

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Centro de Desenvolvimento Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Dissertação

**Obtenção e caracterização de compósitos sustentáveis de polietileno verde
reforçados com casca de ovos e bio-CaCO₃**

Kássia Peçanha Vieira

Pelotas, 2021

Kássia Peçanha Vieira

**Obtenção e caracterização de compósitos sustentáveis de polietileno verde
reforçados com casca de ovos e bio-CaCO₃**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Amanda Dantas de Oliveira

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

V657o Vieira, Kássia Peçanha

Obtenção e caracterização de compósitos sustentáveis de polietileno verde reforçados com casca de ovos e bio-CaCO₃ / Kássia Peçanha Vieira ; Amanda Dantas de Oliveira, orientadora. — Pelotas, 2021.

90 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Polímero verde. 2. Resíduos naturais. 3. Particulado. 4. Sustentabilidade. 5. Renovável. I. Oliveira, Amanda Dantas de, orient. II. Título.

CDD : 620.11063

Kássia Peçanha Vieira

Obtenção e caracterização de compósitos sustentáveis de polietileno verde
reforçados com casca de ovos e bio-CaCO₃

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade
Federal de Pelotas.

Data da defesa: 23/08/2021

Banca examinadora:

Prof.^a Dra. Amanda Dantas de Oliveira (Orientadora)

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São
Carlos

Prof. Dr. André Ricardo Fajardo

Doutor em Química pela Universidade Estadual de Maringá

Dr. Cesar Augusto Gonçalves Beatrice

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São
Carlos

Prof. Dr. José Henrique Alano (Suplente)

Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São
Carlos

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora Amanda pela parceria durante esse período que trabalhamos juntas, por ser uma excelente profissional a qual acrescentou muito à minha vivência acadêmica e além disso por ser uma pessoa ímpar, compreensível e ter se tornado uma grande amiga.

A todos os colegas que fazem parte do Laboratório de Materiais Compósitos, que quando iniciei o mestrado me receberam de braços abertos e ao longo desse tempo proporcionaram uma troca incrível de conhecimentos, ajuda e amizade.

À Braskem, Padaria Sonho da Manhã e Cristal Master, pela disponibilidade e fornecimento dos materiais necessários para desenvolver este trabalho: polietileno verde, cascas de ovos e agente compatibilizante.

Aos laboratórios, centros e departamentos colaboradores pelas caracterizações realizadas, as quais foram de extrema importância para a finalização deste projeto: Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados da UFPI, Centro de Microscopia Eletrônica do Sul da FURG, Centro de Desenvolvimento e Controle em Biomateriais da UFPel, Departamentos de Engenharia Ambiental e Engenharia Química da FURB, Laboratório de Verificação e Validação da FURB, e Laboratório de Polímeros da UFSCar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e a Universidade Federal de Pelotas por apesar das dificuldades, proporcionar um ensino público de qualidade e infraestrutura para esta pesquisa. Agradeço também à Capes, pela concessão da bolsa.

Por fim, agradeço aos meus pais Airton e Raquel e minha irmã Kéuren pela confiança e apoio de sempre. Ao meu namorado Vinícius pelo companheirismo, auxílio e incentivo durante este ciclo.

Resumo

VIEIRA, Kássia Peçanha. **Obtenção e caracterização de compósitos sustentáveis de polietileno verde reforçados com casca de ovos e bio- CaCO_3 .**

Orientadora: Amanda Dantas de Oliveira. 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

