



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Joana Isabel Freitas Matos

**Influência da Incorporação de Reforços
Fibrosos Naturais no Processo de
Termoformação**

Tese de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Fernando Moura Duarte

Professor Doutor Raul Esteves Sousa Figueiro

outubro de 2017

DECLARAÇÃO

Nome: Joana Isabel Freitas Matos

Endereço eletrónico: isabel.amatos@hotmail.com Telefone: 915055912

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 14613794

Título da dissertação: Influência da Incorporação de Reforços Fibrosos Naturais no Processo de Termoformação

Orientador/a/es:

Professor Doutor Fernando Moura Duarte

Professor Doutor Raul Manuel Esteves de Sousa Figueiro

Engenheiro Fernando Eduardo Macedo Cunha

Ano de conclusão: 2017

Mestrado em Engenharia de Polímeros

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Finalizada mais esta etapa académica da minha vida, pela qual tanto ansiei, resta-me agradecer a todos que de alguma forma contribuíram e me deram alento para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, por me acompanharem neste meu percurso académico, que apesar do esforço, sempre quiseram o melhor para mim, dando-me sempre o seu apoio, incentivo e confiança.

Ao meu orientador, Professor Fernando Duarte, o meu mais sincero obrigada, por toda a ajuda e disponibilidade na resolução de contratempos e incentivo quando nem sempre tudo correu como pretendido.

Gostaria de agradecer de igual modo, ao meu Coorientador, Professor Raul Fangueiro, por me ter dado a oportunidade de integrar a equipa *Fibrenamics*, e pela confiança que depositou em mim, para o desenvolvimento desta dissertação.

A todos os colegas, que integram a equipa de Compósitos da *Fibrenamics*, também o meu sincero obrigada, por toda a ajuda nos momentos de mais trabalho e também pelo incentivo que me deram para que esta dissertação envergasse por um bom caminho.

Queria também prestar o meu agradecimento, ao Fernando Cunha e ao João Bessa, pela orientação e pelos sábios conselhos que me foram dando ao longo desta dissertação.

Aos Técnicos do DEP, pela disponibilidade que apresentaram e pelo acompanhamento nos ensaios realizados, o meu obrigado.

Também gostaria de agradecer, ás amigas que fiz, ao longo destes 5 anos, principalmente à Marta Dias e ao Paulo Cunha, pelo companheirismo, ajuda, incentivo, espírito de interajuda e boa disposição que me proporcionaram.

Por fim, ao meu namorado, pela compreensão, paciência e carinho que em momentos difíceis estive sempre presente, o meu obrigado.

RESUMO

Influência da Incorporação de Reforços Fibrosos Naturais no Processo de Termoformação

A exigência da sociedade, por um planeta mais sustentável, levou com que as indústrias automóveis procurassem soluções para os seus produtos de forma a torná-los mais “verdes”, ou seja, com menos derivados do petróleo, mais leve e de reciclagem fácil e biodegradável no seu fim de vida.

Desta procura por materiais inovadores e amigos do ambiente, surgiram os compósitos de matriz termoplásticos com reforço de fibras naturais vegetais, levando com que a indústria automóvel demonstrasse interesse na aplicação destes para revestimento de peças do interior automóvel, produzidos pelo processo de termoformação. Sendo este um processo ainda pouco desenvolvido e não otimizado, pretendeu-se com esta dissertação reunir informação sobre qual a influência da utilização de fibras naturais vegetais (FNV) neste processo.

Assim sendo, obteve-se através do processo de extrusão de folha/chapa, folhas compósitas variando na sua formulação o tipo de fibras (sisal e coco), comprimento (1000 e 500 μm) e quantidade (2 a 15 (w/w) %). As amostras processadas, foram caracterizadas segundo duas vertentes, uma onde se caracterizou as propriedades mecânicas, físicas e térmicas das folhas e também se procedeu à observação das mesmas à lupa e ao microscópio. E outra onde se pretendeu avaliar a termoformabilidade dos filmes produzidos, onde as amostras foram submetidas a ensaios de deformação por peso próprio, descrevendo os fenómenos que surgem durante o aquecimento da folha, e deformação por vácuo em molde fêmea, de modo a avaliar a sua capacidade de reproduzir os contornos do molde.

A principal conclusão retirada na caracterização efetuada, foi que, apesar das fibras naturais agirem na matriz das folhas como uma descontinuidade da matéria, diminuindo as propriedades mecânica da mesma, estas apresentam capacidade para serem termoformadas desde que o produto final não apresente deformações máximas superiores a 150%.

Palavras-Chaves: Compósitos Termoplásticos, Fibras Naturais Vegetais, Extrusão, Termoformação, Indústria Automóvel.

ABSTRACT

Influence of Natural Fibers incorporation as reinforcements on Thermoforming Process

The need for a more sustainable planet has led the automotive industry to find new solutions for their products in order to make them eco-friendlier, depending less on oil derivatives, lighter, easier to recycle and biodegradable at the end of its life cycle.

In this context, natural fiber thermoplastic composites appeared, which have shown interest of application in automotive industry for interior parts coatings automotive, produced by thermoforming processes. As this process is not still developed and optimized, it was intended with this thesis to collect information about the influence of FNV in this process.

Thus, the composite sheets were produced from the extrusion process, testing different natural fibers (sisal and coir), lengths (1000 and 500 μm) and amounts of fiber (2-15 w/w %). The samples obtained were characterized by different methodologies, determining mechanical, physical, thermal and morphological properties. On the other hand, sheets were submitted to thermoforming process, measuring the deformation for own weight and their own thermoforming capacity.

The main conclusion of this characterization was that, despite natural fibers are acting as a material discontinuity in the sheets matrix, decreasing their mechanical properties, it was possible to reach deformation rates until 150% in the thermoforming process.

Keywords: Thermoplastic Composites, Vegetal Natural Fibers, Extrusion, Thermoforming, Automotive Industry.

CONTEÚDO

Agradecimentos	III
Resumo	V
Abstract	VII
Conteúdo	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tabelas	XIX
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	XXI
1. Introdução	3
2. Revisão Bibliográfica	9
2.1 Compósitos Com Matriz Termoplástica.....	9
2.1.1 TPO.....	10
2.2 Fibras Naturais Vegetais.....	12
2.2.1 Fibra de Sisal.....	14
2.2.2 Fibra de Coco.....	17
2.3 Compósitos Termoplásticos Reforçados com FNV.....	19
2.3.1 Compósitos Termoplásticos na Indústria Automóvel.....	20
2.4 Soluções para Incompatibilidade FNV/Matriz Polimérica.....	22
2.4.1 Anidrido Maleico.....	23
2.5 Extrusão de Folha /Chapa com FNV.....	24
2.6 Termoformação.....	27
3. Procedimento Experimental	33
3.1 Matérias Primas.....	33
3.1.1 Matriz Termoplástica.....	33
3.1.2 Reforços Fibrosos Naturais.....	34
3.1.3 Agente de Acoplamento.....	36
3.1.4 Pigmento.....	37

3.2	Processo de Extrusão	38
3.2.1	Formulações das Folhas Compósitas	38
3.2.2	Otimização do Processo de Extrusão	41
3.3	Caracterização das Folhas/Chapas Decorrentes do Processo de Extrusão	47
3.3.1	Ensaio de Tração	48
3.3.2	Análise à Lupa Estereoscópica	49
3.3.3	Microscopia de Campo Claro	49
3.3.4	Avaliação da Dispersão das FNV nas Folhas Compósita	50
3.3.5	Avaliação do teor de humidade	51
3.3.6	TGA.....	52
3.3.7	Avaliação da Deformação por Peso Próprio a Quente	53
3.3.8	Avaliação da capacidade de Reproduzir os Contornos do Molde.....	54
4.	Apresentação e discussão dos resultados	59
4.1	Caracterização das fibras naturais vegetais	59
4.1.1	Teor de Humidade.....	59
4.1.2	TGA.....	60
4.2	Caracterização das folhas compósitas.....	60
4.2.1	Ensaio de Tração	60
4.2.2	Ensaio de Lupa Estereoscópica	69
4.2.3	Microscopia de Campo Claro	74
4.2.4	Dispersão das Fibras	84
4.2.5	Teor de Humidade	86
4.2.6	TGA.....	88
4.2.7	Deformação por Peso Próprio	89
4.2.8	Capacidade de Reproduzir os Contornos do Molde	93
5.	Conclusões	99
5.1	Trabalhos Futuros.....	101
6.	Bibliografia	105
Anexo I – Fichas Técnicas dos Materiais Utilizados		111
Anexo II – Lupa Estereoscópica		114

Anexo III – Ensaios de TGA	123
Anexo IV- Avaliação da Deformação Por Peso Próprio	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de uma fibra celulósica (Henrique et al., 2015).....	13
Figura 2: Planta Agave Silana (“Sisal - Wikipedia,” n.d.).....	15
Figura 3: Fibras de sisal verdes (Lima et al., 2014).....	15
Figura 4: Mesocarpo fibroso da fibra de coco (Fernanda & Castilhos, 2011).	17
Figura 5: Interior do BMW i3.(“Un mundo nuevo_ el interior del BMW i3 _ BMW Magazine,” n.d.)....	22
Figura 6: Fiat Uno Ecology (“Fiat mostra o conceito Novo Uno Ecology,” 2010).....	22
Figura 7: Mecanismo de acoplamento do PPMA (E. F. Santos et al., 2010).....	24
Figura 8: Etapas do processo de Termoformação.....	28
Figura 9: Processo de enformação a vácuo, com molde fêmea. (Peter W. Klein, 2009).....	29
Figura 11: Fibra longa de Coco utilizada nesta dissertação.....	35
Figura 10: Fibra de sisal longa utilizada nesta dissertação.....	35
Figura 12: Peneiros utilizados para a peneiração das fibras.	36
Figura 13: Moinho de facas utilizado no corte das fibras naturais.....	36
Figura 16: Plano das formulações planeadas para esta dissertação.....	39
Figura 17: Alimentador.	41
Figura 18: Extrusora.	42
Figura 19: Zona de desvolatilização improvisada.....	43
Figura 20: Cabeça de extrusão.....	43
Figura 21: Calandra: (A) primeira zona, (B) segunda zona, (C) terceira zona.....	45
Figura 22: Folha compósita de matriz de TPO e reforçada com fibras de Coco.....	46
Figura 23: Defeitos apresentados na folha compósita com 15% de Sisal 1000 µm.	47
Figura 24: (A) Provetes para ensaio de tração; (B) Ensaios de tração.	48
Figura 25: Microscopia de campo claro: (A) micrótomo, (B) amostras, (C) microcopio de transmissão	50
Figura 26: ilustração da avaliação da distribuição das FNV.....	51
Figura 27: Amostras posicionadas na estufa (A) antes e (B) após ensaio.	51
Figura 28: Fórmula para o cálculo do Teor de humidade.....	52
Figura 29: Estrutura projetada para a avaliação da deformação por peso próprio.....	53

Figura 30: (A) Estrutura desenvolvida para o ensaio; (B) Ilustração do ensaio de deformação por peso próprio.	54
Figura 31: Taxa de aquecimento de cada zona do forno da termoformadora.....	55
Figura 32: Processo de termoformação: (A) Colocação da folha na termoformadora, (B) Folha compósita após a etapa de aquecimento, (C) etapa de enformação da folha compósita.....	56
Figura 31: Resultados obtidos na avaliação do teor de umidade presente nas Fibras de coco e de sisal de comprimento de 1000 μm utilizadas para reforçar os filmes compósitos.	59
Figura 32: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à Fibra de Sisal (a) e à fibra de Coco (b) com comprimento de 1000 μm húmidas.....	60
Figura 33: Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração realizados às folhas compósitas.	61
Figura 34: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na resistência à tração das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.	62
Figura 35: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibras de coco diferentes na resistência à tração das folhas compósitas.	62
Figura 36: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na resistência à tração das folhas compósitas na direção transversal ao fluxo.	63
Figura 37: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Coco na resistência à tração das folhas compósitas na direção transversal ao fluxo.	64
Figura 38: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de sisal na deformação das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.	65
Figura 39: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibra de coco diferentes na deformação das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.	65
Figura 40: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na deformação das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.	66
Figura 41: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de coco na deformação das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.	66
Figura 42: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal no módulo de Young das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.....	67
Figura 43: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibra de Coco diferentes no módulo de Young das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.....	67

Figura 44: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal no módulo de young das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.	68
Figura 45: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibras de coco no módulo de young das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.	68
Figura 46: Visualização da folha compósita com 10% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	76
Figura 47: Visualização da folha compósita com 8% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	77
Figura 48: Visualização da folha compósita com 4% (w/w) fibra de coco de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	79
Figura 49: Visualização da folha compósita com 15% (w/w) fibra de Sisal de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	79
Figura 50: Visualização da folha compósita com 2% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm através da microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	82
Figura 51: Visualização da folha compósita com 10% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm através da microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	82
Figura 52: Visualização da folha compósita com 15% (w/w) fibra de coco de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.	84
Figura 53: Resultados obtidos na avaliação do teor de humidade presente nas folhas compósitas anteriormente extrudidas.	87
Figura 54: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 1000 μm , durante um período de ensaio de 1 minuto.	90
Figura 55: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 500 μm , durante um período de ensaio de 1 minuto.	91
Figura 56: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 1000 μm , durante um período de ensaio de 1 minuto.	92

Figura 57: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de Coco com comprimento de 500 μm , durante um período de ensaio de 1 minuto.....	92
Figura 58: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de sisal de comprimento de 1000 μm	94
Figura 59: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de sisal de comprimento de 500 μm	94
Figura 60: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 1000 μm	94
Figura 61: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 500 μm	94
Figura 62: Ficha técnica da matriz de TPO utilizada nas folhas compósitas.....	111
Figura 63: Ficha técnica do pigmento utilizada na composição das folhas compósitas.....	112
Figura 64: Ficha técnica do agente de acoplamento utilizada na composição das folhas compósitas processadas.	113
Figura 65: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Sisal de comprimento de 1000 μm	123
Figura 66: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Sisal de comprimento de 500 μm	123
Figura 67: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Coco de comprimento de 500 μm	124
Figura 68: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 6% de Fibra de Sisal de comprimento de 1000 μm	124
Figura 69: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 6% de Fibra de Coco de comprimento de 1000 μm	125
Figura 70: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 10% de Fibra de Coco de comprimento de 1000 μm	125
Figura 71: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 10% de Fibra de Coco de comprimento de 500 μm	126
Figura 72: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 15% de Fibra de Sisal de comprimento de 500 μm	126

Figura 73: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 1000 μm , durante um período de ensaio de 15 minuto..... 127

Figura 74: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 500 μm , durante um período de ensaio de 15 minuto..... 127

Figura 75: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 1000 μm , durante um período de ensaio de 15 minuto..... 128

Figura 76: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 500 μm , durante um período de ensaio de 15 minuto..... 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens das matrizes termoplásticas em comparação às matrizes termoendurecíveis.....	10
Tabela 2: Materiais utilizados para a obtenção do TPO.....	11
Tabela 3: Características gerais do composto TPO.	12
Tabela 4: Composição química típica das fibras de sisal.	16
Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas típicas das fibras de sisal.....	16
Tabela 6: Composição química típica das fibras de coco.	17
Tabela 7: Propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de coco.....	19
Tabela 8: Características dos elementos do fuso ideais para a extrusão de compósitos com fibras naturais.	26
Tabela 9: Configuração da extrusora apropriada à para a produção das folhas compósitas.	27
Tabela 10: Características específicas do TPO 15800066.	33
Tabela 11: Propriedades físicas e mecânicas do TPO 15800066.....	34
Tabela 12: Temperaturas de processamento do TPO 15800066.	34
Tabela 13: Propriedades do SCONA TPPP 8112 FA.....	37
Tabela 14: Propriedades do pigmento s/estabilizantes utilizados nas folhas compósitas.	37
Tabela 15: Quantidades em massa para cada componente das diferentes composições.	40
Tabela 16: Condições operatórias do alimentador.....	42
Tabela 17: Condições operatórias da extrusora.....	44
Tabela 18: Condições operatórias da calandra.	46
Tabela 19: Filmes selecionados para realizar o ensaio de TGA.....	52
Tabela 20: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 6% de fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.	70
Tabela 21: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 10% de fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.	71
Tabela 22: Imagens obtidas na observação das folhas compósitas com 6% fibra de Coco com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.	72

Tabela 23: Imagens obtidas na observação das folhas compósitas com 15% fibra de Coco com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.	72
Tabela 24: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 10% fibras de Sisal com comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.	73
Tabela 25: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 15% fibras de Sisal com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.	74
Tabela 26: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de Sisal de comprimento de 1000 μm com ampliação de 4x.	75
Tabela 27: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de Sisal de comprimento de 500 μm com ampliação de 4x.	78
Tabela 28: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 1000 μm com ampliação de 4x.	81
Tabela 29: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 500 μm com ampliação de 4x.	83
Tabela 30: Imagens das folhas compósitas processadas pelo processo de extrusão para avaliação da dispersão das fibras ao longo da folha.	85
Tabela 31: Resultados dos ensaios de TGA realizados às folhas compósitas.	88
Tabela 32: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.	114
Tabela 33: Imagens obtidas na observação das folhas compósitas com fibra de Coco com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.	117
Tabela 34: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com fibras de Sisal com comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.	119
Tabela 35: Imagens obtidas com a visualização das folhas compósitas com fibras de sisal de comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.	121

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
FAO-ONU	Organização das nações unidas para a agricultura e a alimentação
FNV	Fibra Natural Vegetal
IV	Infravermelhos
L/D	Razão do comprimento pelo diâmetro do fuso
MAPP	Polipropileno funcionalizado com anidrido maleico
MFI	Índice médio de fluidez
PP	Polipropileno
PE	Polietileno
T_d	Temperatura de degradação térmica
TGA	Análise Termogravimétrica
T_m	Temperatura de fusão
TPO	Polioléfina Termoplástica Elastomérica
UV	Ultravioleta

CAPÍTULO 1

Introdução

1. INTRODUÇÃO

A consciencialização da sociedade, pela procura por um planeta mais sustentável, tem vindo a crescer nas últimas duas décadas, tendo esta tendência sido promovida pela legislação e regulamentos decretados pela União Europeia, Japão e América do Norte, onde exigem, que os veículos reduzam as emissões de poluentes para a atmosfera e no seu fim de vida consigam ser facilmente recicláveis. (Du, Yan, & Kortschot, 2014; Ligowski, Santos, & Fujiwara, 2015)

Neste contexto, a indústria automóvel, teve a necessidade de desenvolver componentes automóveis mais ecológicos, baseados no eco design, ou seja, que reduzam a dependência de polímeros derivados de petróleo, conservando este recurso natural não renovável, que consigam ser facilmente recicláveis, de baixo custo, leves, e que reduzam o consumo de combustível. (Alves et al., 2010; Gamon, Evon, & Rigal, 2013; Ligowski et al., 2015)

De forma a tornar os desafios em oportunidades, surgiram os compósitos reforçados com FNV (fibras naturais vegetais), como alternativas aos tradicionais compósitos reforçados por fibras sintéticas, utilizados na maioria dos componentes do interior automóvel. A incorporação de FNV como reforço nos materiais compósitos, tem relevante interesse entre a comunidade investigadora, devido às suas inúmeras vantagens económicas, sociais e ambientais, tornando-o num tema em constante desenvolvimento. (Alves et al., 2010; Du et al., 2014; Erchiqui, Talla, & Kassami, 2016; Igl & Osswald, 1992)

Estes materiais compósitos reforçados com FNV, têm vindo a ser incorporados em diferentes componentes automóveis, sendo alguns destes, processados pelo processo de termoformação, como por exemplo, os revestimentos de painéis de porta e de instrumentos, através de uma folha/chapa previamente extrudida. (Du et al., 2014; Erchiqui et al., 2016; Igl & Osswald, 1992)

A constante inovação da termoformação resulta no processamento de geometrias mais complexas e numa procura por materiais potenciais, cuja seleção é baseada no custo, nas propriedades mecânicas, físicas, químicas e na processabilidade. (Erchiqui et al., 2016)

Para que os compósitos termoplásticos reforçados com fibras naturais, sejam um material inovador e potencial para a termoformação alguns parâmetros têm de ser ultrapassados de forma a obter um material compósito reforçado com fibras naturais, com geometrias complexas. Estes passam pela

quantidade de reforço incorporado, pela proporção de agente de acoplamento, pelas condições de processamento e parâmetros geométricos (relação L/D) do processo de extrusão, pela degradação térmica das fibras naturais, e pela viscosidade da mistura, uma vez que, a incorporação das fibras naturais aumenta a viscosidade da mistura, limitando a capacidade de Termoformação. Desta forma, o comportamento das folhas compósitas termoplásticas reforçadas com FNV no processo de termoformação, tem levantado muito o interesse entre os investigadores. (Erchiqui et al., 2016)

A falta de informação acerca da influência das FNV como reforços de folhas compósitas no processo de termoformação, o facto deste processo ainda ser pouco desenvolvido levantando ainda o interesse da comunidade científica e o interesse que a indústria automóvel tem demonstrado na introdução destes compósitos em revestimentos de componentes do interior automóvel, são assuntos que motivaram a realização desta dissertação.

Assim sendo, o presente trabalho, tem como objetivo principal avaliar o comportamento das FNV como reforço das folhas compósitas termoplásticas aquando a sua termoformação, focando-se, na influência do tipo, quantidade e tamanho do reforço incorporado, nas suas propriedades mecânicas, físicas e térmicas, de forma a avaliar o seu desempenho, quando submetidas ao processo de termoformação, atendendo à aplicação final das mesmas, revestir painéis de porta e de instrumentos do interior automóvel.

Para cumprir o objetivo desta dissertação, realizou-se, a partir do processo de extrusão de folha/chapa, a extrusão prévia de folhas compósitas de matriz termoplástica de TPO (Poliolefina elastomérica) reforçada com dois tipos de FNV curtas, o coco e Sisal.

Para a caracterização das folhas compósitas produzidas, foram seguidas duas metodologias de avaliação, uma delas, mais direcionada para a caracterização das propriedades mecânicas, térmicas e físicas das folhas compósitas, bem como a observação das mesmas à lupa e ao microscópico e a outra, realizada de modo a avaliar a termoformabilidade das folhas, onde se estudou os fenómenos, que ocorrem durante as etapas de aquecimento e de enformação do processo de termoformação.

Assim sendo, após a extrusão, caracterizaram-se as folhas compósitas, onde se investigou a capacidade de estas serem termoformadas, avaliando a deformação das folhas na direção longitudinal e transversal ao fluxo, a dispersão das fibras naturais ao longo da largura e da espessura da folha, a sua temperatura de degradação, e também a sua capacidade de absorver humidade, reunindo assim informação teórica acerca da influência da incorporação das FNV na termoformação destas folhas.

Em continuação desta caracterização, avaliou-se a termoformabilidade destas folhas compósitas submetendo-as a ensaios de deformação por peso próprio, relatando assim, fenómenos que ocorrem durante a etapa de aquecimento e deformadas por vácuo num molde fêmea, de forma a avaliar a sua capacidade de reproduzir os contornos do molde.

A presente dissertação foi realizada no âmbito do projeto FibreINsurface – Inclusão de fibras em materiais plastificados para utilização visível em superfícies interior automóvel, que decorre entre a TECMINHO e a empresa TMG Automotive, financiado pelo Portugal 2020, através do projeto número 10977.

Os conteúdos abordados nesta Tese de Mestrado, encontram-se divididos em seis capítulos. No capítulo II, apresenta-se o estado de arte acerca dos temas abordados neste trabalho, tais como compósitos termoplásticos reforçados com FNV na área automóvel, soluções para a incompatibilidade matriz/FNV, processo de extrusão e de termoformação.

O capítulo III descreve, o trabalho experimental levado a cabo nesta dissertação, incluindo, materiais a utilizar, metodologia de preparação das matérias-primas, formulações realizadas, condições operatórias da técnica de processamento de polímeros envolvida e os ensaios de caracterização realizados às folhas processadas. No capítulo IV, apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização efetuados às folhas reforçadas com as FNV.

O capítulo V, responde ao objetivo desta dissertação, e apresenta as conclusões finais sobre a influência da incorporação das fibras naturais como reforço da matriz polimérica, nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e óticas das folhas compósitas e sobre a capacidade de as termoformar, apresentando também algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos Com Matriz Termoplástica

Os compósitos são materiais constituídos por duas fases, sendo elas, a matriz e os elementos de reforço. A combinação destes dois ou mais materiais produz propriedades únicas e sinérgicas, diferentes das conseguidas pelos seus componentes individuais. A matriz confere ao material compósito a estrutura, preenchendo os espaços vazios que ficam entre os elementos de reforço, enquanto, estes realçam as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito (Ligowski et al., 2015).

Neste contexto, os compósitos foram inicialmente desenvolvidos usando matrizes poliméricas termoendurecíveis e reforços de fibras sintéticas como vidro, carbono e aramida. Porém com a consciencialização da sociedade para um planeta melhor, as matrizes foram substituídas por materiais termoplásticos e o reforço por fibras de origem natural (Joseph, Mathew, Joseph, Thomas, & Pradeep, 2003).

Na Tabela 1, encontram-se descritas as vantagens e desvantagens das matrizes termoplásticas em relação às matrizes termoendurecíveis.

A incorporação das matrizes termoplásticas nos compósitos advém, para além das vantagens que apresenta, do facto de estas, no seu final de vida poderem ser trituradas num material processável de tamanho de *pellet*, sujeitos à ação de calor, que facilmente se deformam podendo ser modelados, solidificados e remodelados novamente a uma nova estrutura, sem perderem as suas propriedades intrínsecas, podendo assim ser reciclados.

Enquanto que, a maioria dos materiais compósitos com matriz termoendurecíveis, só pode ser moído e utilizado como material de enchimento (Ligowski et al., 2015; Stack & Lai, 2011).

Outra das razões é o facto de as interações intermoleculares dos termoplásticos serem rompidas no processo de fusão, permitindo a adição dos reforços naturais, onde estes, durante o processo de arrefecimento estabelecem interações com o material termoplástico, obtendo-se assim o material compósito (Ligowski et al., 2015; Stack & Lai, 2011).

Tabela 1: Vantagens e desvantagens das matrizes termoplásticas em comparação às matrizes termoendurecíveis (LEBRUN, BUREAU, & DENAULT, 2004; McCool, Murphy, Wilson, Jiang, & Price, 2011; Stack & Lai, 2011).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Melhor resistência à fadiga e ao impacto; • São flexíveis; • Não requerem armazenamento refrigerado, como algumas matrizes termoendurecíveis; • Tempos de vida longos; • Métodos de processamento com menor impacto ambiental, pois não emitem COVs; • Tempos de ciclo reduzidos, devido à ausência da reação de cura química. 	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam elevada tenacidade; • São 500 a 1000 vezes mais viscosos, o que dificulta a integração do polímero no substrato do reforço; • Exigem pressões mais elevadas durante o seu processamento; • Requerem equipamentos mais robustos e elaborados; • Requerem mais gastos de energia para aquecer e arrefecer o polímero; • Tem temperaturas de serviço mais elevadas.

2.1.1 TPO

As olefinas termoplásticas elastomérica, ou elastómeros termoplásticos olefinicos (TPO) são uma mistura de materiais poliméricos, normalmente, um termoplástico, que é o material que constitui a matriz do TPO ou seja, que constitui a fase rígida e cristalina do material e um elastómero ou borracha, que constitui a fase dispersa e amorfa que visa melhorar a tenacidade e resistência ao impacto a baixa temperatura (Liu & Kontopoulou, 2006; R. Santos, 2011; “Thermoplastic olefin,” 2015).

Na Tabela 2 encontra-se referidos os possíveis materiais que constituem a fase rígida e a fase dispersa das misturas de TPO. Contudo o TPO mais típico tem matriz de polipropileno (Mariano, 2013; “Thermoplastic olefin,” 2015).

Tabela 2: Materiais utilizados para a obtenção do TPO. (Liu & Kontopoulou, 2006; R. Santos, 2011; “Thermoplastic olefin,” 2015)

Termoplásticos (Fase rígida)	Elastómeros (Fase dispersa)
<ul style="list-style-type: none">• Polipropileno (PP)• Polietileno (PE)• Polipropileno copolímero de bloco (BCPP)• Policloreto de vinil (PVC)	<ul style="list-style-type: none">• Borrachas de etileno e propileno (EPR)• Borrachas de EP-dieno (EPDM)• Borrachas de etileno-octeno (EO)• Etilbenzeno (EB)• Estireno etileno butadieno estireno (SEBS)

O TPO também pode incluir na sua composição, aditivos, talco ou outros agentes de preenchimento minerais, tais como fibra de vidro ou de carbono (Mariano, 2013).

A matriz termoplástica poliolefínica proporciona ao composto TPO a rigidez, estabilidade térmica, elevada resistência à água e outros fluidos polares, boas propriedades elétricas, tais como resistividade ou força dielétrica, enquanto o elastômero proporciona a flexibilidade e a resistência ao impacto. O talco e os enchimentos minerais, conferem uma elevada rigidez e a estabilidade dimensional ao composto. Os aditivos, sendo eles antioxidantes, plastificantes e retardadores de chama são incorporados com o intuito de melhorar a durabilidade e desempenho final do produto (Mariano, 2013; R. Santos, 2011).

As proporções de cada um destes componentes na mistura, para a obtenção deste composto, dependem do desempenho e das especificações que se pretende satisfazer numa dada aplicação (Mariano, 2013; “Poliolefinas termoplásticas_ qué son y para qué sirven,” 2016).

O composto de TPO é obtido, misturando os materiais que incorporam a sua composição através de uma extrusora duplo-fuso ou através de um misturador contínuo com um conjunto de temperaturas que vai desde os 210 até aos 270°C e sob taxas de corte elevadas (“Thermoplastic olefin,” 2015).

Na Tabela 3 encontra-se um resumo das características gerais do composto TPO.

Tabela 3: Características gerais do composto TPO (Mariano, 2013; “Poliolefinas termoplásticas_ qué son y para qué sirven,” 2016, “Thermoplastic olefin,” 2015; R. Santos, 2011).

Características do TPO

- Boa resistência aos agentes atmosféricos (raios UV e água);
- Boa resistência aos agentes químicos;
- Excelente capacidade de isolamento elétrico;
- Excelente comportamento elástico a baixas temperaturas;
- Baixo peso específico;
- Pode ser processado por Extrusão, Injeção, Termoformação e moldação sopro.

Normalmente o TPO é utilizado para aplicações ao ar livre, como coberturas, devido ao facto, deste material não se degradar sob a radiação solar, como já referido neste relatório (Mariano, 2013).

Contudo, este composto está a crescer em termos de popularidade em outros sectores como a indústria automóvel com o revestimento de painel de instrumentos e painéis interiores das portas, no fabrico de para-choques, bandas laterais exteriores, e no isolamento de cabos elétricos dos automóveis. Este tipo de composto está a ter bastante sucesso, no ramo automóvel por exercerem uma constante de equilíbrio entre a rigidez e a ductilidade a baixa temperatura e também por serem bastante competitivo com outros produtos, tais como vinil, couro, e termoplásticos de uretanos (TPU), uma vez que, este composto pode ser extrudido numa folha para posteriormente ser termoformada para utilização em revestimentos no interior dos automóveis (Mariano, 2013; “Poliolefinas termoplásticas_ qué son y para qué sirven,” 2016).

2.2 Fibras Naturais Vegetais

Em 2009, a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO-ONU - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) declarou o ano corrente, como o ano internacional das fibras naturais vegetais (FNV), visando conscientizar e estimular a utilização destas, encorajando políticas governamentais de incentivo ao setor e às ações empresariais sustentáveis, para a exploração destas matérias-primas (Debiagi, Ivano, Do Nascimento, & Oliveira, 2013).

As FNV são carboidratos complexos, uma espécie de biopolímero, designadas como materiais lignocelulósicos, compostos principalmente, e em porções diferentes, por celulose, hemicelulose e

lignina, insolúveis em água, e pectina, solúvel em água, e uma pequena quantidade de ceras e ácidos gordos (Debiagi et al., 2013; LEÃO, ROWELL, & TAVARES, 1998).

De uma forma genérica, as FNV são constituídas por várias paredes celulares, normalmente com comprimentos entre 1 e 50 mm e diâmetros tipicamente ente 10 e 50 µm.

A sua estrutura física assemelha-se a um tubo microscópico, onde as paredes celulares cercam o lúmen central. Estas paredes são formadas por microfibrilas de celulose rígidas e semicristalinas, embebidas numa matriz amorfa, constituída por lignina e hemicelulose. Estes componentes químicos determinam as caraterísticas, funcionalidades e eficiência de processamento (Albinante, Pacheco, Visconte, & Tavares, 2012; Castro, 2013; Ho et al., 2012; Li, Tabil, & Panigrahi, 2007; Mussig, 2010).

A estrutura e os principais constituintes deste tipo de fibras estão representadas na Figura 1, apresentada em seguida.

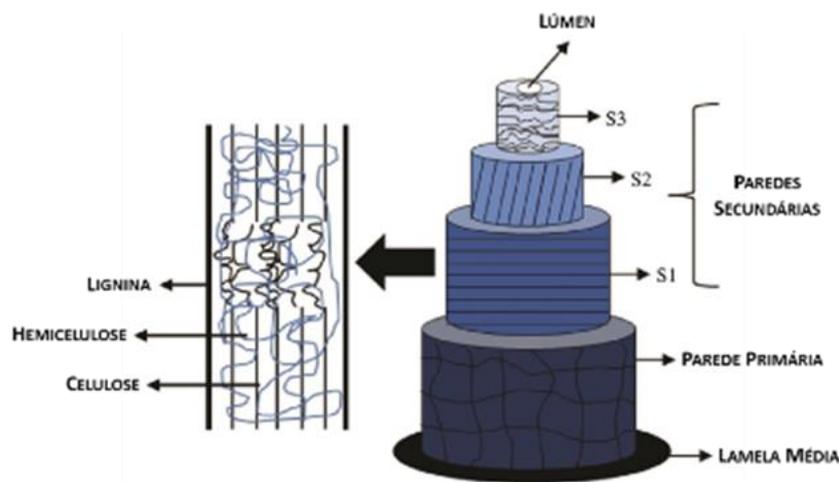


Figura 1: Estrutura de uma fibra celulósica (Henrique et al., 2015).

A celulose é um polímero cristalino linear, e representa 40 a 90% em massa da fibra, sendo o principal componente das FNV. Este componente apresenta um alto grau de polimerização e uma elevada orientação molecular, que conferem às fibras a resistência. Porém confere às mesmas um alto carácter hidrofílico (Albinante et al., 2012; Fonseca & Nachtigall, 2009).

A hemicelulose são moléculas complexas e amorfas, formadas por cadeias de carbono com um grupo hidroxilo, representando cerca de 1 a 30% em massa da FNV (Albinante et al., 2012).

A lignina é o segundo maior componente básico da FNV, e representa 1 a 35% em massa desta. Este componente é uma macromolécula formada por um sistema aromático, reticulado, com elevada massa molar, amorfo e com unidades de fenilpropano. Devido ao facto de a lignina conter na sua estrutura química anéis aromáticos, estes conferem à fibra a rigidez (Albinante et al., 2012).

