influencia negativamente nas ligações químicas que evitam a propagação de trincas ao longo da superfície de contato das fases dos compósitos.

#### 4.2.4 Análise de variância dos resultados dos ensaios de flexão

A TAB. 4.1 mostra os valores médios amostrais para o  $MOE_f$  e o  $MOR_f$  para cada condição planejada do experimento. Além disso, há também os valores médios da deformação até a tensão máxima, que variou em médias entre 0,05 e 0,07.

TABELA 4.1

Ensaio de flexão: médias do  $MOE_f$ , do  $MOR_f$  e da deformação até a fratura na flexão dos compósitos.

<b>Condição</b>	<b>Tipo de PEAD</b>	<b>Tipo de Reforço</b>	<b><math>MOE_f</math> (GPa)</b>	<b><math>MOR_f</math> (MPa)</b>	<b>Deformação até a tensão máxima</b>
<b>TR/PURO</b>	Tradicional	Sem reforço	0,63	16,27	0,06
<b>VE/PURO</b>	Verde	Sem reforço	0,70	20,82	0,07
<b>TR/90</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$	0,55	14,20	0,06
<b>VE/90</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$	0,65	14,62	0,06
<b>TR/45</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$	0,71	14,45	0,05
<b>VE/45</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$	0,88	17,94	0,07

Com base na Análise de Variância (ANOVA), investigou-se a influência dos fatores e da interação entre eles nas médias obtidas, utilizando-se do p-valor e da estatística do teste F (f-valor). Quando o p-valor é menor que o nível de significância adotado, a influência do fator ou da interação entre eles é significativa na variável resposta. A estatística do teste F, por sua vez, indica a força da significância do fator ou da interação, ou seja, quanto maior este valor, dado que o p-valor é menor que o nível de significância, maior é a influência do fator ou da interação na variável resposta (MINITAB, 2017).

Para verificar a normalidade dos resíduos, utilizou-se o p-valor do teste de Anderson Darling, que possui a hipótese nula de que os resíduos seguem uma distribuição normal. Se o p-valor do teste de Anderson Darling for maior que o nível de significância adotado (neste estudo,  $\alpha = 0,05$ ), não deve-se rejeitar a hipótese da normalidade dos resíduos.



Esse pressuposto da normalidade dos resíduos, ao lado da homocedasticidade, que garante a inexistência de tendências de grandes diferenças entre as variâncias subgrupais, sendo observada nos gráficos que trazem os valores ajustados e a ordem de observações, são necessários para a validação dos resultados obtidos no ANOVA (MINITAB, 2017).

A TAB. 4.2 mostra o p-valor e a f-valor encontrados no estudo. Através dos valores obtidos de p-valor para cada fator e interação, pode-se inferir, ao nível de confiança de 95%, que tanto a direção da fibra quanto o tipo de PEAD tiveram influência nos resultados de  $MOE_f$  e de  $MOR_f$  dos compósitos em estudo. Através do f-valor, destaca-se a maior influência do tipo de PEAD nas médias amostrais obtidas, em ambos os casos, alinhando-se aos resultados experimentais relatados anteriormente.

TABELA 4.2

Ensaio de flexão: análise de variância do  $MOE_f$  e do  $MOR_f$  dos compósitos.

Fator	$MOE_f$ (GPa)		$MOR_f$ (MPa)	
	f-valor	p-valor	f-valor	p-valor
Tipo de PEAD	55,68	0,000	49,23	0,000
Tipo de Reforço	50,96	0,000	34,85	0,000
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço	2,45	0,105	9,70	0,001

O p-valor do teste da normalidade de Anderson Darling (0,269) para o modelo de  $MOE_f$  foi maior que o nível de significância adotado (0,05), e os resíduos configuram, aproximadamente, um linha reta (GRAF 4.5), o que pressupõe a normalidade dos resíduos. O GRAF. 4.6a indica que não há tendências ou padrões entre as variâncias, e o GRA 4.6b mostra a homogeneidade e a independência das observações amostrais, pressupondo a homocedasticidade dos resíduos. O  $R^2$  ajustado indica que o modelo explica 81,18 % da variação dos dados, considerando as variáveis em estudo.

Em relação ao  $MOR_f$ , os resultados da ANOVA indicaram um p-valor do teste da normalidade de Anderson Darling (0,237) maior que o nível de significância (0,05), e resíduos configurando uma reta, fatos que indicam a normalidade dos resíduos (GRAF. 4.7). O GRA. 4.4 mostra que, igualmente à análise realizada com os resíduos do modelo gerado para os valores de  $MOE_f$ , a variância dos resíduos do modelo para os valores de  $MOR_f$  não evidencia tendências (GRA. 4.8a) e há homogeneidade e independência nas amostras (GRA. 4.8b). A partir do  $R^2$  ajustado, infere-se que o modelo explica 80,31 % da variação do  $MOR_f$  dos compósitos.

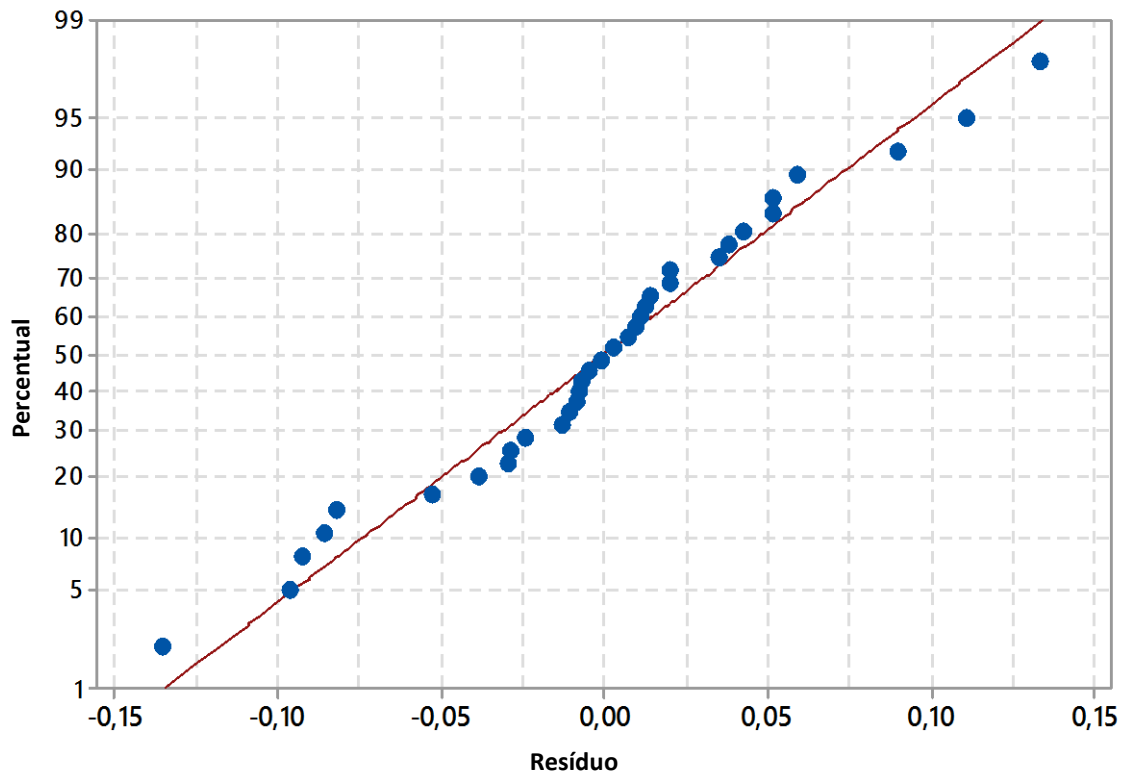


GRÁFICO 4.5 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de  $MOE_f$  nos ensaios de flexão.

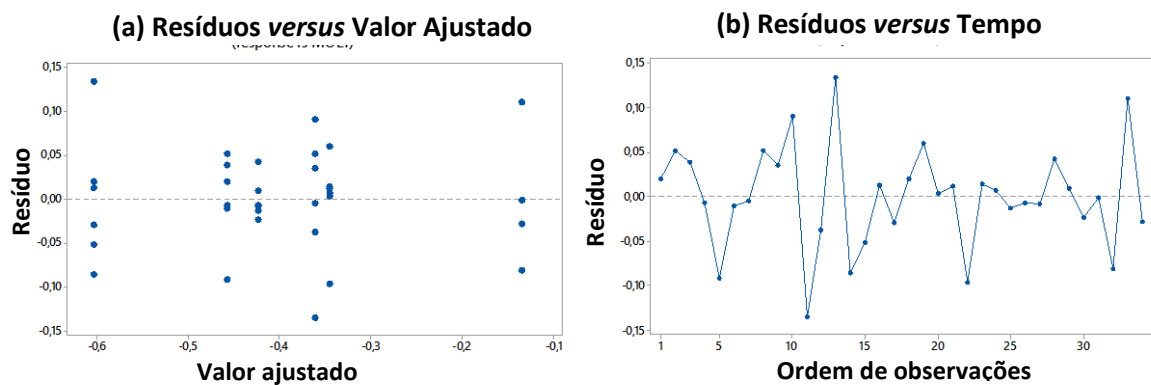


GRÁFICO 4.6 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de  $MOE_f$  nos ensaios de flexão.

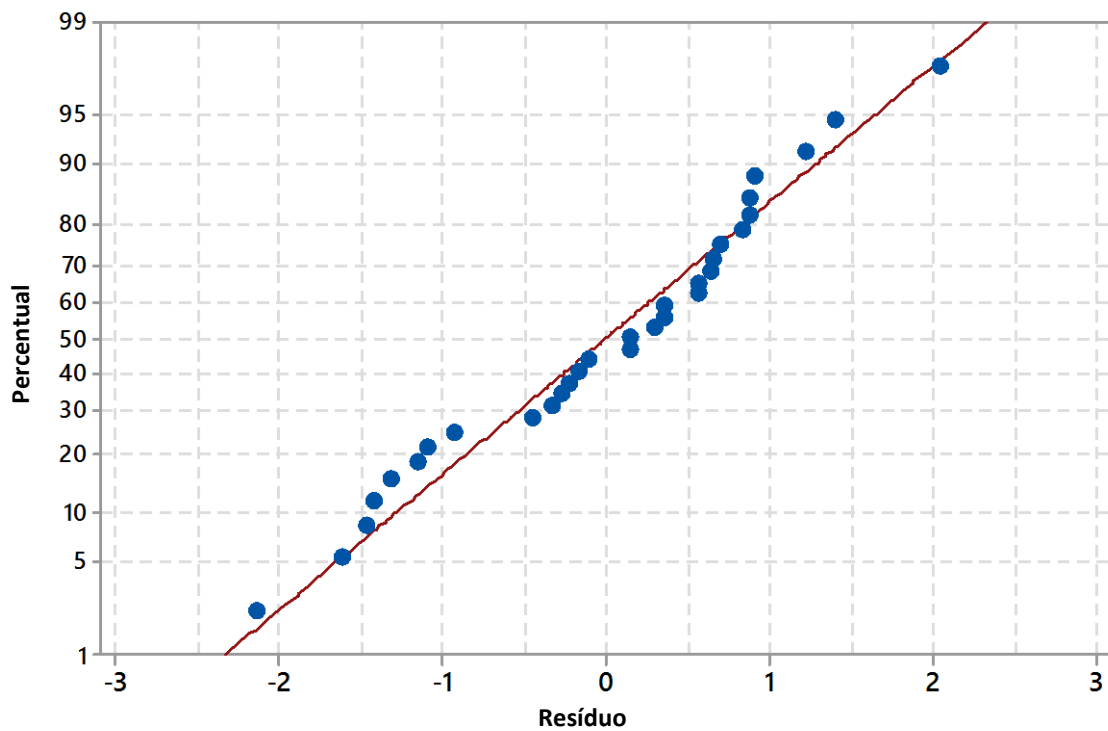


GRÁFICO 4.7 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de  $MOR_f$  nos ensaios de flexão.

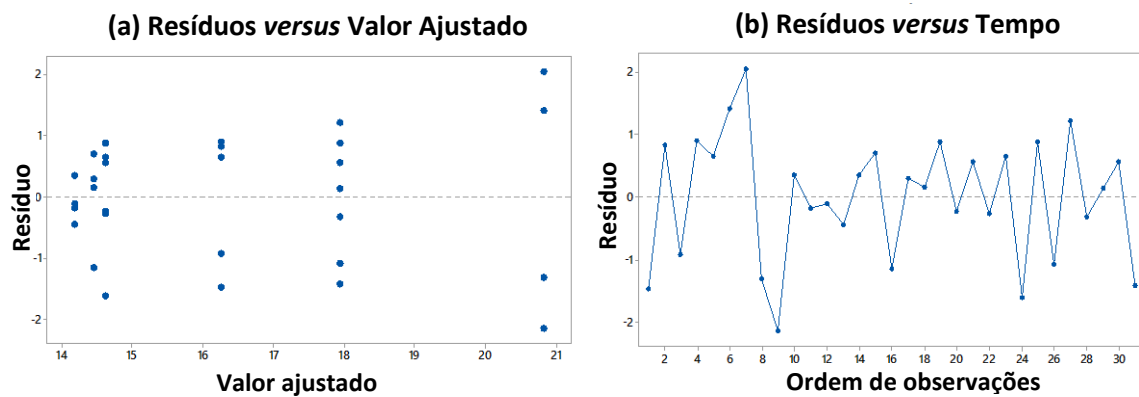


GRÁFICO 4.8 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de  $MOR_f$  nos ensaios de flexão.