Os polímeros são materiais consolidados em diversas áreas de aplicação, isso se deve às ótimas propriedades que estes materiais detêm e por serem de baixo custo. Empresas e pesquisadores estão aderindo a ideia sobre consciência ambiental e produzindo materiais sustentáveis, como é o caso do polietileno verde *I'm green™*. Materiais compósitos eram inicialmente produzidos apenas com constituintes sintéticos, todavia, com o passar dos anos, tornou-se visível a gama de estudos alternando o uso de tais materiais por resíduos naturais, como as cascas de ovos, que são provenientes de um alimento altamente consumível e geram uma grande deposição de rejeitos rica em sais minerais. Desse modo, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento sustentável, o presente trabalho busca obter, caracterizar e analisar materiais compósitos feitos a partir de polietileno verde de baixa densidade (PEVBD), cascas de ovos e carbonato de cálcio extraído das mesmas. Avaliou-se também o efeito do polietileno *graftizado* com anidrido maleico (PE-g-AM) como agente compatibilizante na preparação dos compósitos. Para isso, as cascas de ovos foram coletadas e preparadas para posterior obtenção do carbonato de cálcio. Os pós obtidos foram misturados juntamente com o polímero de interesse pelo processo de extrusão e posteriormente moldados via injeção. As partículas *in natura* e bio- CaCO_3 foram caracterizadas por difração de raios-x (DRX), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), análise termogravimétrica (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e granulometria por dispersão a laser. A matriz de PEVBD e os compósitos foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas (ensaio de tração e impacto Izod), propriedades térmicas (TGA e calorimetria exploratório diferencial –DSC) e, para análise estrutural e morfológica, foi empregue microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ao final do estudo, os resultados mostraram um aumento significativo no módulo de Young dos compósitos em relação ao polímero puro. Este efeito foi mais pronunciado para o sistema PEVBD/*in natura*, onde o aumento no módulo de Young foi de aproximadamente 124%. Os resultados do MEV mostraram boa dispersão dos materiais de reforço na matriz e boa adesão entre a matriz e o reforço. Sendo assim, tanto as partículas *in natura* quanto as de bio- CaCO_3 podem ser utilizadas como material de reforço em compósitos, onde atuam principalmente na rigidez e resistência ao impacto dos mesmos. Os compósitos produzidos nesta pesquisa têm forte competência para serem aplicados no setor de embalagens, onde comumente o PEVBD já vem sendo empregado.

Palavras-chave: polímero verde; resíduos naturais; particulado; sustentabilidade; renovável.

Abstract

VIEIRA, Kássia Peçanha. **Obtaining and characterization of sustainable green polyethylene composites reinforced with eggshell and bio-CaCO₃**. Advisor: Amanda Dantas de Oliveira. 2021. 90f. Dissertation (Masters in Science and Materials Engineering) – Technological Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

Polymers are consolidated materials in several application areas, due to their excellent properties and low cost. Companies and researchers are adhering to the idea about environmental awareness and producing sustainable materials, such as the green polyethylene *I am green*TM. Composite materials were initially produced only with synthetic constituents, however, over the years, the range of studies changing the use of such materials by natural waste became visible, such as eggshells, which come from a highly consumable food and generate a large amount of waste rich in mineral salts. Thus, in order to contribute to the sustainable development, this work aimed to obtain, characterize and analyze composite materials made from low density green polyethylene (LDGPE), eggshells, and calcium carbonate. For that, the eggshells were collected and prepared for later extraction of calcium carbonate. The obtained powders were mixed with the polymer of interest by extrusion process and then molded via injection. The *in natura* and bio-CaCO₃ particles were characterized by x-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry analysis (TGA), scanning electron microscopy (SEM) and laser dispersion granulometry. The LDGPE matrix and the composites were characterized for their mechanical properties (tensile test and Izod impact), thermal properties, through TGA and differential scanning calorimetry (DSC) and for structural and morphological analysis, scanning electron microscopy (SEM). At the end of the study, the results showed a significant increase in the Young's modulus of the composites compared to the pure polymer. This effect was more pronounced for the PEVBD/*in natura* system, where the increase in Young's modulus was approximately 124%. The SEM results showed good dispersion of the reinforcement materials in the matrix and good adhesion between the matrix and the reinforcement. Thus, both *in natura* and bio-CaCO₃ particles can be used as reinforcement material in composites, where they act mainly on their stiffness and impact resistance. The composites produced in this research have strong competence to be applied in the packaging sector, where LDGPE is commonly used.

Keywords: green polymer; natural waste; particulate; sustainability; renewable.