A forma como estes componentes se unem assemelha-se aos materiais compósitos.

As microfibrilas de celulose ligam-se às moléculas de hemicelulose da parede celular, através de ligações pontes de hidrogénio, formando uma rede. Nesta rede, a hemicelulose atua como uma matriz que orienta as microfibrilas em determinadas direções. A lignina, por sua vez, atua como agente consolidador e provoca o aumento da rigidez da rede.

As paredes celulares podem ser divididas em duas secções: a parede celular primária e as paredes secundárias. A parede celular primária é constituída por uma rede irregular de microfibrilas de celulose, embebidas numa matriz de hemicelulose. Para além disso, é porosa e responsável por algumas propriedades indesejáveis, como por exemplo a fraca molhabilidade. Nas paredes secundárias S1, S2 e S3, as microfibrilas encontram-se aproximadamente paralelas entre si, e inclinadas relativamente ao eixo longitudinal da fibra. A camada S2 é a mais importante e é a que determina as propriedades das fibras (Castro, 2013).

A composição química das FNV depende de fatores como o tamanho e maturidade da fibra, condições do solo, humidade e métodos de processamento utilizados na extração das mesmas, que variam de produtor para produtor, levando, assim, a que dentro do mesmo tipo de fibra natural exista uma enorme variabilidade na constituição química.

Por conseguinte, esta constituição, influencia diretamente as propriedades das FNV, uma vez que, a celulose atua na densidade e na resistência à tração, a hemicelulose, no módulo de Young e na absorção de humidade, e a lignina, tem efeito na deformação de rotura e também na absorção de humidade (Gomes, 2015; Kalia, Kaith, & Kaur, 2009; LEÃO et al., 1998; Pickering, 2008) .

Algumas FNV encontram-se espontaneamente na natureza, outras são cultivadas como atividade agrícola e, ainda, há aquelas que são resíduos gerados, principalmente pela agroindústria (Debiagi et al., 2013)

2.2.1 Fibra de Sisal

A fibra de sisal (Figura 3) é um material lignocelulósico extraído da planta *Agave sisalana* (Figura 2) originária da península de Yucatã, no México e o nome de sisal surgiu de uma erva nativa chamada Zizal-xiu. Atualmente, o maior produtor e exportador mundial de fibras de sisal e de sisal manufaturado é o Brasil (Martin, Martins, Mattoso, & Silva, 2009).

Porém, estas fibras, também estão disponíveis em grande quantidade no sul da Índia (Joseph et al., 2003; Martin et al., 2009).



Figura 2: Planta Agave Silana (“Sisal - Wikipedia,” n.d.).

Estas fibras celulósicas são a principal fibra natural produzida no mundo, correspondendo a aproximadamente a 70% da produção comercial. São extraídas das folhas, que possuem entre 8 a 10 cm de largura e 150 a 200 cm de comprimento. De uma folha da *Agave Sisalana* obtém-se cerca de 3 a 5% do seu peso em fibra os restantes 97 a 95% constituem o chamados resíduo, que são utilizados como adubo orgânico, ração animal e pela indústria farmacêutica (Lima, Santos, Ferreira, & Filho, 2014; Martin et al., 2009).

As fibras são constituídas por fibrilas ou fibras elementares que tem de 1,5 a 4 mm de comprimento, diâmetro de 6 a 30 μm , e a espessura da parede celular varia de 6 a 9 μm .

As fibrilas são unidas entre si pela lignina, de maneira a formar filamentos contínuos em todo o sentido do comprimento da fibra e proporcionando, desta forma, uma certa rigidez à mesma (Martin et al., 2009). Na Tabela 4 está representada a percentagem típica de cada constituinte da composição química das fibras de sisal.



Figura 3: Fibras de sisal verdes (Lima et al., 2014).

Tabela 4: Composição química típica das fibras de sisal (Castro, 2013; Komuraiah, Kumar, & Prasad, 2014).

Constituição Típica das Fibras de Sisal (%)				
Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Pectina
Sisal	43–78	10–24	4–12	0,8–2

Esta composição química proporciona à fibra de sisal uma rigidez moderadamente alta, alta resistência ao impacto e boas propriedades de resistência à tração e flexão (Joseph et al., 2003; Martin et al., 2009). Mais propriedades destas fibras encontra-se mencionadas em seguida (Tabela 5).

Tabela 5: Propriedades físicas e mecânicas típicas das fibras de sisal (Castro, 2013; Fangueiro, 2011; Kalia et al., 2009; Ku, Wang, Pattarachaiyakooop, & Trada, 2011; Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003).

Propriedades Típicas da Fibra de Sisal				
Massa Volúmica (g/cm³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na Rotura (%)	Absorção de Humidade (%)
1,45	468–640	9,4–22	2–7	11

As principais aplicações da fibra de sisal são na indústria automóvel e também na fabricação de cordas, cabos marítimos, tapetes, sacos, vassouras, estofamentos e artesanato.

As fibras de sisal, são obtidas pelo processo de descorticação, que consiste em separar a fibra do chamado residuo. Deste processo apenas aproximadamente 5% em massa da folha de sisal é utilizada. Após esta separação as fibras são secas ao sol ou em estufas. Durante o processo de secagem, as fibras de sisal são selecionadas visualmente e as que não apresentam danos ou impurezas são depois escovadas e embaladas para exportação (Lima et al., 2014).

2.2.2 Fibra de Coco

As fibras de coco são extraídas do mesocarpo (Figura 4) da casca do coco, ou seja, a parte espessa fibrosa do fruto que não encontra aplicação em fins alimentares (Fernanda & Castilhos, 2011; E. F. Santos, Moresco, Rosa, & Nachtigall, 2010).

Estas fibras são compostas por materiais lignocelulósico, ricas em lignina, com percentagens, duas a quatro vezes superiores aos valores de lignina encontrados nas fibras de sisal e possuem uma quantidade menor de celulose. O teor de lignina nestas fibras varia em função da idade do fruto, alterando entre 20% nas fibras de coco jovem e de aproximadamente 35% no fruto maduro (Brahmakumar, Pavithran, & Pillai, 2005; Fernanda & Castilhos, 2011).

Na Tabela 6 encontra-se designada a composição química típica das fibras de coco.



Figura 4: Mesocarpo fibroso da fibra de coco (Fernanda & Castilhos, 2011).

Tabela 6: Composição química típica das fibras de coco (Castro, 2013; Komuraiah et al., 2014).

Constituição Típica das Fibras de Coco (%)				
Fibra	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Pectina
Coco	43–46	0,3	45–46	3–4

Devido a esta composição química as fibras de coco apresentam características, tais como, baixa densidade, tensão de rotura elevada, boa flexibilidade no processamento, resistência a agentes químicos, uma elasticidade superior à das outras FNV, elevada capacidade de resistir à humidade e às variações nas condições climáticas, para além disto ainda são provenientes de uma fonte renovável, são biodegradáveis e não abrasivas (Brahmakumar et al., 2005; Fernanda & Castilhos, 2011).

As fibras de coco contêm uma camada superficial fina e contínua de um composto alifático, designada por camada cerosa. A camada cerosa consiste em ácidos gordos de cadeia longa e seus produtos de condensação. Tendo em conta esta camada, as fibras de coco podem ser utilizadas como reforço numa matriz poliolefinica sem ser necessário qualquer tratamento ou modificação da superfície, uma vez que, esta camada natural cerosa proporciona uma forte ligação interfacial entre a fibra e a matriz do polímero e assim uma melhor compatibilidade entre os dois componentes do compósito (Brahmakumar et al., 2005).

O processo convencional de extração das fibras de coco ocorre de duas formas, sendo elas a maceração e desfibramento mecânico.

A maceração é realizada nas fibras de coco verde, enquanto o desfibramento mecânico ocorre nas fibras de coco seco. A maceração é um processo de origem biológica, no qual as cascas de coco são imersas em água por um período de 4 a 12 semanas para que ocorra uma fermentação anaeróbia voluntária da matéria vegetal, levando à liberação dos feixes fibrosos. Depois de esmagadas, as cascas seguem para o desfibramento, onde ocorre a separação da parte celulósica da semi-celulósica. Deste processo cerca de 25% de fibra é aproveitada e 75% é pó. Após este último procedimento, as fibras devem ser lavadas em água corrente para a remoção parcial da lignina e posteriormente são secas ao sol ou em estufas (Fernanda & Castilhos, 2011).

As principais aplicações das fibras de coco são na fabricação de tapetes, cordas para navios, escovas e vassouras, enchimento de almofadas e na fabricação de madeira prensada (Fernanda & Castilhos, 2011).

A hemicelulose presente nas fibras de coco começa a degradar-se a temperaturas inferiores a 200°C enquanto a celulose só inicia a sua decomposição a partir dos 350°C (Fonseca & Nachtigall, 2009). Tendo em conta estes valores tem-se que ter em atenção a utilização de temperaturas superiores a 200°C no processamento das fibras de coco. As restantes propriedades físicas e mecânicas típicas das fibras de coco encontram-se mencionadas na tabela (Tabela 7) seguinte.

Tabela 7: Propriedades físicas e mecânicas típicas da fibra de coco (Castro, 2013; Fangueiro, 2011; Kalia et al., 2009; Ku et al., 2011; Wambua et al., 2003).

Propriedades Típicas da Fibra de Coco				
Massa Volúmica (g/cm³)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação na Rotura (%)	Absorção de humidade (%)
1,15	106—175	4—6	15—40	10

2.3 Compósitos Termoplásticos Reforçados com FNV

Os primeiros materiais compósitos termoplásticos reforçados com FNV, produzidos em grande escala, surgiram no ano de 1908, com a utilização de lâminas de polímeros termoplásticos reforçadas com fibras de papel e algodão (Fonseca & Nachtigall, 2009).

Várias razões apoiam a incorporação de fibras naturais, como reforço, nos compósitos, como substitutas das usuais fibras sintética, sendo elas o facto de as FNV serem abundantes na natureza, uma vez que, são considerados como resíduos da atividade agrícola e o seu aproveitamento, além de lhes prover um destino final racionalizado, reduz o custo da produção do compósito, que satisfaz o interesse económico das indústrias.

Outra das razões, advém de estas serem um recurso renovável, reciclável e biodegradável, contribuindo assim para um ecossistema sustentável.

No que diz respeito às suas propriedades intrínsecas, as FNV, apresentam metade do peso específico das fibras de vidro, boas propriedades mecânicas e de isolamento térmico. Para além destas vantagens, estas, são também menos irritantes para a pele e para as vias respiratórias, uma vez que tem toxicidade limitada, e provocam um menor desgaste das ferramentas ao serem processadas, devido ao seu tamanho reduzido e à sua baixa abrasividade, possibilitando a utilização de frações elevadas. (Erchiqui et al., 2016; Gama, Duarte, & Andrade, 2011; Gamon et al., 2013; Holbery & Houston, 2006; Joseph et al., 2003; Martin et al., 2009; E. F. Santos et al., 2010; Stack & Lai, 2011).

Apesar dos compósitos de matriz termoplástica reforçados com FNV, ainda se encontrarem em desenvolvimento, estes já têm uma importância bastante elevada, em diversas áreas de aplicação, sendo elas, na indústria do mobiliário, da construção civil, do desporto, da aeronáutica e recentemente, na

indústria automóvel, que se tem demonstrado uma das principais aplicação destes compósitos (Brahmakumar et al., 2005; Erchiqui et al., 2016; Ligowski et al., 2015; E. F. Santos et al., 2010).

Contudo, o desenvolvimento de compósitos termoplásticos reforçados por fibras naturais é limitado por dois motivos, sendo eles, a temperatura à qual a fibra pode ser processada, uma vez que, a exposição prolongada das fibras a altas temperaturas poderá provocar a degradação das mesmas, podendo este facto ser visível através da descoloração, da libertação de voláteis, ou na fragilização dos componentes da celulose.

O outro motivo, deve-se à fraca aderência interfacial entre a fibra polar hidrofílica e a matriz hidrofóbica apolar, resultando numa fraca adesão entre os dois componentes do compósito, uma vez que fibra tem má molhabilidade por parte da matriz (Brahmakumar et al., 2005; Holbery & Houston, 2006).

Este comportamento hidrofílico das fibras naturais além de provocar a incompatibilidade com a matriz polimérica pode causar uma má distribuição das fibras na mistura e aumentar a sensibilidade à humidade do compósito, que resulta em propriedades mecânicas decepcionantes e limita o volume processável de FNV (Brahmakumar et al., 2005; Erchiqui et al., 2016; Gamon et al., 2013).

De forma a resolver este desafio de incompatibilidade química está descrito na literatura, que se melhora a qualidade da ligação entre as moléculas da celulose e da matriz através da modificação química da superfície da fibra ou pela adição de um agente de acoplamento compatível com a matriz a utilizar (Erchiqui et al., 2016).

2.3.1 Compósitos Termoplásticos na Indústria Automóvel

Na última década, os compósitos de FNV com matrizes termoplásticas foram aceites pelos fabricantes e fornecedores de automóveis europeus, no acabamento de peças interiores, como por exemplo, painéis de portas, encostos de bancos, chapas e painéis de instrumentos.

O interesse por estes compósitos não coincide apenas com a legislação que tem sido promulgada em grandes mercados como a União Europeia, mas também com a prioridade no interesse na sustentabilidade global, uma vez que estes, atenuam em muitos problemas de fim de vida que se tornaram críticos para a indústria automóvel (Holbery & Houston, 2006; Stack & Lai, 2011).

Contudo, a tecnologia de implementação de compósitos reforçados com FNV na produção de peças automóveis continua a ser desenvolvida pelos produtores dos automóveis em parceria com os

fornecedores das FNV, de forma a tentar introduzi-los na produção de peças exteriores. Para que tal seja possível, estes compósitos, deveram ultrapassar algumas entraves incluindo a homogeneização das propriedades da fibra, a adesão entre a fibra e a matriz, a repelência à humidade e propriedades retardadoras de chama, sendo estas apenas algumas (Holbery & Houston, 2006).

No entanto, a utilização de fibras naturais em aplicações no exterior dos automóveis não é uma ideia nova, pois nas décadas de 1930 e 1940, Henry Ford defendia fortemente, o uso de materiais naturais e chegou a produzir painéis de corpo exterior em compósito, onde a sua matriz consistia em resina de soja e o reforço em fibras de cânhamo. Se não fosse o longo tempo de cura do material, e a dificuldade de moldação, a ideia de Ford poderia ter sido implementada (Holbery & Houston, 2006).

Hoje em dia a aplicação de fibras naturais como reforço em compósitos têm-se mostrado viável, em várias peças automóveis. O linho, o sisal, o kenaf e o cânhamo são transformados em revestimento de portas, forros de encosto e painéis de piso enquanto as fibras de coco são usadas para fazer fundos de assento, almofadas de costas e encostos de cabeça, tal como a fibra de madeira. O algodão é usado para fornecer prova de som. (Holbery & Houston, 2006; Stryjewski, 2002)

Exemplos concretos da aplicação de compósitos termoplásticos reforçados com fibras naturais em peças automóveis são o caso da General Motors, que confeccionou bandejas e inserções do painel de porta numa mistura de kenaf e flax para aplicação no Saturn *L300* e no mercado europeu no Opel *Vectra*.

As fibras de madeira foram utilizadas na conceção dos encostos dos bancos para o Cadillac *DeVille* e no piso da área de carga do GMC *Envoy* e do Chevrolet *TrailBlazer* e as inserções das portas deslizantes para o Ford *Freestar*.

A Toyota utilizou kenaf para fazer bandejas na Lexus, e incorporou-as na estrutura do corpo dos conceitos dos automóveis *i-foot* e *i-unit*. (Holbery & Houston, 2006)

Mais recentemente, a BMW, utilizou compósitos reforçados com fibra de kenaf no revestimento do painel e da porta do i3 (Figura 5). (Carro, 2015; “Un mundo nuevo_ el interior del BMW i3 _ BMW Magazine,” n.d.)

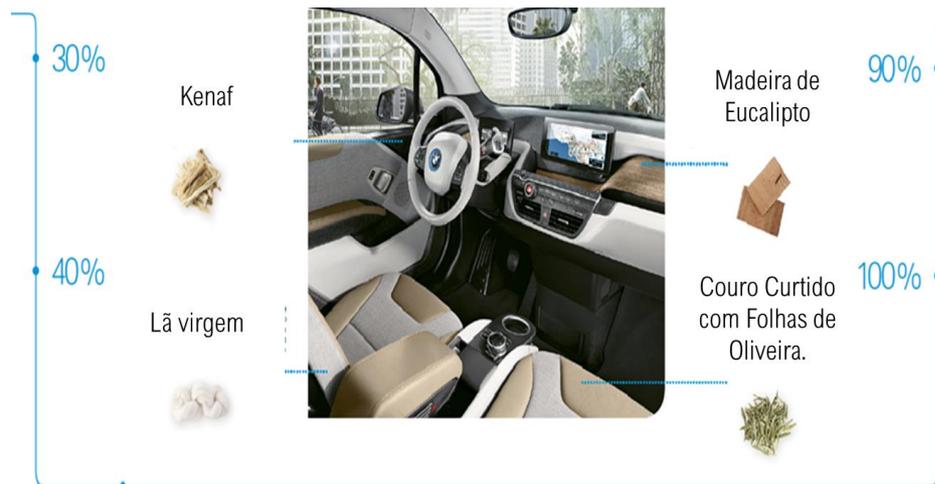


Figura 5: Interior do BMW i3. (“Un mundo nuevo_ el interior del BMW i3 _ BMW Magazine,” n.d.)

Também a Fiat, em 2010, utilizou para o estofamento dos bancos do Uno Ecology (Figura 6) um compósito de matriz de látex e reforço de fibra de coco. (AutoEsporte, 2010; Carro, 2015)



Figura 6: Fiat Uno Ecology (“Fiat mostra o conceito Novo Uno Ecology,” 2010).

2.4 Soluções para Incompatibilidade FNV/Matriz Polimérica

Tendo em conta que a adesão entre as fibras naturais e a matriz polimérica é o fator que determina as propriedades físicas e mecânicas do compósito, é necessário compatibilizar ou acoplar a mistura, de forma a conseguir-se uma boa adesão entre a fibra e a matriz.

Sendo que a compatibilização é uma qualquer operação realizada sobre a fibra e o polímero que aumenta a molhabilidade dentro da mistura enquanto o acoplamento é um processo no qual os polímeros são transformados noutro composto por meio de agentes externos chamados agentes de acoplamento (Holbery & Houston, 2006).

Atendendo a este facto, a otimização da adesão da interface entre as FNV e os termoplásticos tem sido o foco de várias pesquisas realizadas durante as duas últimas décadas (Brahmakumar et al., 2005).

Várias técnicas têm sido mencionadas para melhorar a ligação interfacial entre as fibras naturais e os termoplásticos. Esta ligação interfacial pode ser conseguida modificando a matriz polimérica, modificando a fibra, ou adicionando agentes tensioativos. Estas técnicas vão desde o enxerto de polímeros e moléculas de cadeia curta sobre a superfície da fibra até ao uso de agentes de acoplamento ou promotores de adesão induzidos por radicais (Brahmakumar et al., 2005; Holbery & Houston, 2006).

O enxerto de moléculas melhora a molhabilidade da fibra por hidrofobização da superfície da fibra e promove a ligação física por difusão dos segmentos da cadeia das moléculas enxertadas na matriz (Brahmakumar et al., 2005; Holbery & Houston, 2006).

Os agentes de acoplamento ou os promotores de adesão induzidos por radicais aumentam a adesão interfacial através da produção de ligações covalentes entre a fibra e a matriz e podem reagir *in-situ* durante o processamento (Brahmakumar et al., 2005; Holbery & Houston, 2006).

Existem muitos tipos de agentes de acoplamento incluindo os agentes tensioativos, em tempos referidos como modificadores funcionais. Os agentes ativos superficiais são materiais que aumentam a adesão interfacial atuando como um tensioativo sólido e que não formam ligações covalentes com a matriz polimérica. O resultado do emprego de um agente de acoplamento adequado ao compósito resulta num aumento das propriedades físicas e na durabilidade ambiental (Holbery & Houston, 2006).

2.4.1 Anidrido Maleico

O uso de poliolefinas como matrizes na fabricação de compósitos com fibras naturais é limitada pela baixa adesão entre os componentes intervenientes. Estudos realizados comprovaram que a utilização de um agente de acoplamento entre uma matriz poliolefínica e fibras naturais, como o MAPP, ou seja, PP modificado com moléculas funcionalizadas de anidrido maleico, conseguiu reagir com os grupos hidroxilos presentes na fibra natural, aumentando desta forma a adesão entre a fibra e a matriz (Fonseca & Nachtigall, 2009).

O mecanismo de acoplamento do MAPP (Figura 7), descrito na literatura, diz que o MAPP forma ligações covalentes entre os seus grupos de anidrido reativos e os grupos hidroxilo (-OH) das cadeias de celulose presentes nas fibras naturais. Além das ligações covalentes, interações do tipo ligações de hidrogénio também são formadas. O entrelaçamento das cadeias da matriz polimérica com a cadeia

carbônica do agente de acoplamento estabelece a interação necessária para promover a adesão entre as duas fases do compósito (E. F. Santos et al., 2010).

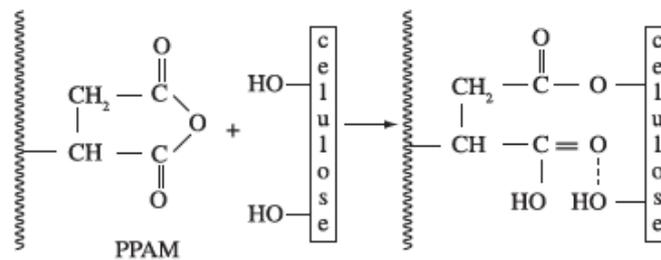


Figura 7: Mecanismo de acoplamento do PPMA (E. F. Santos et al., 2010).

2.5 Extrusão de Folha /Chapa com FNV

A extrusão de compósitos com FNV é um tema em desenvolvimento constante, uma vez que, a utilização destas fibras na extrusão de compósitos termoplásticos ainda apresenta algumas limitações, como o facto de estas fibras absorverem uma grande quantidade de humidade, e esta característica, por em causa o grau de qualidade do compósito final.

Uma vez que, mesmo que as fibras sejam sujeitas a um processo de pré-secagem, estas têm tendência a absorver humidade muito rapidamente quando saem desse condicionamento, por exemplo, enquanto estão à espera de serem alimentadas da tremonha para a extrusora.

Também o facto de as fibras naturais se degradarem a temperaturas próximas de 200°C dificulta a incorporação, sem queimar ou degradar, da fibra no compósito durante o processo de extrusão. (Albernaz, 2009).

Contudo, de forma a combater estas complicações na extrusão de compósitos com FNV, tem-se desenvolvido sistemas de extrusão que permitem a incorporação de FNV, sem a necessidade da pré-secagem da fibra. Estes sistemas possibilitam tanto a produção de grânulos para posterior extrusão ou injeção, como a extrusão direta de perfis, filmes ou folhas (Albernaz, 2009).

Estes sistemas de extrusão admitem trabalhar com poliolefinas com reforços de fibras naturais até 70% em massa e com humidade acima de 7%, sem qualquer problema de degradação, dispersão ou humidade. O facto de nestes sistemas inovadores de extrusão, não haver necessidade do pré-condicionamento das fibras de forma a remover a humidade por elas absorvida, apresenta como vantagem uma economia energética bastante significativa, pois a humidade da fibra é removida durante o processo de extrusão. Esta vantagem reflete-se na economia do custo da estufa, e no custo adicional

da manutenção deste equipamento, uma vez que o preço de uma estufa que consiga atingir uma percentagem tão baixa de humidade é bastante dispendioso (Albernaz, 2009).

Estes sistemas inovadores para extrusão de compósitos termoplásticos com FNV, consistem numa extrusora duplo-fuso com ação co-rotativa, normalmente composta por uma zona de alimentação e transporte, zona de plastificação e mistura, zona de desvolatilização que pode ser atmosférica ou a vácuo e a zona de pressurização para vencer a resistência causada pelo composto à saída da extrusora (Albernaz, 2009).

As extrusoras duplo-fuso são equipamentos compostos por dois fusos paralelos, que realizam o trabalho de processamento através da combinação de vários tipos de elementos do fuso. (Albernaz, 2009). Chama-se ação co-rotativa dos fusos quando os dois eixos têm ação rotativa no mesmo sentido, transportando o material por câmaras abertas, o que acrescenta uma mistura longitudinal ao produto e permite que seja criado um efeito de auto-limpeza nos elementos do fuso. Esta ação na extrusora permite que haja uma maior dispersão das fibras ao longo do compósito. Porém a produtividade destas extrusoras é relativamente baixa. (Albernaz, 2009).

Para que se consiga um aumento da produtividade da extrusora sem que ocorra a degradação das fibras naturais durante um processamento é necessário o aumento do volume interno do cilindro na zona de processamento, o aumento do torque, que permite o aumento da alimentação sem haver necessidade do aumento da rotação dos fusos e um canal mais profundo dos elementos do fuso, que permite o processamento a rotações mais elevadas sem aumentar as taxas de corte (Albernaz, 2009).

O perfil dos fusos da extrusora dupla-fuso é composto por vários elementos. Existem muitos tipos de elementos de fuso que podem causar maior ou menor transporte, corte ou mistura dependendo do seu formato e da maneira de como são combinados. Para o processamento de compósitos com fibras naturais é muito importante realizar uma mistura intensa com um corte mais baixo, para que não ocorra a degradação da fibra (Albernaz, 2009).

Para que o perfil do fuso proporcione uma boa desvolatilização das fibras naturais é necessário garantir que o tempo de residência, do compósito dentro da extrusora, é o suficiente para permitir a remoção dos voláteis e que o polímero esteja todo plastificado. Este Processo de desvolatilização é limitado quando a matriz termoplástica é bastante viscosa, devido ao facto de haver uma tendência bastante elevada do produto sair da extrusora através do canal de desvolatilização juntamente com a

humidade acabando por impedir ao longo de algum tempo a passagem de voláteis uma vez que o material solidifica ao entrar em contacto com a temperatura ambiente (Albernaz, 2009).

Assim sendo, e de forma a resumir o descrito acima, para produzir compósitos com fibras naturais através do processo de extrusão, o perfil dos elementos do fuso deverá ter as seguintes características (Tabela 8), de forma a produzir efeitos positivos na extrusão destes compósitos.

Em seguida, na Tabela 9, está mencionada a configuração da extrusora e do fuso ideal para a produção de compósitos com fibras naturais, tendo em conta a configuração do fuso para o processamento de poliolefinas termoplásticas.

Tabela 8: Características dos elementos do fuso ideais para a extrusão de compósitos com fibras naturais (Albernaz, 2009; INNOVA, n.d.).

Características do Perfil dos Elementos do Fuso	
Características	Efeito na Extrusão e nas Fibras Naturais
Comprimento suficiente	O processo ser capaz de remover toda a humidade e efetuar uma boa mistura do composto.
Maior volume interno na zona de processamento	Aumenta a produtividade e diminui a degradação das fibras.
Canal mais profundo	Aumento da rotação do fuso, sem aumentar as taxas de corte, diminuindo a degradação das fibras.
Baixa razão de compressão	Diminuem as taxas de corte e conseqüentemente a degradação das fibras.

Tabela 9: Configuração da extrusora apropriada à para a produção das folhas compósitas (Albernaz, 2009; “Forflex®,” n.d.; INNOVA, n.d.).

Configuração da Extrusora
<ul style="list-style-type: none">• Extrusora duplo-fuso• Ação co-rotativa• Zona de desvolatilização• Sem zona de mistura exaustiva• Razão do fuso igual ou superior a 20 L/D

2.6 Termoformação

A termoformação, foi descoberta em meados dos anos 1800, e é das mais importantes técnicas de processamento de materiais poliméricos e compósitos na indústria dos plásticos (Erchiqui et al., 2016; Peter W. Klein, 2009).

A produção por termoformação tem apresentado uma taxa de crescimento anual de aproximadamente 5% a 6%, que se mantem à mais de quarenta e cinco anos.

A termoformação de folhas termoplásticas reforçadas com FNV tornou-se um processo importante na indústria devido ao seu baixo custo, boa formabilidade e uma elevada relação resistência-peso, porém encontra-se em constante desenvolvimento pelos investigadores. Para estes compósitos termoplásticos, a manipulação por termoformação tem que ter em consideração o possível deslocamento da fibra durante a enformação e as razões de estiramento muito elevadas, uma vez que podem romper a folha compósita (Erchiqui et al., 2016; Igl & Osswald, 1992; Okine, 1989) .

O ciclo processual da termoformação é composto por várias etapas, estando estas representadas na Figura 8, apresentada em seguida.



Figura 8: Etapas do processo de Termoformação.

A primeira etapa do ciclo processual, é a alimentação da matéria prima, que pode ser fornecida em rolos de folha continua se tiverem espessuras inferiores a 1.5 mm e em folhas cortadas se tiverem espessuras superiores a 3 mm.

Após a alimentação das folhas na termoformadora esta é encaminhada para o forno onde se dá a segunda etapa do ciclo processual. Nesta etapa, uma folha termoplástica, é aquecida por meio de radiação, através do forno, por condução, pelo contacto entre moléculas e por convecção, pelo aquecimento do ar circundante, até ao seu estado maleável, ou seja, acima da temperatura de T_g (Transição Vítrea).

Em seguida, esta é forçada a deformar contra as paredes do molde que pode ser macho ou fêmea, através da aplicação de um diferencial de pressão, conseguido pela pressão atmosférica, vácuo, assistência por meios mecânicos, como o movimento de um punção, ou da combinação destes três, e a forma desejada é obtida por meio da diferença de pressão e o alongamento mecânico, replicando assim os contornos do molde. A esta etapa dá-se o nome de enformação. (Erchiqui et al., 2016; Okine, 1989; Pereira, 2013; Tobergte & Curtis, 2013)

A orientação e a adesão das fibras na matriz polimérica proporcionam alterações nas propriedades mecânicas, e afetam significativamente a termoformabilidade das folhas compósitas. A termoformabilidade é a facilidade que um material tem para enformar, e depende de fatores como a temperatura, velocidade e razão de enformação ou seja a razão entre largura e profundidade da geometria a termoformar. (Bhattacharyya, Bowis, & Jayaraman, 2003; Torres & Bush, 2000)

Estudos encontrados na literatura, mostraram que a incorporação de fibras na folha compósita a ser termoformada, não apresentou influencias significativas na distribuição final de espessuras, porém afirmam que concentrações mais baixas de fibra nas formulações das folhas compósitas, promovem a

sua termoformabilidade. (Erchiqui et al., 2016) Também se encontrou referenciado em estudos, que velocidades de enformação mais lentas aumentam a viscosidade da matriz polimérica, resultando numa capacidade de deformação limitada, ocorrendo por vezes, roturas devido à discontinuidade da matéria provocada pelas fibras. (Bhattacharyya et al., 2003)

Após a enformação, a folha é arrefecida até ao estado sólido, através da passagem de água e pelo contacto com o ar, de forma a manter as cadeias de moléculas orientadas e posteriormente é que se procede à remoção da peça do molde. (Erchiqui et al., 2016; Okine, 1989; Pereira, 2013; Tobergte & Curtis, 2013)

Para terminar, realizam-se processos de acabamento, onde se procede ao corte das peças termoformadas da folha enformada, através de um laser guiado por um computador, seguido do armazenamento das peças (Peter W. Klein, 2009; Throne, 2003).

A Termoformação de folhas compósitas termoplásticas reforçadas com FNV é, tipicamente, realizada através da enformação por vácuo com molde macho ou fêmea, tendo em conta que quando a quantidade de reforço é bastante elevada aconselha-se a utilização do molde macho, devido ao facto de este apresentar razões de estiramento mais baixas (Du et al., 2014; Okine, 1989).

Na enformação por vácuo, o ar existente no molde é evacuado, por ação do vácuo e a pressão atmosférica força a folha aquecida, contra os contornos do molde, onde solidificará e dará forma à peça final, como se pode observar na Figura 9. Embora esta força é bastante limitada, cerca de 1 bar, este é o processo mais comum utilizado para produtos de alto volume e de calibre fino, como por exemplo, produtos descartáveis, embalagens, revestimentos, entre outros (Peter W. Klein, 2009; Throne, 2003).

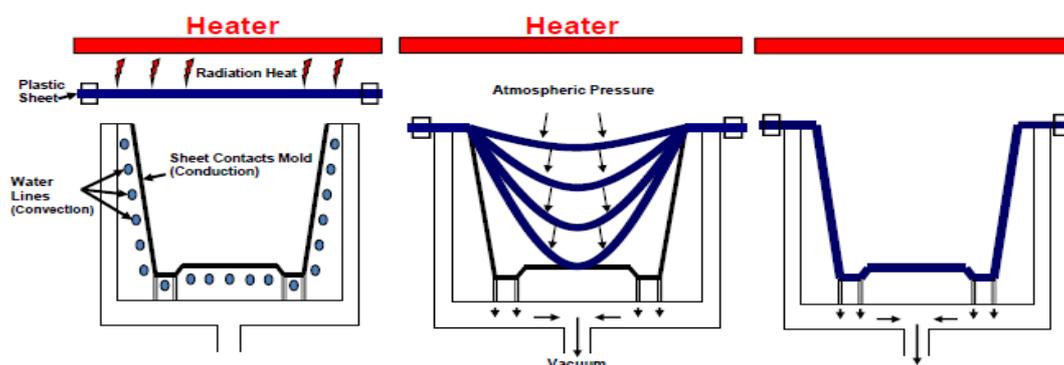


Figura 9: Processo de enformação a vácuo, com molde fêmea. (Peter W. Klein, 2009)

CAPÍTULO 3

Procedimiento Experimental

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Matérias Primas

As folhas compósitas produzidas no âmbito desta dissertação, apresentam na sua formulação uma matriz termoplástica, o TPO, dois reforços naturais vegetais distintos, a fibra de sisal e a fibra de Coco e dois aditivos, sendo eles um agente de acoplamento e um pigmento, ou seja, o MAPP e o negro de fumo.

Estes aditivos são incorporados na composição das folhas compósitas, devido ao facto das FNV não apresentarem compatibilidade com a matriz polimérica, havendo a necessidade da incorporação de um agente de acoplamento. Também se incorporou um pigmento preto translucido atendendo ao facto de as fibras naturais serem propensas a se degradar devido ao facto de estarem expostas à radiação UV, ou seja, aos raios solares.

3.1.1 Matriz Termoplástica

O TPO utilizado como matriz na formulação das folhas compósitas tem como referência 15800066, sendo esta uma referência interna.

Com base na ficha técnica, fornecida pelo produtor, este é composto por copolímeros de etileno-buteno que lhe proporciona elevada flexibilidade, elasticidade e alta resistência do fundido. Este material é adequado para extrusão de filme ou folha e termoformação. Na Tabela 10 encontram-se enunciada todas as características específicas deste material, sendo elas fornecidas na ficha técnica do mesmo.

Tabela 10: Características específicas do TPO 15800066.