## 4.3 Ensaios de tração

### 4.3.1 Módulo de elasticidade na tração dos compósitos

O GRA. 4.9 mostra os valores médios do  $MOE_t$  dos corpos de prova ensaiados neste estudo.

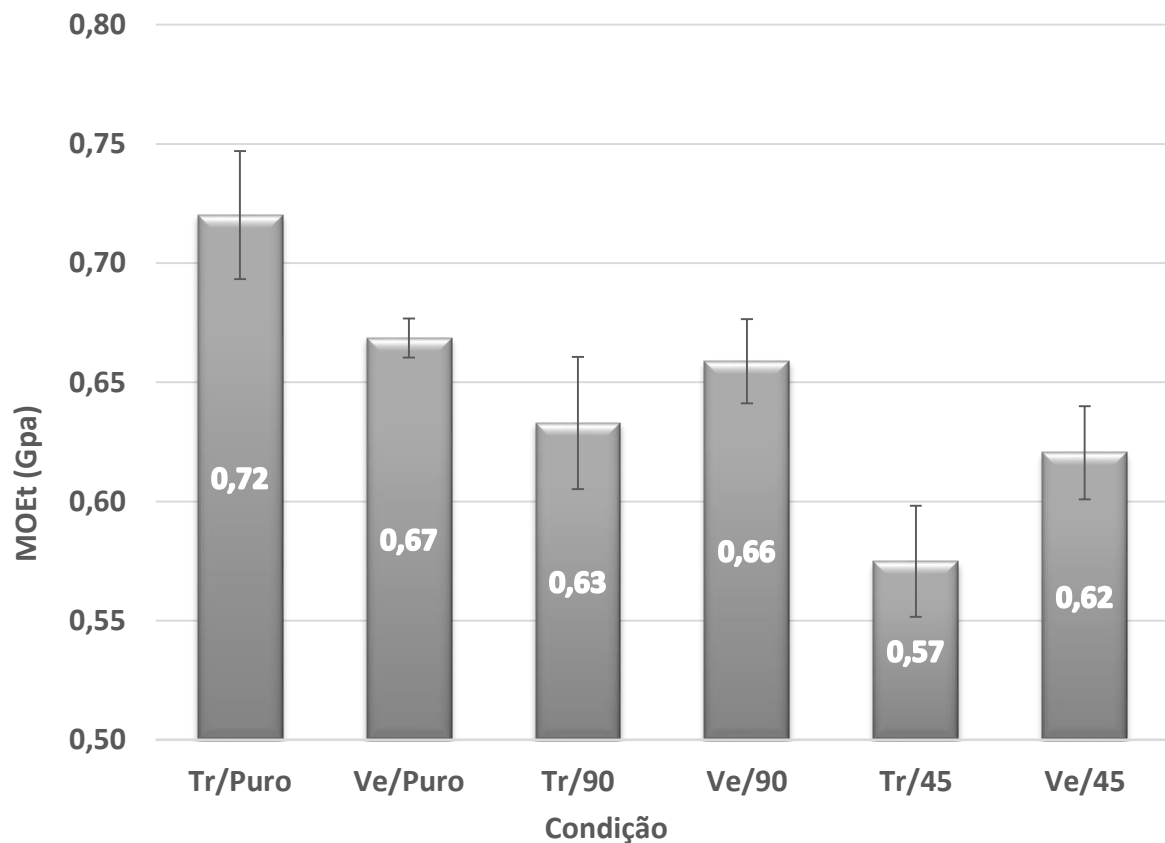


GRÁFICO 4.9 - Módulo de elasticidade na tração dos corpos de prova.

Os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$  apresentaram menor rigidez à tração (menores médias amostrais de  $MOE_t$ ) que o PEAD sem reforço, em ambos os tipos de PEAD. Além disso, os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram maior rigidez no esforço à tração que aqueles reforçados com tecidos na orientação  $[\pm 45^\circ]$ .

Nielsen e Landel (1994) afirmaram que materiais compósitos com tecidos de reforço em orientação  $[\pm 45^\circ]$  apresentam alto nível de tensão interlaminar em esforços de tração, a qual acarreta em delaminações no material, diminuindo a rigidez à tração. Segundo os autores, os compósitos com reforços na orientação  $[\pm 45^\circ]$  apenas são mais rígidos que compósitos com reforço em orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  quando são submetidos a esforços de cisalhamento (torção).

Constatou-se também que as médias amostrais de  $MOE_t$  dos compósitos foram inferiores aos polímeros sem reforço. Esse fato também foi verificado por Becker *et al.* (2011), em um estudo de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de bananeira. Segundo os

autores, a inserção de fibras pode diminuir a homogeneidade do material, o que pode influenciar negativamente nas propriedades mecânicas relacionadas à esforços de tração.

O GRA. 4.10, por sua vez, mostra o comportamento mecânico de alguns compósitos sob cada condição estudada na curva tensão-deformação quando submetidos à tração, com um enfoque especial na determinação do  $MOE_t$  dos compósitos (inclinação da reta).

Através das curvas e das inclinações das retas que tangenciam o regime elástico dos compósitos em estudo, percebeu-se uma maior inclinação da reta que passa pela região elástica da curva tensão-deformação no caso dos compósitos reforçados com tecido de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  que no caso dos reforçados com tecidos na orientação  $[\pm 45^\circ]$ .

As curvas tensão-deformação do GRA. 4.10 também comprovam a influência que a orientação das fibras de sisal exerceram na rigidez do PEAD reforçado, ressaltando a possibilidade de se obter materiais mais flexíveis a esforços de tração com a utilização de tecidos de sisal como reforço em polímeros.

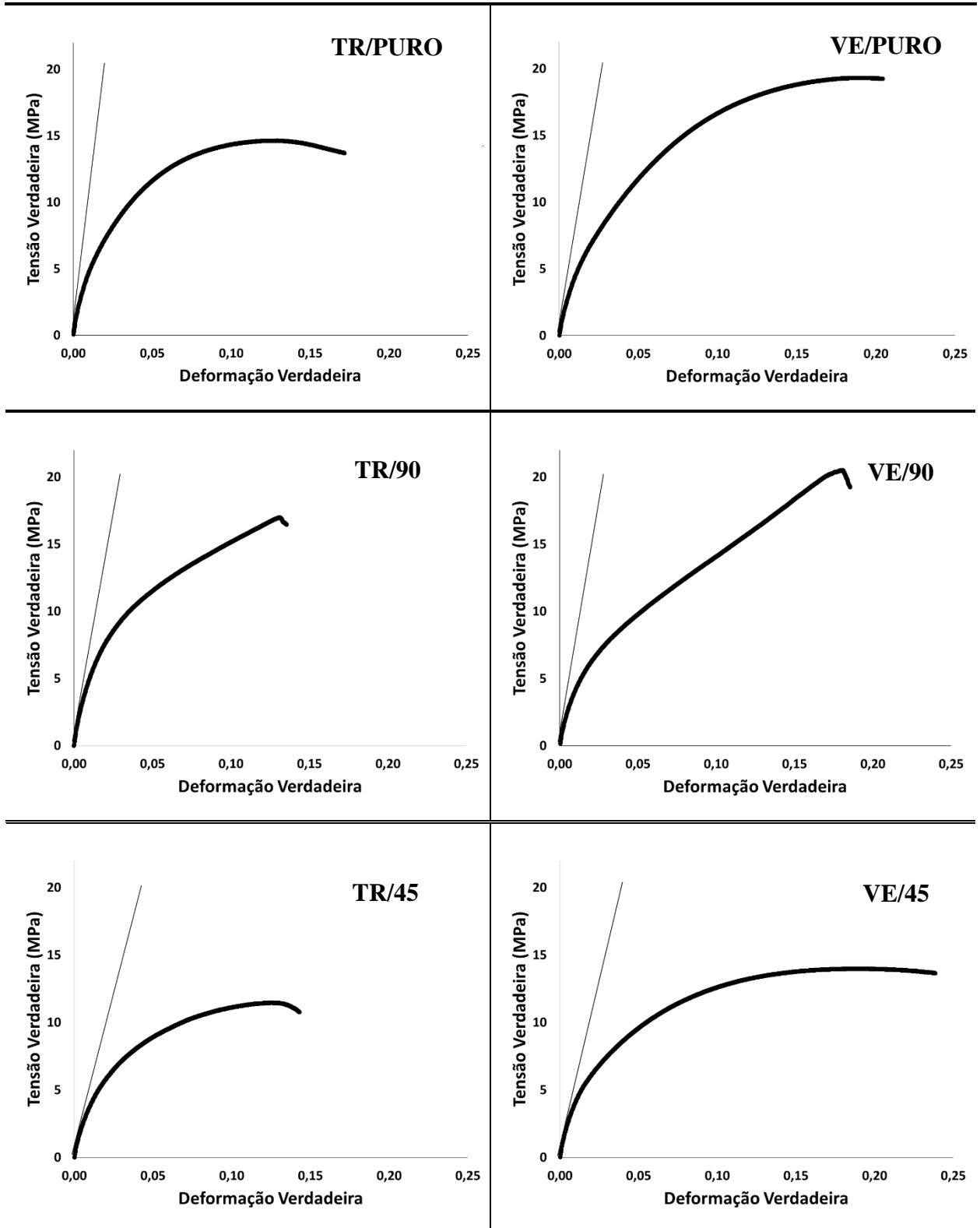


GRÁFICO 4.10 – Exemplos de diagramas tensão-deformação na tração de compósitos de cada condição, com enfoque na reta do regime elástico.

#### 4.3.2 Resistência à tração dos compósitos

O GRA. 4.11 descreve o valor médio obtido em cada condição estudada para o  $MOR_t$ , todos acompanhados do seu respectivo desvio-padrão.

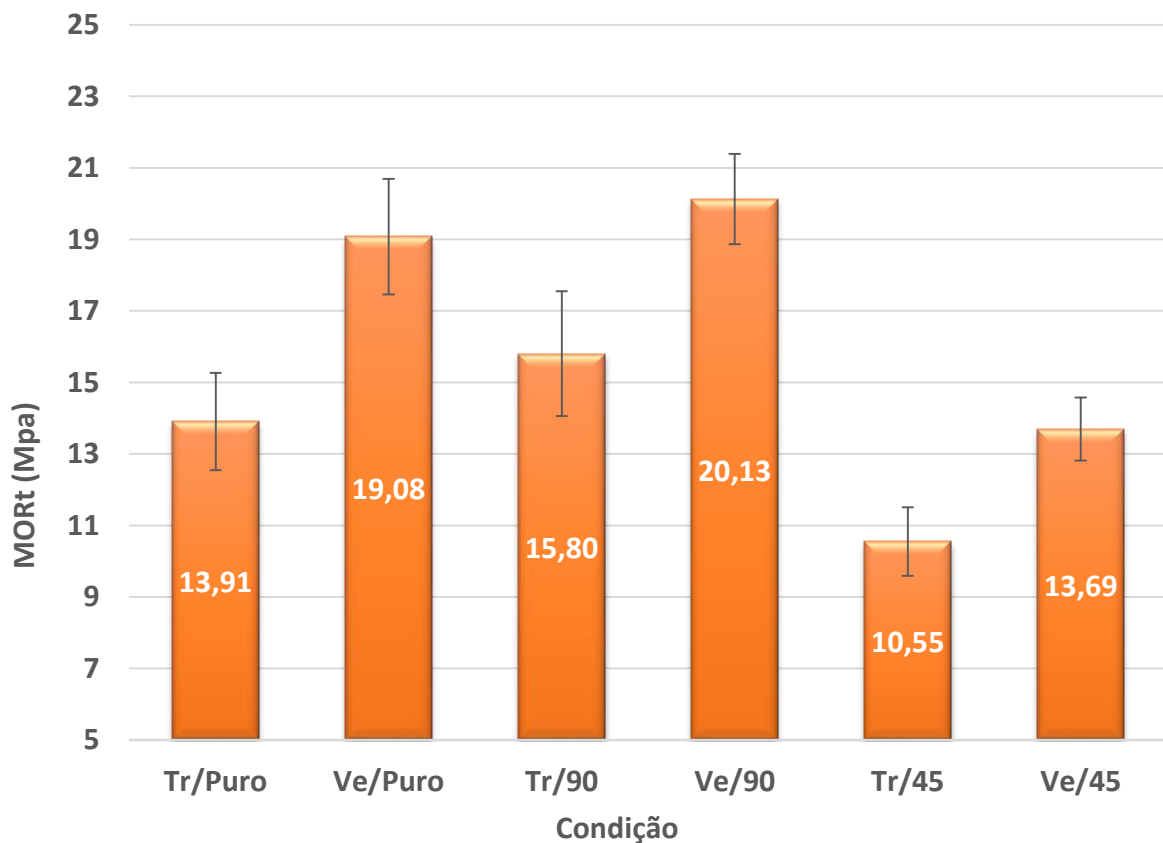


GRÁFICO 4.11 – Resistência à tração dos corpos de prova

Os ensaios de tração do PEAD tradicional sem reforço de fibras, resultaram em um valor médio de  $MOR_t$  de  $13,91 \pm 1,36$  MPa, sendo muito próximo ao encontrado para o PEAD reciclado do estudo de Candian e Dias (2009), que foi de  $14,15 \pm 0,28$  MPa, porém ele foi menor que o valor médio encontrado para o PEAD reciclado do estudo de Favaro *et al.* (2010), que foi de  $21 \pm 0,5$  MPa, e abaixo também do encontrado por Zhao, Li e Bai (2014), que apresentaram um valor médio de  $24,8 \pm 1,0$  MPa, tendo este último utilizado um tratamento para o PEAD, com anidrido maleico.