Lista de Figuras

Figura 1	Representação das fases que constituem um compósito.....	19
Figura 2	Fluxograma de classificação dos compósitos.....	20
Figura 3	Arranjo das cadeias em uma célula unitária do polietileno	22
Figura 4	Microscopia óptica com luz polarizada da estrutura esferulítica do PE. Ampliação de 525x	23
Figura 5	Curvas de tensão-deformação do PEBD e PEAD	25
Figura 6	Fotografia do Centro de Inovação e Tecnologia do pólo petroquímico da Braskem na cidade de Triunfo, RS.....	25
Figura 7	Esquema da relação do rendimento da produção de PE verde.....	26
Figura 8	Rota química do polietileno verde e polietileno convencional	27
Figura 9	Vantagens e desvantagens do polietileno verde.....	28
Figura 10	Esquema apresentando a estrutura de uma casca de ovo.....	32
Figura 11	Micrografia eletrônica de varredura mostrando (A) as camadas de uma casca de ovo, onde de cima para baixo: cutícula, camada cristalina vertical, camada paliçada, camada mamilar e membranas. Em (B-C) apresenta-se uma ampliação da camada paliçada, a qual apresenta numerosos vazios esférico.....	33
Figura 12	Esquema reacional da graftização do polietileno com anidrido maleico (PE-g-AM)	36

Figura 13	Representação da vista de uma extrusora monorrosca	37
Figura 14	Fluxograma apresentando as principais etapas da metodologia aplicada	42
Figura 15	Cascas de ovos após limpeza e remoção de sujidades.....	43
Figura 16	Casca de ovos, em A) moída, B) peneirada.....	43
Figura 17	Bio-CaCO ₃ obtido por meio do método de calcinação.....	44
Figura 18	<i>Pellets</i> obtidos pelo processo de extrusão, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/ <i>in natura</i> , C) PEVBD/bio-CaCO ₃ , D) PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM.....	45
Figura 19	Corpos de prova obtidos a partir de moldagem por injeção para ensaio de tração uniaxial, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/ <i>in natura</i> , C) PEVBD/bio-CaCO ₃ , D) PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM.....	46
Figura 20	Corpos de prova obtidos a partir de moldagem por injeção para ensaio de resistência ao impacto Izod, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/ <i>in natura</i> , C) PEVBD/bio-CaCO ₃ , D) PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM.....	47
Figura 21	Micrografias de MEV dos pós <i>in natura</i> e bio-CaCO ₃ – ampliação de 200x, 500x, 1000x.....	52
Figura 22	Difratogramas de raios-x das partículas <i>in natura</i> e de bio-CaCO ₃ ...	54
Figura 23	Espectros de FTIR das partículas de interesse (<i>in natura</i> e bio-CaCO ₃).....	54

Figura 24	Curvas de TG/DTG dos pós <i>in natura</i> e bio-CaCO ₃	55
Figura 25	Micrografias de MEV do PEVBD puro – ampliação de 200x, 500x, 1050x, 2250x.....	56
Figura 26	Micrografias de MEV dos compósitos obtidos – ampliação de 200x, 500x, 1050x, 2250x.....	57
Figura 27	Curvas de TG/DTG dos compósitos produzidos.....	58
Figura 28	Termogramas de DSC obtidos para os compósitos produzidos, em A) resfriamento e B) segundo aquecimento	59
Figura 29	Corpos de prova após ensaio de impacto (<i>no break</i>), em A) PEVBD puro, B) PEVBD/ <i>in natura</i> , C) PEVBD/bio-CaCO ₃ , D) PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM.....	61
Figura 30	Corpos de prova após ensaio de tração, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/ <i>in natura</i> , C) PEVBD/bio-CaCO ₃ , D) PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM.....	62
Figura 31	Histogramas de dados obtidos a partir do ensaio de tração das amostras estudadas	64