Características do TPO 15800066

- Elevada elasticidade e boa recuperação elástica
- Baixo brilho
- Alta resistência do fundido
- Baixa libertação de odores e compostos orgânicos voláteis (VOCs)
- Boa resistência ao impacto

Nas tabelas seguintes (Tabela 11 e Tabela 12) estão mencionadas as propriedades físicas e mecânicas para este material e também as temperaturas de processamento de extrusão, também fornecidas pela ficha técnica do material.

Tabela 11: Propriedades físicas e mecânicas do TPO 15800066.

Propriedades físicas do TPO 15800066		
Propriedade	Valor (unidade)	Método de teste
Densidade	0.891	ASTM D792
Índice médio de fluidez (MFI) (190°C/2.16 kg)	<0.50 kg/10 min	ASTM D1238
Temperatura de transição vítrea (T _g)	-52 °C	Método interno
Temperatura de fusão (T _m)	165 °C	Método interno
Propriedades mecânicas do TPO 15800066		
Propriedade	Valor (unidade)	Método de teste
Tensão máxima	10 MPa	ASTM D412
Deformação na Tensão máxima	640%	

Tabela 12: Temperaturas de processamento do TPO 15800066.

Temperaturas de processamento do TPO 15800066	
Temperatura do cilindro	180—220 °C
Temperatura da fieira	190—230 °C
Temperatura da calandra	30—70 °C

Mais propriedades acerca este composto de TPO podem ser consultadas na ficha que se encontra ilustrada na Figura 62 em Anexo I.

3.1.2 Reforços Fibrosos Naturais

As fibras de sisal e de coco, provenientes do Brasil e da Índia, respetivamente, foram as fibras selecionadas para utilizada na formulação das folhas compósitas de vido ao facto de estas serem as mais abundantes nos resíduos agrícolas e nas indústrias alimentares.

Preparação das FVN

Assim sendo, este procedimento experimental inicia-se com a preparação das fibras naturais, uma vez que, estas têm de ser cortadas nos comprimentos desejados para a produção do plano experimental definido para esta tese de mestrado. As fibras de sisal e de coco têm de ser cortadas, devido ao facto de terem sido fornecidas como fibras longas, como ilustrado na Figura 10 e na Figura 11, respetivamente.



Figura 10: Fibra de sisal longa utilizada nesta dissertação.



Figura 11: Fibra longa de Coco utilizada nesta dissertação.

As fibras são cortadas num moinho de facas, com um crivo de 2000 μm , o equipamento encontra-se ilustrado na Figura 13.

Com o corte das fibras através do moinho obteve-se fibras de tamanhos entre 2000 e 125 μm . Devido a este facto têm-se que peneirar as fibras em peneiros (Figura 12), de forma a obter-se o comprimento pretendido para a elaboração deste plano experimental. A peneiração das fibras é efetuada em peneiros com granulometrias de 2000, 1000 e 500 μm e da seguinte forma:

- Primeiramente, as fibras são peneiradas com toda a serie de peneiros selecionados.
- As fibras que permaneceram no peneiro de granulometria de 1000 μm , são peneiradas por um peneiro de 2000 μm e novamente por um peneiro de 1000 μm , o que sobrou é recolhido e identificado como sendo fibras de comprimento de 1000 μm .
- As fibras que resultaram no peneiro de granulometria de 500 μm são peneiradas por um peneiro de 1000 μm e novamente por um de granulometria de 500 μm e o que resultou nesse peneiro é recolhido e identificado como sendo fibra de comprimento de 500 μm .



Figura 13: Moinho de facas utilizado no corte das fibras naturais.



Figura 12: Peneiros utilizados para a peneiração das fibras.

Estes processos de corte e peneiração são realizados para ambas as fibras naturais utilizadas nesta dissertação, até obtermos a quantidade necessária de cada comprimento para cada tipo de fibra, de forma a cumprir todo o plano de formulações das folhas compósitas.

Condicionamento das FNV

Confirmando a existência de humidade nas FNV a utilizar nas formulações das folhas compósitas, foi necessário, após reunir as quantidades necessárias de ambos os tamanhos, condicioná-las numa estufa a 100°C, antes 24 horas do momento do processamento pelo processo de extrusão.

Contudo as fibras não tem que sofrer um condicionamento muito longo e perlongado, uma vez que os grupos OH da água são mais reativo do que os grupos -OH disponíveis nos componentes da fibra, tornando a remoção de humidade rápida (Holbery & Houston, 2006).

3.1.3 Agente de Acoplamento

O agente de acoplamento utilizado na produção das folhas compósitas desta dissertação foi o MAPP SCONA TPPP 8112 FA da fornecedora *BYK Additives & Instruments*, que se trata de um polipropileno altamente funcionalizado com anidrido maleico, em forma de pó. Este MAPP é indicado para promover a adesão em compostos de TPE-S, para ser usados como agentes de acoplamento em compostos com fibras naturais e para o fabrico de *one-packs* em polipropileno.

As propriedades deste agente de acoplamento indicadas na ficha técnica deste encontra-se referidas na Tabela 13.

Tabela 13: Propriedades do SCONA TPPP 8112 FA.

Propriedades	Valor	Unidade
Índice médio de fluidez (MFI) (190°C/2.16 kg)	>80	g/cm ³
Remoção de humidade (3h/110°C)	<0.5	%
Quantidade de MAH	1,4	%

Mais informações acerca do agente de acoplamento utilizado encontram-se referidas na ficha técnica do mesmo presente em Anexo I (Figura 64).

3.1.4 Pigmento

O Negro de fumo utilizado no plano experimental deste projeto individual foi fornecido como pigmento na forma de *masterbatch*, e tem a referência interna, de 15270456. Este pigmento é um concentrador de cor preto com uma matriz de PE e 4% de Negro de Fumo, sem adição de outros aditivos e sem aprovação alimentar, informações estas retiradas da ficha técnica deste composto presente em Anexo I (Figura 63).

As propriedades especificadas na ficha técnica encontram-se referenciadas na tabela seguinte (Tabela 14).

Tabela 14: Propriedades do pigmento s/estabilizantes utilizados nas folhas compósitas.

Propriedade	Valor	Unidade	Método
Massa volúmica	0.56±0.05	g/cm ³	IT.07
Absorção de Humidade	<0.15	%	IT.08
Resistência aos UV	7	(1–8)	IT.20
Resistência Térmica	260	°C	IT.21

3.2 Processo de Extrusão

3.2.1 Formulações das Folhas Compósitas

Para a elaboração do plano das formulações das folhas compósitas, teve que se ter em consideração as influências que pretendíamos avaliar, de forma a cumprir o objetivo deste trabalho.

Assim sendo, e uma vez que se pretende avaliar a influencia do tipo, comprimento e quantidade de fibra no processo de termoformação das folhas compósitas, teve-se que planear este plano , com dois tipos distintos de fibras, Sisal e Coco, dois comprimento diferentes, 1000 e 500, e diferentes quantidade percentuais de fibra, sendo elas, 2, 4, 6, 8, 10 e 15%, uma vez que, não pretendíamos perder totalmente as características do elastómero, pois estas folhas terão que ter capacidade de se deformarem quando termoformadas.

Considerando a fraca adesão entre o polímero e a matriz polimérica, juntou-se ao plano a incorporação constante de 2% de MAPP, atendendo que para 50% de fibra e 50% de polímero a percentagem referida pelo fornecedor é de 2%. A quantidade de pigmento a ser incorporado neste compósito é também constante ao longo de todo o plano, sendo ela 1%, uma vez que este é à base de negro de fumo, tendo um poder de coloração bastante elevado, e visto que pretendemos ver a incorporação das fibras no compósito, a quantidade a incorporar deste pigmento deverá ser a mais baixa possível.

Tendo em conta todas as matérias-primas e percentagens mássicas referidas acima, apresenta-se, em seguida, o plano das formulações, na Figura 14, concebido para esta dissertação.

Partiu-se do princípio que a quantidade de polímero no compósito era de 1 kg e que a partir desta massa se calculou as restantes frações mássicas dos outros constituintes do compósito. As massas de cada constituinte da formulação das diferentes folhas compósitas a serem produzidas encontra-se apresentadas em seguida (Tabela 15). Com o cálculo das frações mássicas facilitou-se a realização das receitas aquando a extrusão e também permitiu apurar a quantidade total necessária de cada componente para cumprir todo este plano experimental.

Assim sendo, para cumprir com os objetivos desta dissertação, é necessária a extrusão de 26 folhas compósitas com formulações distintas.

Figura 14: Plano das formulações planeadas para esta dissertação.



Tabela 15: Quantidades em massa para cada componente das diferentes composições.

Receita	Tipo de Fibra	Tamanho de Fibra (µm)	TPO (kg)	Pigmento (kg)	MAPP (kg)	Quantidade de Fibra (kg)		
1	-	-	1	0	0	0		
2	-	-		0	0	0		
3	Coco	1000		0.010	0.020	0.020		
4						0.040		
5						0.060		
6						0.080		
7						0.100		
8						0.150		
9						500	0.020	
10							0.040	
11	0.060							
12	0.080							
13	0.100							
14	0.150							
15	Sisal	1000					0.020	
16							0.040	
17						0.060		
18						0.080		
19						0.100		
20						0.150		
21						500	0.020	
22							0.040	
23							0.060	
24							0.080	
25							0.100	
26						0.150		
TOTAL	Coco	1000	26			0.25	0.48	0.45
		500						0.45
	Sisal	1000		0.45				
		500		0.45				

3.2.2 Otimização do Processo de Extrusão

Aquando o processo de extrusão realiza-se formulação após formulação, de cada amostra, como planeada no plano ilustrado na Figura 14 e na Tabela 15. As frações mássicas de cada receita são medidas com auxílio de uma balança digital *Denver Instruments SI-6002* com erro associado de 0.01g.

Após a sua confeção, a composição é colocada na estufa a uma temperatura de 100°C durante um tempo mínimo de 15 minutos, de forma a retirar alguma humidade absorvida aquando a elaboração da mistura dos compostos que compõem a formulação das amostras.

Acoplada à extrusora, teve-se um alimentador MORETTO BVM (Figura 15), onde se introduzem as formulações de imediato, após serem retiradas da estufa, para não dar oportunidade de as fibras naturais absorver a humidade presente no ambiente. Após a introdução da formulação no alimentador este é tapado com a sua própria tampa de forma a impedir o contacto direto das fibras naturais com a humidade ambiente.



Figura 15: Alimentador.

As condições operatórias introduzidas no alimentador são a velocidade de rotação do parafuso do alimentador e o débito com que queremos alimentar a extrusora com as composições. As condições operatórias introduzidas no alimentador, no decorrer do trabalho experimental desta dissertação, encontram-se indicadas na Tabela 16.

Tabela 16: Condições operatórias do alimentador.

Variável	Valor	Unidades
Velocidade do parafuso	33	RPM
Débito	8	Kg/h

Tendo em conta, a configuração ideal da extrusora para a produção de poliolefinas reforçadas com fibras naturais refira acima, na Revisão Bibliográfica, na Tabela 9, e os recursos que tínhamos disponíveis no departamento de Engenharia de polímeros, chegou-se à configuração exposta de seguida.

A extrusora utilizada para a produção das folhas compósitas foi uma extrusora duplo-fuso com $L/D = 29$ e ação co-rotativa, da marca LEISTRITZ AG LSM 36/25 D (Figura 16) de 1993 e com capacidade de 1,05 kg.



Figura 16: Extrusora.

Esta extrusora tem doze zonas, sendo estas, duas zonas de alimentação, zonas de transporte, zonas de plastificação e de mistura, a zona de mistura intensiva foi retirada, de forma a não quebrar as fibras naturais, e tem no final uma zona de pressurização, não contém zona de desvolatilização, uma vez que por razão de recursos não foi possível colocá-la e conta com dozes resistências para aquecer o cilindro da extrusora nestas diferentes zonas.

Como não houve possibilidade de colocar uma zona de desvolatilização na extrusora utilizada, tentou-se secar as fibras e as formulações o melhor possível, de forma a não provocar defeitos, nem distorção nas folhas causadas pela humidade. Apesar de não se conseguir a introdução dessa zona de desvolatilização, tentou-se simular essa zona deixando a segunda zona de alimentação da extrusora em aberto, como ilustrado na Figura 17.

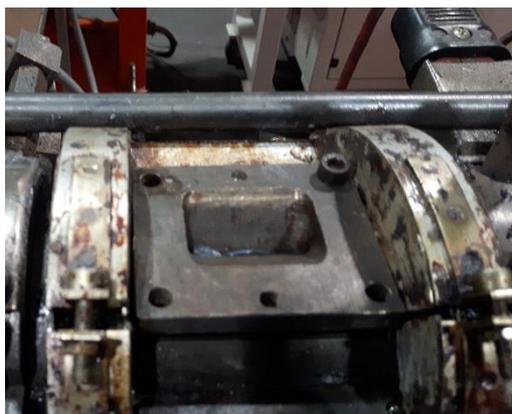


Figura 17: Zona de desvolatilização improvisada.

Porém concluiu-se que não teria nenhum efeito na produção da folha, sendo que, o TPO é um material bastante viscoso, e devido ao efeito da rotação do fuso o material era expelido para fora dessa abertura acabando por impedir que qualquer volátil fosse imitado para fora da extrusora, acabando por ser fechada. As formulações são extrudidas pela fieira da cabeça de extrusão acoplada à extrusora.

Esta fieira tem forma de fenda e uma largura de aproximadamente 30 cm. A cabeça de extrusão utilizada para extrusão das folhas encontra-se ilustrada na Figura 18.

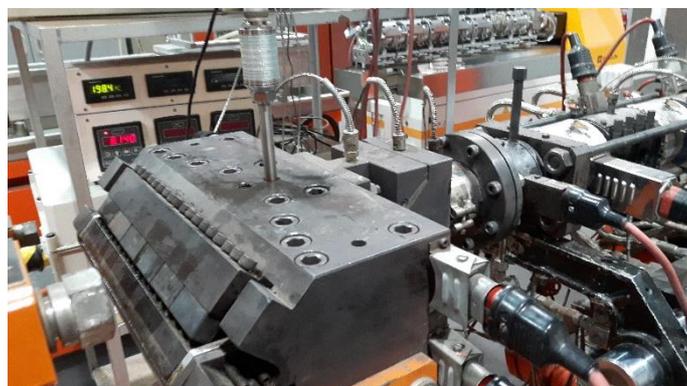


Figura 18: Cabeça de extrusão.

As condições operatórias a ser introduzidas no painel de controlo da extrusora são a velocidade de rotação dos fusos e as temperaturas das zonas e da cabeça de extrusão. Os valores introduzidos para estas condições operatórias encontram-se descritos na Tabela 17.

Tabela 17: Condições operatórias da extrusora.

Variável	Velocidade dos fusos	Temperaturas das zonas						Temperatura da cabeça de extrusão
		Z1	Z2 - Z3	Z4 - Z5	Z6 - Z9	Z10	Z11 - Z12	
Valor	115	180	180	170	180	190	180	170
Unidades	RPM	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C

Para definir as temperaturas para as zonas da extrusora teve-se em conta as temperaturas de processamento referidas na ficha técnica do TPO, todavia, teve-se também que considerar que juntamente com o TPO estava-se a processar fibras naturais, cujo seu processo de degradação inicia-se a temperaturas superiores a 200 °C. A velocidade do fuso selecionada também foi baixa de forma a não produzir taxas de corte elevadas e assim não haver quebra das fibras durante o processamento das folhas compósitas.

De forma, a conseguir obter a espessura pretendida para a folha qua deveria andar por volta dos 700 µm, inseriu-se na linha de extrusão uma calandra hidráulica 180-300 do ano 2000, da marca PERIPLAST.

Esta calandra tinha inicialmente uma zona de 3 rolos de puxo que eram aquecidos por um termostato PIOVAN, para que o extrudido arrefece-se lentamente de forma a não rasgar aquando o estiramento provocado pelos rolos de puxo, uma vez que o TPO utilizado tem uma excelente flexibilidade do material enquanto fundido.

O extrudido expelido pela fiação passa primeiramente pelo meio dos dois rolos inferiores, que se encontravam fechados, e o compactavam a uma espessura de 900 µm e começavam a provocar o seu estiramento. Posteriormente, o extrudido foi feito passar pelo rolo superior que se encontrava aberto de forma a provocar ainda mais o estiramento deste, que acabava por solidificar dando origem à folha.

Para conduzir a folha até à terceira zona da calandra usou-se a segunda zona da calandra, que era composta por um sistema de sete calandras. A folha vinda do último rolo de puxo da primeira zona

da calandra foi feita passar por baixo da primeira calandra e em seguida por cima da segunda e assim sucessivamente até ao fim da segunda zona da calandra.

A terceira zona da calandra era composta por dois rolos de puxo em borracha que auxiliavam o estiramento do filme provocado pelos rolos de puxo da primeira zona da calandra, de forma a obter-se a espessura pretendida para folha.

A folha conduzida pelo sistema de calandras foi então introduzida no meio deste rolo de puxo, que para além de a estirar, a conduzia para fora da calandra onde era recolhida e identificada para posteriormente ser caracterizada. A calandra e toda a montagem da folha nesta encontra-se ilustrada na figura seguinte (Figura 19).

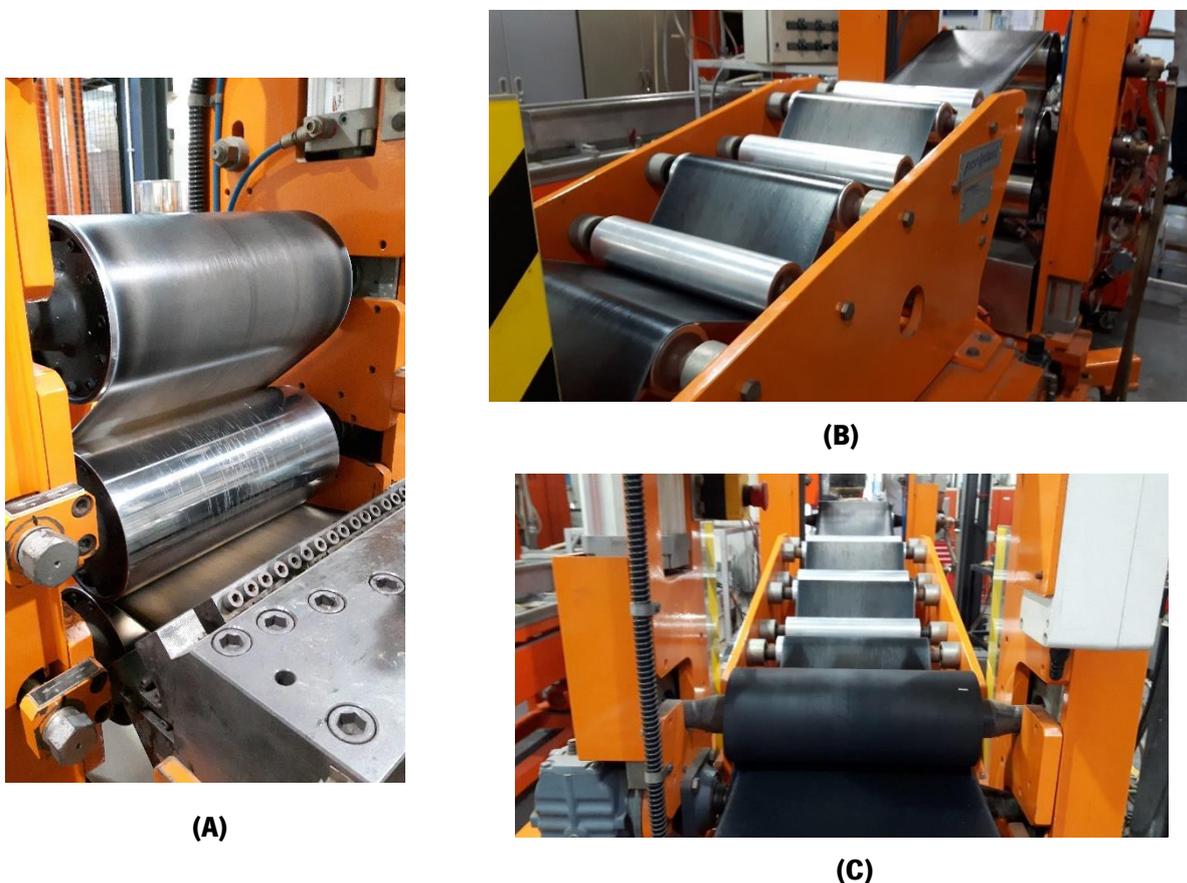


Figura 19: Calandra: (A) primeira zona, (B) segunda zona, (C) terceira zona.

As condições operatórias a ser introduzidas na calandra foram a velocidade dos rolos de puxo e a temperatura da calandra e foram seleccionadas tendo em conta as temperaturas de processamento indicadas pela ficha técnica do TPO. Estas condições operatórias encontram-se indicadas na Tabela 18.

Tabela 18: Condições operatórias da calandra.

Variável	Valor	Unidades
Velocidade de puxo	0.04	m/min
Temperatura da calandra	75	°C

Para além destes equipamentos a linha de extrusão ainda continha um sensor de pressão localizado na cabeça de extrusão que media a pressão que o extrudido exercia à saída da feira. Este sensor de pressão estava ligado a um monitor que nos mostrava a pressão medida pelo sensor. A pressão medida pelo sensor andava sempre entre os 3 e os 7 bar.

O aspeto final da folha compósita de matriz termoplástica e reforçada com fibras naturais encontra-se ilustrado na imagem (Figura 20) seguinte.

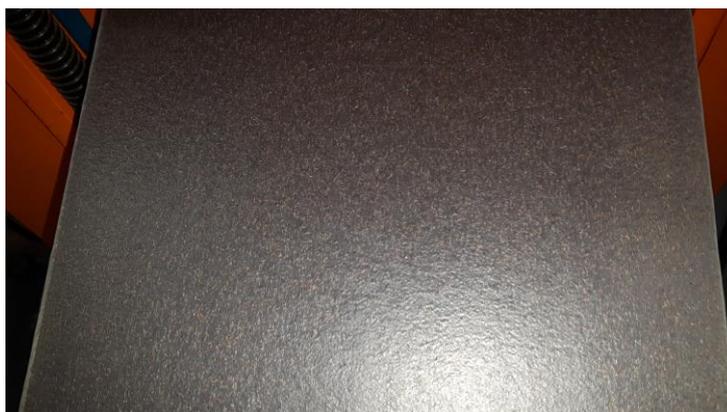


Figura 20: Folha compósita de matriz de TPO e reforçada com fibras de Coco.

Contudo, aquando a realização da extrusão, das amostras com 15% de fibra de comprimentos de 1000 μm , deparou-se com o facto de a fibra se acumular na tremonha, servindo como um “tampão” não deixando que o polímero alimentasse a extrusora criando um filme com defeitos, como poderemos verificar na Figura 21. Assim sendo, as amostras 9 e 21 (Figura 14), que correspondem a 15% de fibra de Sisal e de Coco com comprimentos de 1000 μm , ficaram sem efeito neste plano experimental.



Figura 21: Defeitos apresentados na folha compósita com 15% de Sisal 1000 μm .

Após a extrusão de todas as amostras, estas são recolhidas, enroladas e identificadas, para que pudessem, posteriormente, ser caracterizadas quanto às suas propriedades mecânicas, térmicas, físicas e visuais e ao seu desempenho quando termoformadas.

Esta caracterização encontrar-se-á mais aclarada ao longo do próximo subcapítulo.

3.3 Caracterização das Folhas/Chapas Decorrentes do Processo de Extrusão

Após a recolha de todas as folhas compósitas processadas pelo processo de extrusão, realizaram-se ensaios de caracterização de forma a avaliar o comportamento destas quando submetidas ao processo de termoformação.

A caracterização das folhas compósitas foi dividida em duas metodologias, uma mais direcionada para a caracterização das propriedades e o aspecto visual das folhas compósitas processadas, e outra mais focada na avaliação da sua termoformabilidade.

Assim sendo, na primeira metodologia de caracterização das folhas compósitas, avaliou-se as propriedades mecânicas, através de ensaios de tração mecânica na direção longitudinal e transversal à direção do fluxo. Avaliou-se também as propriedades térmicas e físicas, a partir do ensaio de TGA e através da avaliação do teor de humidade, respetivamente. Ainda dentro desta caracterização e de forma a avaliar a dispersão, distribuição e adesão das fibras naturais nas folhas compósitas, observaram-se as folhas compósitas através da microscopia de campo claro e com a lupa estereoscópica.

Para avaliar a termoformabilidade das folhas compósitas, realizaram-se ensaios de deformação por peso próprio, de modo a descrever os fenómenos que surgem durante o aquecimento e estudou-se a

capacidade de estas reproduzirem os contornos do molde através da deformação por vácuo com um molde fêmea. Apesar de existirem muitos ensaios referidos pela literatura para estudar a termoformabilidade dos materiais, decidiu-se envergar por uma metodologia mais real submetendo as folhas a condições reais das etapas do processo de termoformação.

O procedimento e as condições em que cada ensaio foi realizado encontra-se descrito, nos adjacentes subcapítulos desta dissertação.

3.3.1 Ensaios de Tração

Realizou-se ensaios de tração a todas as folhas produzidas, uma vez que, com este ensaio de caracterização pretendia-se avaliar a influência das fibras naturais no reforço das propriedades mecânicas destas folhas compósitas, tendo em conta a influência do tipo de reforço, o comprimento das fibras de reforço, a percentagem de reforço incorporada na folha.

Os ensaios de tração às folhas compósitas foram realizados segundo a norma ASTM 638-02.

Os provetes para deste ensaio foram extraídos na direção longitudinal e transversal à direção do fluxo de extrusão, onde se cortaram 8 amostras em forma de osso Figura 22 (A) com dimensões de 11,5 por 1,9 cm e com uma secção central de 6 mm, através de um cortante com esta forma e dimensões, e uma prensa pneumática.

Estes provetes foram ensaiados a uma velocidade 50 mm/min num dinamómetro Zwich/ Roell Z 0005, com uma célula de carga de 5 KN e com uma distância entre amarras de 65 mm, à temperatura ambiente. Um ensaio ilustrativo das amostras à tração encontra-se na Figura 22 (B).

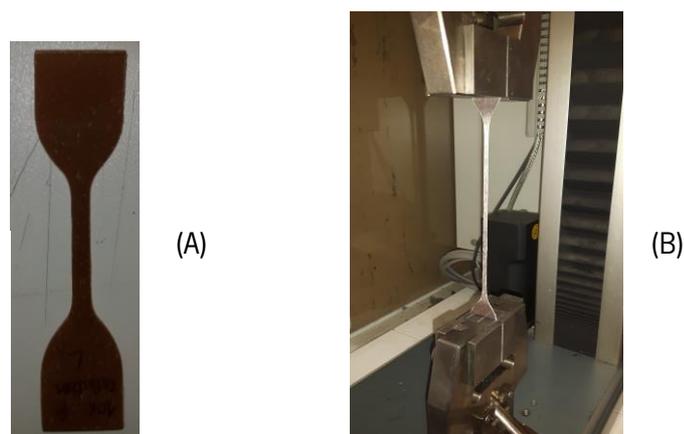


Figura 22: (A) Provetes para ensaio de tração; (B) Ensaios de tração.

3.3.2 Análise à Lupa Estereoscópica

Observaram-se os filmes à lupa estereoscópica de forma a avaliar a dispersão das fibras e o aspeto visual à superfície dos filmes após o processo de extrusão das folhas compósitas, uma vez que, uma má distribuição poderá criar problemas durante o processo de termoformação.

Assim sendo, os filmes foram observados numa lupa estereoscópica *Olympus S2-TH* com uma ampliação de 0,67X e com uma ocular de 1,67X e capturadas através de uma câmara *Leica*.

Foram capturadas imagens nas duas superfícies do filme, de forma a também se perceber se o facto do filme estar em contacto com a calandra, teve ou não algum efeito.

3.3.3 Microscopia de Campo Claro

Após a avaliação da dispersão das fibras ao longo da superfície dos filmes, pretendeu-se também avaliar a dispersão ao longo da espessura dos mesmos. Para tal observou-se os filmes através da microscopia de campo. Para além de avaliar a dispersão das fibras também se avaliou a adesão entre as interfaces da matriz termoplástica e da fibra natural vegetal.

Para a realização deste ensaio teve-se primeiramente que preparar as amostras, ou seja através de um micrótomo *Leitz 14 D1* (Figura 23 (A)), definido para um corte de 20 μm , efetuou-se um corte longitudinal à espessura do filme, removendo assim um filme através de uma faca metálica.

Este filme com auxílio de uma agulha foi colocado entre uma lâmina e uma lamela, *Lab box* e *Detlab*, respetivamente, onde juntamente foi colocado bálsamo do Canadá para conseguir uma imagem translúcida. Após a preparação da amostra esta teve que ficar durante 12 horas sob um peso de 0,540 kg antes de ser observada ao microscópio (Figura 23(B)).

O microscópio utilizado para esta observação foi um *Olympus BH-2* (Figura 23 (C)), e foram captadas imagem com duas objetivas distintas, de 4 e 10X e com uma ocular de 2,5X, através de uma câmara *Leica DFC 280*.



(A)



(B)



(C)

Figura 23: Microscopia de campo claro: (A) micrótomo, (B) amostras, (C) microscópio de transmissão.

3.3.4 Avaliação da Dispersão das FNV nas Folhas Compósita

Atendendo ao facto de através da lupa estereoscópica só conseguir-se visualizar uma pequena porção da dispersão das fibras nas folhas compósitas à superfície, decidiu-se expor uma fração das folhas à luz e retirar uma foto a cada folha.

Uma vez que o pigmento é translúcido quando exposto à luz deixa as fibras visíveis podendo-se avaliar a dispersão e distribuição da fibra ao longo da largura da folha provocado pelo fluxo durante o processo de extrusão.

Uma imagem representativa desta avaliação apresenta-se abaixo, na Figura 24.



Figura 24:ilustração da avaliação da distribuição das FNV.

3.3.5 Avaliação do teor de humidade

A realização deste ensaio, teve como intuito, avaliar o encapsulamento das fibras naturais hidrofílicas por parte do polímero nas folhas compósitas, e conseqüentemente, retirar conclusões acerca da adesão entre reforço e matriz, uma vez que, se as fibras estiverem bem encapsuladas e aderidas ao polímero, as folhas compósitas não devem apresentar humidade, atendendo ao facto do polímero

Para a realização desta avaliação, cortou-se amostras das folhas compósitas com dimensão de 5 por 5 cm, como ilustrado na Figura 27.

Posteriormente estas foram pesados numa balança digital Scansci FX-300i, com um erro associado de 0,001g, de forma a avaliar a massa da amostra com humidade, juntamente também se efetuou a pesagem de cerca de 40 gramas de fibra húmida de coco e de sisal, posteriormente estes foram introduzidos numa estufa *Memert* a 100°C, durante 24 horas.

Anteriormente à extrusão das folhas compósitas, este ensaio foi realizado a 40 g de fibra natural de Sisal e de Coco, seguindo o mesmo procedimento.

Na Figura 25 encontra-se ilustrado a realização do ensaio, mostrando também a diferença entre os filmes compósitos antes e depois de 24 horas na estufa.

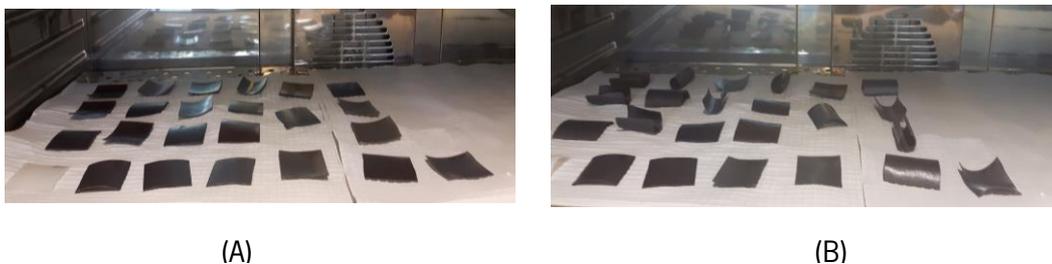


Figura 25: Amostras posicionadas na estufa (A) antes e (B) após ensaio.

Passado este intervalo de tempo, as amostras das folhas foram retiradas da estufa e novamente pesadas, de forma a avaliar a massa das amostras e das fibras isenta de humidade, designada por massa seca.

Posteriormente através da seguinte fórmula (Figura 26), calculou-se o teor de humidade, em percentagem, presente nas folhas compósitas e nas FNV.

$$\% \text{ Teor de Humidade} = \frac{m_{\text{húmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{húmida}}} \times 100$$

Figura 26: Fórmula para o cálculo do Teor de humidade.

3.3.6 TGA

Nesta dissertação, também se realizou um ensaio de TGA a algumas das folhas compósitas extrudidas. A seleção das folhas compósitas para este ensaio, foi baseada nos filmes que apresentaram maior e menor resistência à tração de cada tamanho e tipo de fibra.

Anteriormente ao processo de extrusão das folhas compósitas este ensaio foi efetuado às fibras húmidas de Sisal e de coco de comprimento de 1000 µm, de forma a caracterizar a sua temperatura de degradação e a existência de humidade.

Os filmes selecionados encontram-se representados a seguir, na Tabela 19:

Tabela 19: Filmes selecionados para realizar o ensaio de TGA.

Coco 1000 µm	Sisal 1000 µm	Coco 500 µm	Sisal 500 µm
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> 6% Fibra	<input type="checkbox"/> 2% Fibra	<input type="checkbox"/> 2% Fibra	<input type="checkbox"/> 2% Fibra
<input type="checkbox"/> 10% Fibra	<input type="checkbox"/> 6% Fibra	<input type="checkbox"/> 10% Fibra	<input type="checkbox"/> 15% Fibra

Resolveu-se efetuar estes ensaios às folhas, para avaliar três questões sendo elas:

- Avaliar a quantidade real de fibra nas folhas compósitas;
- Avaliar a temperatura de degradação das FNV e do compósito;
- Avaliar a humidade proveniente nas folhas compósitas e nas FNV.

O equipamento utilizado nesta dissertação para a realização do ensaio de TGA, foi um *TGA Q500*, com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até aos 500°C, com 40 mg/L de oxigénio de fluxo de purga da balança e com 60 mg/L de nitrogénio de fluxo de purga da amostra.

Primeiramente, efetua-se um ensaio sem amostra de forma a tarar o ensaio, em seguida, corta-se um quadrado muito pequeno da folha a avaliar e coloca-se a amostra no cadinho, posteriormente fecha-se o forno e dá-se início ao ensaio.

Após a obtenção da curva de TGA, a medição da temperatura de degradação e percentagens de fibra que cada uma das folhas avaliadas continha foi realizada com auxílio do software *Qseries*.

A percentagens real de fibra calculou-se através da percentagem de perda de massa entre os 200 e os 300 °C no espectro obtido.

3.3.7 Avaliação da Deformação por Peso Próprio a Quente

Para avaliar, os fenómenos que surgem durante a etapa de aquecimento da termoformação, submeteu-se as folhas compósitas a ensaios de deformação por peso próprio, dado que, durante a etapa de aquecimento, é bastante importante que a folha ao ser aquecida não deforme pelo seu próprio peso.