Os compósitos com matriz de PEAD verde obtiveram maiores médias amostrais que aqueles de matriz de PEAD tradicional, comparando-se por tipo de reforço. Tal fato pode ser explicado pelas constatações de Wolf (2004) e de Lucas, Sores e Monteiro (2001), que

afirmaram que polímeros, de uma mesma estrutura química, podem apresentar variações de grau de cristalinidade e de peso molecular, de acordo com a amostra coletada. Assim, polímeros com maior grau de cristalinidade tendem a ter maiores médias amostrais de  $MOR_t$ .

Os compósitos reforçados com tecidos de sisal de orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  obtiveram médias amostrais de  $MOR_t$  superiores aos reforçados com tecidos de orientação  $[\pm 45^\circ]$ . Este fato também foi relatado por Nielsen e Landel (1994), que ressaltaram uma maior resistência ao esforço de tração quando o mesmo é executado na direção de uma das camadas ou direções do tecido (fibras orientadas na direção da tensão monotônica), o que pode melhorar a transferência da carga imposta ao reforço de fibras, que geralmente possui maior  $MOR_t$  que o material da matriz, o que se aplica no presente estudo.

Salienta-se que os valores médios amostrais de  $MOR_t$  para os compósitos com tecidos de sisal em orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  foram ligeiramente maiores que os apresentados pelos PEAD sem reforço, porém deve-se considerar o erro da inferência estatística, em uma possível afirmação de que o reforço de tecidos em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  gera um material superior, em termos de  $MOR_t$ , que o PEAD sem reforço.

Através do GRA. 4.12, pode-se observar o comportamento no ensaio de tração de alguns corpos de prova, de cada condição, em diagramas de tensão-deformação, que facilitam a visualização do comportamento mecânico apresentado pelo material, quando submetido ao referido esforço.

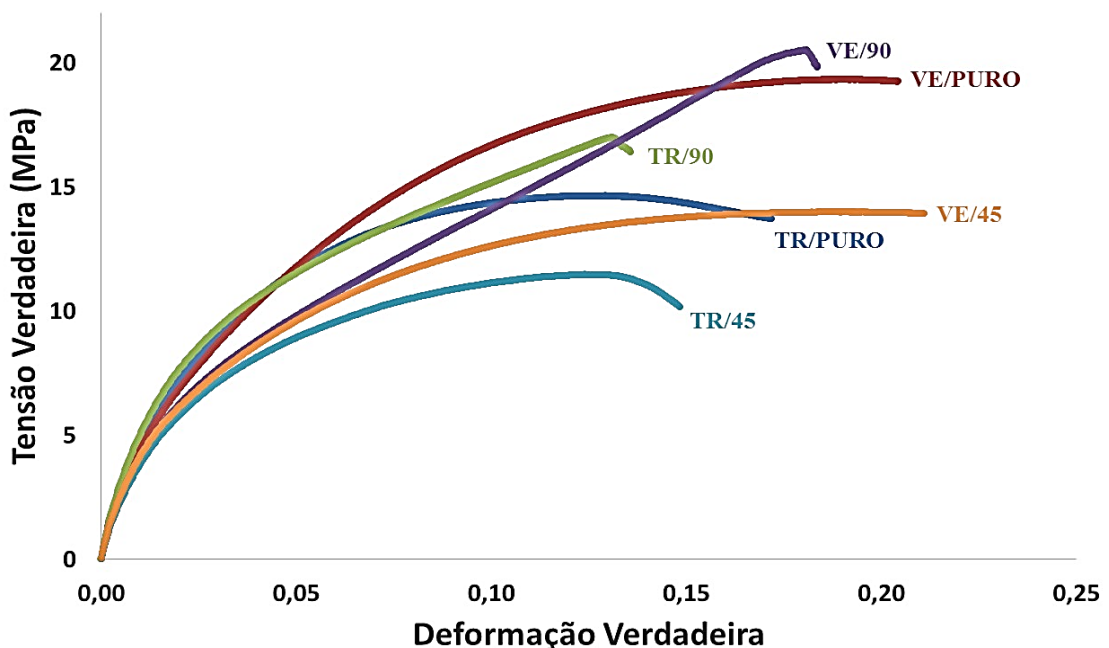


GRÁFICO 4.12 – Esboço do comportamento dos compósitos no ensaio de tração, com base na tensão e na deformação (curvas sobrepostas).



A partir das curvas de tensão-deformação dos compósitos em estudo, torna-se possível perceber também uma maior deformação até a ruptura dos compósitos com matriz de PEAD verde, o que ressalta a influência do polímero no comportamento mecânico desses compósitos, conforme investigado e comentado anteriormente.

Além disso, ressalta-se o comportamento mecânico dos compósitos com PEAD verde reforçados com tecidos de sisal em orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , que apresentaram uma curva mais uniforme no regime de deformação plástica, em comparação aos outros materiais. Em função disso, o uso de tecidos de reforço, com essa orientação, nesse referido polímero, possibilita aplicações desses materiais em situações as quais tensões de tração são atuantes.

#### 4.3.3 Análise das fraturas resultantes do esforço de tração nos compósitos

A FIG. 4.4 mostra a região onde ocorreu a fratura dos corpos de prova ensaiados por tração, sob cada condição do estudo.

Os corpos de prova de PEAD sem reforço apresentaram fraturas em regiões que sugerem a heterogeneidade nas compilações das camadas de sacolas e, conseqüentemente, na espessura final dos mesmos, no processo de prensagem a quente. Tal fator tem grande potencialidade na influência de diminuição da resistência à tração dos materiais citados.

Os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , por sua vez, apresentaram problemas de delaminação durante os ensaios de tração, o que indica problemas na adesão entre o PEAD e os tecidos de sisal, que influencia diretamente na transferência das cargas entre a matriz e o reforço (VIEIRA *et al.*, 2017).

Com relação aos compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$ , considera-se a possibilidade de pouca transferência da carga aplicada de tração ao tecido de sisal. Devido a esta orientação do tecido, pode-se explicar também sua maior deformação até a ruptura, uma vez que após o arrancamento das fibras (*pull-out*), a carga ficou concentrada nas finas camadas poliméricas restantes, que com base nesse estudo e em estudos da literatura (LI; MAI; YE, 2000), possuem maior deformação até a ruptura que os tecidos de sisal.

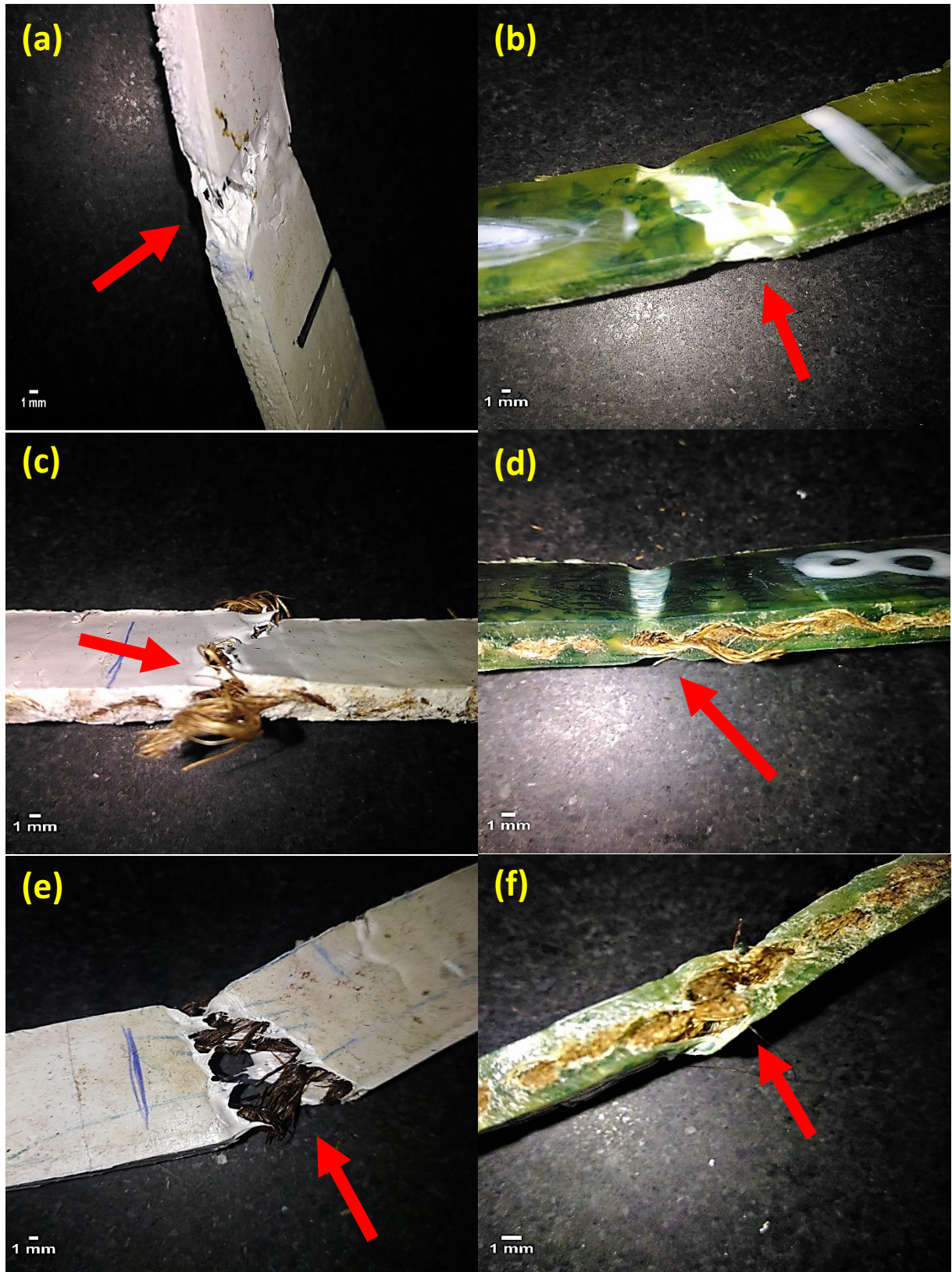


FIGURA 4.4 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de tração: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/90, (d) VE/90, (e) TR/45 e (f) VE/45.

#### 4.3.4 Análise de variância dos resultados dos ensaios de tração

A TAB. 4.3 traz a média amostral das propriedades de  $MOE_t$ , de  $MOR_t$  e de deformação até a tensão máxima em cada combinação estudada.

TABELA 4.3

Ensaio de tração: médias amostrais do  $MOE_t$ , do  $MOR_t$  e da deformação até a tensão máxima dos compósitos.

<b>Condição</b>	<b>Tipo de PEAD</b>	<b>Tipo de Reforço</b>	<b><math>MOE_t</math> (GPa)</b>	<b><math>MOR_t</math> (MPa)</b>	<b>Deformação até a tensão máxima</b>
<b>TR/PURO</b>	Tradicional	Sem reforço	0,72	13,91	0,12
<b>VE/PURO</b>	Verde	Sem reforço	0,67	19,08	0,19
<b>TR/90</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$	0,63	15,80	0,15
<b>VE/90</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$	0,66	20,13	0,19
<b>TR/45</b>	Tradicional	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$	0,57	10,55	0,17
<b>VE/45</b>	Verde	Tecido de sisal com orientação $[\pm 45^\circ]$	0,62	13,69	0,20

Os compósitos com matriz de PEAD verde apresentaram valores médios superiores de deformação até o alcance da tensão máxima suportada que aqueles com PEAD tradicional. Esse fato também se aplica às possíveis influências da cristalinidade das cadeias moleculares nas propriedades mecânicas dos polímeros (WOLF, 2004).