Lista de Tabelas

Tabela 1	Propriedades e características do PEBD e PEAD.....	24
Tabela 2	Comportamento degradativo do PEBD e PEAD em determinados meios ^a	24
Tabela 3	Comparação entre o polietileno convencional e polietileno verde.....	29
Tabela 4	Constituintes da casca de ovo de aves.....	32
Tabela 5	Algumas propriedades do polimorfo de carbonato de cálcio encontrado na casca de ovos aviárias (calcita)	34
Tabela 6	Condições de processamento dos materiais compósitos via extrusão.....	45
Tabela 7	Formulações dos <i>pellets</i> obtidos pelo processo de extrusão.....	46
Tabela 8	Tamanho de partícula e área superficial determinados para os materiais obtidos a partir das cascas de ovos	53
Tabela 9	Dados térmicos obtidos a partir da análise de DSC.....	59
Tabela 10	Dados obtidos a partir dos ensaios mecânicos (tração e impacto), para o polímero puro e os compósitos	63

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABBI	Associação Brasileira de Bioinovação
ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Bio-CaCO ₃	Carbonato de cálcio extraído de cascas de ovos
CAGR	<i>Compound Annual Growth Rate</i>
CDC-Bio	Centro de Desenvolvimento e Controle em Biomateriais
CEME-SUL	Centro de Microscopia Eletrônica do Sul
CEPAL	Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe
DRX	Difração de Raios-x
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria Derivada
EDX	Espectroscopia de Raios-X por Energia Dispersiva
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
FURB	Universidade Regional de Blumenau
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
HDPE-g-AM	Polietileno com Enxerto de Anidrido Maleico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>In natura</i>	Particulado de cascas de ovos
LabCom	Laboratório de Materiais Compósitos
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ONU	Organização das Nações Unidas
PBAT	Poli(butileno adipato co-tereftalato)
PC	Polycarbonato

PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PE-g-AM	Polietileno Graftizado com Anidrido Maleico
PET	Polietileno Tereftalato
PEVAD	Polietileno Verde de Alta Densidade
PEVBD	Polietileno Verde de Baixa Densidade
PHB	Poli (3-hidroxibutirato)
PLA	Poliácido láctico
PP	Polipropileno
RMN	Ressonância Magnética Nuclear de Prótons
T _c	Temperatura de cristalização
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _m	Temperatura de fusão
TGA	Termogravimetria
UFPeI	Universidade Federal de Pelotas
UFPI	Universidade Federal do Piauí
UHMWPE	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
UV-Vis	Espectroscopia no Ultravioleta Visível
WWF	<i>World Wide Fund for Nature</i>
X _c	Grau de cristalinidade
ΔH _c	Entalpia de cristalização
ΔH _f	Entalpia de fusão cristalina

Sumário

1 Introdução	16
2 Objetivos	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos	18
3 Referencial teórico	19
3.1 Materiais compósitos	19
3.2 Matrizes para compósitos	20
3.2.1 Matrizes termoplásticas.....	21
3.2.1.1 Polietileno	21
3.2.1.1.1 Polietileno verde.....	25
3.3 Compósitos reforçados por partículas.....	30
3.3.1 Cascas de ovos.....	31
3.3.1.1 Carbonato de cálcio	33
3.4 Agente de acoplamento ou compatibilizante.....	35
3.4.1 Polietileno graftizado com anidrido maleico (PE-g-AM)	35
4 Processo de extrusão.....	36
4.1 Extrusão de materiais compósitos.....	37
5 Revisão da literatura	39
5.1 Polietileno verde utilizado como matriz em compósitos	39
5.2 Casca de ovos e carbonato de cálcio como agentes de reforço	40
6 Materiais e métodos	42
6.1 Materiais utilizados.....	42
6.2 Metodologia	42
6.2.1 Preparação das cascas de ovos	43
6.2.2.1 Obtenção do carbonato de cálcio.....	44
6.2.3 Fabricação do material compósito.....	44
6.3 Técnicas de caracterização	47
6.3.1 Caracterização das partículas <i>in natura</i> e de carbonato de cálcio	47
6.3.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	47
6.3.1.2 Granulometria por difração a laser	48
6.3.1.3 Difração de raios-x (DRX).....	48