Para tal, projetou-se uma estrutura (Figura 27), de forma a que esta encastre a folha em duas extremidades paralelas e deixasse as outras duas livres para que a folha compósita pudesse deformar por peso próprio. Para além disto, esta estrutura teria que caber numa câmara climática onde a folha pode-se ser aquecida à sua temperatura de enformação, simulando a etapa de aquecimento do processo de termoformação.

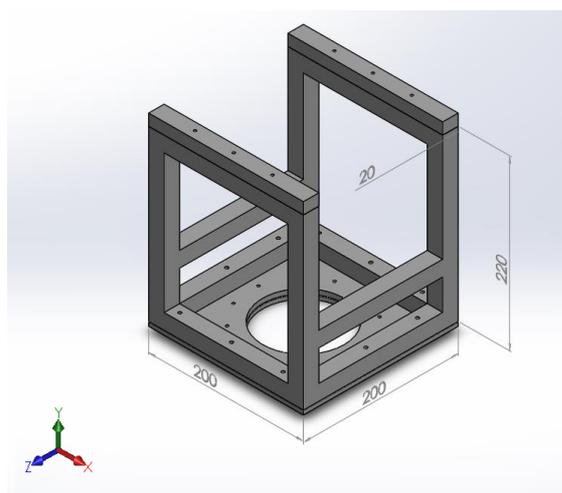


Figura 27: Estrutura projetada para a avaliação da deformação por peso próprio.

As amostras para este ensaio foram cortadas com dimensão de 20 por 20 cm e encastrada, posteriormente, em duas das extremidades da estrutura com parafusos e porcas, como ilustrado na Figura 28 (A).

Quando colocada a amostra na estrutura estas eram introduzidas na câmara climática *Instron* a uma temperatura estável de 185 °C durante 15 min e foi feito um vídeo de cada ensaio, em 4K com uma câmara de filmar *Sony*.

Os vídeos dos ensaios foram posteriormente cortados em frame de 30s em 30s, com auxílio do programa de conversão de vídeo em imagens, o *Adpter*. Através das imagens obtidas anteriormente com ajuda do programa de medição, *Image J*, mediu-se a deformação por peso próprio desde o instante inicial até ao final do ensaio.

Uma ilustração do processo de ensaio encontra-se representadas na Figura 28 (B).



(A)



(B)

Figura 28: (A) Estrutura desenvolvida para o ensaio; (B) Ilustração do ensaio de deformação por peso próprio.

3.3.8 Avaliação da capacidade de Reproduzir os Contornos do Molde

De modo a avaliar a capacidade de reprodução dos contornos do molde das folhas compósitas, realizou-se a termoformação por vacuum com molde fêmea tronco-cônico.

Iniciou-se este processo de termoformação com a colocação da folha na termoformadora encastrada por uma estrutura metálica, em seguida, o forno avança para realizar o aquecimento da folha, com um

forno unifacial, programado com diferentes percentagens de aquecimento em cada zona durante cerca de 45 segundos. As percentagens de aquecimento utilizadas em cada zona encontram-se ilustradas na Figura 29.

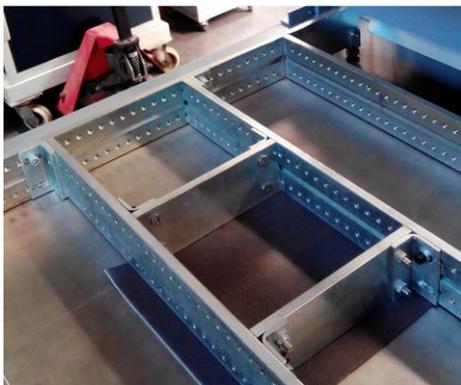


Figura 29: Taxa de aquecimento de cada zona do forno da termoformadora.

Após o aquecimento da folha, o forno recua, o molde fêmea sobe e o vácuo é acionado durante 11 segundos, dando-se a enformação das folhas compósitas. Em seguida liga-se o arrefecimento durante 10 segundos.

Passado este período o arrefecimento é desligado e o vacum também, o molde fêmea desce e a estrutura levanta para remoção da peça termoformada.

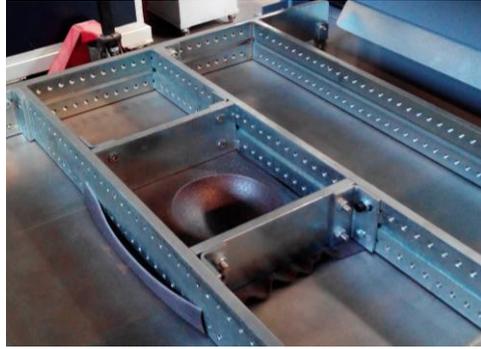
As etapas da enformação das folhas compósitas encontram-se representado nas Figura 30, apresentada em seguida.



(A)



(B)



(C)

Figura 30: Processo de termoformação: (A) Colocação da folha na termoformadora, (B) Folha compósita após a etapa de aquecimento, (C) etapa de enformação da folha compósita.

CAPÍTULO 4

Apresentação e Discussão dos Resultados

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo, encontram-se dividido em oito subcapítulos, onde se encontram ilustrados os resultados obtidos na caracterização realizada às folhas compósitas reforçadas com FNV.

Em cada um destes subcapítulos, para além de expor os resultados obtidos no respetivo ensaio, para cada ponto a avaliar, também se apresenta uma breve discussão sobre estes resultados, fundamentando esta abordagem com passagens encontradas na literatura.

4.1 Caracterização das fibras naturais vegetais

4.1.1 Teor de Humidade

Os resultados da avaliação do teor de humidade presente nas fibras naturais, encontram-se ilustrados, em seguida, na Figura 31.



Figura 31: Resultados obtidos na avaliação do teor de humidade presente nas Fibras de coco e de sisal de comprimento de 1000 μm utilizadas para reforçar os filmes compósitos.

Avaliando a imagem anterior, pode-se concluir que as fibras naturais apresentam claramente humidade, sendo a fibra de sisal a que apresenta maior teor de humidade.

Como já se tinha referido na revisão bibliográfica, este cenário advém do facto de a fibra de sisal apresentar na sua constituição teores de celulose superiores aos encontrados na constituição da fibra de Coco, uma vez que este constituinte confere as fibras um alto carácter hidrofílico.

Assim sendo as fibras naturais apresentaram teores de absorção de 0,09 e 0,06% de humidade, bastante mais baixos aos apresentados anteriormente na Tabela 5 e Tabela 7 para as fibras de Sisal e de Coco, respetivamente.

4.1.2 TGA

Os resultados obtidos na caracterização das fibras de Sisal e de Coco no ensaio de TGA encontram-se ilustradas na imagem Figura 32, apresentada de seguida.

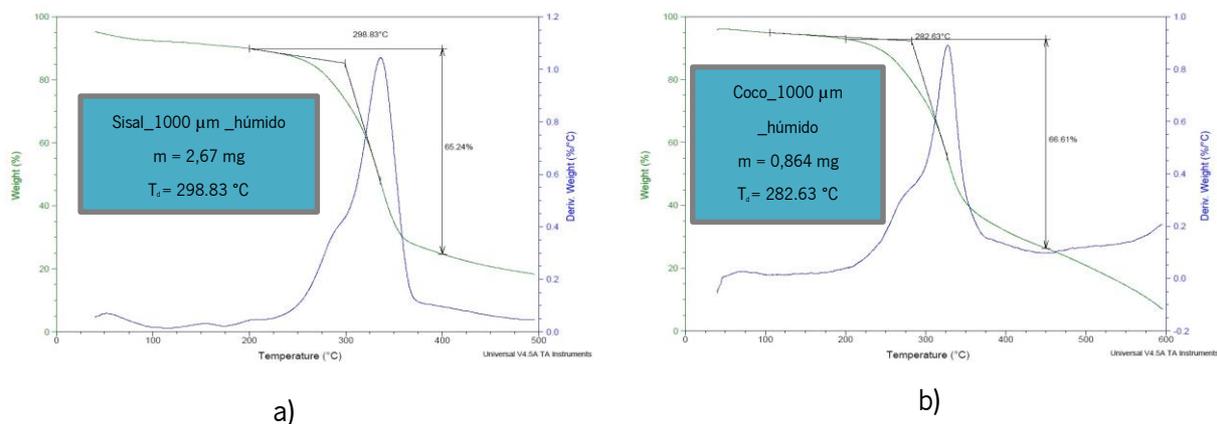


Figura 32: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à Fibra de Sisal (a) e à fibra de Coco (b) com comprimento de 1000 µm húmidas.

Através das curvas apresentadas anteriormente, conseguiu-se verificar que as temperaturas planeadas para o processo de extrusão, não provocaram a degradação das fibras naturais, uma vez que, as fibras de sisal e coco degradam-se a aproximadamente 299 e 283 °C, respetivamente e as temperaturas a utilizar no processo de extrusão rondam os 200°C. Verifica-se também perda de massa entre os 100 e os 150 °C, que poderá corresponder à humidade absorvida pelas fibras.

4.2 Caracterização das folhas compósitas

4.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração realizados permitiram recolher informação quanto a influência da quantidade, tamanho, tipo e orientação das fibras de sisal e coco nas propriedades mecânicas da folha compósita.

O gráfico seguinte (Figura 33), pretende ilustrar, a influência da incorporação de pigmento e de fibras de sisal ou de coco na curva tensão – deformação, tendo como referência a curva tensão-deformação do TPO virgem. Estas curvas são os resultados obtidos, em bruto, nos ensaios de tração das folhas compósitas que se encontram mais próximos da média dos oito ensaios realizados.

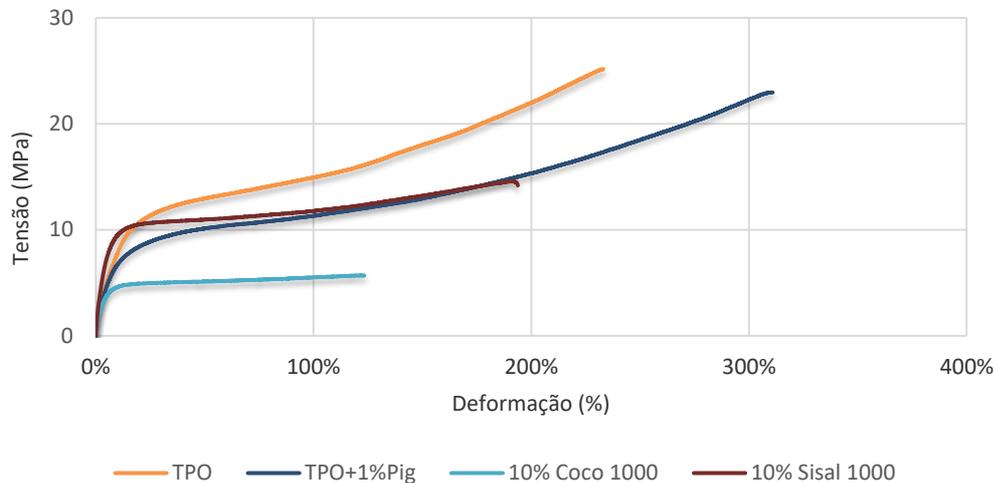


Figura 33: Curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração realizados às folhas compósitas.

Avaliando a Figura anterior, é possível concluir que, a incorporação do pigmento conseguiu diminuir a resistência à tração do material, e aumentar a deformação para valores superiores a 300%.

Tal facto, poderá ser justificado devido ao pigmento ser composto por negro de fumo que atua como uma carga no polímero, justificando o facto de afetar as propriedades mecânicas do material virgem.

A incorporação da fibra de Sisal aumentou a resistência à tração e a regidez do material em relação ao TPO com 1% de pigmento, porém diminuiu a deformação para valores inferiores a 200%. Este comportamento é fundamentado pelo facto da fibra de Sisal estar a reforçar a matriz polimérica.

Contudo com a incorporação das fibras de Coco, conseguiu-se aumentar somente a regidez da folha compósita, uma vez que, a resistência à tração e a deformação diminuíram para valores de 5 MPa e cerca de 120%, respectivamente.

Ao contrário do que ocorreu com a incorporação da fibra de sisal, a incorporação de coco não incrementou as propriedades da matriz TPO, mas sim reduziu-as.

Com o gráfico demonstrado pode-se também concluir que, quer a incorporação do pigmento, quer a incorporação das fibras naturais não afetou a ductilidade do TPO, uma vez que, este material após a incorporação destes componentes apresenta uma curva típica dos materiais dúcteis elastoméricos.

Em seguida, apresenta-se uma avaliação mais detalhada da influência do teor, do tamanho, do tipo e da orientação das fibras naturais na resistência à tração, na deformação à ruptura e no módulo de Young do material compósito.

Assim sendo, nos gráficos apresentados adiante, encontra-se ilustrada a influência do aumento de teor e do tamanho das fibras de Sisal e Coco na resistência à tração das folhas compósitas na direção longitudinal e transversal à direção do fluxo.

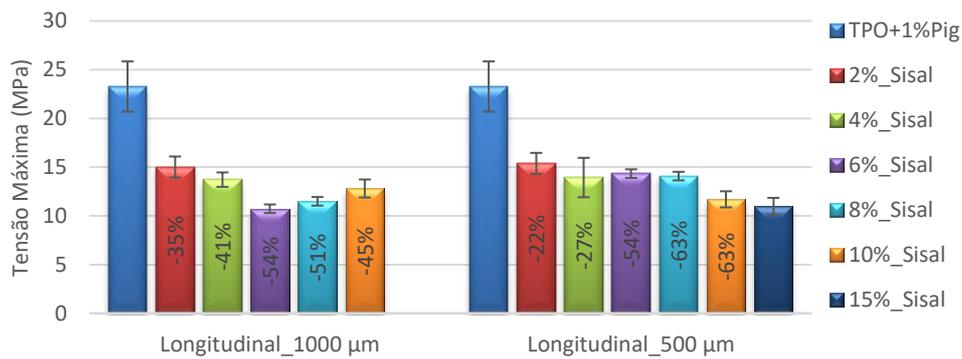


Figura 34: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na resistência à tração das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.

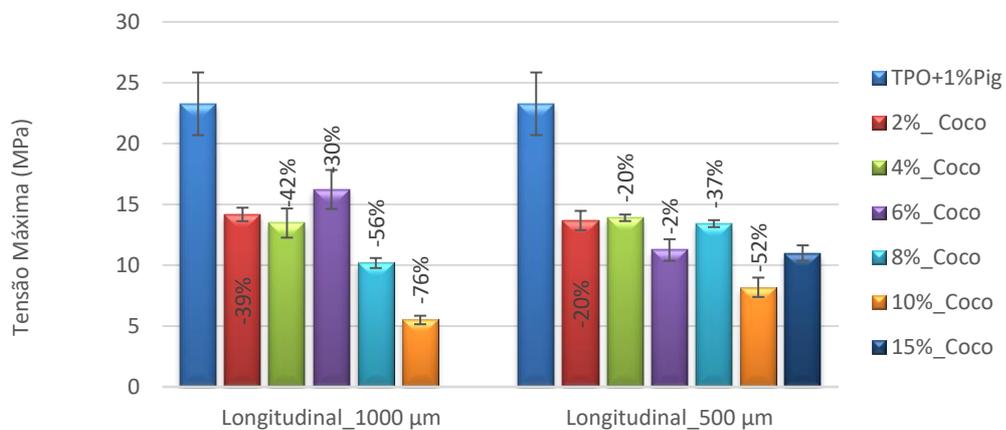


Figura 35: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibras de coco diferentes na resistência à tração das folhas compósitas.

Observando os gráficos apresentados anteriormente (Figura 34 e Figura 35), conclui-se que, com o aumento do teor de fibra natural na matriz polimérica, as folhas compósitas suportam menos 34 a 54% de tensão para a fibra de Sisal e 39 a 76% para a fibra de Coco, do que a sua matriz de TPO com 1 % de pigmento.

Regra geral, se houvesse transferência de esforço entre matriz e reforço, ou seja, adesão entre eles, com o aumento do teor de fibra na composição do compósito, a resistência à tração, ou seja, a tensão máxima, deveria aumentar, uma vez que estamos a aumentar a quantidade de reforço no compósito. (Fonseca & Nachtigall, 2009)

Avaliando, a influência do comprimento da fibra na resistência à tração, concluiu-se que quando o comprimento da fibra diminuí, a resistência à tração aumenta ligeiramente.

Porém como os valores variam 1% entre comprimentos, e tendo em conta os desvios-padrão representados, não é fiável retirar esta conclusão, até porque na literatura tem sido relatado, que a presença de comprimentos menores de fibra produz descontinuidades na matriz polimérica, dificultando a distribuição da força aplicada, reduzindo a resistência à tração dos compósitos (Fonseca & Nachtigall, 2009).

Considerando a influência do tipo de fibra na resistência à tração das folhas compósitas, verificou-se que as folhas compósitas que contêm fibra de Sisal apresentam maior resistência à tração que as folhas com fibra de Coco.

Segundo a literatura, a adição da fibra de Coco provoca uma diminuição na tensão máxima dos compósitos em comparação com a adição de fibra de Sisal, devido ao facto de esta apresentar um teor de celulose mais baixo que a fibra de Sisal, uma vez que este constituinte é o que confere a resistência à fibra. (Fonseca & Nachtigall, 2009).

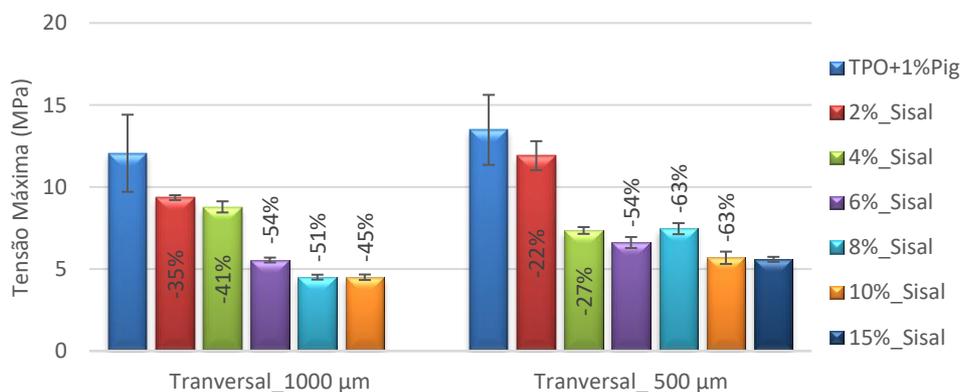


Figura 36: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na resistência à tração das folhas compósitas na direção transversal ao fluxo.

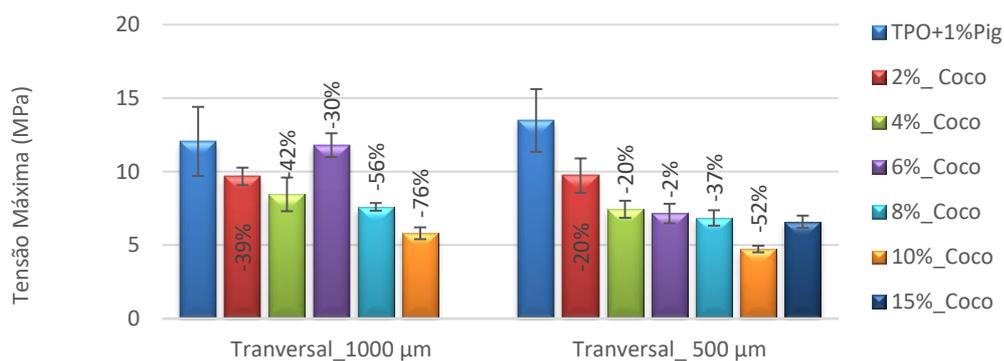


Figura 37: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Coco na resistência à tração das folhas compósitas na direção transversal ao fluxo.

Observando os gráficos (Figura 36 e Figura 37), representativos da influência do aumento do teor e do comprimento das fibras na direção transversal à direção do fluxo, concluiu-se que o cenário descrito para a direção longitudinal, salvo algumas exceções, repete-se.

Assim sendo, verificou-se que tanto as fibras de coco como as fibras de Sisal encontram-se maioritariamente orientadas na direção longitudinal à direção do fluxo, o que justifica a obtenção de tensões máximas superiores na direção longitudinal do que na direção transversal, para a qual se obteve uma redução de cerca de 5 MPa no valor de tensão máxima.

Contudo também existem fibras orientadas na direção contrária à direção do fluxo de extrusão, ou seja, na direção transversal, uma vez que as tensões máximas apresentaram valores inferiores à tensão máxima obtida para a matriz de TPO com 1 % pigmento.

Ao avaliar a tensão máxima da matriz de TPO com 1 % de pigmento nas duas direções, também se verificou que o pigmento também se encontra maioritariamente na direção longitudinal à direção do fluxo, uma vez que, da direção longitudinal para a direção transversal baixou cerca de 10 MPa o valor da tensão máxima.

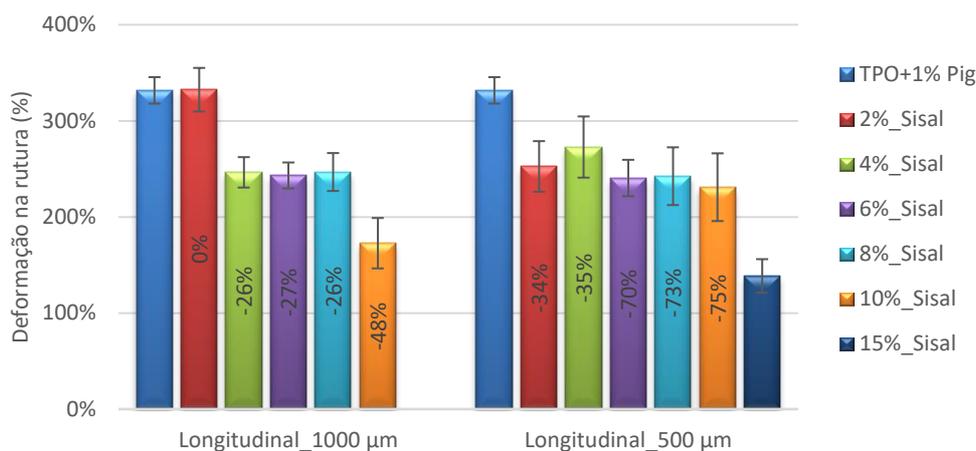


Figura 38: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de sisal na deformação das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.

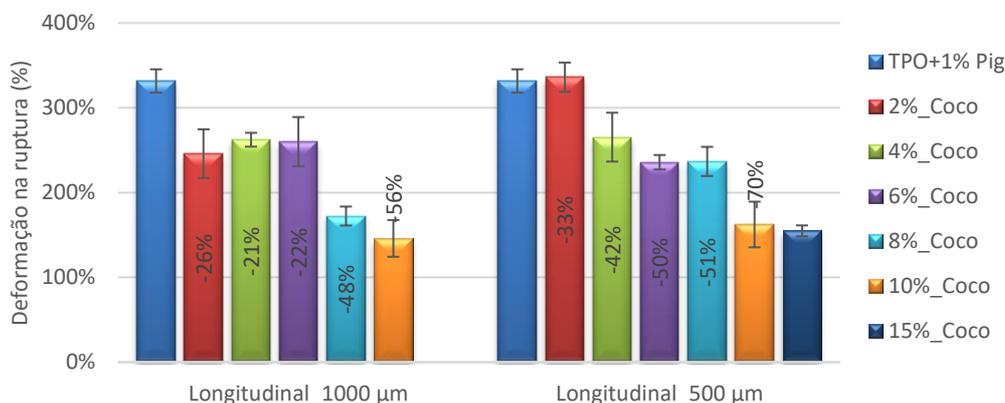


Figura 39: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibra de coco diferentes na deformação das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.

Avaliando, o efeito do aumento do teor de fibra de Sisal e de Coco, na capacidade de deformação das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo (Figura 38 e Figura 39, respetivamente), concluiu-se que quanto maior for a quantidade de fibra, menor é a capacidade de deformação das folhas compósitas. A capacidade de deformação com aumento do teor de fibra reduz entre 0 a 58% para a fibra de sisal e entre 13 a 74% para a fibra de Coco.

Comparando a capacidade de deformação com diferentes comprimentos de fibra, verificou-se que para o comprimento menor existe uma tendência para aumentar a deformação. Este cenário vem comprovar, o que se encontrou descrito na literatura, quanto maior o comprimento da fibra menor descontinuidades existem entre fibra e matriz, promovendo a resistência do compósito e consequentemente a diminuição da capacidade de deformação.

Atendendo à influência do tipo de fibra na capacidade de deformação das folhas compósitas, concluiu-se que, as fibras de coco apresentam menor deformação que as fibras de sisal, porém esta diminuição não é muito significativa e tendo em conta os desvios padrões apresentados, não permite retirar conclusões confiáveis.

Contudo, como já mencionado neste relatório, as fibras de Coco apresentam mais lignina que as fibras de Sisal, e este componente das fibras naturais, apresenta efeitos na deformação de rotura, devido ao facto de ser totalmente amorfo, assim sendo o cenário mencionado acima não é o fundamentado pela literatura.

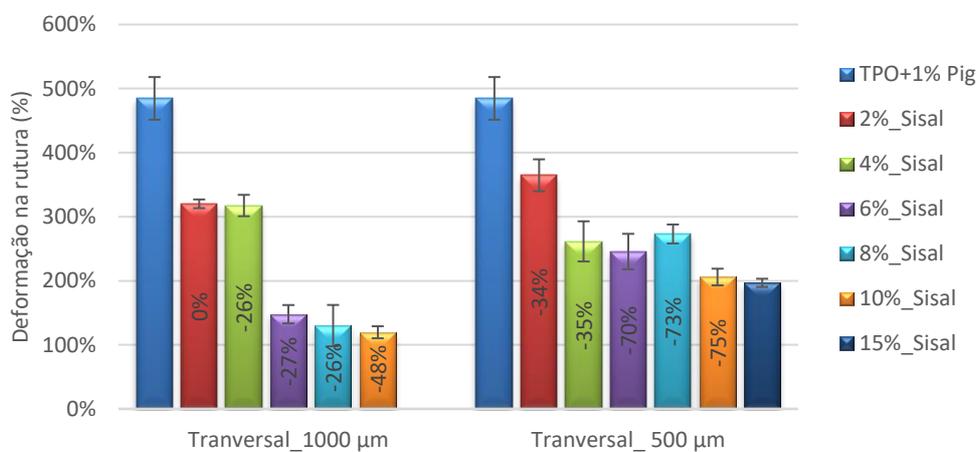


Figura 40: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal na deformação das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.

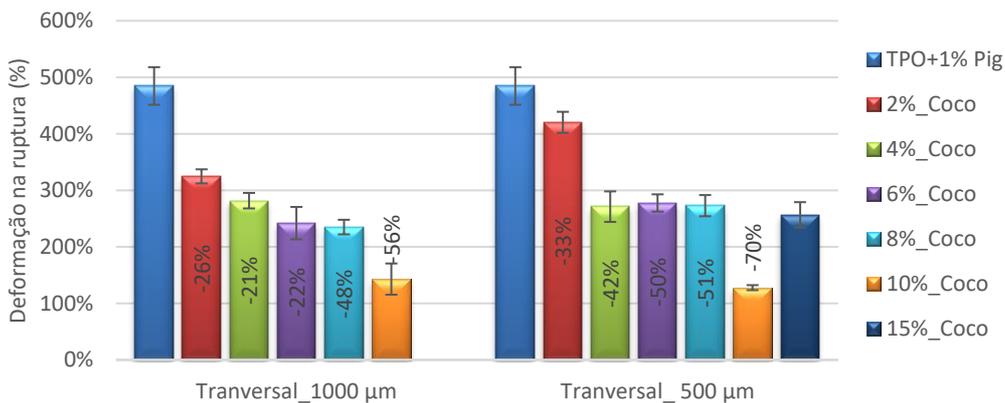


Figura 41: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de coco na deformação das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.

Observando os gráficos correspondentes aos resultados obtidos para as folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo (Figura 40 e Figura 41), obteve-se maiores deformações na direção

transversal do que na direção longitudinal, devido ao facto de as fibras se encontrarem orientadas maioritariamente na direção do fluxo de extrusão, diminuindo a deformação nesta direção.

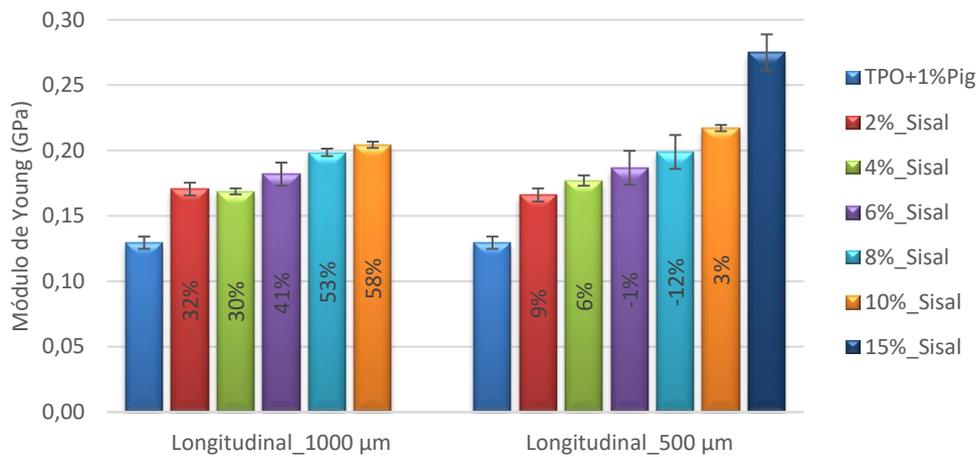


Figura 42: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal no módulo de Young das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.

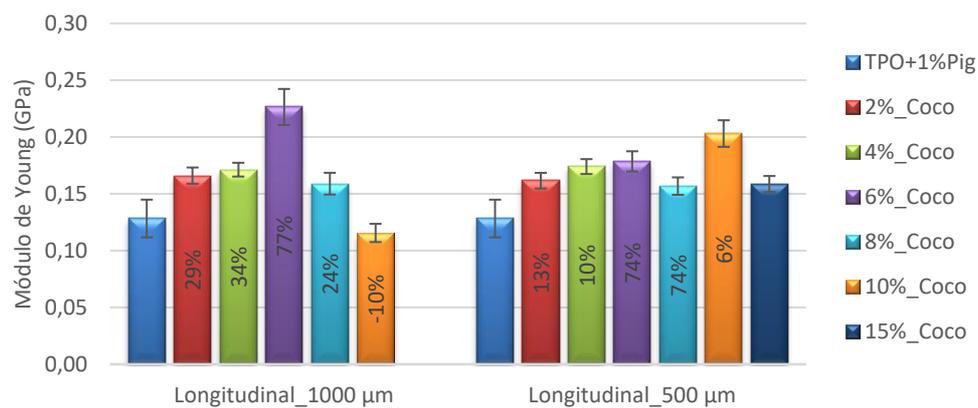


Figura 43: Influência da incorporação de teores e comprimentos de fibra de Coco diferentes no módulo de Young das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo.

Quanto à influência da quantidade e comprimento das fibras no módulo de young das folhas compósitas na direção longitudinal à direção do fluxo (Figura 42 e Figura 43), concluiu-se que existe uma tendência para o aumento da rigidez com o aumento da quantidade de fibra incorporada na composição da folha compósita. O módulo de Young com o incremento da quantidade de fibra no compósito consegue aumentar entre 28 a 112% com reforço de fibra de sisal e entre 22 a 74 % com reforço de fibra de Coco, em relação ao TPO com 1% de pigmento.

Atendendo à comparação de comprimentos diferentes para o mesmo tipo de fibra, verificou-se que existia uma tendência para o incremento do módulo de Young com a diminuição do comprimento da fibra, ou seja, aumenta-se a rigidez da folha compósita.

Acerca da influência do tipo de fibra no módulo de Young, verificou-se que as folhas compósitas reforçadas com fibras de coco obtêm módulos menores do que quando reforçadas com fibras de sisal.

Contudo, este cenário pode ser justificado, pelo facto de as fibras de coco apresentarem, na sua composição, menores percentagens de hemicelulose do que as fibras de sisal e na literatura se encontrar descrito, que a hemicelulose é o constituinte das fibras naturais que influencia o módulo de Young. (Albinante et al., 2012)

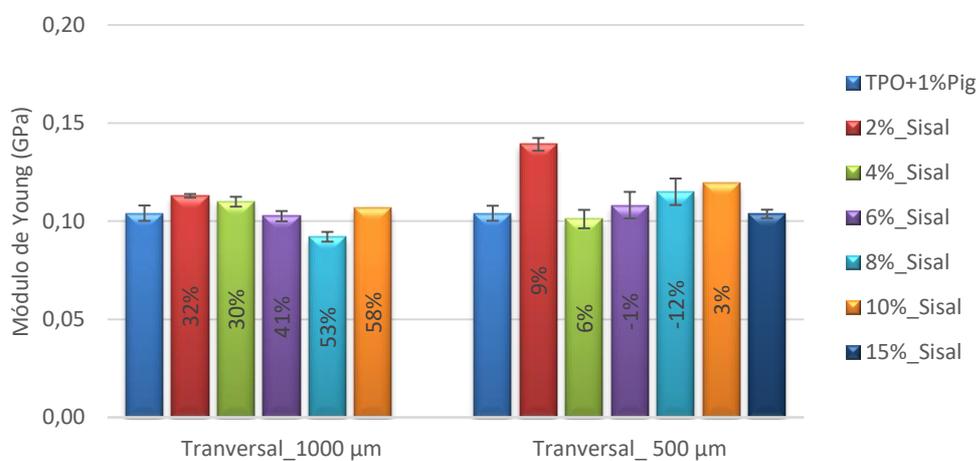


Figura 44: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibra de Sisal no módulo de young das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.

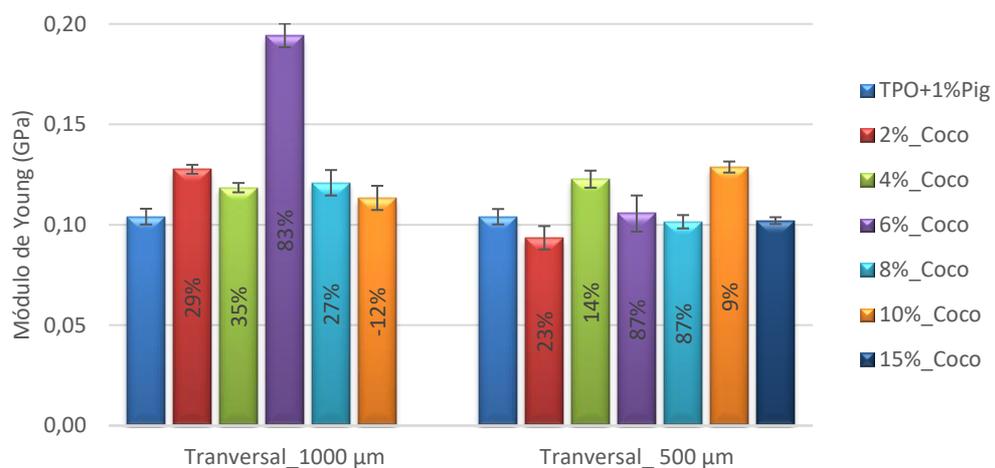


Figura 45: Influência da incorporação de teores e comprimentos diferentes de fibras de coco no módulo de young das folhas compósitas na direção transversal à direção do fluxo.