A TAB. 4.4, por sua vez, traz o p-valor e o f-valor da ANOVA realizada para os resultados obtidos nos ensaios de tração, a fim de entender a interferência de cada fator nos valores obtidos nesses ensaios.

TABELA 4.4

Ensaio de tração: análise de variância do  $MOE_t$  e do  $MOR_t$  dos compósitos.

<b>Fator</b>	<b><math>MOE_t</math> (GPa)</b>		<b><math>MOR_t</math> (MPa)</b>	
	<b>f-valor</b>	<b>p-valor</b>	<b>f-valor</b>	<b>p-valor</b>
Tipo de PEAD	0,75	0,400	101,34	0,000
Tipo de Reforço	35,38	0,000	66,60	0,000
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço	10,22	0,002	1,94	0,158

A partir desses dados, percebeu-se, ao nível de confiança de 95%, a influência do tipo de reforço e a interação deste fator com o tipo de PEAD nos resultados de  $MOE_t$ , uma vez que os dois apresentaram p-valores menores que o nível de significância (0,05). Além disso, o f-valor destaca uma maior força de significância do fator “tipo de reforço” nas médias amostrais encontradas para essa propriedade. Com relação aos p-valores encontrados para as médias amostrais de  $MOR_t$ , infere-se que os dois fatores são significantes nas médias obtidas, com destaque para o tipo de PEAD, que obteve um maior f-valor.

O p-valor para o teste de normalidade de Anderson Darling para o  $MOE_t$  (0,509) foi maior que o nível de significância adotado, garantindo a normalidade dos resíduos, o que pode ser visto no GRA. 4.13, com o esboço de configuração de uma reta, pelo resíduos. O GRA. 4.14 mostra a constância da variância dos resíduos e a homogeneidade e a independência das amostras, sem a presença de padrões ou tendências. O  $R^2$  ajustado indica que o modelo explica 80,17 % da variação dos dados.

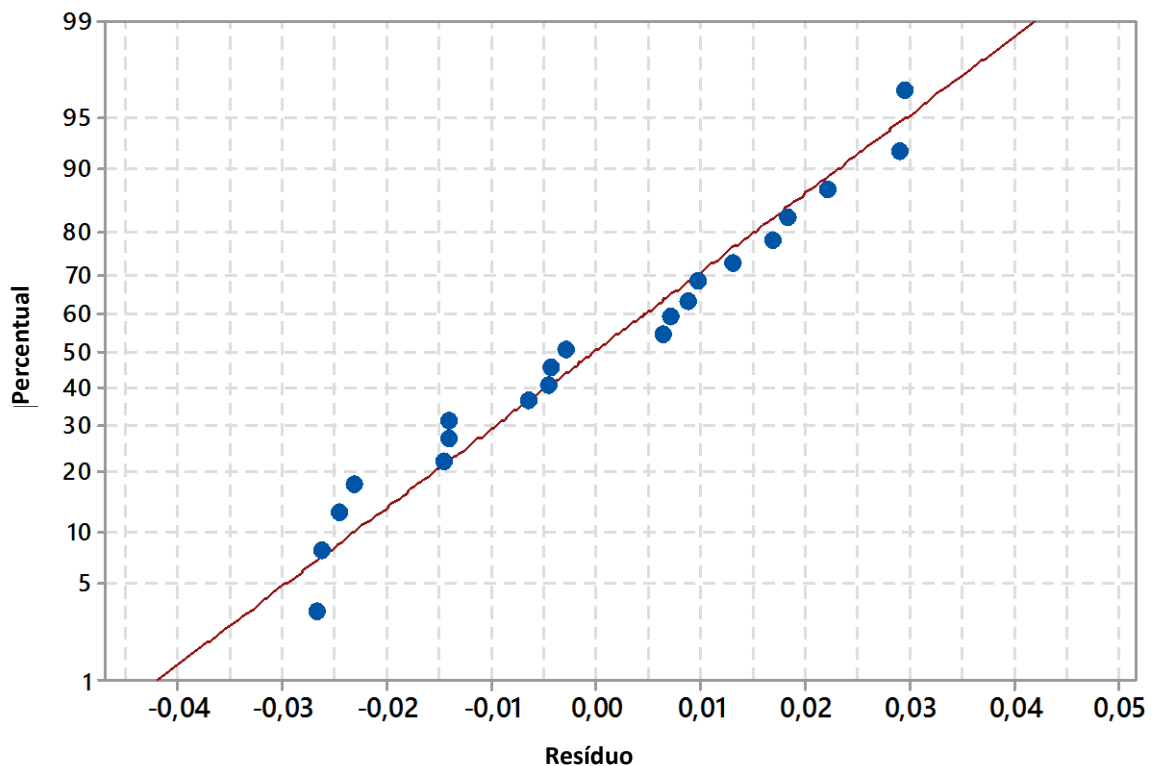


GRÁFICO 4.13 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de  $MOE_t$  nos ensaios de tração.

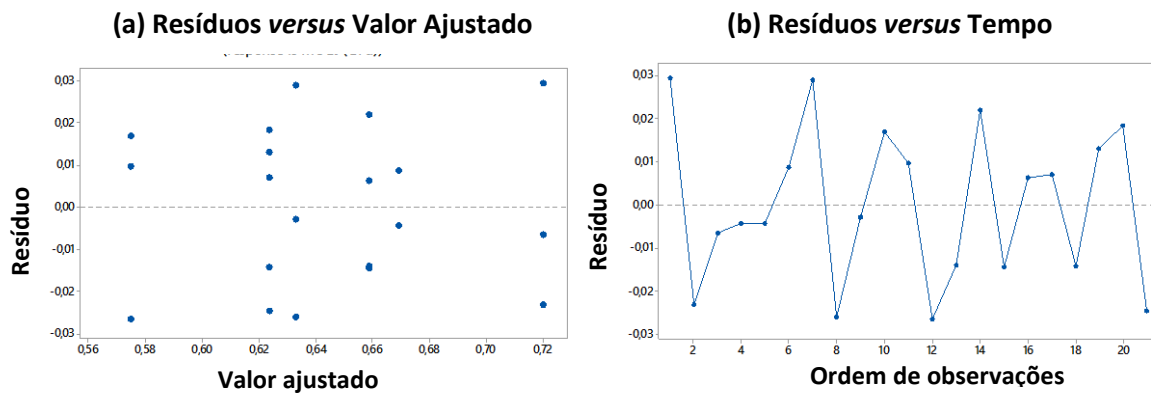


GRÁFICO 4.14 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de  $MOE_t$  nos ensaios de tração.

Com base no ANOVA dos valores encontrados de  $MOR_t$  dos compósitos, percebe-se, como ocorreu no caso do ensaio de flexão, um comportamento semelhante ao encontrado nos resíduos da ANOVA do  $MOR_t$ , com um p-valor do teste da normalidade de Anderson Darling (0,077) maior que o nível de significância (0,05), e com resíduos constituindo uma reta, indicando a normalidade dos resíduos (GRA. 4.15). De acordo com o  $R^2$  ajustado, o modelo explica 85,12 % da variação dos valores encontrados de  $MOE_t$  dos compósitos em estudo. A variância constante dos resíduos e a homogeneidade e a independência das amostras podem ser comprovadas através do GRA. 4.16.

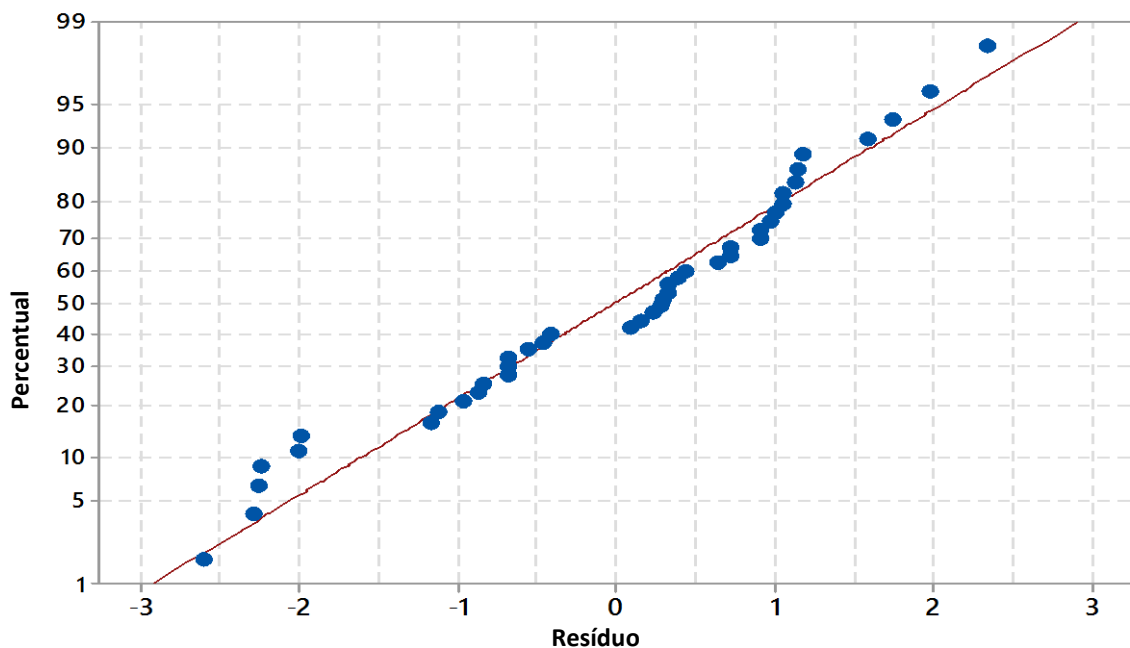


GRÁFICO 4.15 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de  $MOR_t$  nos ensaios de tração.

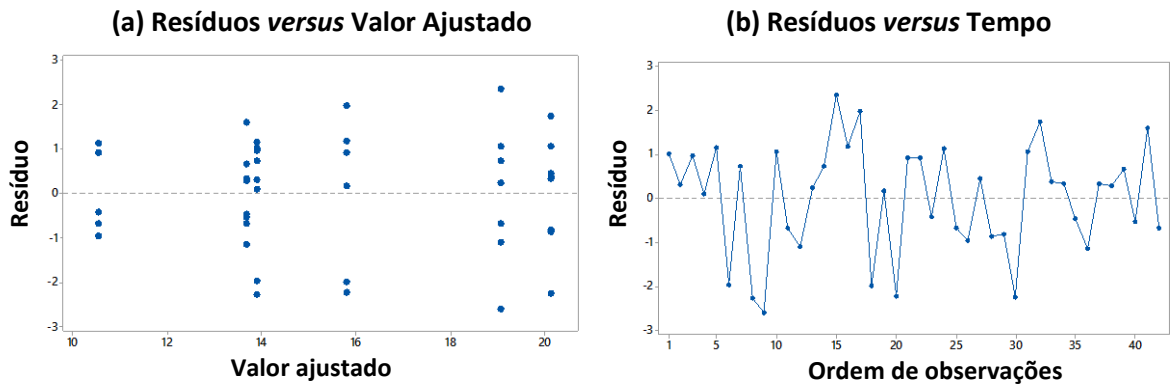


GRÁFICO 4.16 –Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de MOR<sub>t</sub> nos ensaios de tração.

### 4.4 Ensaio de Impacto

#### 4.4.1 Energia absorvida ao impacto

O GRA. 4.17 traz os valores médios de E<sub>c</sub> apresentada pelos corpos de prova nos ensaios de impacto. Ressalta-se novamente que os ensaios foram realizados em corpos de prova sem entalhe.

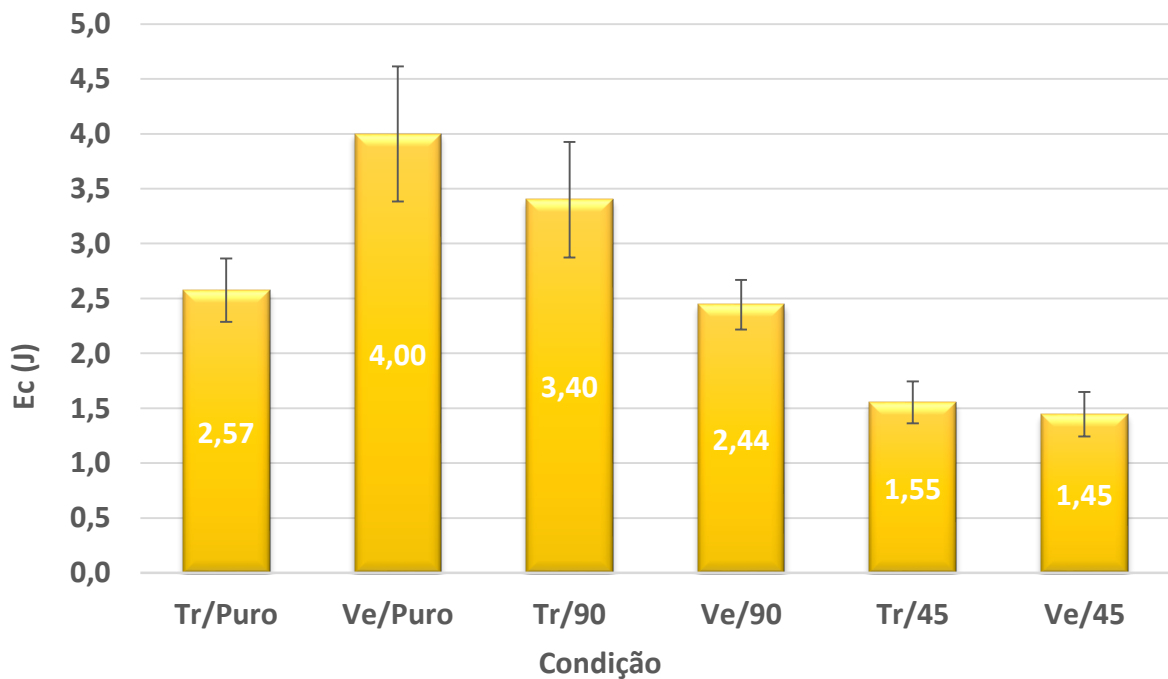


GRÁFICO 4.17 - Energia absorvida ao impacto dos corpos de prova.