Como era de esperar, atendendo aos resultados obtidos anteriormente, os valores referentes ao módulo de Young na direção transversal à direção do fluxo (Figura 44 e Figura 45) são menores do que os valores exibidos para a direção longitudinal à direção do fluxo, apresentando uma diminuição de 0,10 GPa entre direções.

Foi também perceptível que na direção transversal, a rigidez das folhas compósitas com diferentes teores de fibra não se afastou muito do valor obtido para a rigidez da sua matriz de TPO com 1% de pigmento, ou seja, andaram sempre a rondar os 0,10 GPa.

Após a análise e discussão destes resultados, concluiu-se que ao se incorporar quer as fibras de sisal quer as fibras de coco, nas matrizes das folhas compósitas, estas não incrementam as propriedades mecânicas da matriz, mas reduzem-nas, ou seja, tornaram-nas menos resistentes, mais rígidas e consequentemente com uma menor capacidade de deformação.

Tal cenário, poderá ser justificado, talvez devido ao facto do tamanho de fibra utilizado estar próximo do tamanho crítico destas fibras e assim, não atuar como reforço.

Para concluir, apesar dos filmes apresentarem características frágeis, este ainda apresenta alguma capacidade de deformação, o que não impede de estes serem termoformados, desde que a geometria não apresente percentagens de deformação, superiores a 150%.

Também podemos concluir que, com a incorporação das fibras a capacidade de deformação diminui para metade quando comparada com o TPO com 1% de pigmento, porém com o incremento da quantidade e do comprimento das fibras a capacidade de deformação não varia muito entre as folhas compósitas.

Caso o objetivo seja a termoformação e a estética do produto final e não, o facto de obter boas propriedades mecânicas, talvez seja conveniente não utilizar o agente de acoplamento.

4.2.2 Ensaio de Lupa Estereoscópica

Neste subcapítulo, iram ser apresentadas as imagens obtidas na visualização das folhas compósitas extrudidas, à lupa estereoscópica.

Realizou-se esta observação de forma a avaliar a dispersão das fibras e o aspecto visual à superfície da folha extrudida. Foram observadas as duas faces da folha compósita, sendo a face designada por verso, a que não esteve sempre em contacto com os rolos da calandra.

Nas tabelas apresentadas no Anexo II encontram-se todas as imagens capturadas às amostras extrudidas com fibra de Coco e fibra de sisal de comprimentos 1000 e 500 μ m.

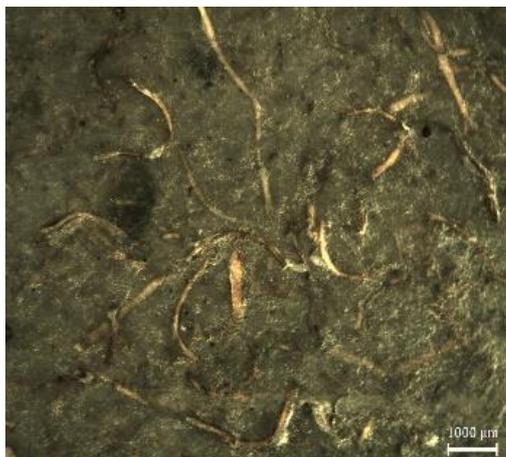
Através desta visualização com lupa, pode-se concluir que a região que não fica em contacto com as calandras apresenta mais rugosidade, podendo este facto ser justificado pelo facto de a folha não estar constantemente em contacto com a calandra, provocando o seu arrefecimento.

Por este motivo, o polímero relaxa da pressão exercida à saída da fieira e contrai ao arrefecer, porém as fibras não contraem, provocando estes vincos à superfície. Na superfície contrária que entra em contacto com a calandra o relaxamento das moléculas é impedido pelo arrefecimento mais lento e o aspecto visual é menos rugoso.

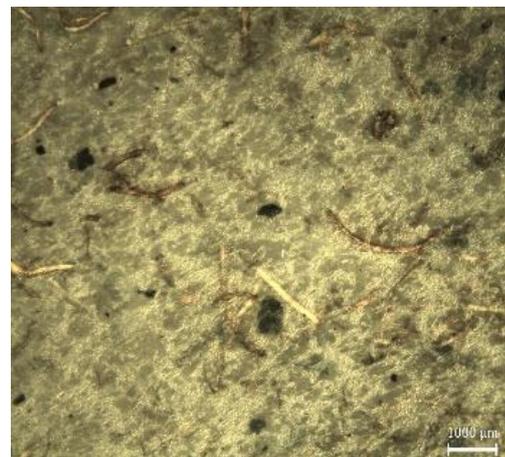
É perceptível também umas zonas esbranquiçadas nas imagens apresentadas, estas representam bolhas produzidas pela humidade contida nas fibras naturais que evapora e pelo facto de o polímero não ser poroso, este vapor não tem como se expelir para a atmosfera, criando, assim, bolhas que ao passaram pela fieira são esmagadas e rebentam. Porém, como uma das superfícies permanece em contacto com a calandra, consegue suavizar as bolhas e conseqüentemente, que estas sejam menos visíveis, porém do lado em que a folha não passa por esta calandra ficando mais evidenciadas.

É também de notar que com o aumento da quantidade de fibra na chapa existe uma tendência para a superfície se encontrar mais danificada, devido à humidade, sendo a folha com 6% de fibra, que demonstra estar mais danificada, como se pode observar na Tabela 20.

Tabela 20: Imagens obtidas pela observação das folhas compostas com 6% de fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.



TPO + 6% (w/w) Fibra

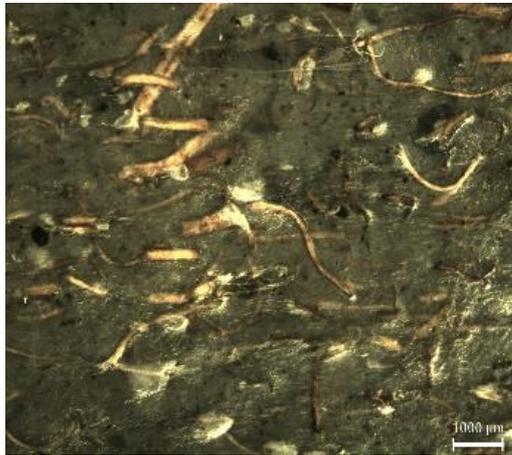


TPO + 6% (w/w) Fibra - Verso

A partir do filme com 4% de fibra é visível que algumas fibras estão sobrepostas na superfície da folha, não apresentado um bom encapsulamento por parte do polímero, ficando mais propensas a

absorver humidade, uma vez que não estão revestidas pelo polímero, que é um material hidrofóbico, ou seja, que repela a água invés de a absorver. Este afloramento das fibras pode ser visível na Tabela 21.

Tabela 21: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 10% de fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.



TPO + 10% (w/w) Fibra



TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso

Observando as imagens referentes às folhas com fibras de coco de 500 μm , verificou-se claramente que o tamanho das fibras é bastante mais pequeno .

Comparando as folhas com comprimentos de fibra de Coco maiores com as com menor comprimentos de fibra, verifica-se que estas últimas, apresentam mais defeitos à superfície, pelo facto de as fibras de 500 μm , absorveram a humidade ambiente mais rapidamente.

Ao contrário das folhas com fibras de comprimento de 1000 μm , as folhas com fibras de 500 μm apresentam, menos zonas esbranquiçadas, quando o teor mássico de fibra de coco é superior a 10%, sendo, as folhas com 6 e 8% de teor mássico de fibra os que apresentam mais defeitos à superfície (Tabela 22 e Tabela 23).

Também nas imagens referentes às folhas com fibras de coco é visível uns pontos negros que correspondem à casca de coco que não se conseguiu com a peneiração separar das fibras, ou seja, podendo assim se concluir que para além das fibras de coco incorporaram-se cascas nas folhas compósitas, que criam pontos frágeis nas folhas.

Tabela 22:imagens obtidas na observação das folhas compósitas com 6% fibra de Coco com comprimento de 500 µm à lupa estereoscópica.

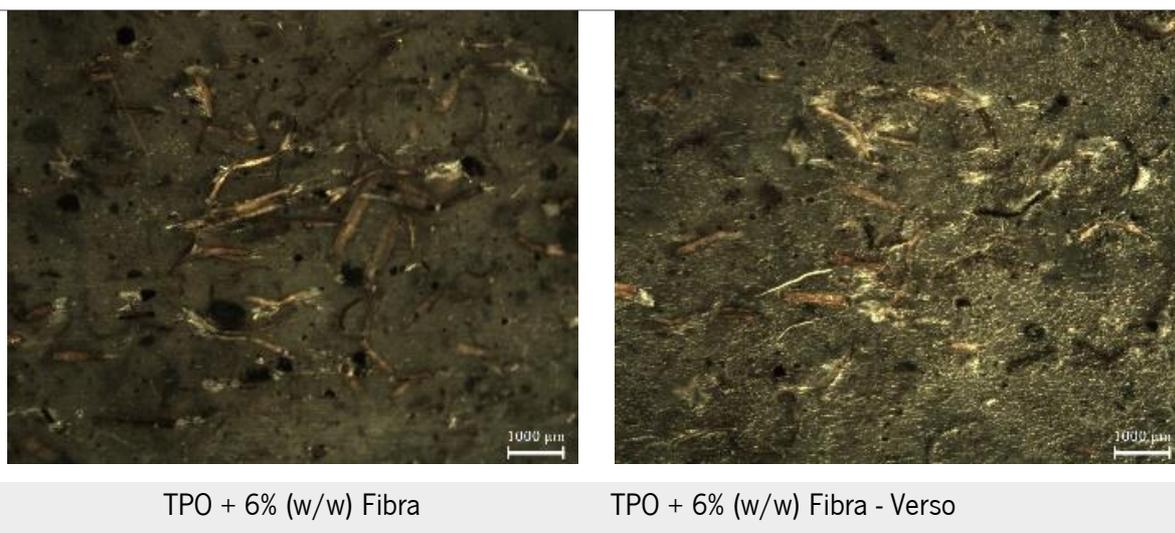
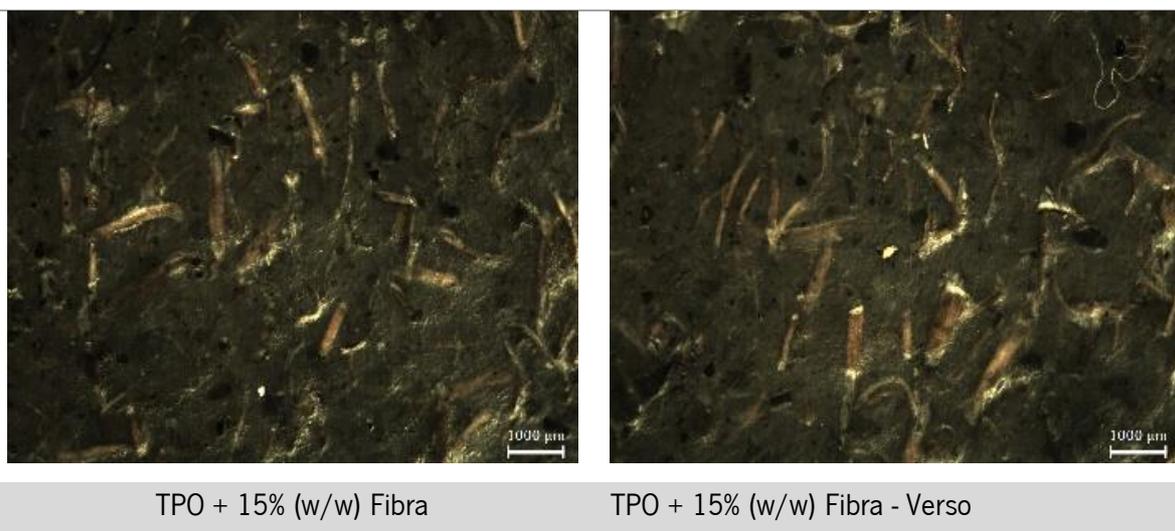


Tabela 23:imagens obtidas na observação das folhas compósitas com 15% fibra de Coco com comprimento de 500 µm à lupa estereoscópica.

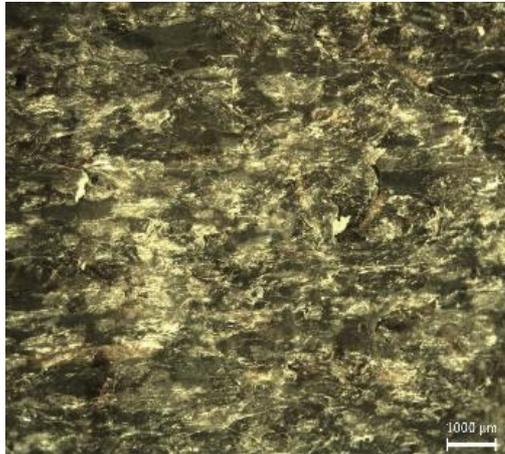


Examinando agora as imagens obtidas para as folhas com fibras de sisal com comprimento de 1000 µm, conclui-se que as fibras de sisal em comparação às fibras de coco, absorvem muito mais humidade, uma vez que as folhas que contêm fibra de sisal apresentam uma superfície bastante mais danificada que as folhas reforçadas fibra de coco.

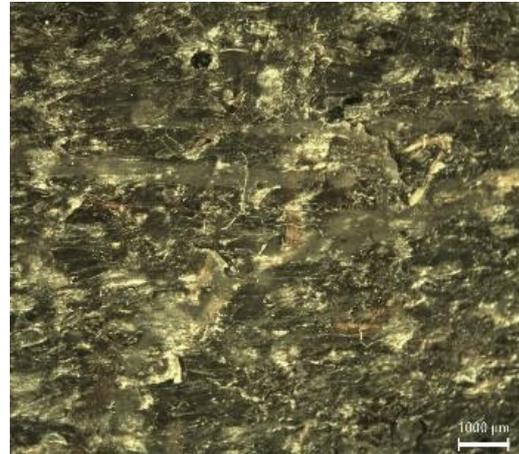
É claramente visível que com o aumento do teor mássico de fibra incorporado nas folhas, mais danificada a superfície se apresenta. Na folha com 10% de teor mássico de fibra de sisal, a superfície encontra-se tão danificada, que poucas diferenças existem entre a face que se encontrou em contacto constante com a calandra e o seu verso, como se pode verificar na Tabela 24.

Relembrando que, esta folha compósita foi a última que se conseguiu extrudir sem que a tremonha ficasse obstruída com a formulação. Como a fibra de sisal é tão leve, esta impedia que a tremonha alimentasse o fuso com TPO, não permitindo a extrusão da folha compósita.

Tabela 24: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 10% fibras de Sisal com comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.



TPO + 10% (w/w) Fibra



TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso

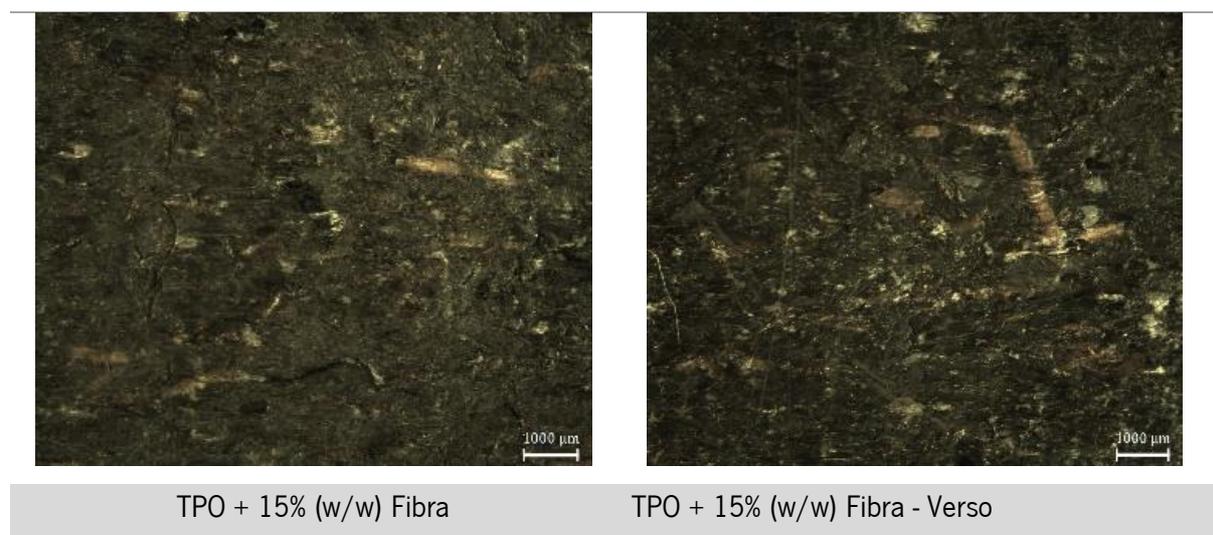
Apesar de não ser tão visível, as fibras de sisal também se encontram sobrepostas à superfície, e consequentemente mal encapsuladas pelo polímero, sendo este facto mais perceptível nos filmes com maiores quantidades de fibras de sisal.

Analisando, as imagens referentes às folhas compósitas com fibra de sisal de 500 μm , é possível verificar tal como nas outras folhas compósitas que quanto maior o teor de fibra incorporada na folha compósita mais danificada a sua superfície se encontra, como se pode verificar na Tabela 25.

Tal como as fibras de coco, as fibras de sisal de 500 μm , por apresentar um tamanho menor, são mais propensas a absorver humidade, provocando mais defeitos na superfície.

Porém os defeitos nas folhas compósitas com fibras de sisal são muito mais evidentes que os defeitos retratados nas folhas com fibras de coco.

Tabela 25: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com 15% fibras de Sisal com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.



Este cenário advém do facto das fibras de sisal apresentarem na sua composição maior teor de celulose que as fibras de coco, componente este responsável pela absorção de humidade, fazendo com que estas absorvam a humidade do meio mais rapidamente que as fibras de coco. E, uma vez que, as fibras de sisal são menos densas, obstruíram a tremonha e impediram a alimentação do TPO, tendo que ser alimentadas lentamente, fazendo com que as fibras ficassem mais tempo expostas à humidade presente no ambiente circundante delas, absorvendo-a.

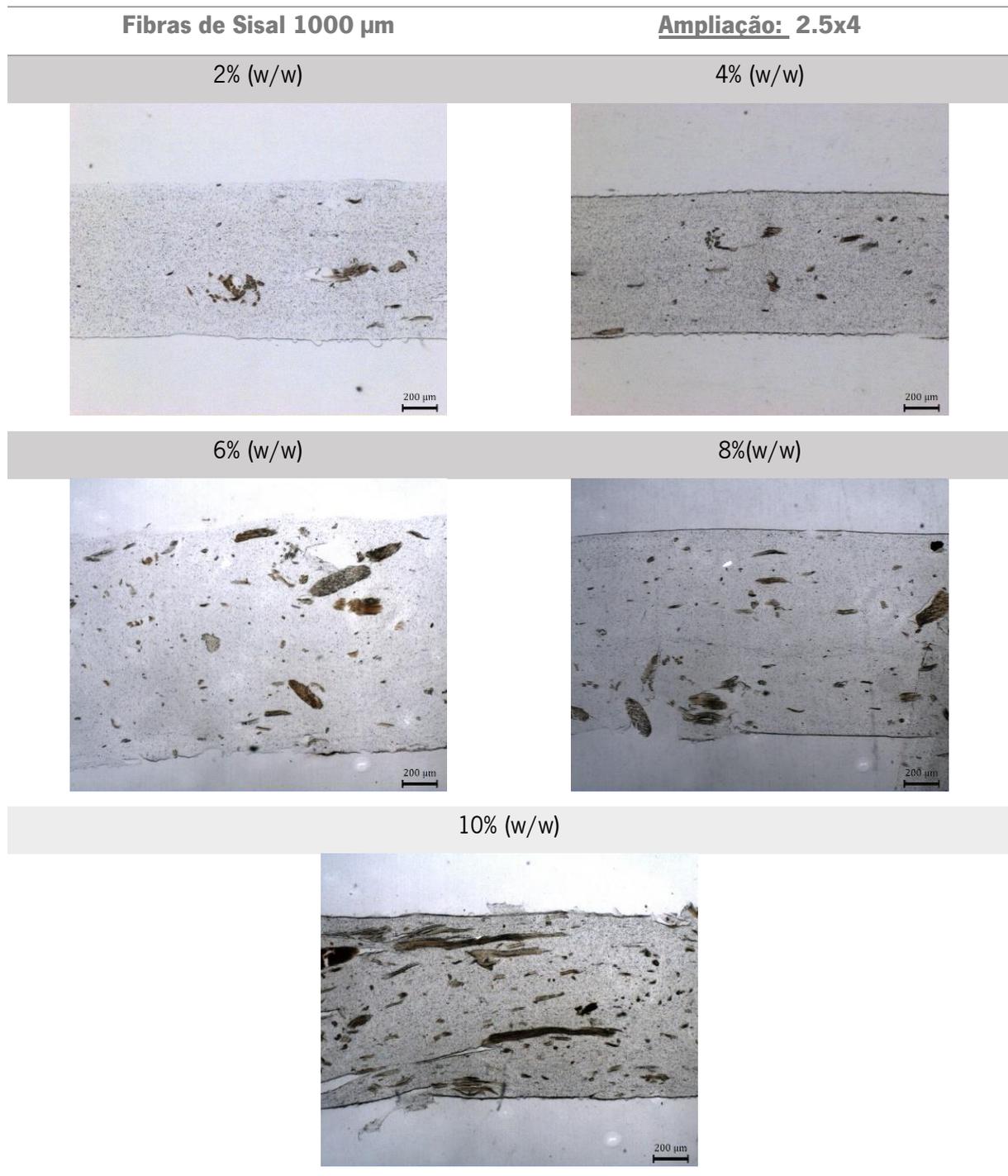
Com a observação destas folhas compósitas, pode-se concluir que as fibras não se encontram bem encapsuladas pela matriz polimérica, ficando muito mais propensas a absorver humidade, influenciando negativamente a performance do filme quando termoformado.

4.2.3 Microscopia de Campo Claro

Com a observação das folhas ao microscópio, pretendia-se retirar conclusões acerca da adesão entre as fibras naturais e a matriz polimérica, da dispersão das fibras e do pigmento ao longo da espessura das folhas compósitas e também da orientação fornecida as fibras durante o processo de extrusão.

Assim sendo, na tabela seguinte (Tabela 26), encontra-se as imagens obtidas para as folhas compósitas com fibra de sisal de comprimento de 1000 μm e com teores de fibra diferentes.

Tabela 26: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de Sisal de comprimento de 1000 μm com ampliação de 4x.



Avaliando as imagens anteriores, pôde-se concluir que com o aumento do teor de fibra na folha compósita, esta apresenta uma maior quantidade de fibrilas ao longo da sua espessura, conclui-se também que as fibrilas, apresentam alguma tendência a deslocar-se para as periferias do filme.

Verifica-se também que as fibras de sisal se separam em microfibrilas aquando o processo de extrusão, provocando uma melhor dispersão ao longo da espessura das folhas compósitas.

O pigmento encontra-se bem disperso ao longo da espessura do filme, porém apresenta alguns aglomerados, mas nada relevante que possa por em causa o desempenho do filme.

A adesão existente entre as fibras de sisal e a matriz polimérica é razoável, apesar de nas imagens se verificar rasgos nos filmes provocados pelas fibras. Estes rasgos são provocados pelo corte das folhas compósitas com o micrótomo, devido á rigidez da fibra em comparação com a maciez da matriz.

A Figura 46, representa de uma forma facilmente visível os rasgos no filme e as fibras no interior deste rasgo, garantindo que este foi provocado por essas mesmas fibras.

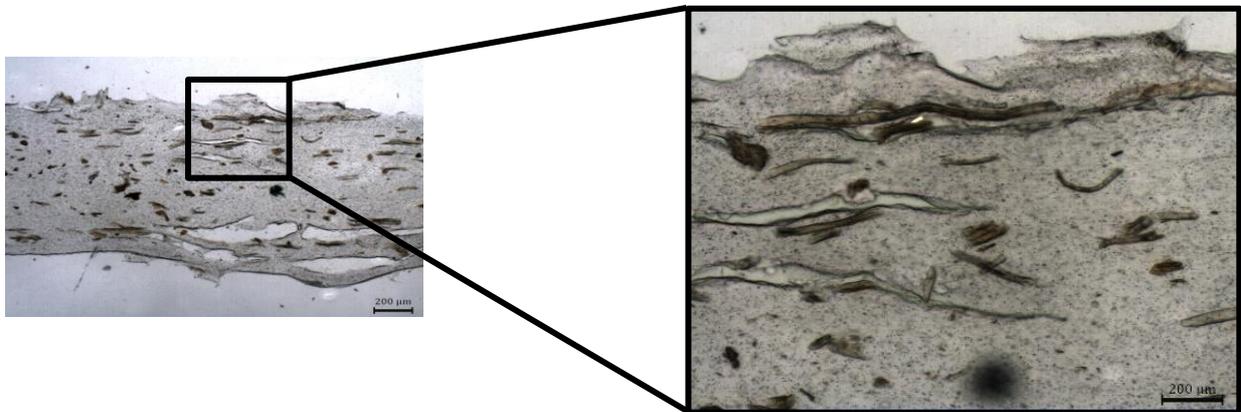


Figura 46: Visualização da folha compósita com 10% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

As fibras encontram orientadas maioritariamente na direção do fluxo de extrusão, porém existem algumas orientadas transversalmente a essa direção, uma vez que, é visível núcleos perfeitos das microfibrilas da fibra de sisal, estes núcleos podem-se ser visíveis na Figura 47, apresentada em seguida.

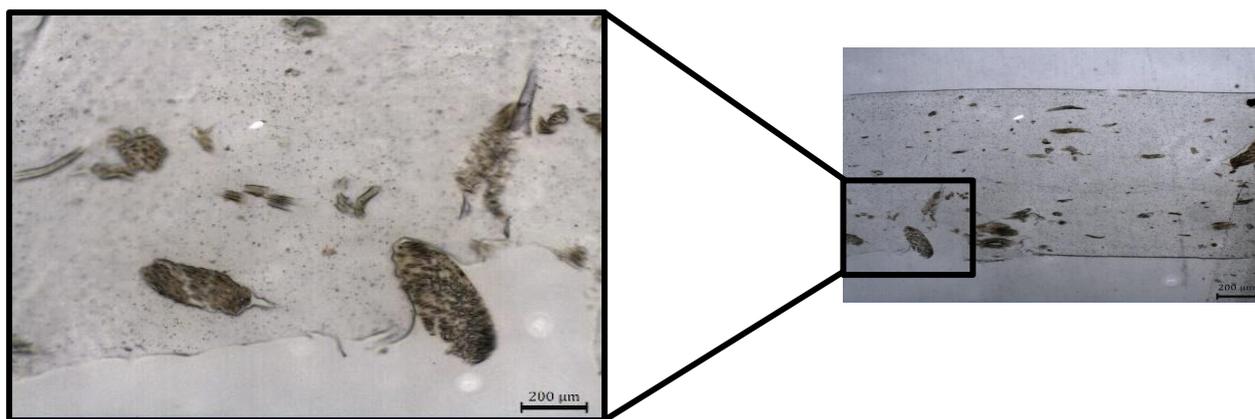


Figura 47: Visualização da folha compósita com 8% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

Na Tabela 27, encontram-se as imagens referentes às folhas compósitas com fibra de Sisal com comprimento de 500 μm .

Da folha compósita com 2% em massa de fibra até à folha compósita com 8%, nota-se um ligeiro aumento da quantidade das fibras ao longo da espessura. Na folha com 15% em massa de fibra também é perceptível o abrupto aumento em comparação com as imagens das folhas anteriores, porém na folha com 10% de fibra não transparece o aumento da quantidade de fibra.

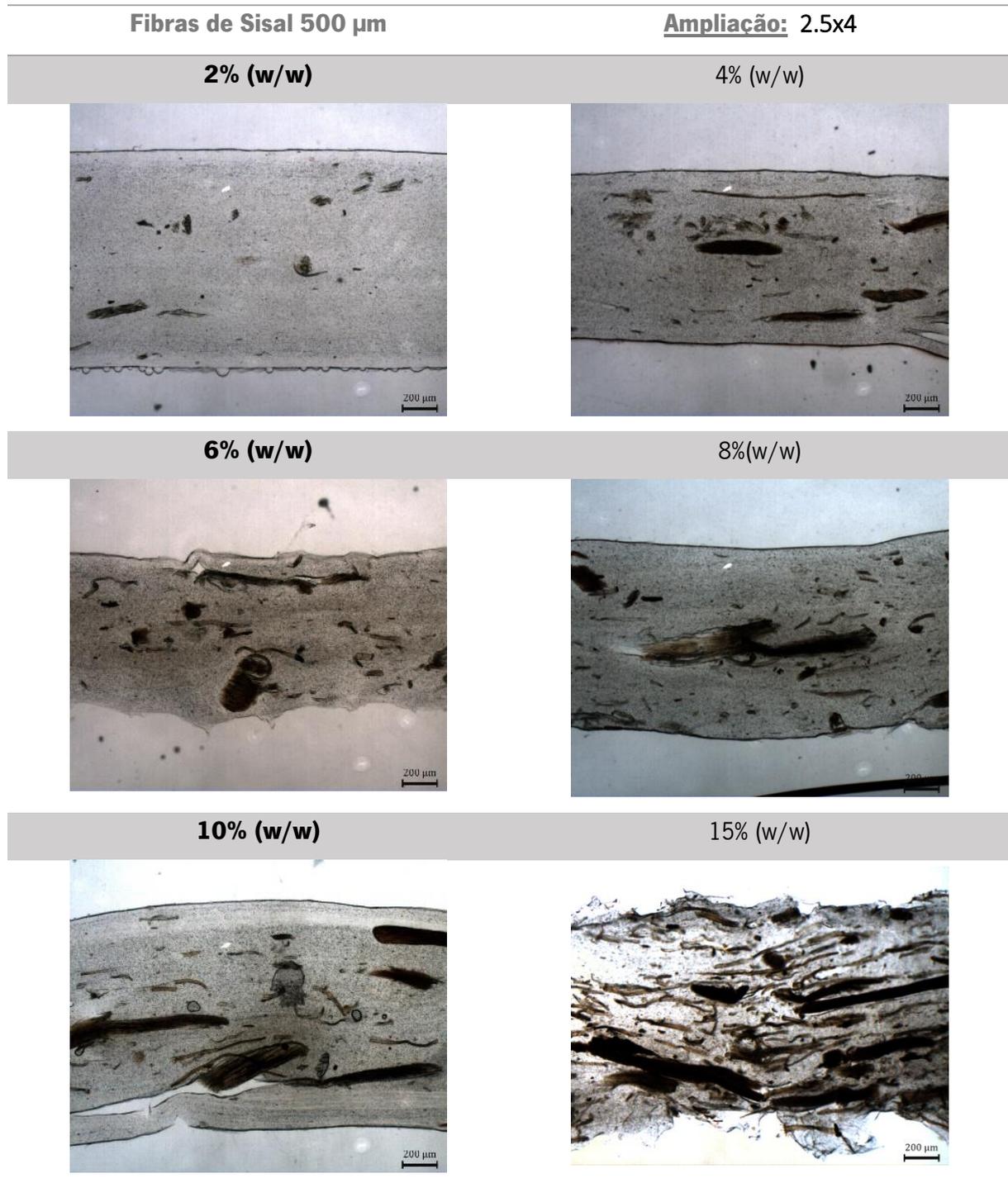
O pigmento apresenta nas maiorias das imagens uma boa dispersão e distribuição, contudo nas imagens referentes à quantidade de fibra em massa de 2 e 10%, o pigmento encontra-se mais concentrado no centro do que nas periferias do filme.

As fibras com tamanho menor, têm maior tendência a desfibrilar e assim recobrir melhor toda a espessura do filme compósito. Foi possível verificar que as fibras incorporadas nestas folhas compósitas se encontram orientadas na sua maioria na direção do fluxo, uma vez que não foi visível núcleos.

As fibras de sisal apresentam uma adesão estável com o polímero pois continuam a rasgar o filme ao cortar as folhas compósitas no micrótomo, como é visível, na Figura 48.

Na imagem da folha compósita com 15% em massa de fibra, as fibras apresentam uma coloração mais acastanhada do que as fibras das outras folhas compósitas observadas, o que poderá significar a degradação das fibras devido às elevadas taxas de corte, provocadas pelo elevado teor de fibra de sisal incorporado. Este facto encontra-se ampliado na Figura 49, apresentada a seguir.

Tabela 27:Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de Sisal de comprimento de 500 μm com ampliação de 4x.



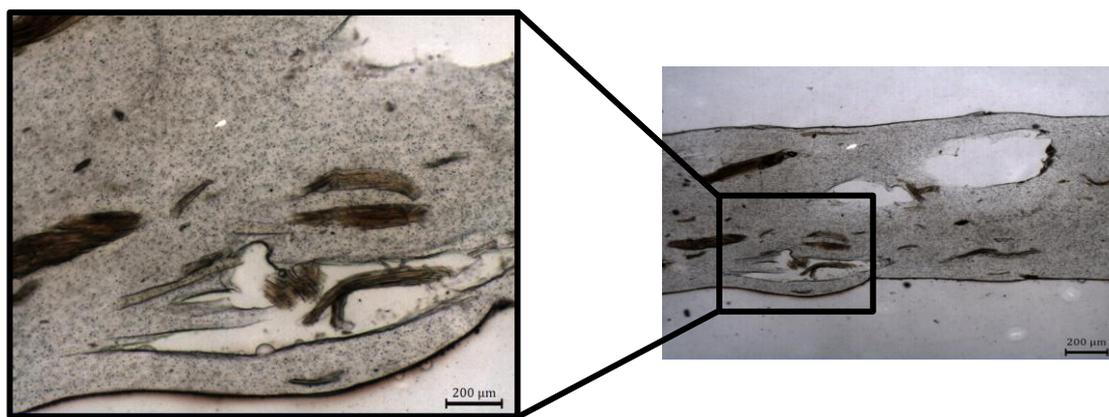


Figura 48: Visualização da folha compósita com 4% (w/w) fibra de coco de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

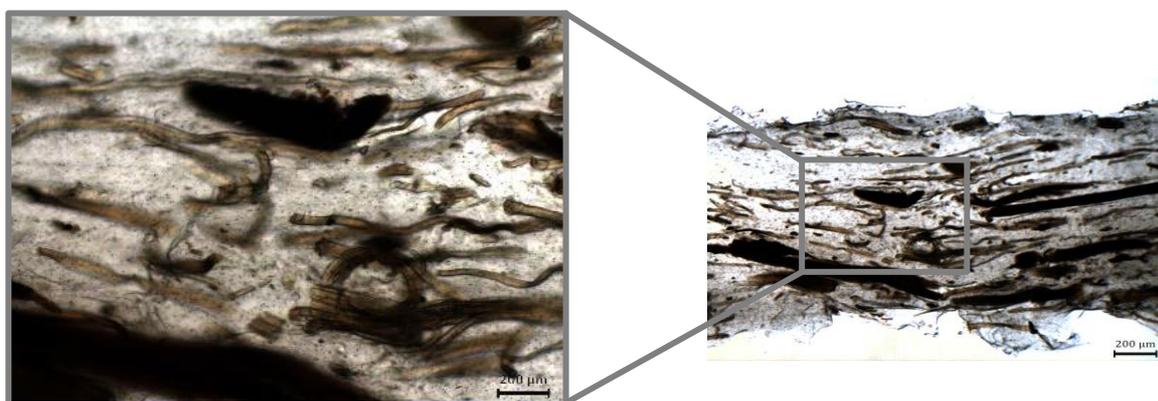


Figura 49: Visualização da folha compósita com 15% (w/w) fibra de Sisal de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

Quando comparadas as imagens das fibras sisal apresentadas anteriormente, com as imagens apresentadas na Tabela 28 e na Tabela 29, referentes às folhas compósitas com fibras de coco de comprimentos 1000 e 500 μm , respetivamente, pode-se concluir à primeira vista que as fibras de coco não se separam em microfibrilas quando processadas pelo processo de extrusão.

Tal facto pode ser fundamentado, uma vez que, às fibras de coco apresentarem na sua constituição um teor maior de lignina do que as fibras de Sisal, sendo este, o componente que confere a estrutura às fibras naturais.

Nas folhas com quantidades em massa de fibra de 2% a 4% é de notar um ligeiro aumento da quantidade de fibra enquanto a folha com 6% de fibra, dá a entender ter menos fibra do que a folha com

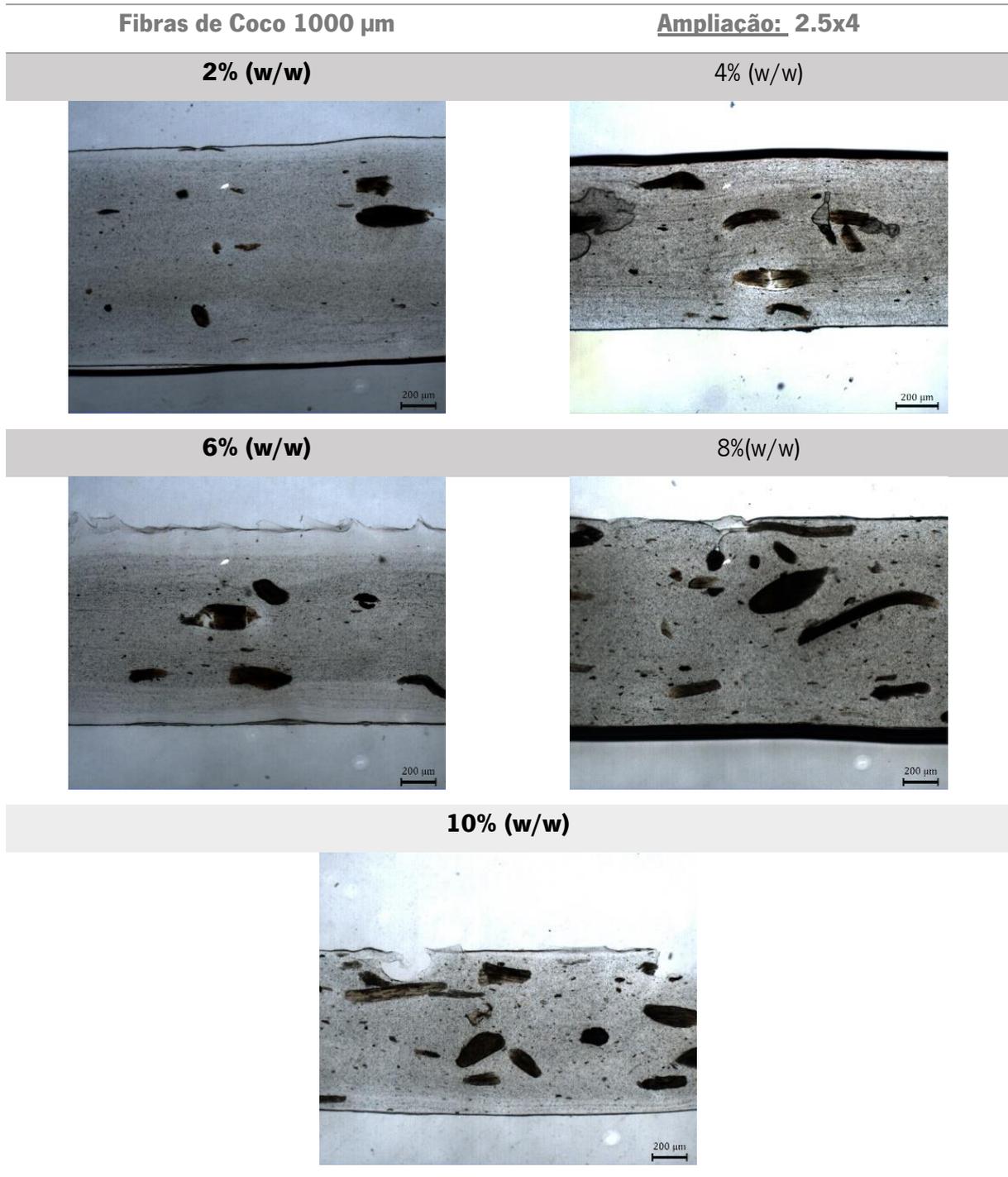
4%, contudo as folhas com 8 e 10% continuam a apresentar a tendência para aumentar a quantidade de fibra ao longo da espessura da folha.

As fibras de coco, apresentam-se bem distribuídas ao longo da espessura não estando concentradas ao centro nem nas periferias, a única folha compósita que tal não acontece é a de 6% onde as fibras estão concentradas no centro da espessura do filme. Ainda nesta folha compósita é de notar que o pigmento não se encontra bem distribuído, encontrando-se concentrado também no centro.

Também as fibras de coco apresentam rasgos causados pelas fibras, aquando o corte com o micrótomo, porém comparando estes rasgos com os apresentados nas imagens referentes às fibras de sisal, os da fibra de coco são bastante mais pequenos, talvez devido ao facto destas últimas serem menos rígidas do que as fibras de sisal, tal facto é visível na Figura 50.

As fibras de coco estão na sua maioria orientadas na direção do fluxo, uma vez que, só pontualmente é que encontramos núcleos nas imagens das diversas folhas, como se pode verificar na Figura 51.

Tabela 28: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 1000 μm com ampliação de 4x.



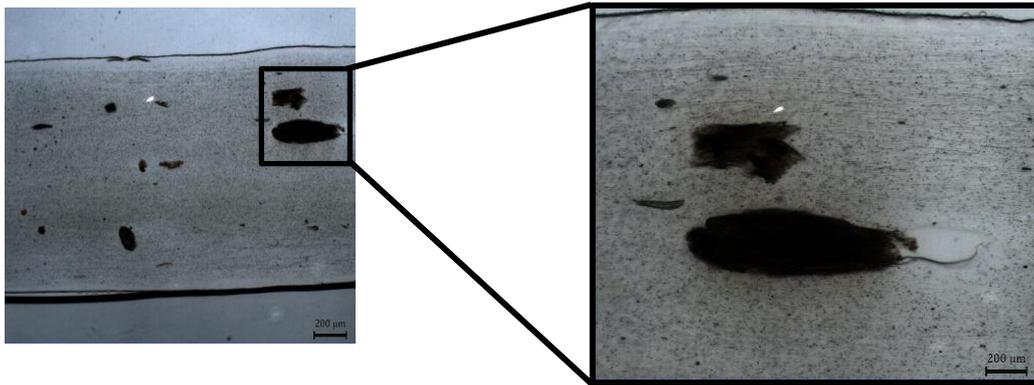


Figura 50: Visualização da folha compósita com 2% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm através da microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

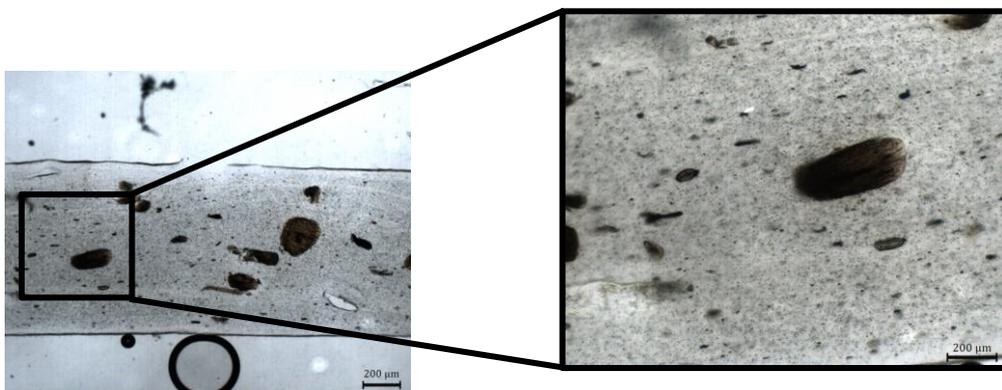


Figura 51: Visualização da folha compósita com 10% (w/w) fibra de coco de comprimento de 1000 μm através da microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

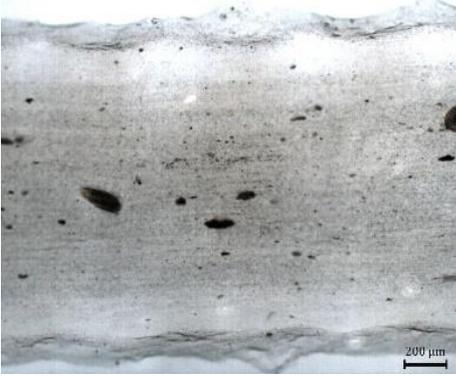
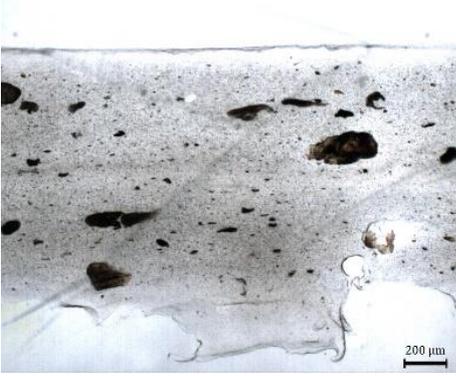
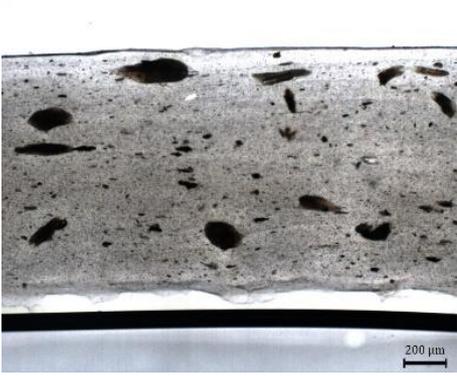
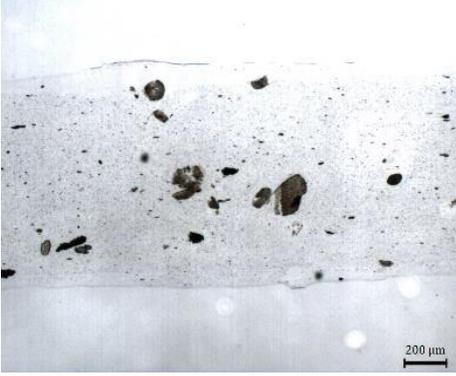
As imagens referentes às folhas compósitas reforçadas com fibras de coco de comprimento de 500 μm , encontram-se na Tabela 29, apresentada em seguida.

Nos folhas com teores de fibra em massa de 2, 6 e 10% apresentam um aumento contínuo de fibra ao longo da espessura do filme, os restantes, não transparecem o aumento de fibra em comparação com a folha de teor mássico anterior. .

O pigmento encontra-se mais concentrado no interior da espessura do filme observado, havendo a existência de aglomerados.

As fibras encontram-se maioritariamente orientadas na direção do fluxo, porém são visíveis alguns núcleos das fibras, significando que algumas destas se encontram orientadas na direção transversal à direção do fluxo de extrusão, como é visível na Figura 52.

Tabela 29: Imagens obtidas por microscopia de campo claro das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 500 µm com ampliação de 4x.

Fibras de Coco 500 µm	Ampliação: 2.5x4
2% (w/w)	4% (w/w)
	
6% (w/w)	8% (w/w)
	
10% (w/w)	15% (w/w)
	

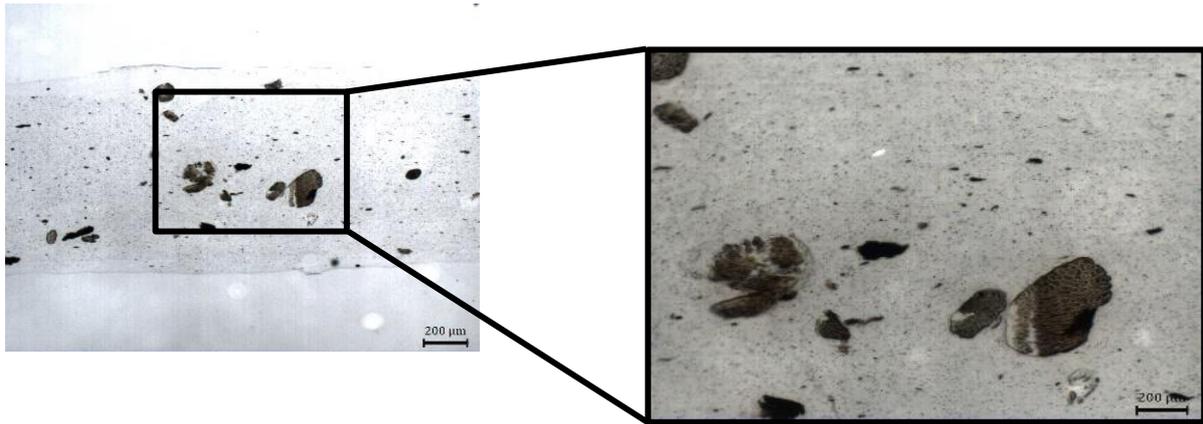


Figura 52: Visualização da folha compósita com 15% (w/w) fibra de coco de comprimento de 500 μm por microscopia de campo claro com ampliação de 10x.

Em suma, a adesão entre o polímero e a fibra natural foi promovida. Quanto aos teores de fibra incorporadas, consegue-se verificar que em algumas folhas compósitas, não transparece esses teores o que poderá significar que o teor real de fibra na folha compósita não é igual ou sequer próximo do valor teórico definido no plano experimental para essa folha compósita, o que poderá justificar a falta de coerência dos resultados obtidos nos ensaios de tração realizados.

4.2.4 Dispersão das Fibras

Devido ao facto de através da lupa estereoscópica só conseguir-se visualizar uma pequena porção da dispersão das fibras na superfície das folhas compósitas, decidiu-se observar uma fração do filme à luz de forma a verificar a dispersão das fibras ao longo de toda a largura do filme.

As imagens capturadas às folhas compósitas, encontram-se expostas na Tabela 30, apresentada em seguida.

Tabela 30: Imagens das folhas compostas processadas pelo processo de extrusão para avaliação da dispersão das fibras ao longo da folha.

Teor de Fibra (w/w)	Comprimento: 1000 μm		Comprimento: 500 μm	
	Sisal	Coco	Sisal	Coco
2%				
4%				
6%				
8%				
10%				



Avaliando as imagens apresentadas na tabela anterior, consegue-se deduzir que o processo de extrusão de duplo fuso com ação co-rotativa levou as fibras se dispersassem ao longo do filme, uma vez que não são visíveis aglomerados.

Em praticamente todos os filmes consegue-se verificar as linhas do fluxo, zonas mais escuras nos filmes, que justificam o facto das fibras se encontrarem mais dispostas ao centro, provocadas pelo fluxo à saída da fiação, podendo ser justificado pela má calibração da fiação.

Concluiu-se também que com um teor de fibra mais elevado as fibras começam a dar coloração ao filme não sendo o pigmento capaz de cobrir este efeito. E também através desta coloração é possível mais uma vez verificar a conclusão retirada na microscopia de campo claro, que o teor de fibra no filme não é igual ao valor definido para a mesma.

Por exemplo nas folhas compósitas com fibra de coco de comprimento de 500 μm com teores de 10 e 15% consegue-se verificar pela coloração que a de 10% apresenta muito mais fibra do que a de 15%.

Os factos apresentados acima podem por em causa a termoformação das folhas compósitas, dependendo da zona do filme que estamos a termoformar.

4.2.5 Teor de Humidade

Submeteram-se as folhas compósitas a este ensaio de modo a avaliar o encapsulamento das fibras por parte do polímero, dado que se as fibras naturais hidrofílicas estiverem bem camufladas pelo polímero, as folhas compósitas estarão isentas de humidade, uma vez que, o polímero é hidrofóbico repela a água.

Os teores de humidade obtidos para as folhas compósitas apresentam-se em seguida, na Figura 53.

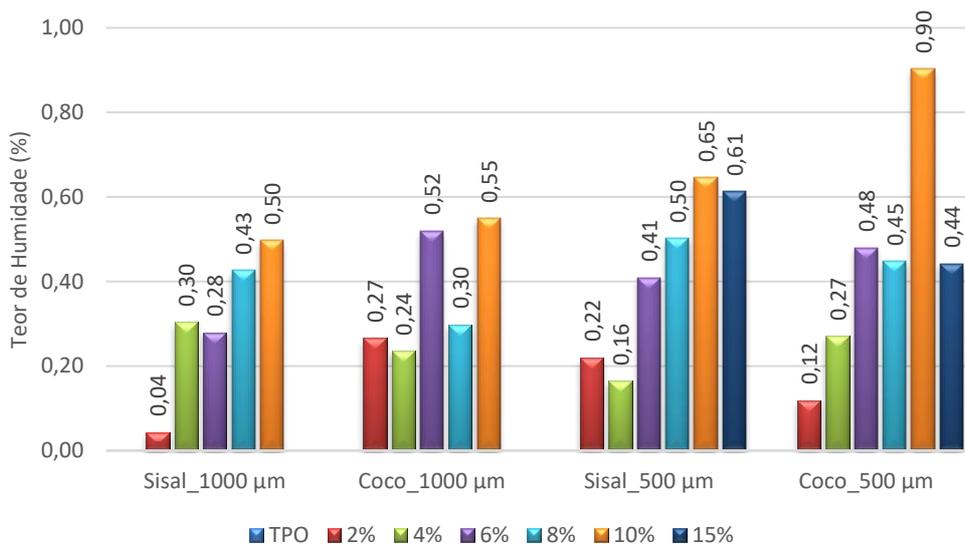


Figura 53: Resultados obtidos na avaliação do teor de humidade presente nas folhas compósitas anteriormente extrudidas.

Numa primeira abordagem, o polímero TPO utilizado como matriz por si só não absorve qualquer humidade, uma vez que, é um material hidrofóbico.

Com aumento do teor de fibra, as folhas compósitas apresentam uma tendência para absorver maior teor de humidade. Porém existe uma variabilidade e uma falta de coerência nos resultados obtidos, o que leva a creditar a justificação dada anteriormente de que o teor de fibra não é o mesmo do valor definido.

As folhas compósitas reforçadas com fibras de comprimento de 500 µm, apresentam uma maior tendência para absorver humidade, tal cenário é justificado pelo facto de as fibras naturais perder e absorver humidade muito rapidamente e quanto menor o tamanho da fibra mais rápido este processo de perda ganho ocorrerá.

Tal como referido e justificado no gráfico ilustrado na Figura 31, também nos ensaios realizados às folhas compósitas as folhas reforçadas com fibras de sisal apresentam teores de humidade maiores que as com fibra de Coco.

Em suma, as fibras naturais não se apresentam bem camufladas pelo polímero, permitindo que a absorva humidade, dado que, se a folha compósita consegue absorver humidade, isto se deve à incorporação da fibra, posto que o polímero é hidrofóbico e por este motivo repele a humidade não a absorvendo.

Este cenário, poderá ser justificado pelo afloramento das fibras naturais devido a efeitos reológicos ocorridos durante o processo de extrusão.

O facto de as fibras naturais continuarem a absorver humidade mesmo incorporadas nas folhas compósitas, irá prejudicar o aquecimento e a enformação aquando a termoformação.

4.2.6 TGA

Realizaram-se ensaios de TGA a algumas das folhas compósitas, com o intuito de verificar o teor de fibra nelas incorporado, a sua temperatura de degradação e também avaliar a existência ou não de humidade nas mesmas.

Os valores obtidos, com estes ensaios, para o teor de fibra e para a temperatura de degradação das folhas compósitas, encontram-se apresentados na Tabela 31, apresentada em seguida.

Tabela 31: Resultados dos ensaios de TGA realizados às folhas compósitas.

Amostra	Teor Mássico de Fibra (%)	Temperatura de Degradação (°C)
2% Sisal 1000 µm	1,74	429,15
2% Sisal 500 µm	1,22	436,24
2% Coco 500 µm	1,04	431,89
6% Sisal 1000 µm	3,47	431,96
6% Coco 1000 µm	2,98	435,59
10% Coco 1000 µm	5,30	429,09
10% Coco 500 µm	3,79	433,80
15% Sisal 500 µm	8,07	427,66

Analisando a tabela anterior, numa primeira abordagem, concluiu-se que a temperatura de degradação das folhas compósitas ronda os 430°C e também que com o aumento de quantidade de fibra na formulação do composto, maior é a diferença entre o teor massico contido na folha compósita e o teor para ela planeado inicialmente.

As folhas com fibras de comprimentos menores demonstraram uma maior diferença entre o teor apresentado e o planeado, dado que pelo facto de as fibras ser mais pequenas seja mais difícil o fluxo as arrastar para fora da extrusora.

Avaliando os valores obtidos para diferentes tipos de fibras, concluiu-se que as folhas com a fibra de coco apresentam maiores diferenças entre o teor apresentado e o planeado. A fibra de Sisal talvez pelo facto de ser menos densa, é arrastada mais facilmente pelo fluxo do polímero, fazendo com

que ocorra menos detenção de fibras ao longo do processo de extrusão. Mesmo assim, as folhas com 6% de fibra de sisal de 1000 μm , apresentou uma redução de mais de metade do teor mássico de fibra apresentado em relação ao planeado.

A folha compósita de 10% de fibra de coco de 500 μm apresenta um teor real de fibra muito próximo ao apresentado para a folha compósita de 6% de fibra de sisal de 1000 μm , justificando assim o facto da discrepância e falta de coerência dos resultados obtidos nos ensaios realizados anteriormente

Com a avaliação dos gráficos anteriores também se pode concluir que com o aumento da fibra a curva obtida no TGA apresenta algumas oscilações entre as temperaturas de 100 e 150 $^{\circ}\text{C}$, que significa que as fibras apresentavam mais humidade.

Este ensaio também permitiu justificar a conclusão da existência de humidade absorvida pelas fibras naturais nas folhas compósitas, devido às pequenas oscilações de perda de massa entre os 100 e os 150 $^{\circ}\text{C}$, apresentada nas curvas, presentes em Anexo III – Ensaio de TGA

Para finalizar, o teor de fibra que as folhas apresentam é diferente dos teores definidos no plano experimental, o que vem justificar a falta de coerência dos resultados obtidos nomeadamente nos ensaios de tração, que provavelmente irá se refletir durante a termoformação.

Concluiu-se igualmente que as fibras de coco e os comprimentos menores de fibra, apresentam uma maior detenção das fibras durante o processo de extrusão.

4.2.7 Deformação por Peso Próprio

Submeteram-se as folhas compósitas a ensaios de deformação por peso próprio de forma a avaliar os fenómenos que surgem durante a etapa de aquecimento durante a termoformação.

Os resultados apresentados em seguida, representam somente 1 minuto do ensaio realizado às folhas compósitas, sendo este o tempo necessário para o aquecimento da folha. Os gráficos da totalidade do ensaio encontram em Anexo IV- Avaliação da Deformação Por Peso Próprio

Na Figura 54, apresenta-se os resultados referentes às folhas compósitas com fibra de sisal de comprimento de 1000 μm .

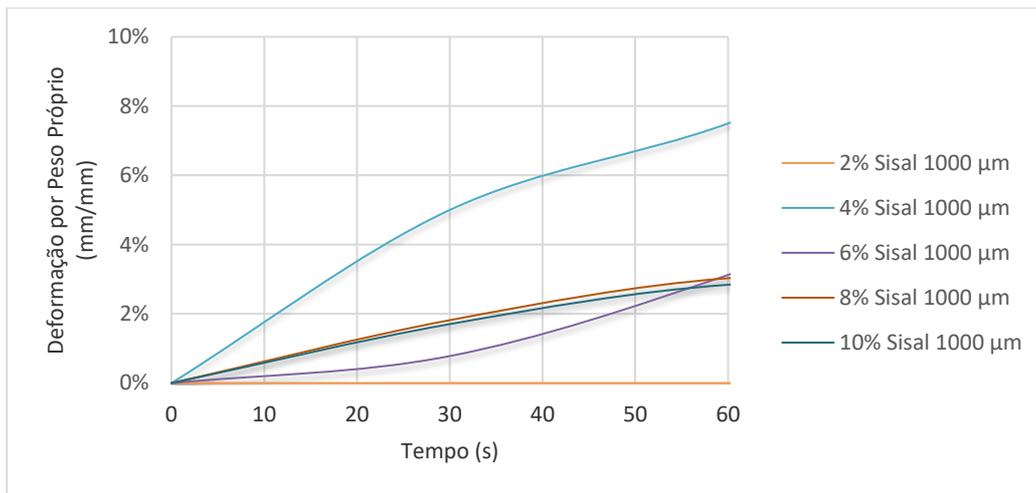


Figura 54: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 1000 µm, durante um período de ensaio de 1 minuto.

Avaliando o gráfico anterior, concluiu-se que com 2 % de fibra em massa a folha compósita não apresenta qualquer deformação por peso próprio, no primeiro minuto de ensaio.

Porém as restantes folhas não apresentaram qualquer coerência na deformação por peso próprio que apresentaram, uma vez que, a folha compósita com 4% de fibra apresentou mais de 6% de deformação, deformando muito rapidamente, enquanto que as folhas com 6,8 e 10% apresentaram quase a mesma deformação, sendo a folha compósita com 6% de fibra a que deformou menos ao longo desse minuto.

Este cenário, pode ser justificado pelo facto de o teor de fibra incorporada na folha compósita poderá ser igual ou bastante próxima entre as folhas compósitas mencionadas acima, devido ao facto da existência de perda de fibra durante o processo de extrusão.

Apesar da incoerência dos resultados, pode-se mesmo assim concluir que num minuto as folhas compósitas com fibra de sisal de 1000 µm, deformam por peso próprio cerca de 3% à exceção das folhas com 2% de fibra que não apresenta qualquer deformação e a folha com 4% que deforma mais de 6% num minuto de aquecimento a 185 °C.

Também, existe uma tendência para o aumento da deformação com o aumento da quantidade de fibra incorporada na folha compósita, ou seja, com o aumento do teor mássico de fibra, a viscosidade do polímero diminui não conseguindo sustentar o seu próprio peso e assim deforma.

A deformação por peso próprio das folhas compósitas reforçadas com fibras de sisal com comprimento de 500 µm, encontra-se ilustrada na Figura 55.

A folha compósita com um teor de fibra de 4%, não apresenta qualquer deformação até aos 30 segundos de ensaio e a folha com um teor de 6% de fibra é a que apresenta maior deformação por peso

próprio. Porém a maioria das folhas compósitas apresentam uma deformação não superior a 2% de deformação, excluindo a folha compósita com 6% de fibra que apresenta uma deformação superior a 5%.

Pode-se também com este ensaio concluir que para as fibras de sisal o tamanho das fibras não está a influenciar a deformação por peso próprio, não estando a alterar a viscosidade da folha compósita.

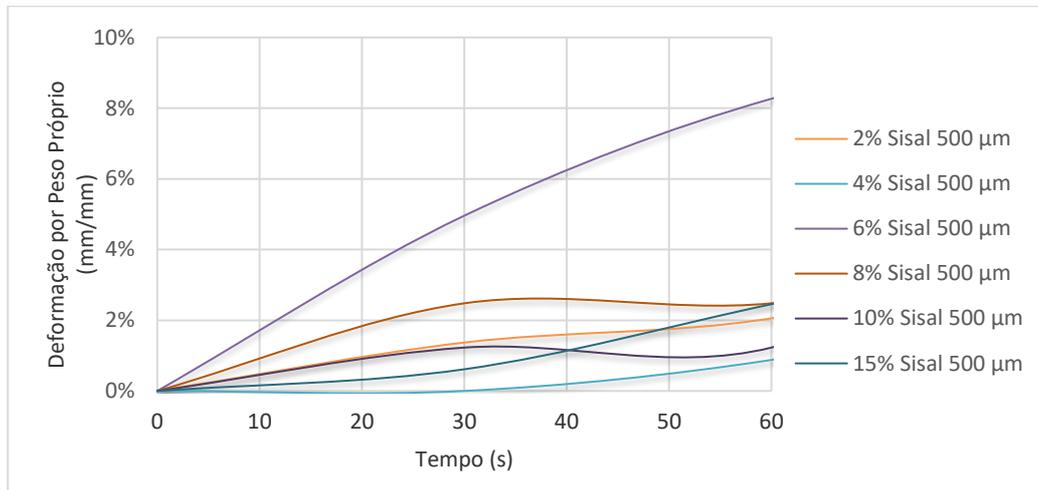


Figura 55: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de sisal com comprimento de 500 µm, durante um período de ensaio de 1 minuto.

A Figura 56 e na Figura 57, representam o ensaio referente às folhas compósitas reforçadas com fibras de Coco de comprimentos de 1000 e 500 µm, respetivamente

As fibras de coco provocam uma maior deformação por peso próprio nas folhas compósitas, talvez pelo facto de estas serem mais densas que as fibras de sisal.

Contudo verificou-se que com quantidades mais baixas de fibras a deformação é bastante mais baixa.

Para as folhas compósitas com um teor de 2 e 6% de fibra de Coco de 1000 µm, não existe qualquer deformação por peso próprio até aos 20 segundos de ensaio. Porém a folha com 6% de fibra, apresenta ao final de um minuto uma deformação por peso próprio superior a 8% enquanto a folha com 2% de fibra uma deformação de 1%, aproximadamente.

A folha compósita com 8% de teor de fibra, foi a que apresentou uma maior deformação por peso próprio, sendo esta superior a 12 % ao final de 1 minuto.

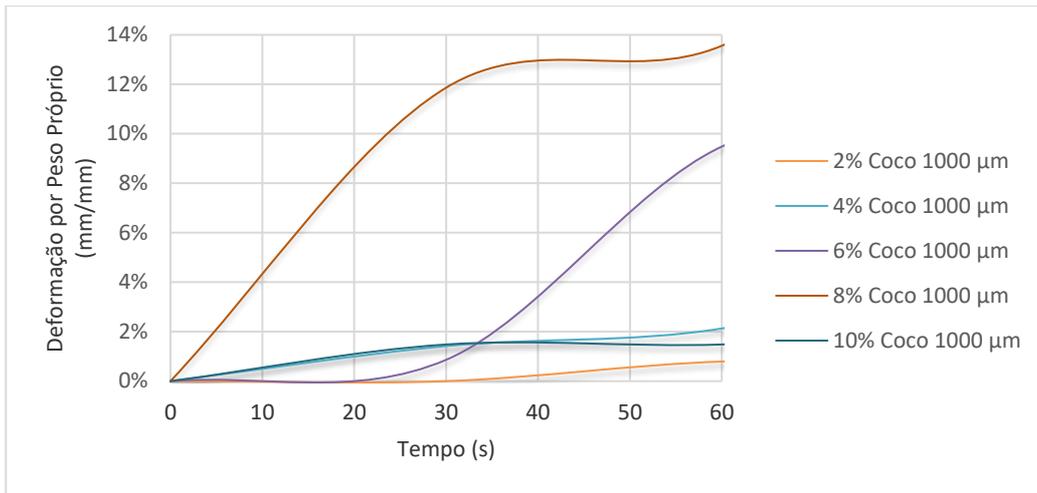


Figura 56: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 1000 µm, durante um período de ensaio de 1 minuto.

As folhas compósitas com 2, 4 e 15%, apresentam deformações por peso próprio entre 6 e 10%, enquanto a folha com 6% de fibra até ao instante 10 segundos, não apresentou qualquer deformação por peso próprio e ao final de um minuto, já tinha deformado quase 6%.

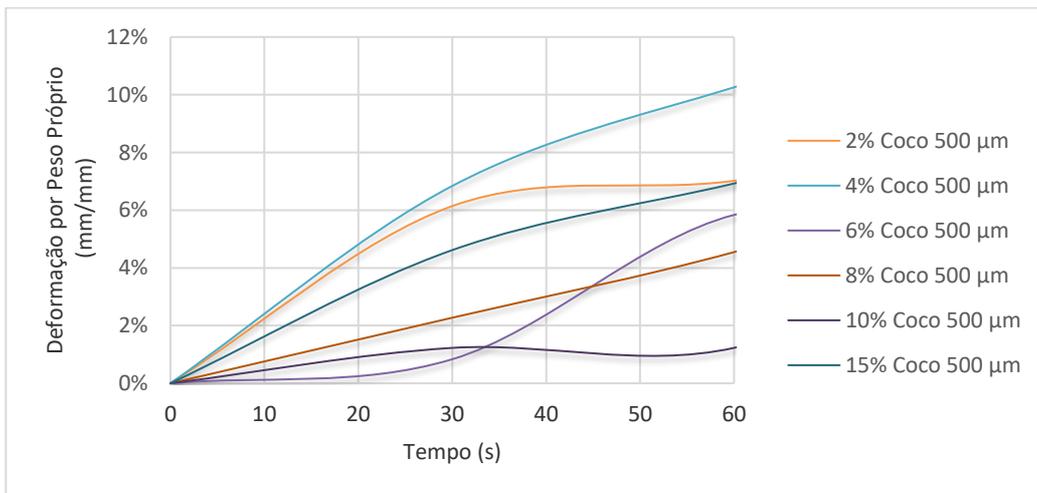


Figura 57: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de Coco com comprimento de 500 µm, durante um período de ensaio de 1 minuto.

Resumindo, com a realização deste ensaio de deformação por peso próprio, conseguiu-se verificar que o facto de as fibras apresentarem teores de fibra diferentes aos definidos no plano experimental, e alguns deles serem bastante próximos, irá afetar a deformação por peso próprio tornando-se impossível retirar conclusões verídicas acerca da influência do aumento da quantidade de fibra na deformação por peso próprio das folhas compósitas, devido à incoerência apresentada nos

resultados. Esta coerência é influenciada pela zona de onde foi retirada a amostra e da distribuição de fibras que estas apresentavam.