A partir dos dados, percebe-se que os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação [0°/90°/0°] apresentaram maior energia absorvida ao impacto que os compósitos

com tecidos de reforço na orientação  $[\pm 45^\circ]$ , o que sugere que o reforço em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , com fibras perpendiculares à força atuante nesse ensaio, dificultou a propagação da energia no interior do material.

Uma hipótese para esse resultado é a ocorrência de um fenômeno chamado *bridging*, verificado por Naglis e d'Almeida (1998) em um estudo de fraturas por impacto em compósitos reforçados com fibras. Segundo os autores, o fenômeno é caracterizado pela união das superfícies de fratura no momento da delaminação, no qual os diversos filamentos resultantes do arrancamento superficial (*pull-out*) permanecem unidos à superfície da trinca, aumentando a capacidade de absorção de energia do compósito.

Segundo Fonseca (2005), a utilização de fios de fibras de maior comprimento, como no caso dos compósitos reforçados com tecidos orientados em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , contribui para uma maior absorção de energia ao impacto, uma vez que as mesmas apresentam uma maior capacidade de absorção e distribuição de energia do choque.

Chawla *et al.* (2010) verificaram, com base no estudo de tecidos bidirecionais, que a porosidade existente entre as lacunas do tecido e a fase matriz, e a orientação do tecido, devem ser consideradas na resistência ao cisalhamento interlaminar desses compósitos. Além disso, a relação entre a direção da tensão aplicada e o formato das lacunas preenchidas pela matriz são determinantes na deformação (escorregamento) em ambos os eixos do compósito.

Os compósitos de PEAD tradicional com tecidos orientados a  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram maior energia absorvida que o PEAD puro. Como o fato não ocorreu com os compósitos de PEAD verde com esse mesmo reforço, salienta-se a hipótese de diferenças na cristalinidade e no peso molecular entre os PEAD utilizados, conforme citado nos ensaios anteriores, uma vez que o escoamento desses polímeros é fortemente influenciado por esses fatores (LUCAS; SOARES; MONTEIRO, 2001). Além disso, ressalta-se também variabilidades na manufatura dos compósitos, sobretudo no quesito espessura, que foi diretamente influenciado pelas viscosidades dos PEAD.

#### 4.4.2 Análise da fratura resultante da energia absorvida por impacto nos compósitos

A FIG. 4.5 mostram as regiões afetadas pelo pêndulo utilizado nos ensaios de impacto, nos materiais de cada condição do estudo.



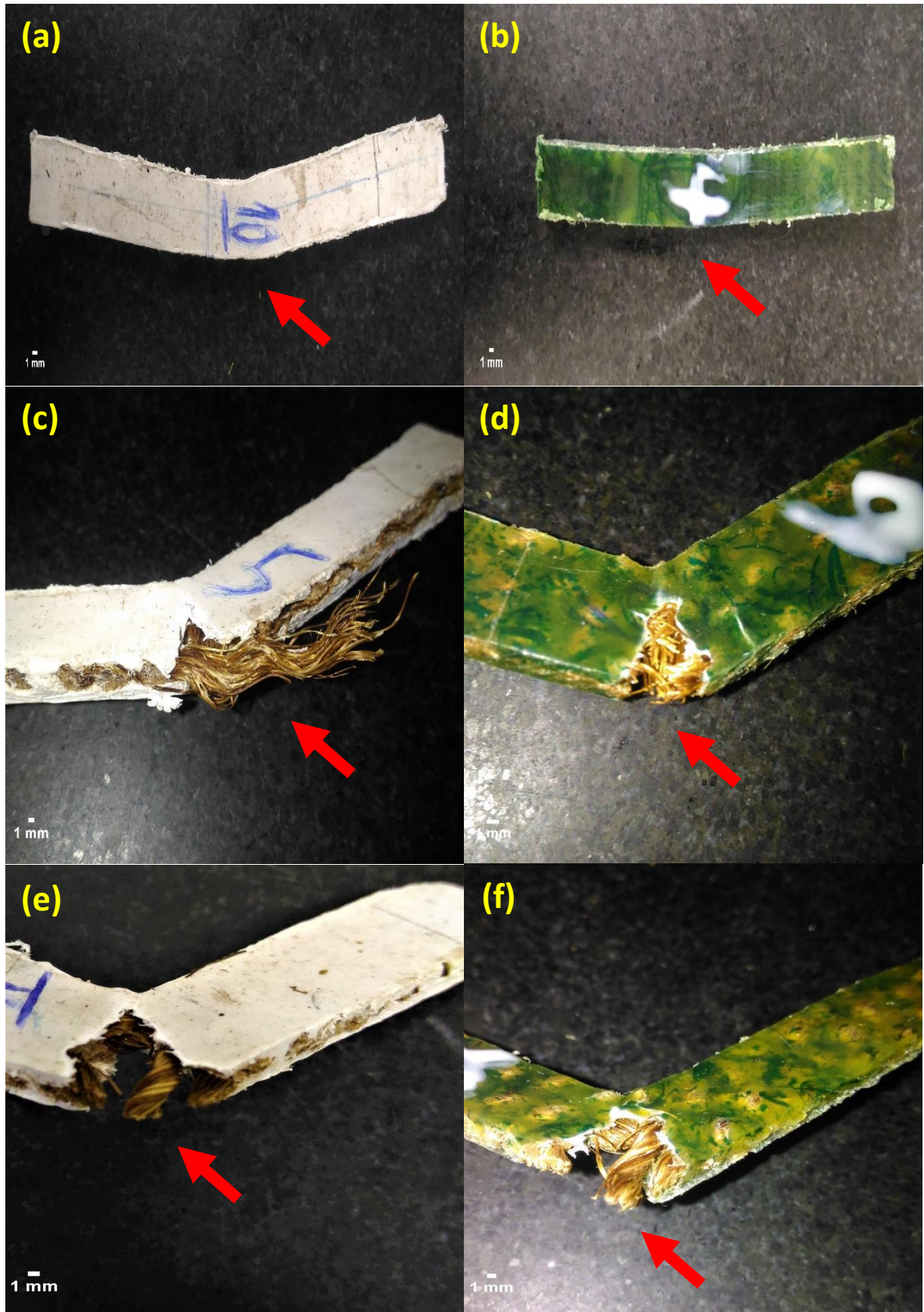


FIGURA 4.5 – Região de fratura dos compósitos após a tensão de impacto: (a) TR/PURO, (b) VE/PURO, (c) TR/90, (d) VE/90, (e) TR/45 e (f) VE/45.



Os corpos de prova de PEAD sem reforço apresentaram maiores módulos de absorção de energia no impacto, e igualmente como ocorreu nos ensaios de flexão, se mostraram com boa tenacidade, apresentando apenas pequenas fraturas internas em sua estrutura.

Os compósitos reforçados com tecidos a  $[\pm 45^\circ]$  apresentaram baixa resistência à energia associada à indução de delaminações, o que caracterizou uma baixa efetividade da resistência ao cisalhamento nesses ensaios, o que condiz com o estudo de análise de fratura por impacto de Naglis e d'Almeida (1998). Há uma forte hipótese de que houve um maior arrancamento de fios nessa configuração de reforço, além de uma maior propagação de trincas na matriz, considerando a região que sofreu o impacto do pêndulo, o que caracteriza falhas na resistência interfacial desses compósitos nesse tipo de ensaio realizado.

Kim e Seo (2006) também ressaltam que a desmoldagem interfacial pode ocorrer devido à fratura de diversas microcélulas no impacto, no interior das fibras do tecido, uma vez que existem muitas microfibrilas de alinhamento curto, que são orientadas em uma direção diferente da fibra de sisal.

Com relação ao compósitos com tecidos orientados em  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ , reforça-se a hipótese da ocorrência de *bridging*, sobre tudo nos fios adjacentes ao fio mais distante (fortemente afetado) da região impactada pelo pêndulo (FIG. 4.5d), que tendem a restringir a propagação da trinca na seção transversal dos compósitos. Além disso, foi possível perceber que a matriz de PEAD foi retida pelos tecidos de sisal, impedindo que os compósitos se rompessem totalmente.

#### 4.4.3 Análise de variância dos resultados dos ensaios de impacto

Conforme os valores médios amostrais obtidos nesses ensaios, percebe-se que os compósitos de PEAD reforçados com tecidos de orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram maiores médias que aqueles com orientação  $[\pm 45^\circ]$ , com a expressiva superioridade de 119,35 % de energia absorvida no impacto no caso dos compósitos de matriz de PEAD tradicional, e de 68,27 %, considerando aqueles de matriz de PEAD verde.

Através da ANOVA (TAB.4.5), infere-se, ao nível de confiança de 95%, que o tipo de reforço influenciou nas médias de energia absorvida ao impacto, e a interação deste fator com os dois tipos de PEAD também interferem nos valores médios (p-valores menores que o nível de significância de 0,05).

TABELA 4.5

Ensaio de impacto Charpy: análise de variância do  $E_c$  dos compósitos.

Fator	$E_c$ (J)	
	f-valor	p-valor
Tipo de PEAD	0,11	0,743
Tipo de Reforço	143,18	0,000
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço	33,79	0,000

O p-valor para o teste de normalidade de Anderson Darling para a  $E_c$  (0,368) foi maior que o nível de significância adotado (0,05), o que infere não rejeitar a hipótese de que os resíduos seguem uma distribuição normal. A partir do GRA. 4.18, percebe-se o esboço de uma de reta, pelo resíduos, o que também contribui para essa inferência.

Por meio do GRA 4.19, percebeu-se também a ausência de tendências de grandes diferenças entre a variância dos resíduos e a homogeneidade e a independência das amostras, sem padrões evidentes. O  $R^2$  ajustado do modelo indica uma explicação de 88,13 % da variação dos dados.

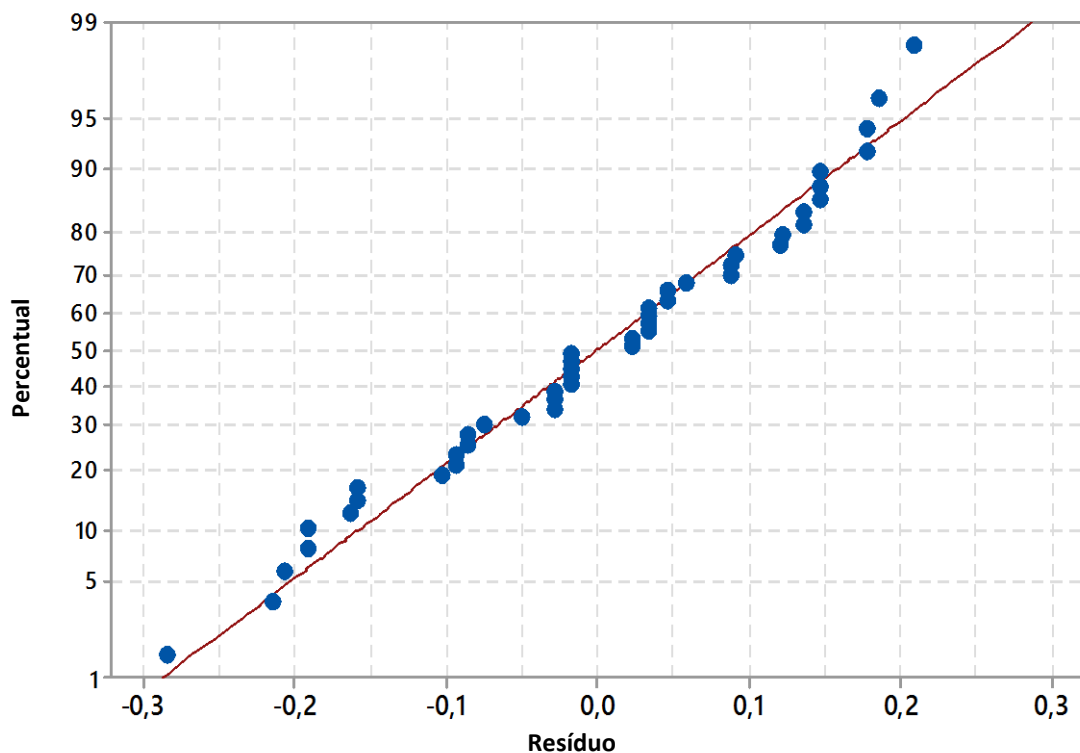


GRÁFICO 4.18 – Análise da normalidade dos resíduos para os valores encontrados de  $E_c$  nos ensaios de impacto Charpy.

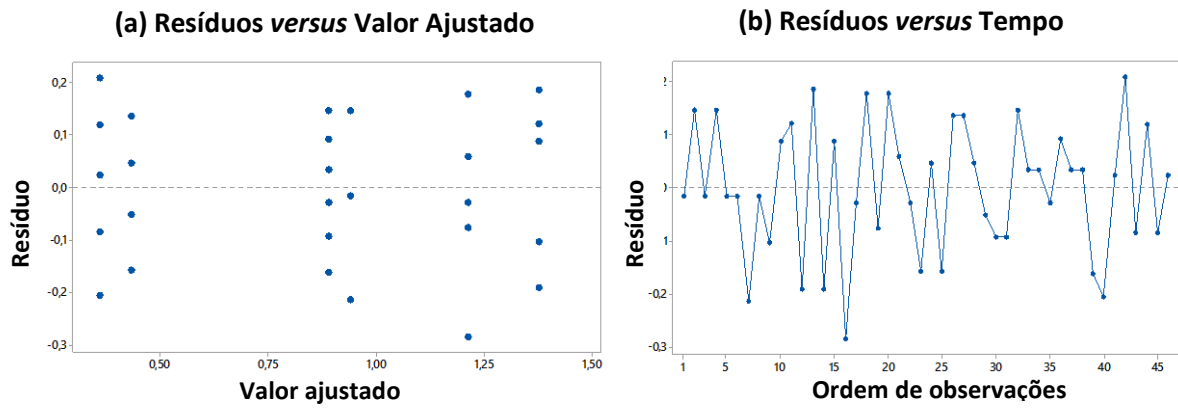


GRÁFICO 4.19 – Análise da variância dos resíduos para os valores encontrados de  $E_c$  nos ensaios de impacto Charpy.

## 5 CONCLUSÃO

Pode-se perceber a grande importância em considerar a produção de compósitos como a solução de diversos problemas recorrentes em diferentes ramos da engenharia, alinhando tais materiais com um avanço tecnológico.

Além disso, nota-se que tais materiais não se prendem apenas à soluções voltadas para uma aplicabilidade específica, um vez que também se mostram importantes e flexíveis, no uso de recursos renováveis e reciclados, e na sua volta ao mercado como substituto de outros produtos, o que tem se tornado um alvo constante de estudo por parte dos pesquisadores.

A partir desse trabalho, foi possível verificar que o PEAD verde possui um comportamento mecânico semelhante ao PEAD tradicional, e que ambos os tipos de PEAD podem ser reforçados com tecidos de fibras de sisal, ainda que estas não recebam qualquer tratamento químico. Dessa forma, conclui-se que:

- Os compósitos fabricados neste estudo apresentaram boa consistência física e boas condições mecânicas para serem cortados por cisalhamento, com baixa incidência de delaminações durante o processo de manufatura;
- O estudo apresentou uma metodologia simples e de baixo custo para reaproveitar sacolas plásticas, com a utilização de tecidos de fibras de sisal como reforço, para fabricar placas com potenciais aplicações em painéis estruturais;
- Os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$  apresentaram maiores médias amostrais de módulo de elasticidade na flexão ( $MOE_f$ ) e de resistência à flexão ( $MOR_f$ ), que aqueles reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$ ;
- Os compósitos com matriz de PEAD verde apresentaram maiores médias amostrais de módulo de elasticidade na flexão ( $MOE_f$ ) e de resistência à flexão ( $MOR_f$ ), que os compósitos com matriz de PEAD tradicional, considerando um mesmo tipo de reforço;
- Os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  obtiveram maiores médias amostrais de módulo de elasticidade na tração ( $MOE_t$ ) e de resistência à tração ( $MOR_t$ ) que os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$ ;
- Nos ensaios de impacto Charpy, os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[0^\circ/90^\circ/\bar{0}^\circ]$  apresentaram maior tenacidade que os compósitos reforçados com tecidos de sisal na orientação  $[\pm 45^\circ]$ .

Por fim, salienta-se que a escolha de materiais para a produção de compósitos, além de considerar o critério de combinação ideal das propriedades das fases, deve englobar todos os aspectos que envolvem a sua fabricação e a sua aplicação, de modo a se utilizar uma visão sistêmica, considerando também fatores como custo, volume de produção, transporte, armazenamento, condições dos trabalhadores e possíveis danos ao meio ambiente.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do presente estudo, tornou-se possível o levantamento de diversas propostas de trabalhos futuros para dar continuidade à análise das propriedades de compósitos de PEAD reforçados com tecidos de sisal. Assim, sugere-se como próximos trabalhos:

- Uma análise reológica dos compósitos fabricados nesse estudo, a fim de estudar a deformação e o escoamento do PEAD tradicional e do PEAD verde, para compreender suas propriedades viscoelásticas;
- A realização de uma análise termogravimétrica (TGA), para analisar a perda de massa em função da temperatura, aprofundando os conhecimentos do processo de degradação dos tecidos de sisal e dos PEAD;
- A realização de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), a fim de entender o processo de recristalização do PEAD tradicional e do PEAD verde;
- A realização de uma microscopia eletrônica por varredura (MEV), para analisar microscopicamente a adesão interfacial desses compósitos;
- O uso de diferentes proporções mássicas e volumétricas de fibras de sisal e de PEAD, para averiguar a influência desse fator nas propriedades de tração, flexão e impacto nesses compósitos;
- Uma análise sobre o emprego de tratamento químico nos tecidos de sisal, como mercerização e acetilação, para avaliar as melhorias na adesão interfacial desses compósitos;
- A realização de ensaios mecânicos de fadiga e de fluência com os compósitos desse estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABIQUIM.** Resinas Termoplásticas – COPLAST. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/comissao/setorial/resinas-termoplasticas-coplast/especificidade/sobre-o-produto>>. Acesso em: 08 set. 2017.

**ABNT NBR 13230. Simbologia indicativa de reciclabilidade e identificação de materiais plásticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

AGRELA, S. P. et al Preparação e caracterização de compósitos de polietileno de alta densidade com resíduos de fibras de piaçava da espécie *Attalea Funifera Mart.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 10., 2009, Foz do Iguaçu. **Anais.** Foz do Iguaçu: Out. 2009.

AHMAD, E. E. M. LUYT, A. S. Effects of Organic Peroxide and Polymer Chain Structure on Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Sisal Fiber Reinforced Polyethylene Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, Phuthaditjhaba, v. 125, p. 2216-2222, jan. 2012.

ALBINANTE, S. R. et al. Caracterização de Fibras de Bananeira e de Coco por Ressonância Magnética Nuclear de Alta Resolução no Estado Sólido. **Polímeros**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 460-466, 2012.

ALI, A. et al. Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites—A review. **Journal of Industrial Textiles**, Faisalabad, p. 1-31, 2016.

ALMACO. **Faturamento do setor brasileiro de compósitos caiu 18% em 2015.** Disponível em: <<http://www.almaco.org.br/noticias.cfm?ID=3477>>. Acesso em 29 abr. 2016.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros.** Barueri: Manole, 2007.

APRELINI, L. O. **Caracterização térmica, mecânica e morfológica de compósitos de polietileno de alta densidade com fibras da casca da semente da Moringa oleífera.** 2016.

69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

ARAÚJO, J. R. **Compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibra de curauá obtidos por extrusão e injeção**. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ASHBY, M. F. SHERCLIFF, H. CEBON, D. **Engenharia, ciência, processamento e projeto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

ASKELAND, D. R. PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

ASKELAND, D. R. WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

**ASTM D2563 “Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts”**, ASTM International, West Conshohocken, 2002.

**ASTM D3039 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”**, ASTM International, West Conshohocken, 2014.

**ASTM D3878 “Standard Terminology for Composite Materials”**, ASTM International, West Conshohocken, 2015.

**ASTM D6110 “Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics”**, ASTM International, West Conshohocken, 2010.

**ASTM D790 “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials”**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ATKINS, P. JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.



AYRILMIS, N. BUYUKSARI, U. DUNDAR, T. Waste Pine Cones as a Source of Reinforcing Fillers for Thermoplastic Composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 117, p. 2324-2330, Istanbul, 2010.

BATISTA, R. A. **Obtenção do polietileno a partir de fontes renováveis**. 2013. 84 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

BECKER, D. et al. Influência da sequência de mistura do PP-MA nas propriedades dos compósitos de PP e fibra de bananeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 21, n. 1 p. 7-12, 2011.

BELLOLI, R. **Polietileno Verde do Etanol da Cana-de-Açúcar Brasileira: Biopolímero de classe mundial**. 2010. 34 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia química) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BONELLI, C. M. C. ELZUBAIR, A. SUAREZ, J. C. M. Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava. **Polímeros: Ciência e tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 4, p. 256-260, 2005.

BRASKEM. **O plástico no planeta: o uso consciente torna o mundo mais sustentável**. Planeta Sustentável. 2012. Disponível em: <[https://www.braskem.com.br/download/Principal/21103?file=Cartilha\\_Braskem.pdf](https://www.braskem.com.br/download/Principal/21103?file=Cartilha_Braskem.pdf)>. Acesso em 24 ago. 2016.

BRASKEM. **PE verde: como é produzido**. Disponível em: <<http://www.braskem.com/site.aspx/Como-e-Produzido>>. Acesso em: 24 ago. 2017b.

BRASKEM. **Polietileno verde I'm Green (PE verde I'm Green)**. Disponível em: <<http://www.braskem.com/site.aspx/PE-Verde-Produtos-e-Inovacao>>. Acesso em: 24 ago. 2017a.

BRASKEM. **Poliolefinas:** tabela de propriedades. 2015. Disponível em: <[http://www.braskem.com/catalogos2015/poliolefinas\\_ago2015.pdf](http://www.braskem.com/catalogos2015/poliolefinas_ago2015.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

**BS EN ISO 179-1 “Plastics — Determination of Charpy impact properties”.** BSI Standards Publication, University of Manchester, UK, 2010.

CALLISTER JR, W. D. RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANDIAN, L. M. **Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais.** 2007. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CANDIAN, L. M. DIAS, A. A. Estudo do polietileno de alta densidade reciclado para uso em elementos estruturais. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 51, p. 1-16, 2009.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros:** um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CARMO, R. W. BELLOLI, R. MORSCHBACKER, A. Polietileno Verde. **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens**, v. 24, n. 1, p. 1-5, jan-mar. 2012.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** 2005. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual.** 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

CHARD, J. M. et al. Green composites: sustainability and mechanical performance. **Plastics, rubber and composites**, Surrey, v. 42, n. 10, p. 421-426, 2013.

CHATTOPADHYAY, S. K. et al. Biodegradability studies on natural fibers reinforced polypropylene composites. **Journal of Applied Polymer Science**, Nova Delhi, v. 121, p. 2226-2232, mar. 2011.

CHAWLA, N. et al. Effect of fiber fabric orientation on the flexural monotonic and fatigue behavior of 2D woven ceramic matrix composites. **Materials Science & Engineering A**, v. 557, p. 77-83, 2010.

CHOUDHURY, A. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. **Materials science and engineering A**, Ranchi, v. 491, p. 492-500, mar. 2008.

CICALA, G. et al. Composites Based on Natural Fibre Fabrics. **Woven Fabric Engineering**, Polona Dobnik Dubrovki, InTech, 2010.

COMA, V. Polysaccharide-based Biomaterials with Antimicrobial and Antioxidant Properties. **Polímeros**, v. 23, n. 3, p. 287-297, 2013.

CONAB. **Sisal 2015: Retrospectiva**. 2015. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_02\\_04\\_11\\_15\\_32\\_sisal\\_\\_conjuntura\\_especial\\_retrospectiva\\_2015-1.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_15_32_sisal__conjuntura_especial_retrospectiva_2015-1.pdf)>. Acesso em: 18 mai. 2016.

COSIBRA. **Matéria Prima**. Disponível em: <[http://www.cosibra.com.br/materia\\_prima.php](http://www.cosibra.com.br/materia_prima.php)>. Acesso em: 14 jul. 2016.

COUTINHO, F. M. B. MELLO, I. L. MARIA, L. C. S. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 13, n. 1, p. 1-13, jan./mar. 2003.