Contudo verificou-se que as fibras de sisal e fibras com comprimentos menores, provocam muito menos deformação por peso próprio nas folhas compósitas do que a fibra de Coco, devido ao facto das fibras de coco serem mais densas e do que as fibras de comprimentos maiores.

4.2.8 Capacidade de Reproduzir os Contornos do Molde

De forma, a verificar a capacidade das folhas compósitas em reproduzir os contornos de um molde fêmea tronco-cónico, avaliando as bolhas formadas, quanto à sua homogeneidade e à sua altura, realizou-se a termoformação por vacuum das mesmas.

A ilustração das bolhas formadas pela submissão das folhas compósitas ao processo de termoformação, encontram-se apresentadas nas figuras seguintes.

Nas bolhas formadas pelas folhas compósitas com fibra de sisal de 1000 μm (Figura 58), concluiu-se que, a folha com teor mássico de 2% foi a que conseguiu uma maior deformação, talvez pelo facto de não apresentar muita quantidade de fibra influenciando menos as propriedades mecânicas da matriz. Porém as bolhas com 6% e 8% de teor de fibra foram as que apresentaram uma bolha mais homogénea, o que significa que a distribuição e a dispersão das fibras são praticamente homogéneas na direção transversal e longitudinal à direção do fluxo.

A Figura 59, representam a enformação das folhas compósitas reforçadas com fibras de Sisal de 500 μm . As folhas com 4 e 10% de fibra foram as que apresentaram bolhas com maior deformação. As bolhas com 8 e 10% em massa de fibra foram as que apresentaram uma maior homogeneidade na bolha enformada. Verificou-se que as folhas compósitas mesmo com as fibras a reduzirem as propriedades mecânicas, conseguem formar bolhas com metade da deformação conseguida pelo TPO, o que permite concluir que é possível termoformar estas folhas desde que a geometria não apresente taxas de deformação muito elevada.

Na Figura 60, que representa as bolhas enformadas a partir das folhas compósitas reforçadas com fibra de Coco de 1000 μm , concluir-se que as folhas reforçadas com fibra de coco apresentam mais capacidade de reprodução dos contornos do molde que as folhas reforçadas com fibra de Sisal. As bolhas com 2, 4 e 8% de fibra foram as que apresentaram mais deformação e também são as mais homogéneas.

Na Figura 61, observa-se que as folhas reforçadas com fibras de coco com 500 μm , apresentaram uma deformação bastante mais baixa que as fibras com comprimento maior. As bolhas com 6 e 10 % de fibra em massa foram as que apresentaram uma maior deformação e também uma bolha mais homogénea.

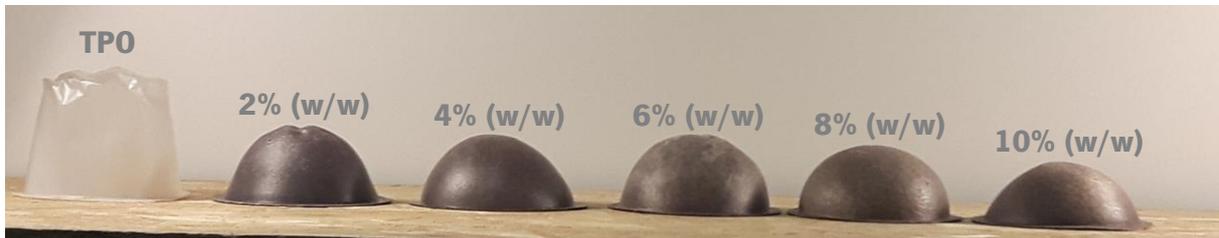


Figura 58: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de sisal de comprimento de 1000 μm .

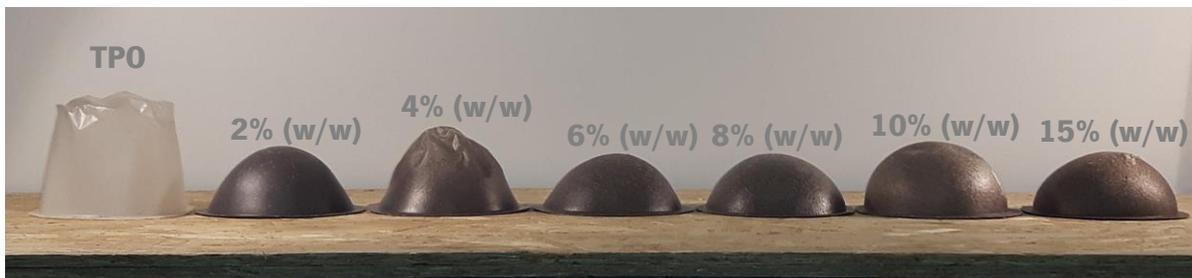


Figura 59: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de sisal de comprimento de 500 μm .



Figura 60: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 1000 μm .



Figura 61: Bolhas enformadas a partir do processo de termoformação das folhas compósitas com fibras de coco de comprimento de 500 μm .

Com a realização deste ensaio, foi possível verificar que mesmo com o facto das fibras, tanto de sisal como a de coco, estarem a reduzir as propriedades da matriz das folhas compósitas, é possível termoformar estas folhas em geometrias com deformação máxima baixa.

É também visível que com a incorporação das fibras, diminuiu-se para metade a capacidade de deformação em comparação com a matriz polimérica, porém com o incremento de fibra a capacidade de deformação das folhas compósitas não apresenta variabilidades significativas entre elas.

Também se reuniu informação acerca das influências do tipo e tamanho da fibra na enformação das folhas compósitas, uma vez que para deformações máximas mais elevadas, a fibra de coco é a mais adequada por apresentar uma percentagem de constituintes amorfos superior aos da fibra de Sisal e as fibras de comprimentos maiores apresentam bolhas mais uniformes do que as bolhas enformadas a partir das folhas compósitas com comprimentos menores.

CAPÍTULO 5

Conclusões

5. CONCLUSÕES

O trabalho de investigação realizado no âmbito desta dissertação, teve como principal objetivo, a elaboração de folhas compósitas de matriz de TPO com reforço de FNV, sendo elas, sisal e coco, pelo processo de extrusão e posterior avaliação do seu comportamento aquando o processo de termoformação, atendendo à sua aplicação final, ou seja, o revestimento de painéis de porta e de instrumentos no interior automóvel.

Iniciou-se esta investigação com a extrusão das folhas compósitas com composições diferentes, variando, o tipo de FNV, sisal e coco, o comprimento, 1000 e 500 μm , e a quantidade, de 2 a 15% de fibra.

Ao longo do processo de extrusão das folhas compósitas, foi possível concluir que quanto maior o comprimento da fibra mais difícil a extrusão se torna com o aumento da quantidade de fibra incorporada na composição de compósito. Apesar desta dificuldade, conseguiu-se com sucesso realizar a extrusão de todas as folhas compósitas planeadas, aparentemente com bom aspeto visual.

Após a extrusão das folhas compósitas, estas foram caracterizadas de forma a compreender o comportamento destas quando termoformadas.

Com esta caracterização das folhas compósitas, retirou-se as seguintes conclusões:

- Com a incorporação das FNV nas matrizes das folhas compósitas, estas não atuam como um reforço, uma vez que, reduzem as propriedades mecânicas da matriz, ou seja, tornaram-na menos resistente, mais rígidas e conseqüentemente com uma menor capacidade de deformação, devido ao facto de as fibras apresentarem descontinuidade da matéria, dificultando a distribuição da tensão quando submetidos a um esforço mecânico, criando pontos de rutura;
- As folhas compósitas com fibras de sisal, de maiores comprimentos e com maior quantidade de fibra na sua formulação, apresentam menor capacidade de deformação.
- As fibras naturais não se apresentavam bem encapsuladas pela matriz polimérica, ficando propensas a absorver humidade, devido a efeitos reológicos durante a extrusão que provocaram o afloramento das fibras à superfície.
- Tipo, quantidade e comprimento das fibras também influenciam a capacidade de absorção de humidade, uma vez que a folha com fibra de sisal tem maior capacidade

de absorção de humidade, assim como os filmes com comprimentos menores e teores de fibra maiores;

- As folhas compósitas, apresentaram quantidades de fibra inferiores às quantidades teóricas apresentadas no plano experimental;
- Também o tipo, quantidade e comprimento de fibra, influenciam a quantidade de fibra presente nas folhas compósitas, uma vez que, nos filmes com fibra de coco, com menores comprimentos e com teores mais elevados de fibra se verificou maior retenção de fibra durante o processo de extrusão;
- As folhas compósitas apresentam capacidade para serem termoformadas desde que a geometria do produto final não apresente taxas de deformação superiores a 150%, e apresentam uma temperatura de degradação superior a 430°C;
- As folhas com fibra de coco e com quantidades mais elevadas de fibra têm uma tendência para deformarem mais por peso próprio, contudo, conseguem formar bolhas com metade da altura da bolha enformada com TPO virgem.
- Com a incorporação das fibras naturais vegetais nas formulações das folhas poliméricas, reduz-se metade a capacidade de deformação em comparação com a matriz polimérica, contudo ao incrementar a quantidade de fibra, a diferença entre as capacidades de deformação destas não é significativa.

De forma a contornar o fator atmosférico humidade, aconselha-se a utilização de contentores de armazenamento e laboratórios com atmosferas condicionados, que protejam as fibras naturais da exposição à humidade ambiente desde o seu armazenamento até à sua alimentação na extrusora. Ou então, a utilização de uma zona de desvolatilização na extrusora duplo fuso utilizada para o processamento das folhas compósitas.

A perda por retenção das fibras no processo de extrusão pode ser contornada, se primeiramente se fizer a composição dos componentes constituintes das folhas compósitas numa extrusora duplo fuso, com duas zonas de alimentação. Inicialmente o TPO e aditivos são incorporados e posteriormente na segunda zona de alimentação são incorporadas as FNV, dando origem a um *pellet* que posteriormente será introduzido numa extrusora monofuso para a produção de folha/chapa. Apesar da extrusora usada ter esta valência, optou-se pela extrusão direta de folha para evitar um segundo Ciclo de processamento do compósito.

Concluir, também que a composição das folhas compósitas irá depender bastante dos requisitos exigidos para o produto final.

Ou seja, caso se pretenda uma folha para termoformar, cujos requisitos sejam a estética e a incorporação do máximo de fibras naturais possível e não melhorias nas propriedades mecânicas, aconselha-se a não utilização de agente de acoplamento, uma vez que pretendemos usufruir ao máximo da capacidade de deformação da matriz polimérica, e a utilização de um comprimento de fibra mais pequeno, de forma a influenciar o mínimo possível a deformação da folha compósita.

Caso os requisitos incluam, o incremento das propriedades mecânicas, aconselha-se a certificação de que as fibras naturais estão isentas e continuam isentas de humidade e a utilização de um agente de acoplamento, ou então um tratamento de superfície às fibras naturais antes de incorporadas nas folhas compósitas.

Apesar das dificuldades encontradas, pode-se afirmar que o objetivo desta tese foi cumprido, uma vez que conseguiu-se desenvolver folhas compósitas reforçadas com fibras naturais com uma deformação máxima de 150%, deformação necessária para a termoformação de um painel de porta ou de instrumentos.

Pelo facto de este ser um tema interessante e inovador, deveria continuar em desenvolvimento, uma vez que o mundo fascinante das fibras naturais ligado ao processo de termoformação ainda é um tema muito pouco desenvolvido e com necessidade de informação.

5.1 Trabalhos Futuros

Em pesquisas futuras seria interessante o estudo da incorporação de elevados teores de fibra sem qualquer agente de acoplamento ou tratamento de superfície, de forma a avaliar a capacidade de adesão entre as fibras e a matriz, e verificar se estas apresentariam mais capacidade de termoformação.

Outra investigação que seria interessante, era adição de diferentes quantidades de MAPP de forma tentar achar a quantidade ótima de agente de acoplamento para cada uma das formulações, tendo em conta o tipo, quantidade e comprimento da fibra.

CAPÍTULO 6

Bibliografía

6. BIBLIOGRAFIA

- Albernaz, M. (2009). Novos desenvolvimentos em extrusão de compostos com fibras naturais. In *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros*.
- Albinante, S., Pacheco, E., Visconte, L., & Tavares, M. (2012). Caracterização de fibras de bananeira e de coco por ressonância magnética nuclear de alta resolução no estado sólido. *Polímeros*, 22(ahead), 0–0. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000057>
- Alves, C., Ferrão, P. M. C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, L. B., & Alves, D. E. (2010). Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of Cleaner Production*, 18(4), 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.022>
- AutoEsporte. (2010). Uno Ecology. Retrieved December 5, 2016, from <http://g1.globo.com/carros/noticia/2010/06/ fiat-divulga-detalhes-do-prototipo-uno-ecology.html>
- Bhattacharyya, D., Bowis, M., & Jayaraman, K. (2003). Thermoforming woodfibre-polypropylene composite sheets. *Composites Science and Technology*, 63(3–4), 353–365. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00214-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00214-2)
- Brahmakumar, M., Pavithran, C., & Pillai, R. M. (2005). Coconut fibre reinforced polyethylene composites: Effect of natural waxy surface layer of the fibre on fibre/matrix interfacial bonding and strength of composites. *Composites Science and Technology*, 65(3–4), 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.09.020>
- Carro, J. do. (2015). Peças ecológicas são pouco usadas em carros. Retrieved December 5, 2016, from <http://www.estadao.com.br/jornal-do-carro/noticias/carros,pecas-ecologicas-sao-pouco-usadas-em-carros,23705,0.htm>
- Castro, B. Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais (2013).
- Debiagi, F., Ivano, L. R. P. F. M., Do Nascimento, P. H. A., & Oliveira, S. M. De. (2013). Embalagens biodegradáveis de amido reforçadas com fibras lignocelulósicas provenientes de resíduos agroindustriais. *BBR - Biochemistry and Biotechnology Reports*, 1(2), 57–67. <https://doi.org/10.5433/2316-5200.2012v1n2p57>
- Du, Y., Yan, N., & Kortschot, M. T. (2014). A simplified fabrication process for biofiber-reinforced polymer composites for automotive interior trim applications. *Journal of Materials Science*, 49(6), 2630–2639. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7965-6>
- Erchiqui, F., Talla, A. S. F., & Kassami, H. (2016). A numerical Investigation of the use of novel melt processed PET-Hemp fiber composites for thermoforming applications. *Polymer Engineering and Science*, 47, 21–25. <https://doi.org/10.1002/pen>
- Fangueiro, R. (2011). *Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Fibrous and composite materials for civil engineering applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857095583.1.3>
- Fernanda, L., & Castilhos, F. De. Aproveitamento da fibra de coco (2011).
- Fiat mostra o conceito Novo Uno Ecology. (2010). Retrieved from <http://www.encontracarros.com/fiat-mostra-o-conceito-novo-uno-ecology/>
- Fonseca, E., & Nachtigall, S. M. B. (2009). Estudo das propriedades de compósitos de polipropileno com fibra de coco. In *Anais do 9º Congresso Brasileiro de Polímeros*.
- Forflex®. (n.d.). Retrieved December 9, 2016, from http://www.softergroup.com/pt/forflex_tpo
- Gama, D., Duarte, I., & Andrade, D. (2011). Obtenção De Compósitos Poliméricos Empregando Fibras De Coco Visando Uma Melhor Utilização Dos Recursos Naturais. In *Anais do 11º congresso brasileiro de polimerosnais do 11º congresso brasileiro de polimeros*. Retrieved from

- <http://www.itep.br/siteteste/images/wellen.cbpol2011.paper3.pdf>
- Gamon, G., Evon, P., & Rigal, L. (2013). Twin-screw extrusion impact on natural fibre morphology and material properties in poly(lactic acid) based biocomposites. *Industrial Crops and Products*, *46*, 173–185.
- Gomes, M. de A. Propriedades Mecânicas de Compósitos poliméricos reforçados com fibras de folhas de abacaxizeiro (2015).
- Henrique, P., Pereira, F., Rosa, M. D. F., Odila, M., Cioffi, H., Cristina, K., ... Mulinari, D. R. (2015). Vegetal fibers in polymeric composites : a review. *Polimeros*, *25*, 9–22.
- Ho, M., Wang, H., Lee, J., Ho, C., Lau, K., Leng, J., & Hui, D. (2012). Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites. *Composites: Part B*, *8*, 3549–3562. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>
- Holbery, J., & Houston, D. (2006). Natural-fibre-reinforced polymer composites in automotive applications. *Journal of Minerals, Metals and Material Society*, *58*(11), 80–86.
- Igl, S. a., & Osswald, T. a. (1992). Thermoforming Simulation of Natural Fiber Filled Polyolefins. *Journal of Plastic Film and Sheeting*, *8*(4), 302–332. <https://doi.org/10.1177/875608799200800406>
- INNOVA. (n.d.). Manual Extrusão.
- Joseph, P. V., Mathew, G., Joseph, K., Thomas, S., & Pradeep, P. (2003). Mechanical properties of short sisal fiber-reinforced polypropylene composites: Comparison of experimental data with theoretical predictions. *Journal of Applied Polymer Science*, *88*(3), 602–611. <https://doi.org/10.1002/app.11498>
- Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites - A Review. *Polymer Engineering and Science*, 21–25. <https://doi.org/10.1002/pen>
- Komuraiah, A., Kumar, N. S., & Prasad, B. D. (2014). Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. *Mechanics of Composite Materials*, *50*(3), 359–376.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites: Part B*, *42*, 856–873. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>
- LEÃO, A. ., ROWELL, R., & TAVARES, N. (1998). Applications of natural fibres in automotive industry in Brazil – thermoforming process. . *Science and Technology Polymers and Advanced Materials*.
- LEBRUN, G., BUREAU, M. N., & DENAULT, J. (2004). Thermoforming-stamping of Continuous Glass Fiber/Polypropylene Composites: Interlaminar and Tool–Laminate Shear Properties. *Journal of THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS*, *17*(March 2004). <https://doi.org/10.1177/0892705704035411>
- Li, X., Tabil, L., & Panigrahi, S. (2007). Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, *15*, 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>
- Ligowski, E., Santos, B. C. Dos, & Fujiwara, S. T. (2015). Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão. *Polímeros*, *25*(1), 70–75. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1605>
- Lima, P., Santos, R., Ferreira, S., & Filho, R. (2014). Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. *Eng. Agric., Joticabal*, *34*(5), 812–825.
- Liu, Y., & Kontopoulou, M. (2006). The structure and physical properties of polypropylene and thermoplastic olefin nanocomposites containing nanosilica. *Polymer*, *47*(22), 7731–7739. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2006.09.014>
- Mariano. (2013). Poliolefinas termoplásticas. Retrieved December 1, 2016, from <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.pt/2013/05/tpo.html>

- Martin, A. R., Martins, M. a., Mattoso, L. H. C., & Silva, O. R. R. F. (2009). Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. *Polímeros*, *19*(1), 40–46. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100011>
- McCool, R., Murphy, A., Wilson, R., Jiang, Z., & Price, M. (2011). Thermoforming of Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *14th International Conference on Material Forming Esaform, 2011 Proceedings*, *1353*(1), 901–906. <https://doi.org/10.1063/1.3589630>
- Mussig, J. (2010). *Industrial Applications of Natural Fibres*. Bremen: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470660324>
- Okine, R. K. (1989). Analysis of Forming Parts from Advanced Thermoplastic Composite Sheet Materials. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *2*(1), 50–76. <https://doi.org/10.1177/089270578900200104>
- Pereira, M. (2013). *Nanocompósitos de PLA para aplicação em embalagem alimentar*.
- Peter W. Klein. (2009). *Fundamental of Pastics Thermoforming*.
- Pickering, K. L. (2008). *Properties and performance of natural-fibre composites*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Poliiolefinas termoplásticas_ qué son y para qué sirven. (2016). Retrieved December 1, 2016, from <https://www.aristegui.info/fr/que-son-las-poliiolefinas-tpo/>
- Santos, E. F., Moresco, M., Rosa, S. M. L., & Nachtigall, S. M. B. (2010). Extrusão de compósitos de PP com fibras curtas de coco: efeito da temperatura e agentes de acoplamento. *Polímeros*, *20*(3), 215–220. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282010005000036>
- Santos, R. (2011). Substituição da borracha termofixa “EDPM” por elastomeros termoplásticos em sistemas de vedação automotivos. Salvador.
- Sisal - Wikipedia. (n.d.). Retrieved December 11, 2016, from <https://en.wikipedia.org/wiki/Sisal>
- Stack, R. M., & Lai, F. Development in Thermoforming Thermoplastic Composites (2011).
- Stryjewski, D. D. (2002). Thermoformable Automotive Composites Containing Kenaf and Other Cellulosic Fibers. *Textile Research Journal*, *8*, 668–672.
- Thermoplastic olefin. (2015). Retrieved December 1, 2016, from https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic_olefin
- Throne, J. L. (2003). Thermoforming. *Encyclopedia Of Polymer Science and Technology*, *8*(4), 222–251. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst371>
- Tobergte, D. R., & Curtis, S. (2013). *Avanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*. (S. Engelmann, Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (First Edit, Vol. 53). Wiley. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Torres, F. G., & Bush, S. F. (2000). Sheet extrusion and thermoforming of discrete long glass fibre reinforced polypropylene. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *31*(12), 1289–1294. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00004X](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00004X)
- Un mundo nuevo_ el interior del BMW i3 _ BMW Magazine. (n.d.). Retrieved December 5, 2016, from <http://www.bmwmagazine.com/int/es/node/987>
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, *63*, 1259–1264. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00096-4)

CAPÍTULO 8

Anexos

ANEXO I – FICHAS TÉCNICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

TPO 15800066

Thermoplastic Polyolefin Elastomer

Product Description

- High elasticity with good elastic recovery
- High strength melt
- Good flow and impact strength
- Low gloss characteristics
- Low VOC and odor

Polyolefin Elastomer Resin is a unique olefinic composition for improved processability and material handling. This product is produced via gas phase polymerization from Dow. It is an ethylene-butene copolymer exhibiting high flexibility, elasticity, and high melt strength. The material is suitable for film or sheet extrusion and thermofoming.

Typical Properties ¹			
Physical	Value	Unit	Test Method
Specific Gravity	0.891		ASTM D792
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/2.16 kg)	< 0.50	g/10 min	ASTM D1238
Glass Transition Temperature (DSC)	-52	°C	Internal Method ¹
Melting Temperature (DSC)	165	°C	Internal Method ¹
Vicat Softening Point, Compression Molded	52	°C	ASTM D 1525
Flammability	30	mm/min	FMVSS302
Mechanical	Value	Unit	Test Method
Flexural :			ASTM D790
Strength, Compression Molded	2.1	MPa	
Modulus, 2% Secant, Compression Molded	43	MPa	
Tensile Strength: ²			ASTM D412
Across Flow: Break, 2mm	10	MPa	
Flow: Break, 2mm	13	MPa	
Tensile Elongation: ²			ASTM D412
Across Flow: Break, 2mm	640	%	
Flow: Break, 2mm	600	%	
Tear Strength ³			ASTM D624
Across Flow: 2mm	620	N/cm	
Flow: 2mm	520	N/cm	
Processing, Extrusion	Range	Unit	
Barrel Temperature	180-220	°C	
Die Temperature	190-230	°C	
Melt Temperature	200-220	°C	
Calender Cylinders Temperature	30-70	°C	
Processing, Vacuum Forming	Range	Unit	
Sheet Temperature	180-210	°C	
Tool Temperature	20-40	°C	
Notes			
¹ Typical properties: these are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests. Fabrication conditions, part design, additives, processing aids and use conditions can affect the performance and the integrity of finished goods.			
² Extruded sheet			
³ Second heating, 10°C/min. method: complete protocols and results available upon request.			

Figura 62: Ficha técnica da matriz de TPO utilizada nas folhas compósitas.

Pigmento sem estabilizantes 15270456

Especificação Técnica Technical Specification

Cor / Color	Preto
Tipo Produto / Product Type	Concentrado de Cór
Resina Base / Base Resin	PE
Aplicação Principal / Main Application	Extrusão
Tipo Aditivos / Additive Type	NA
Aprovação Alimentar / Food Approval	NÃO

PROPRIEDADES	MÉTODO	UNIDADE	VALORES
% Adição	IT.19	%	4.00
Dens.Aparente	IT.07	g/cm ³	0.56±0.05
Humidade	IT.08	%	< 0.15
Resist. Luz	IT.20	1 - 8	7
Resist.Térmica	IT.21	°C	260

Figura 63: Ficha técnica do pigmento utilizada na composição das folhas compósitas.

SCONA TPPP 8112 FA

Adhesion promoter for TPE-S overmolding compounds, coupling agent for natural fiber compounds, and one-packs in polypropylene.

Product Data

Composition

Polypropylene highly functionalized with maleic anhydride

Typical Properties

The values indicated in this data sheet describe typical properties and do not constitute specification limits.

MFR (190 °C, 2.16 kg): > 80 g/10 min

Drying loss (3 h, 110 °C): < 0.5 %

MAH content: 1.4 %

Supplied as: Powder

Food Contact Legal Status

For the current food contact legal status, please contact our product safety department or visit www.byk.com for further information.

Storage and Transportation

Storage temperature max. 35 °C, relative humidity < 80 %. Avoid direct sunlight and contact with water.

Special Note

The modifier is also available as a granulate under the name SCONA TPPP 8112 GA.

Applications

Thermoplastics

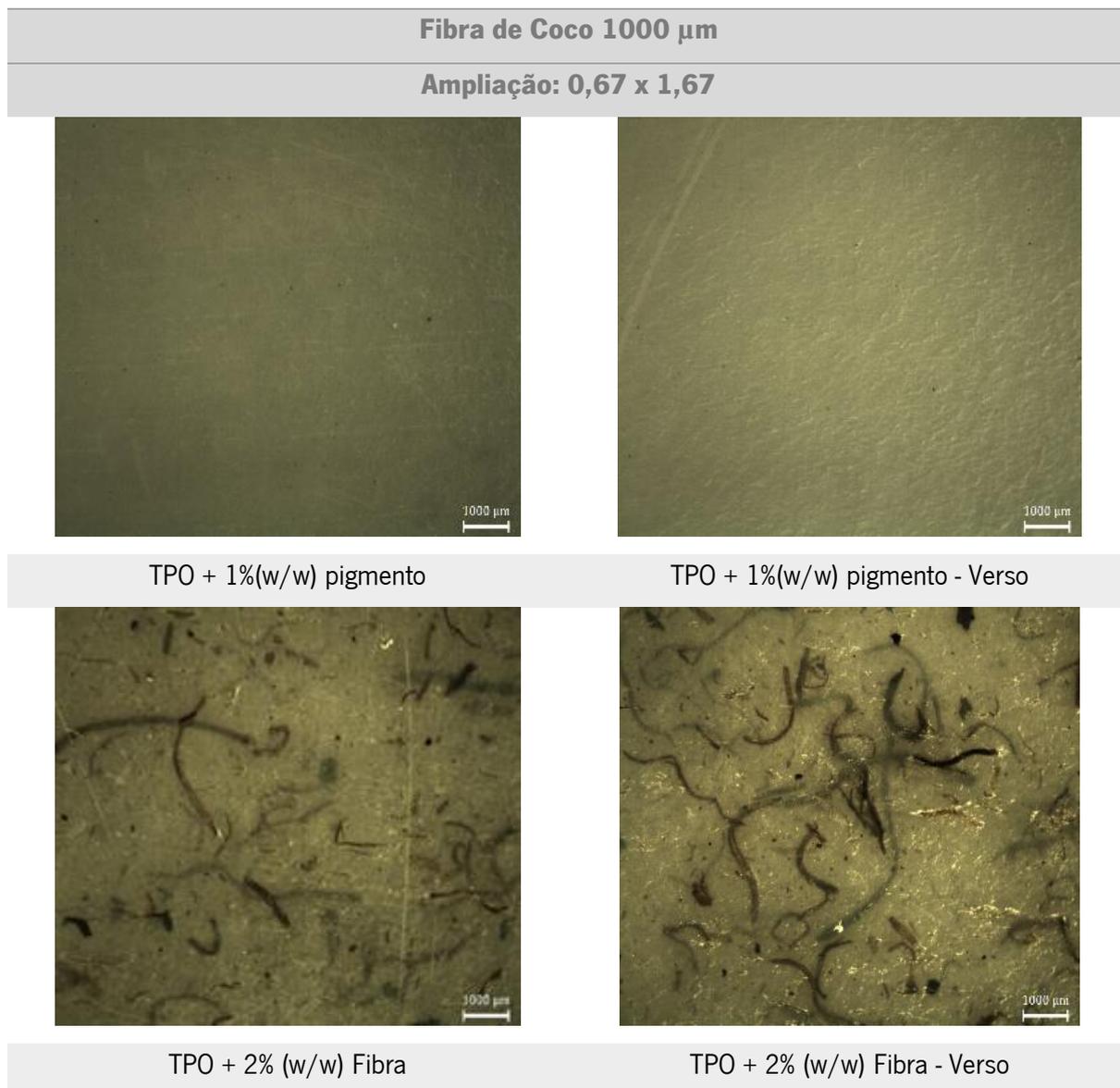
Special Features and Benefits

In TPE-S overmolding compounds, the modifier improves adhesion on hard substrates (such as PC, PA, ABS). Due to the high grafting level, only part of the PP in the TPE compound must be replaced with the modifier. In PP natural fiber compounds, the product significantly improves the mechanical properties and reduces water absorption. The modifier in its supplied form (powder) is ideally suited to the production of one-packs and masterbatches.

Figura 64: Ficha técnica do agente de acoplamento utilizada na composição das folhas compósitas processadas.

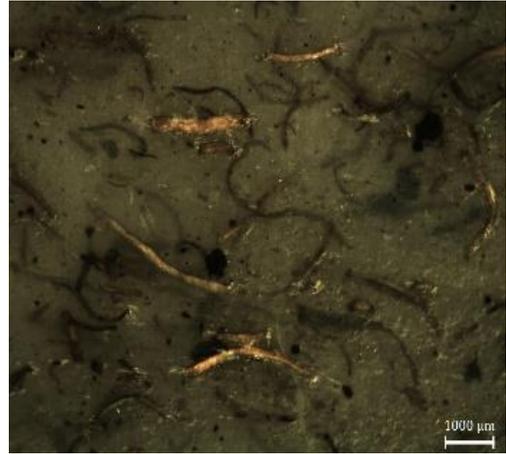
ANEXO II – LUPA ESTEREOSCÓPICA

Tabela 32: Imagens obtidas pela observação das folhas compósitas com fibra de coco de comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.

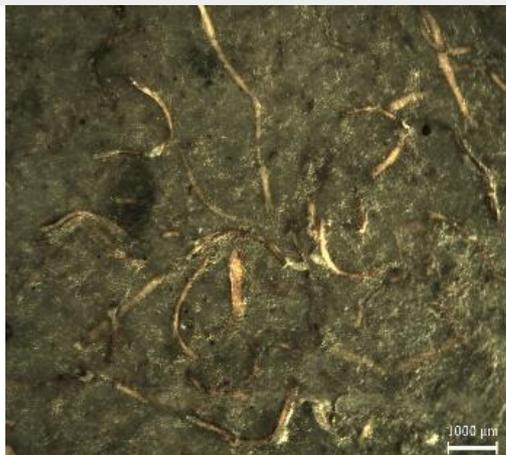




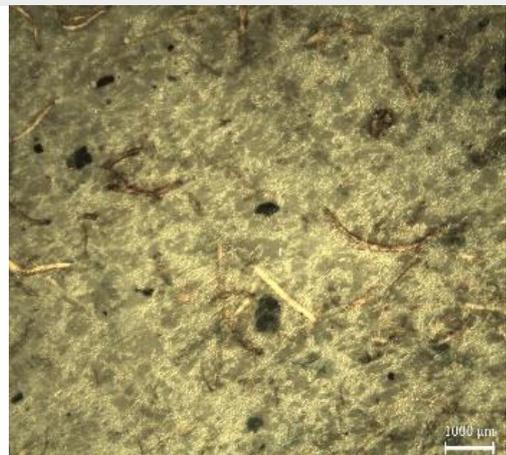
TPO + 4% (w/w) Fibra



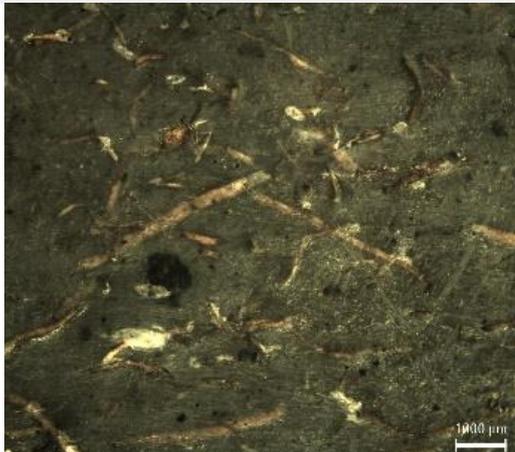
TPO + 4% (w/w) Fibra - Verso



TPO + 6% (w/w) Fibra



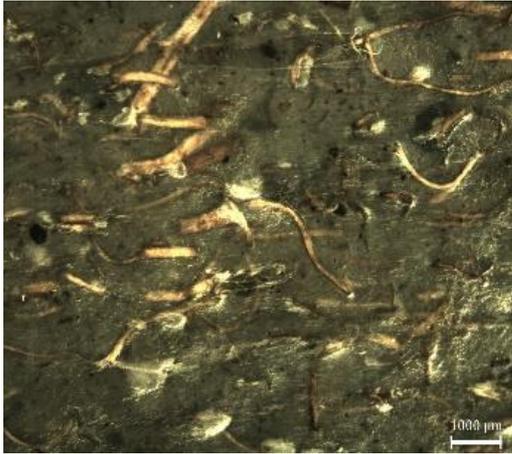
TPO + 6% (w/w) Fibra - Verso



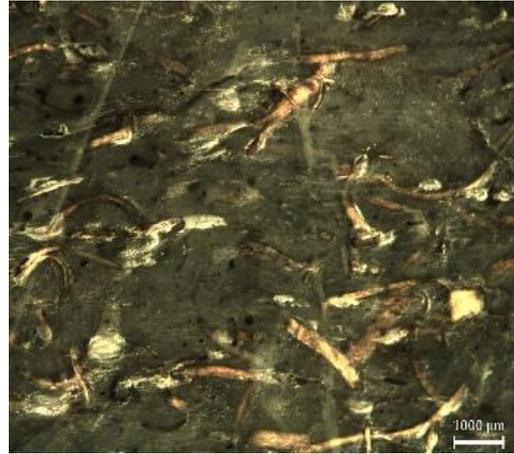
TPO + 8% (w/w) Fibra



TPO + 8% (w/w) Fibra - Verso

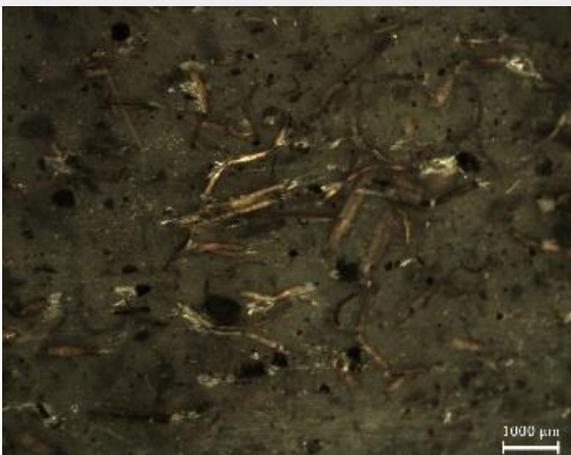


TPO + 10% (w/w) Fibra



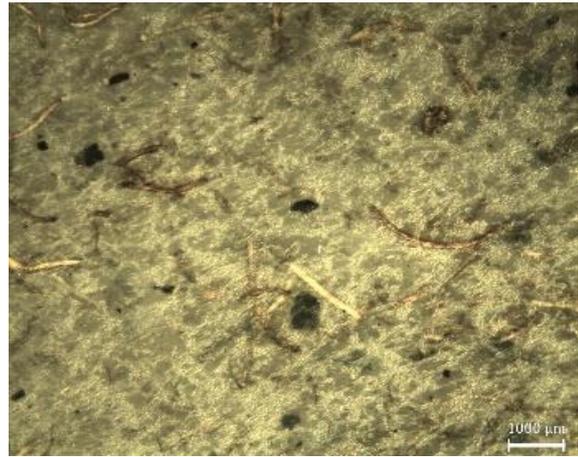
TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso

Tabela 33: imagens obtidas na observação das folhas compósitas com fibra de Coco com comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.