DHANDAPANI, S. NAYAK, S. K. MOHANTY, S. Surface modification of oil palm fruit bunch and fibre reinforcement effect on bio-based polyester matrix composites: Dynamic,

morphological, thermal and mechanical properties. **Journal of Elastomers and Plastics**, Tamil Nadu, v. 48, n.5, p. 456-479, 2016.

EBEWELE, R. O. **Polymer, Science and technology**. Boca Ratón: CRC Press LCC, 2000.

FAO. **New Technology For Sustainability**. Global Materials Team. 2011. Disponível em: <[http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM\\_MARKETS\\_MONITORING/Jute\\_Hard\\_Fibres/Documents/Consultation\\_2011/3-Duarte-Ford.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Jute_Hard_Fibres/Documents/Consultation_2011/3-Duarte-Ford.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2016.

FÁVARO, S. L. et al. Chemical, morphological and mechanical analysis of sisal fiber-reinforced recycled high-density polyethylene composites. **Express Polymer Letters**, Maringá, v. 4, n. 8, p. 465-473, jan.-mar. 2010.

FIBROMIX. **Madeira plástica**. Disponível em: <[http://www.fibromix.com.br/madeira\\_plastica.htm](http://www.fibromix.com.br/madeira_plastica.htm)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

FONSECA, F. M. C. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos à base de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) reciclado e fibras vegetais**. 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Centro Tecnológico de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

FRANCHETTI, S. M. M. MARCONATO, J. C. Polímeros biodegradáveis – uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. **Química Nova**, Rio Claro, v. 29, n. 4, p. 811-816, 2006.

GARCIA, A. SPIN, J. A. SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HAN, W-S. Synthesis and Characterization of Hyperbranched Waterborne Polyurethane/ Ag Nanoparticle Composites. **Polymer composites**, Jinan, 2016.

HONG, H. et al. Improving the performances of polyethylene/sisal fiber composites by infiltratively compatibilizing the multi-scale interfaces. **Composite Interfaces**, v. 22, n. 6, p. 489-502, 2015.

IZQUIERDO, I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JANG, M. G. CHO, C. KIM, W. N. Synergistic effects of hybrid conductive fillers on the electrical properties of carbon fiber pultruded polypropylene/polycarbonate composites prepared by injection molding. **Journal of Composite Materials**, Seoul, p. 1-13, 2016.

JANSSON, A. THUVANDER, F. Influence of thickness on the mechanical properties for starch films. **Carbohydrate Polymers**, v. 56, p. 499-503, 2004.

JOHN, M. J. THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, Kottayam, v. 71, p. 343-364, 2008.

JOSEPH, K. MEDEIROS, E. CARVALHO, L. Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 9, n. 4, p. 136-141, outubro. 1999.

JOSEPH, K. THOMAS, S. PAVITHRAN, C. Viscoelastic properties of short-sisal-fiber-filled low-density polyethylene composites: effect of fiber length and orientation. **Materials Letters**, North-Holland, v. 15, n. 3, p. 224-228, nov. 1992.

KHASHABA, U. Drilling of polymer matrix composites: A review. **Journal of Composite Materials**, v. 47, n. 15, p. 1817–1832, 2012.

KIM, H. J. SEO, D. W. Effect of water absorption fatigue on mechanical properties of sisal textile-reinforced composites. **Internacional Journal of Fatigue**, v. 28, p. 1307-1314, 2006.

KOURKI, H. et al. Highly nanofilled polystyrene composite Thermal and dynamic behavior. **Journal of Elastomers and Plastics**, Tehran, v. 48, n. 5, p. 404-425, 2016.

LI, Y. HU, C. YU, Y. Interfacial studies of sisal fiber reinforced high density polyethylene (HDPE) composites. **Composites: Part A**, Shanghai, v. 39, p. 570-578, 2008.

LI, Y. MAI, Y-W. YE, L. Effects of fibre surface treatment on fracture-mechanical properties of sisal-fibre composites. **Composites Interfaces**, v. 12, n. 1-2, p. 41-63, 2005.

LI, Y. MAI, Y-W. YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recente developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037-2055, 2000.

LI, X. et al Deformation and reinforcement of thin-film composite (TFC) polyamide-imide (PAI) membranes for osmotic power generation. **Journal of Membrane Science**, Singapore, v. 434, p. 204-217, fev. 2013.

LIAN, G. et al. Vertically Aligned and Interconnected Graphene Networks for High Thermal Conductivity of Epoxy Composites with Ultralow Loading. **Chemistry of Materials**, aug. 2016.

LIMA, A. F. M. et al. Propriedades mecânicas do cimento ósseo e da poliuretana de mamona com e sem catalisador. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária, v. 60, n. 5, p. 1061-1068, 2008.

LIMA, P. S. et al. Propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade e quitosana tratadas com polietileno modificado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: 2014, p. 3665-3672, 2014.

LIN, Y. J. et al. Preparation of poly(ether ether ketone)-based composite with high electrical conductivity, good mechanical properties and thermal stability. **High Performance Polymers**, Changchun, p. 1-6, 2016.

LOPES, F. F. M. et al. Estudo dos efeitos da acetilização em fibras de sisal. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 14, n. 7, p. 783-788, 2010.

LUCAS, E. F. SOARES, B. G. MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros**: Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica. Rio de Janeiro: e-papers, 2001.

MANO, E. B. MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MARINELLI, A. L. et al. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.

MARTIN, A. R. et al. Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 40-46, 2009.

MARTIN A. R. et al. Mechanical Behavior of Cold Plasma-Treated Sisal and High-Density Polyethylene Composites. **Polymer Composites**, v. 24, n. 3, p. 464-474, jun. 2003.

MARZOUK, W. et al. Composite materials based on low-density polyethylene loaded with date pits: Mechanical and thermal characterizations. **Journal of Thermoplastic Materials**, v. 30, n. 9, p. 2000-2016, 2015.

MATTOSO, L. H. C. et al. Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos. **Embrapa Instrumentação**, n.3, p. 1-4, nov. 1996.

MEYERS, M. CHAWLA, K. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2009.

MICHAELI, W. et al. **Tecnologia dos Plásticos**. 1. Ed. São Paulo: Blücher, 1995.

**MINITAB**. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/basics/what-is-anova/>. Acesso em: 15/12/2017.

MOHANTY, S. NAYAK, S. K. Rheological Characterization of HDPE/Sisal Fiber Composites. **Polymer Engineering and Science**, v. 47, n. 10, p. 1634-1642, 2007.

MOKHENA, T. C. LUYT, A. S. Investigation of Polyethylene/Sisal Whiskers Nanocomposites Prepared Under Different Conditions. **Polymer Composites**, Phuthadijhaba, v. 35, p. 2221-2233, 2014.

MONTGOMERY, D. C. RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MORSCHBACKER, A. **Inovação e tecnologia: polietileno verde**. Fundação Getúlio Vargas. Disponível em: < [http://www.fgv.br/cev/rsnovarejo/arquivos/forum\\_varejo/AntonioMorschbacker.pdf](http://www.fgv.br/cev/rsnovarejo/arquivos/forum_varejo/AntonioMorschbacker.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

MULINARI, D. R. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

NAGLIS, M. M. M. d’Almeida, J. R. M. Avaliação dos Modos de Falha sob Impacto de Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados por Fibras. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 8, n.1, 1998.

NAJAFLOO, B. REZADOUST, A. M. LATIFI, M. Effect of through-the-thickness areal density and yarn fineness on the mechanical performance of three-dimensional carbon-phenolic composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Karaj, p. 1-13, jun. 2016.

NIELSEN, L. E. LANDEL, R. F. **Mechanical Properties of Polymers and Composites**. 2. Ed. Nova York: Marcel Dekker, 1994.

OGATA, B. H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.



OLIVEIRA, Evelyn M. R. OLIVEIRA, Emilly M. R. COSTA, R. A. **Madeira plástica**. Bahia: Instituto Euvaldo Lodi, 2013.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus, 2000.

PAPPADÀ, S. et al. Fabrication of a thermoplastic matrix composite stiffened panel by induction welding. **Aerospace Science and Technology**, v. 43, p. 314-320, mar. 2015.

PARDINI, L. C. Preformas para compósitos estruturais. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 10, n. 2, p. 100-109, 2000.

PEREIRA, P. H. F. et al. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. **Polímeros**, São Carlos, v. 25, n. 1, p. 9-22, jan.-fev. 2015.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 101 f. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PIRES, E. N. **Efeito do tratamento de superfície em fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PISTOR, V. CHIESA, A. ZATTERA, A. J. Estudo do Reprocessamento de Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) Reciclado do Processamento de Extrusão de Filmes Tubulares. **Polímeros**, v. 20, n. 4, p. 269-274, 2010.

RACLES, C. et al. Silicone-based elastic composites able to generate energy on micromechanical impulse, **Smart Materials and Structures**, v. 25, jul. 2016.

ROSÁRIO, F. et al. Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 90-97, abr. 2011.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** 2000. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à ciência dos materiais para engenheiros.** 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

**SISAL:** o novo aliado do meio ambiente. Carros e acessórios. 2009. Disponível em: <<http://www.carroseacessorios.com.br/noticias-detalhes.php?id=5837>>. Acesso em: 25 ago. 2016.

SOUZA, J. P. F. M. de. **Inspeção de defeitos em revestimentos de materiais compósitos aplicados em tanques metálicos utilizando shearografia.** 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

.

SPINACÉ, M. A. S. et al. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: sisal X curauá. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 3, p. 168-174, 2011.

SPINACÉ, M. A. S. PAOLI, M. A. A Tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

TROMBETTA, E. **Utilização de fibra natural de pinus (serragem) como reforço em componentes automotivos compostos de polipropileno.** 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

VARGAS, W. *et al.* Conformación de um material compuesto de polietileno reforzado com fibra de fique por método de mínimo-estrés. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 5, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: 2015.

VASCONCELOS, Y. Fibra de futuro. **Pesquisa Fapesp**. n. 159, p. 76-79, mai. 2009.

VIEIRA, L. M. G. et al. Hybrid Composites Based on Sisal Fibers and Silica Nanoparticles. **Polymer Composites**, Society of Plastics Engineers, p. 1-11, 2016.

WERKEMA, C. **Criando a cultura Seis Sigma**. Nova Lima: Werkema Editora, 2004.

WIEBECK, H. **Questões sobre plásticos biodegradáveis: fatores positivos e negativos no mercado atual**. Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/08/helio\\_hiebeck.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2007/08/helio_hiebeck.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

WIEBECK, H. HARADA, J. **Plásticos de engenharia**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

WOLF, C. R. **Preparação, Caracterização e Aplicação de Catalisadores Ziegler-Natta na Produção de Polietileno de Alta Densidade**. 2004. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

YAN, L. et al. Effects of resin inside fiber lumen on the mechanical properties of sisal fiber reinforced composites. **Composites Science and Technology**, v. 108, p. 32-40, 2015.

YANG, B. et al. Temperature effects on transverse failure modes of carbon fiber/bismaleimides composites. **Journal of Composite Material**, Xian, p. 1-12, 2016.

ZAMAN, A. U. et al. Sustainability and human health issues pertinent to fibre reinforced polymer composites usage: A review. **Reinforced plastics & composites**, Rabigh, v. 33, n. 11, p. 1069-1084, jun. 2014.

ZHAO, X. LI, R. K. Y. BAI, S. L. Mechanical properties of sisal fiber reinforced high density polyethylene composites: Effect of fiber content, interfacial compatibilization, and manufacturing process. **Composites: Part A**, Hong Kong, v. 65, p. 169-174, out. 2014.

## APÊNDICE A - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de flexão

### Descriptive Statistics: MOEf

Variable	Condição	Mean	StDev	CoefVar
MOEf	Pe/Tr	0,6334	0,0319	5,03
	Pe/Tr/45	0,7085	0,0354	5,00
	Pe/Tr/90	0,5482	0,0432	7,87
	Pe/Ve	0,6988	0,0543	7,77
	Pe/Ve/45	0,8758	0,0725	8,28
	Pe/Ve/90	0,65467	0,0156	2,38

### General Linear Model: MOEf versus Tipo de Polietileno; Tipo de Reforço

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Box-Cox transformation  
 Rounded  $\lambda$  0  
 Estimated  $\lambda$  -0,0885865  
 95% CI for  $\lambda$  (-1,66709; 1,34591)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de Polietileno	Fixed	2	Tradicional; Verde
Tipo de Reforço	Fixed	3	Sem reforço; Tecido de sisal em +45°/45°; em 0°/90°/0°
Tecido de sisal			

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de Polietileno	1	0,21895	0,218947	55,68	0,000
Tipo de Reforço	2	0,40077	0,200386	50,96	0,000
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço	2	0,01927	0,009635	2,45	0,105
Error	28	0,11009	0,003932		
Total	33	0,68953			

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0627050	84,03%	81,18%	76,04%

Coefficients for Transformed Response

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,3878	0,0109	-35,65	0,000	
Tipo de Polietileno					
Tradicional	-0,0812	0,0109	-7,46	0,000	1,02
Tipo de Reforço					
Sem reforço	-0,0215	0,0151	-1,43	0,165	1,39
Tecido de sisal em +45°/45°	0,1474	0,0160	9,23	0,000	1,42
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço					
Tradicional Sem reforço	0,0328	0,0151	2,17	0,038	1,39
Tradicional Tecido de sisal em +45°/45°	-0,0241	0,0160	-1,51	0,143	1,42

## Regression Equation

$\ln(\text{MOEf}) = -0,3878 - 0,0812 \text{ Tipo de Polietileno\_Tradicional}$   
 $+ 0,0812 \text{ Tipo de Polietileno\_Verde} - 0,0215 \text{ Tipo de Reforço\_Sem reforço}$   
 $+ 0,1474 \text{ Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em } +45^\circ/45^\circ$   
 $- 0,1259 \text{ Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em } 0^\circ/90^\circ/0^\circ$   
 $+ 0,0328 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Tradicional Sem reforço}$   
 $- 0,0241 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de sisal}$   
 $\text{em } +45^\circ/45^\circ - 0,0087 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido}$   
 $\text{de sisal em } 0^\circ/90^\circ/0^\circ - 0,0328 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Verde Sem}$   
 $\text{reforço} + 0,0241 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em}$   
 $+45^\circ/45^\circ + 0,0087 \text{ Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em}$   
 $0^\circ/90^\circ/0^\circ$

## Fits and Diagnostics for Unusual Observations

## Original Response

Obs	MOEf	Fit
11	0,6090	0,6970
13	0,6250	0,5468
33	0,9760	0,8736

## Transformed Response

Obs	MOEf'	Fit	Resid	Std Resid	
11	-0,4959	-0,3609	-0,1350	-2,36	R
13	-0,4700	-0,6037	0,1337	2,34	R
33	-0,0243	-0,1352	0,1109	2,04	R

MOEf' = transformed response

R Large residual

**Descriptive Statistics: MORf (MPa)**

Variable	Condição	Mean	StDev	CoefVar
MORf (MPa)	Pe/Tr	16,268	1,110	6,82
	Pe/Tr/45	14,454	0,803	5,56
	Pe/Tr/90	14,196	0,352	2,48
	Pe/Ve	20,82	2,05	9,82
	Pe/Ve/45	17,938	0,994	5,54
	Pe/Ve/90	14,621	0,921	6,30

**General Linear Model: MORf (MPa) versus Tipo de Polietileno; Tipo de Reforço**

## Method

Factor coding (-1; 0; +1)

## Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de Polietileno	Fixed	2	Tradicional; Verde
Tipo de Reforço	Fixed	3	Sem reforço; Tecido de sisal em +45°/45°;
Tecido de sisal			em 0°/90°/0°

## Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de Polietileno	1	59,21	59,211	49,23	0,000
Tipo de Reforço	2	83,83	41,917	34,85	0,000
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço	2	23,33	11,663	9,70	0,001
Error	25	30,07	1,203		
Total	30	183,27			

## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,09674	83,59%	80,31%	73,60%

## Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	16,383	0,201	81,50	0,000	
Tipo de Polietileno					
Tradicional	-1,410	0,201	-7,02	0,000	1,03
Tipo de Reforço					
Sem reforço	2,162	0,292	7,39	0,000	1,41
Tecido de sisal em +45°/45°	-0,187	0,282	-0,66	0,514	1,46
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço					
Tradicional Sem reforço	-0,867	0,292	-2,96	0,007	1,41
Tradicional Tecido de sisal em +45°/45°	-0,332	0,282	-1,17	0,251	1,45

## Regression Equation

MORf (MPa) = 16,383 - 1,410 Tipo de Polietileno\_Tradicional  
+ 1,410 Tipo de Polietileno\_Verde  
+ 2,162 Tipo de Reforço\_Sem reforço - 0,187 Tipo de Reforço\_Tecido de  
sisal em  
+45°/45° - 1,975 Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em 0°/90°/0°  
- 0,867 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Sem reforço  
- 0,332 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de  
sisal em  
+45°/45° + 1,198 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional  
Tecido de sisal  
em 0°/90°/0° + 0,867 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Sem  
reforço  
+ 0,332 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em  
+45°/45°  
- 1,198 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em  
0°/90°/0°

## Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	MORf (MPa)	Fit	Resid	Std Resid
7	22,875	20,822	2,053	2,16 R
9	18,678	20,822	-2,144	-2,26 R

R Large residual

## APÊNDICE B - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de tração

### Descriptive Statistics: MOEt (GPa)

Variable	Condição	Mean	StDev	CoefVar
MOEt (GPa)	TR/45	0,5749	0,0233	4,06
	TR/90	0,6330	0,0277	4,38
	TR/PURO	0,7200	0,0265	3,68
	VE/45	0,62369	0,01846	2,96
	VE/90	0,65885	0,01763	2,68
	VE/PURO	0,66925	0,00758	1,13

### General Linear Model: MOEt (GPa) versus Tipo de Polietileno; Tipo de Reforço

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de Polietileno	Fixed	2	Tradicional; Verde
Tipo de Reforço	Fixed	3	Sem reforço; Tecido de sisal em +45°/45°; em 0°/90°/0°
Tecido de sisal			

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de Polietileno	1	0,000322	0,000322	0,75	0,400
Tipo de Reforço	2	0,030381	0,015190	35,38	0,000
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço	2	0,008780	0,004390	10,22	0,002
Error	25	0,006440	0,000429		
Total	30	0,043304			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,0207201	85,13%	80,17%	69,72%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
VIF				
Constant	0,64660	0,00461	140,21	0,000
Tipo de Polietileno				
Tradicional	-0,00400	0,00461	-0,87	0,400
1,02				
Tipo de Reforço				
Sem reforço	0,04802	0,00672	7,15	0,000
1,36				
Tecido de sisal em +45°/45°	-0,04732	0,00635	-7,45	0,000
1,41				
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço				
Tradicional Sem reforço	0,02937	0,00672	4,37	0,001
1,36				

Tradicional Tecido de sisal em +45°/45° -0,02042 0,00635 -3,21 0,006  
1,41

Regression Equation

MOEt (GPa) = 0,64660 - 0,00400 Tipo de Polietileno\_Tradicional  
+ 0,00400 Tipo de Polietileno\_Verde + 0,04802 Tipo de Reforço\_Sem  
reforço  
- 0,04732 Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em +45°/45°  
- 0,00070 Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em 0°/90°/0°  
+ 0,02937 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Sem reforço  
- 0,02042 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de  
sisal em  
+45°/45° - 0,00896 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional  
Tecido de  
sisal em 0°/90°/0° - 0,02937 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde  
Sem  
reforço + 0,02042 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de  
sisal em  
+45°/45° + 0,00896 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de  
sisal em  
0°/90°/0°

**Descriptive Statistics: MORT (MPa)**

Variable	Condição	Mean	StDev	CoefVar
MORT (MPa)	Pe/Tr	13,906	1,364	9,81
	Pe/Tr/45	10,547	0,959	9,09
	Pe/Tr/90	15,802	1,743	11,03
	Pe/Ve	19,075	1,616	8,47
	Pe/Ve/45	13,693	0,884	6,45
	Pe/Ve/90	20,126	1,261	6,26

**General Linear Model: MORT (MPa) versus Tipo de Polietileno; Tipo de Reforço**

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de Polietileno	Fixed	2	Tradicional; Verde
Tipo de Reforço	Fixed	3	Sem reforço; Tecido de sisal em +45°/45°; em 0°/90°/0°
Tecido de sisal			

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de Polietileno	1	180,582	180,582	101,34	0,000
Tipo de Reforço	2	237,344	118,672	66,60	0,000
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço	2	6,915	3,458	1,94	0,158
Error	36	64,151	1,782		
Total	41	491,105			



## Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,33491	86,94%	85,12%	82,16%

## Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	15,525	0,209	74,20	0,000	
Tipo de Polietileno					
Tradicional	-2,106	0,209	-10,07	0,000	1,02
Tipo de Reforço					
Sem reforço	0,966	0,289	3,34	0,002	1,36
Tecido de sisal em +45°/45°	-3,405	0,303	-11,22	0,000	1,39
Tipo de Polietileno*Tipo de Reforço					
Tradicional Sem reforço	-0,478	0,289	-1,65	0,107	1,35
Tradicional Tecido de sisal em +45°/45°	0,533	0,303	1,76	0,087	1,39

## Regression Equation

MORT (MPa) = 15,525 - 2,106 Tipo de Polietileno\_Tradicional  
 + 2,106 Tipo de Polietileno\_Verde  
           + 0,966 Tipo de Reforço\_Sem reforço - 3,405 Tipo de Reforço\_Tecido de  
 sisal em  
           +45°/45° + 2,439 Tipo de Reforço\_Tecido de sisal em 0°/90°/0°  
           - 0,478 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Sem reforço  
           + 0,533 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de  
 sisal em  
           +45°/45° - 0,055 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Tradicional  
 Tecido de sisal  
           em 0°/90°/0° + 0,478 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Sem  
 reforço  
           - 0,533 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em  
 +45°/45°  
           + 0,055 Tipo de Polietileno\*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal em  
 0°/90°/0°

## Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	MORT (MPa)	Fit	Resid	Std Resid
9	16,478	19,075	-2,597	-2,10 R

R Large residual

## APÊNDICE C - Informações adicionais sobre a Estatística Descritiva e a ANOVA dos valores obtidos nos ensaios de impacto

### Descriptive Statistics: Ec (J)

Variable	Condição	Mean	StDev	CoefVar
Ec (J)	TR/45	1,5525	0,1910	12,31
	TR/90	3,399	0,527	15,51
	TR/PURO	2,574	0,289	11,21
	VE/45	1,4452	0,2020	13,98
	VE/90	2,4426	0,2266	9,28
	VE/PURO	3,998	0,616	15,40

### General Linear Model: Ec (J) versus Tipo de PEAD; Tipo de Reforço

Method

Factor coding (-1; 0; +1)

Box-Cox transformation

Rounded  $\lambda$  0

Estimated  $\lambda$  -0,110098

95% CI for  $\lambda$  (-0,630598; 0,422402)

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Tipo de PEAD	Fixed	2	Tradicional; Verde
Tipo de Reforço	Fixed	3	Sem reforço; Tecido de sisal com orientação em -45°/+45°; Tecido de sisal com orientação em 0°/90°/0°

Analysis of Variance for Transformed Response

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Tipo de PEAD	1	0,00187	0,00187	0,11	0,743
Tipo de Reforço	2	4,90271	2,45136	143,18	0,000
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço	2	1,15718	0,57859	33,79	0,000
Error	40	0,68485	0,01712		
Total	45	6,49307			

Model Summary for Transformed Response

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,130848	89,45%	88,13%	85,88%

Coefficients for Transformed Response

Term	Value	P-Value	Coef	SE Coef	T-
Constant	44,62	0,000	0,8683	0,0195	
Tipo de PEAD					
Tradicional	0,33	0,743	-0,0064	0,0195	-
Tipo de Reforço					

Sem reforço	0,2892	0,0276	
10,48 0,000			
Tecido de sisal com orientação em -45°/+45°	-0,4718	0,0280	-
16,82 0,000			
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço			
Tradicional Sem reforço	-0,2112	0,0276	-
7,66 0,000			
Tradicional Tecido de sisal com orientação em -45°/+45°	0,0431	0,0280	
1,54 0,132			
Term	VIF		
Constant			
Tipo de PEAD			
Tradicional	1,02		
Tipo de Reforço			
Sem reforço	1,42		
Tecido de sisal com orientação em -45°/+45°	1,41		
Tipo de PEAD*Tipo de Reforço			
Tradicional Sem reforço	1,41		
Tradicional Tecido de sisal com orientação em -45°/+45°	1,41		

Regression Equation

$$\ln(Ec(J)) = 0,8683 - 0,0064 \text{ Tipo de PEAD\_Tradicional} + 0,0064 \text{ Tipo de PEAD\_Verde} + 0,2892 \text{ Tipo de Reforço\_Sem reforço} - 0,4718 \text{ Tipo de Reforço\_Tecido de sisal com orientação em } -45^\circ/+45^\circ + 0,1826 \text{ Tipo de Reforço\_Tecido de sisal com orientação em } 0^\circ/90^\circ/0^\circ - 0,2112 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Tradicional Sem reforço} + 0,0431 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de sisal com orientação em } -45^\circ/+45^\circ + 0,1682 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Tradicional Tecido de sisal com orientação em } 0^\circ/90^\circ/0^\circ + 0,2112 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Verde Sem reforço} - 0,0431 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal com orientação em } -45^\circ/+45^\circ - 0,1682 \text{ Tipo de PEAD*Tipo de Reforço\_Verde Tecido de sisal com orientação em } 0^\circ/90^\circ/0^\circ$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations  
Original Response

Obs	Ec (J)	Fit
16	2,529	3,362

Transformed Response

Obs	Ec (J)'	Fit	Resid	Std Resid
16	0,9280	1,2126	-0,2846	-2,35 R

Ec (J)' = transformed response  
R Large residual