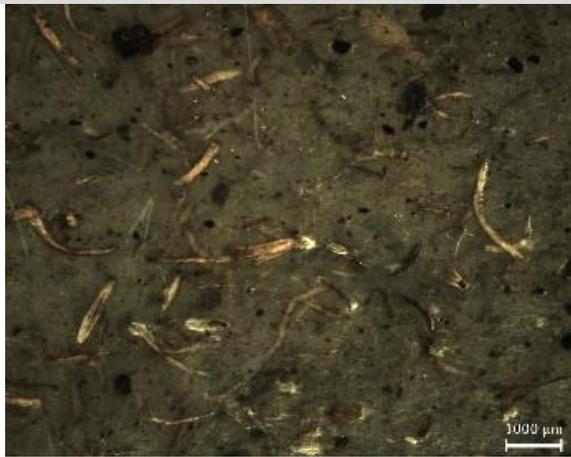
Fibra de Coco 500 μm	
Ampliação: 0,67 x 1,67	
	
TPO + 2% (w/w) Fibra	TPO + 2% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 4% (w/w) Fibra	TPO + 4% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 6% (w/w) Fibra	TPO + 6% (w/w) Fibra - Verso



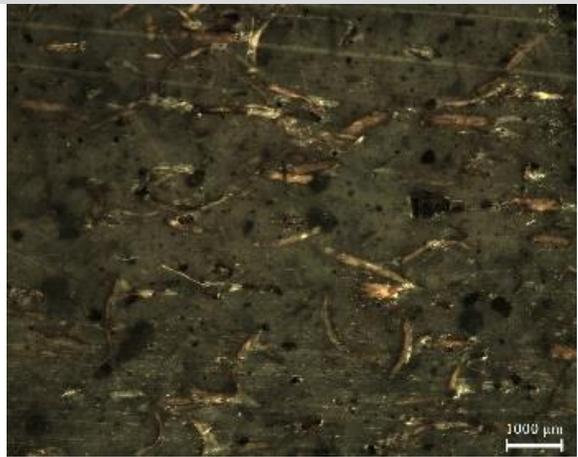
TPO + 8% (w/w) Fibra



TPO + 8% (w/w) Fibra - Verso



TPO + 10% (w/w) Fibra



TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso

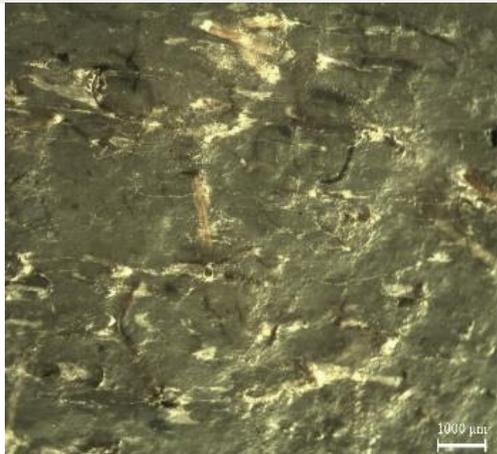


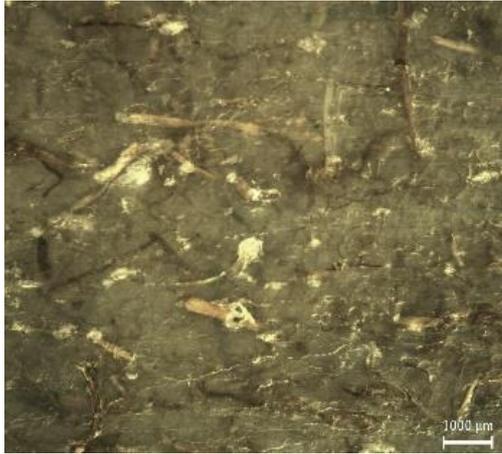
TPO + 15% (w/w) Fibra



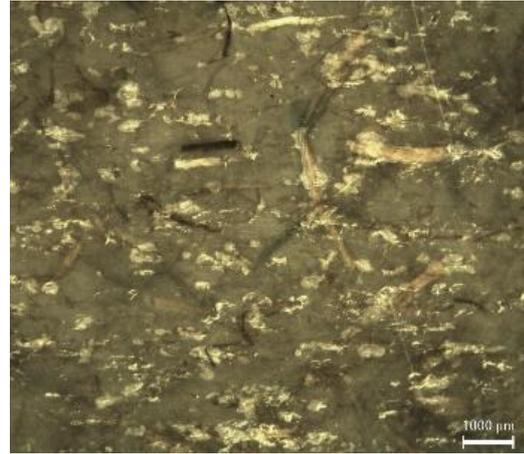
TPO + 15% (w/w) Fibra - Verso

Tabela 34: Imagens obtidas pela observação das folhas compostas com fibras de Sisal com comprimento de 1000 μm à lupa estereoscópica.

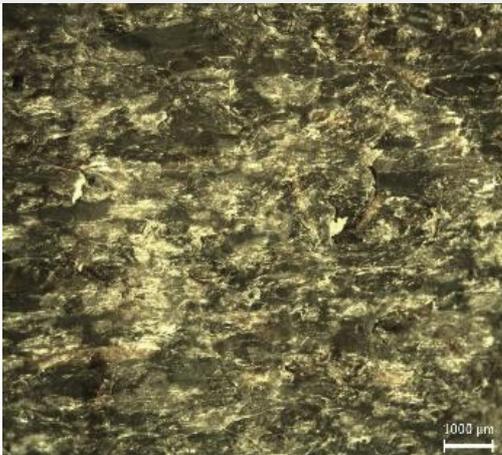
Fibra de Sisal 1000 μm	
Ampliação: 0,67 X 1,67	
	
TPO + 2% (w/w) Fibra	TPO + 2% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 4% (w/w) Fibra	TPO + 4% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 6% (w/w) Fibra	TPO + 6% (w/w) Fibra - Verso



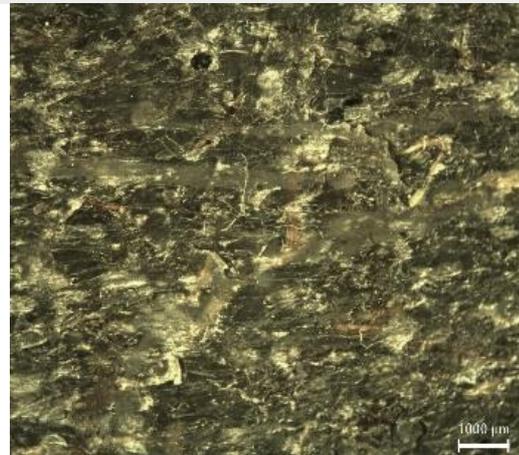
TPO + 8% (w/w) Fibra



TPO + 8% (w/w) Fibra - Verso

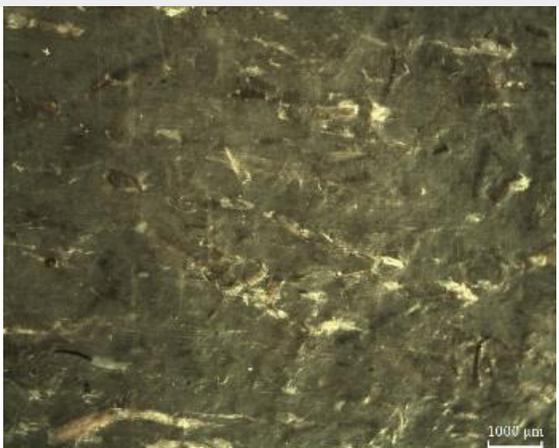


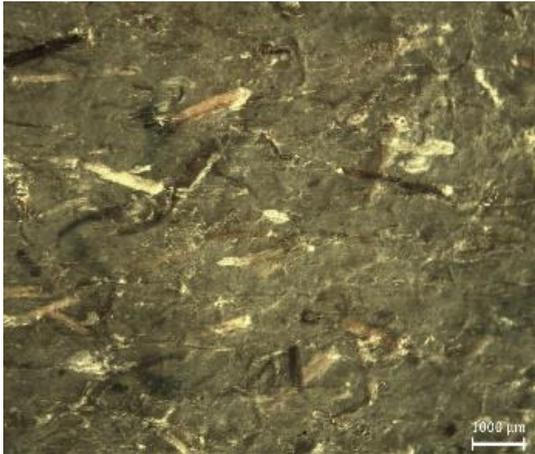
TPO + 10% (w/w) Fibra



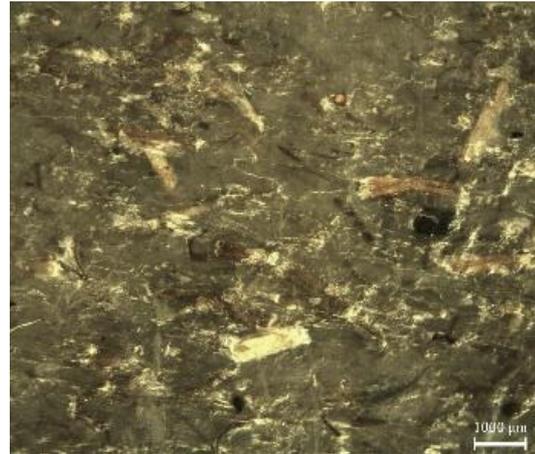
TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso

Tabela 35: Imagens obtidas com a visualização das folhas compostas com fibras de sisal de comprimento de 500 μm à lupa estereoscópica.

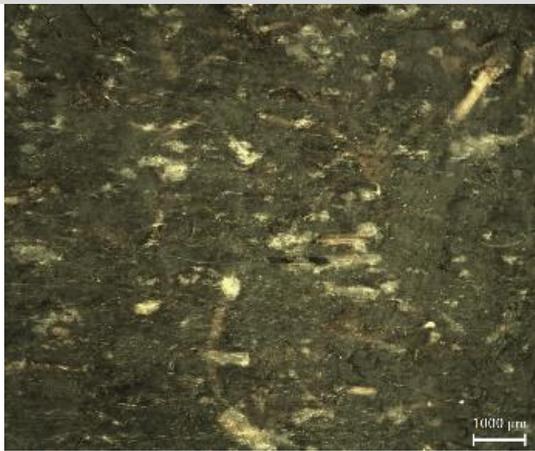
Fibra de Sisal 500 μm	
Ampliação: 0,67 X 1,67	
	
TPO + 2% (w/w) Fibra	TPO + 2% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 4% (w/w) Fibra	TPO + 4% (w/w) Fibra - Verso
	
TPO + 6% (w/w) Fibra	TPO + 6% (w/w) Fibra - Verso



TPO + 8% (w/w) Fibra



TPO + 8% (w/w) Fibra - Verso



TPO + 10% (w/w) Fibra



TPO + 10% (w/w) Fibra - Verso



TPO + 15% (w/w) Fibra



TPO + 15% (w/w) Fibra - Verso

ANEXO III – ENSAIOS DE TGA

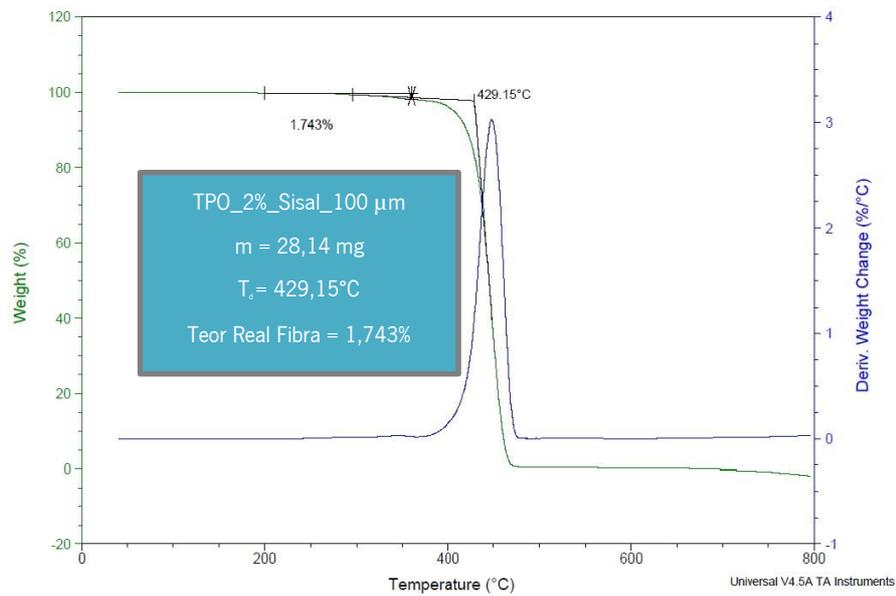


Figura 65: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Sisal de comprimento de 1000 μm.

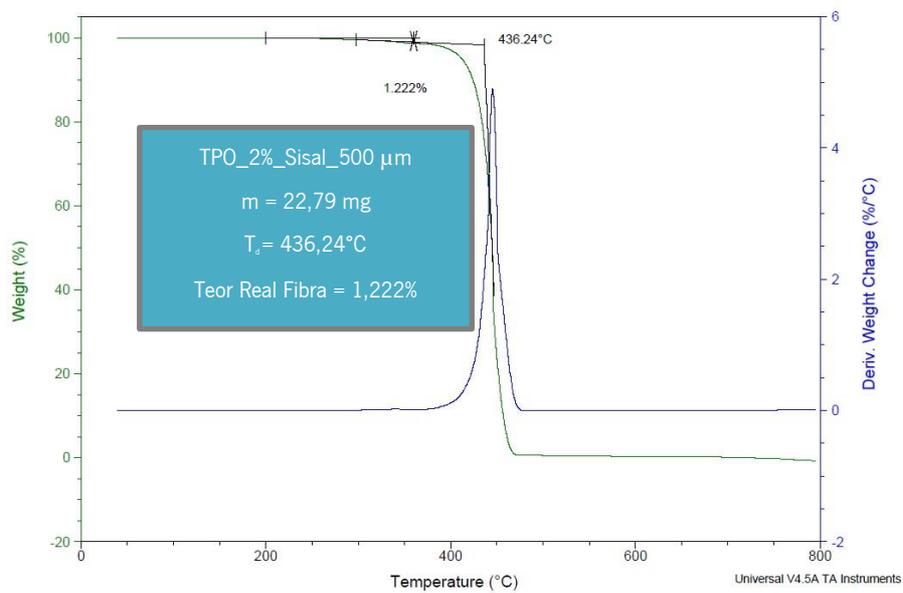


Figura 66: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Sisal de comprimento de 500 μm.

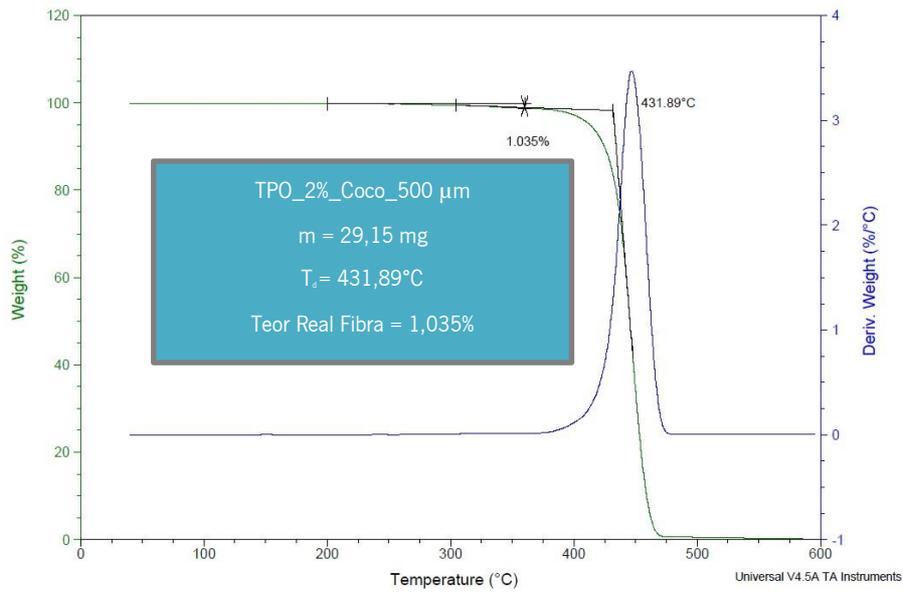


Figura 67: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 2% de Fibra de Coco de comprimento de 500 μm .

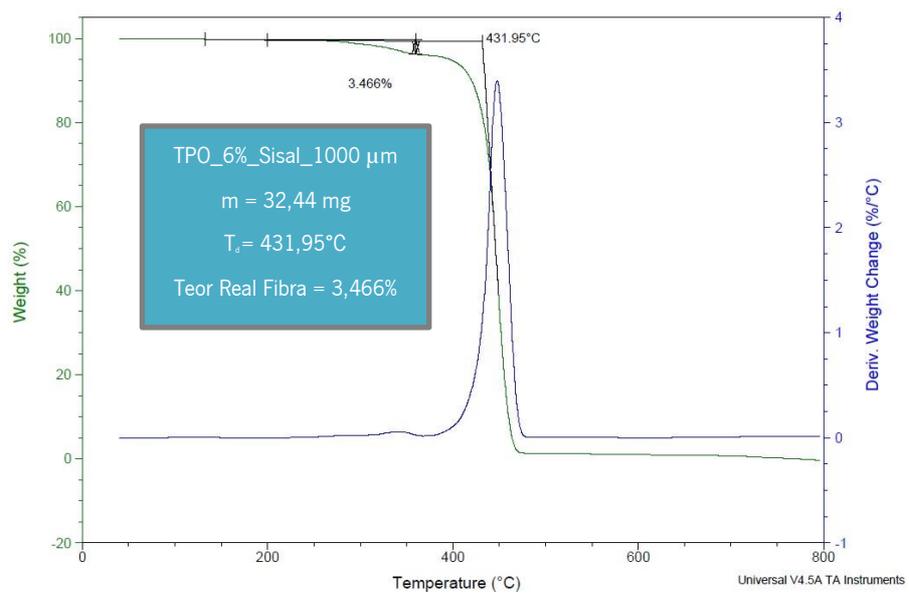


Figura 68: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 6% de Fibra de Sisal de comprimento de 1000 μm .

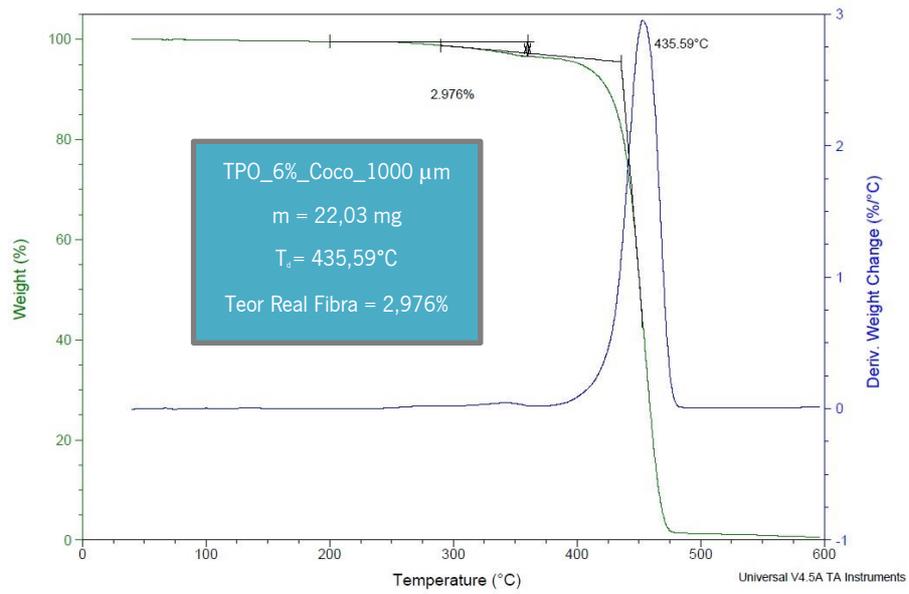


Figura 69: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 6% de Fibra de Coco de comprimento de 1000 μm.

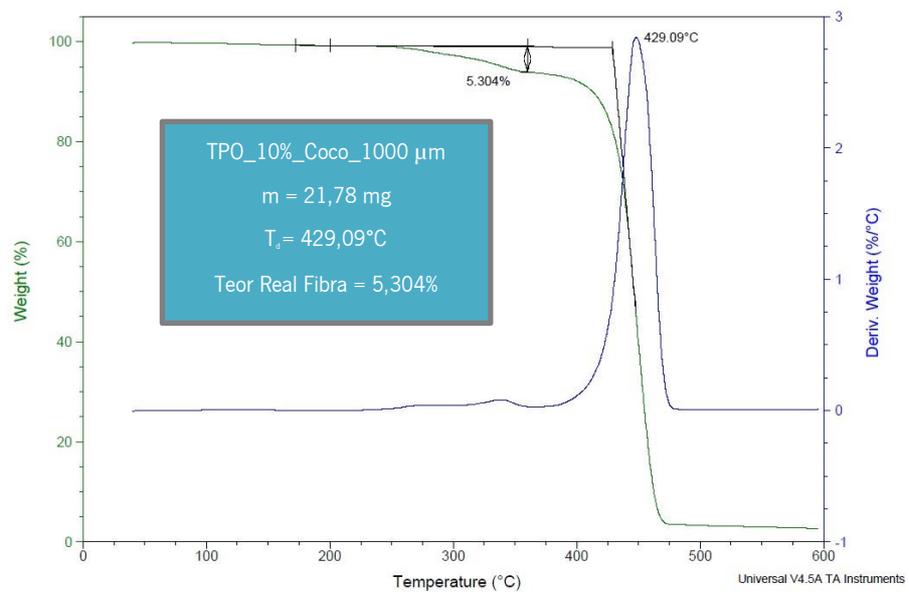


Figura 70: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 10% de Fibra de Coco de comprimento de 1000 μm.

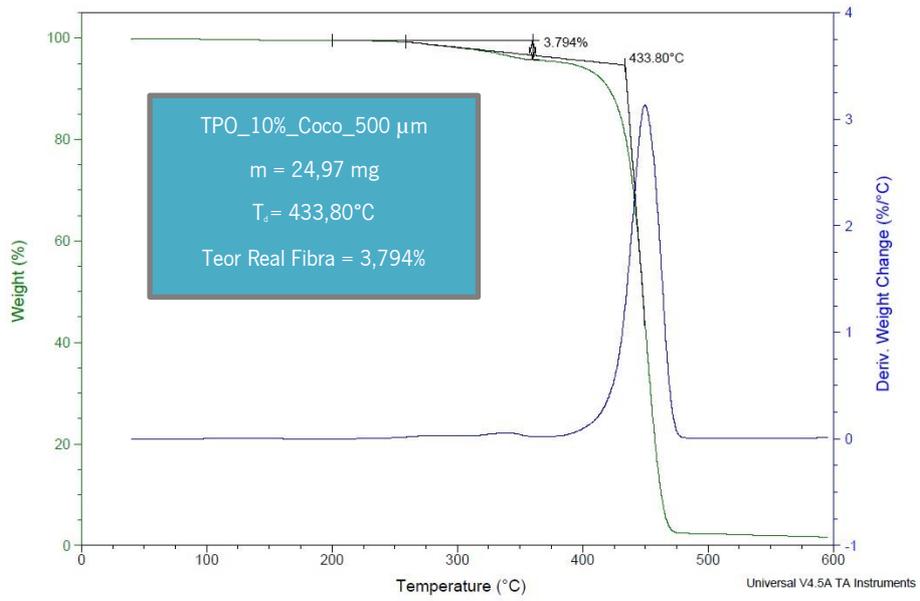


Figura 71: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 10% de Fibra de Coco de comprimento de 500 μm.

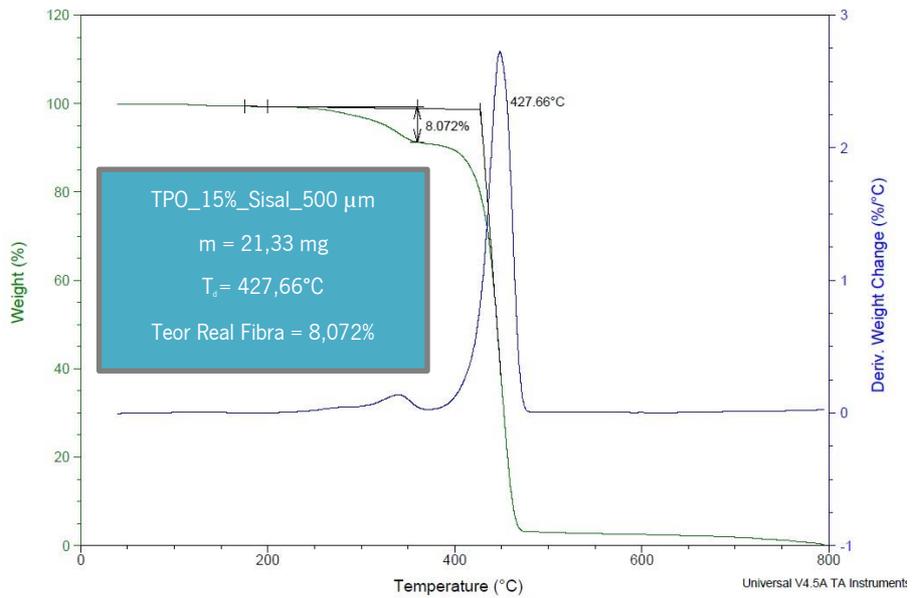


Figura 72: Curva obtida no ensaio de TGA realizado à folha compósita com 15% de Fibra de Sisal de comprimento de 500 μm.

ANEXO IV- AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO POR PESO PRÓPRIO

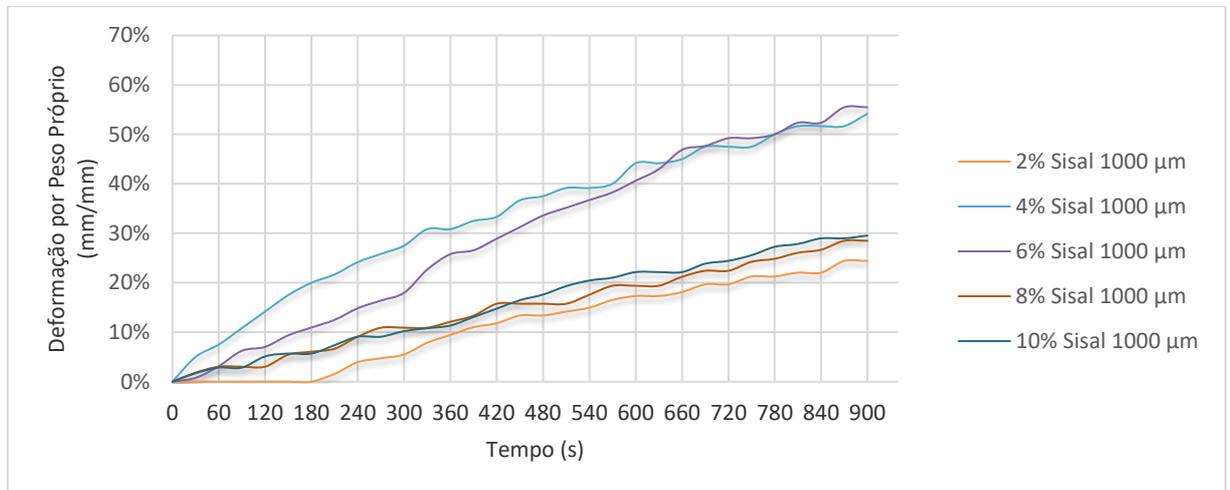


Figura 73: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compostas com fibra de sisal com comprimento de 1000 µm, durante um período de ensaio de 15 minuto.

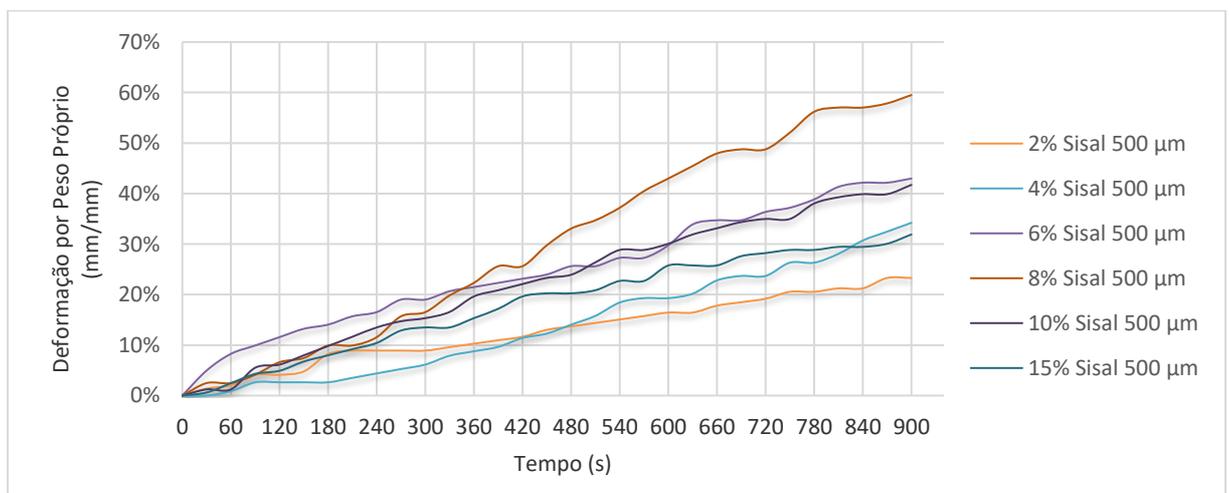


Figura 74: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compostas com fibra de sisal com comprimento de 500 µm, durante um período de ensaio de 15 minuto.

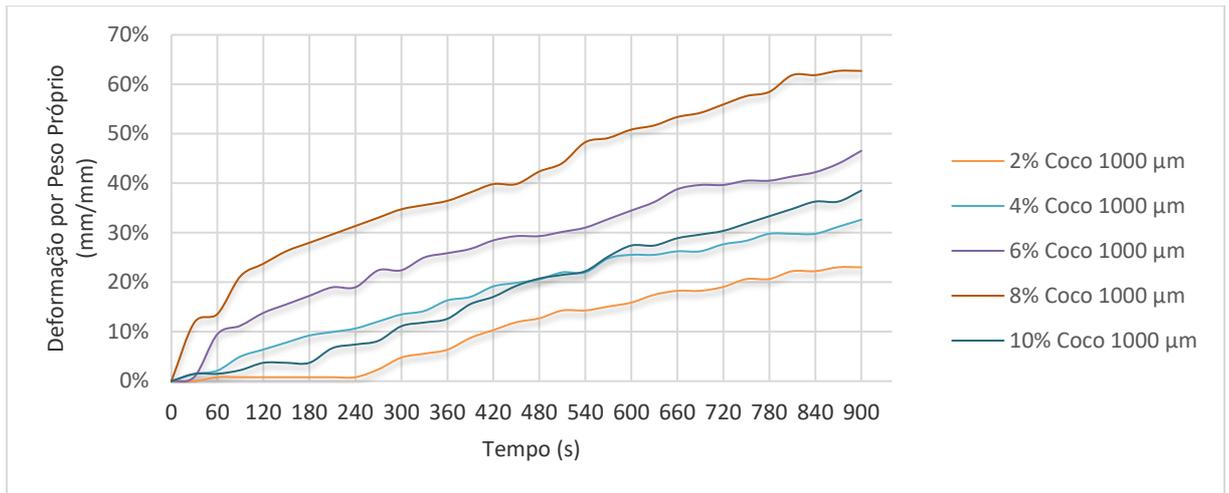


Figura 75: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 1000 µm, durante um período de ensaio de 15 minuto.

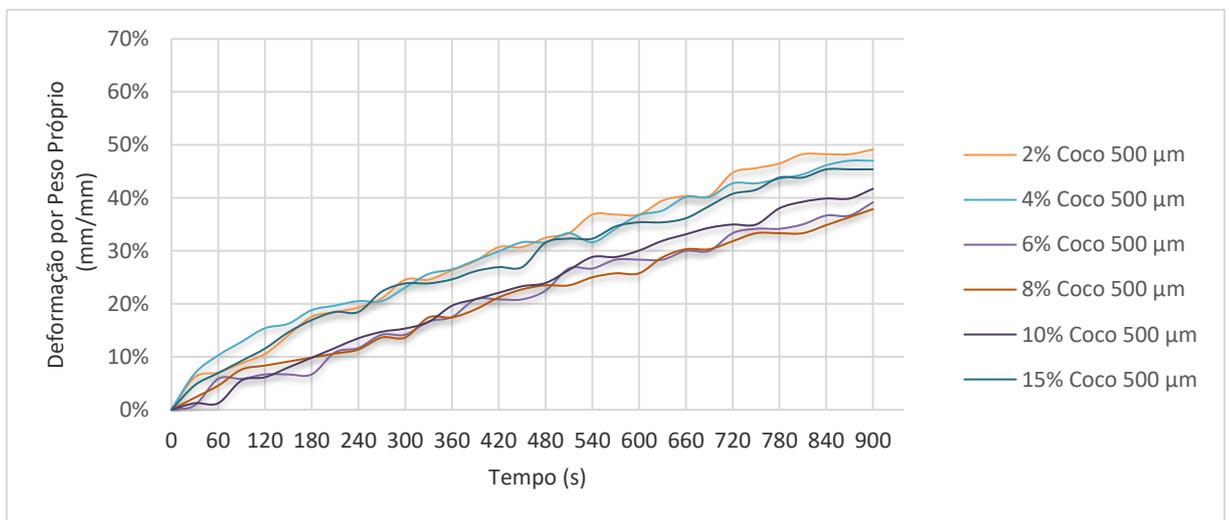


Figura 76: Resultados obtidos na avaliação da deformação por peso próprio realizada às folhas compósitas com fibra de coco com comprimento de 500 µm, durante um período de ensaio de 15 minuto.