6.3.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	48
6.3.1.5 Análise termogravimétrica (TGA)	49
6.3.2 Caracterização da matriz polimérica e dos compósitos produzidos	49
6.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	49
6.3.2.2 Análise termogravimétrica (TGA)	49
6.3.2.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	49
6.3.2.4 Resistência ao impacto tipo Izod	50
6.3.2.5 Ensaio de tração uniaxial	51
7 Resultados e discussão	52
7.1 Partículas de reforço (<i>in natura</i> e bio-CaCO ₃)	52
7.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	52
7.1.2 Granulometria por difração a laser	53
7.1.3 Difração de raios-X (DRX)	53
7.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	54
7.1.5 Análise termogravimétrica (TGA)	55
7.2 Materiais compósitos	55
7.2.1 Caracterizações morfológicas e estruturais	55
7.2.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	55
7.2.2 Caracterizações térmicas	57
7.2.2.1 Análise termogravimétrica (TGA)	57
7.2.2.2 Calorimetria exploratório diferencial (DSC)	58
7.2.3 Caracterizações mecânicas	60
7.2.3.1 Resistência ao impacto Izod	60
7.2.3.2 Tração uniaxial	62
8 Considerações finais	65
9 Sugestões para trabalhos futuros	66
Referências	67
Anexos	78
Apêndices	82

1 Introdução

Não é nenhuma surpresa que os polímeros estão presentes em diversos utensílios que são usados diariamente, brinquedos, peças automotivas, garrafas de bebidas, tubos de encanamento, sacolas de supermercado, tintas de parede, como citam Silva e Rabelo (2017). Entretanto, com a demanda de produção de plásticos crescendo demasiadamente e o processo de reciclagem não atingindo o grau necessário, o desuso inadequado desses materiais vêm dando aos polímeros o título de vilões do meio ambiente. Em um artigo publicado pelo G1, segundo dados do *World Wide Fund for Nature* (WWF), o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico mundial, produzindo em torno de 111 milhões de toneladas de lixo plástico por ano e reciclando apenas 1% de tudo isso.

O petróleo é a principal fonte de matéria-prima para a obtenção de materiais poliméricos. Todavia, nos dias de hoje vive-se um cenário onde há uma limitação crescente da disponibilidade de fontes fósseis, resultando no aumento do valor desse combustível. Além do mais, durante o processo de produção dos polímeros é emitido para a atmosfera milhares de gases que contribuem para a poluição ambiental (BORONAT *et al.*, 2015).

Apesar dos polímeros apresentarem ótimas propriedades, com os fatos descritos acima, pode-se perceber que eles geram dois grandes problemas: o uso de fonte não-renovável para obtenção de sua matéria-prima e a grande quantidade de resíduos sólidos gerados para descarte. Dessa maneira, Belloli (2010) discorre que a ciência que trabalha em busca de novos materiais deixou de deter-se apenas às propriedades que estes devem apresentar e passou a preocupar-se em estudar formas de produzir materiais que afetem menos a sociedade em que estamos incluídos, seja durante o processo de produção, utilização ou descarte.

Inserida neste contexto ambiental e buscando fortalecer o desenvolvimento sustentável, está a petroquímica brasileira Braskem. Com a intenção de elaborar um produto sustentável e com matéria-prima renovável a empresa criou o polietileno verde *I'm green™*. Diferente dos demais polímeros que são derivados de fontes fósseis, como petróleo e gás natural, a obtenção do polietileno verde se dá a partir do etanol da cana-de-açúcar. Desse modo, colabora para a redução de emissão dos gases causadores do efeito estufa, mantendo as mesmas propriedades e desempenho comparado ao polietileno convencional (BRASKEM, 2010).

Mulinari (2009) comenta que o pesquisador de hoje tem maior preocupação em preservar o meio ambiente, sendo assim traz alternativas para substituir insumos sintéticos por resíduos naturais, onde combina materiais poliméricos reforçados com fibras naturais, e neste contexto existe uma multiplicidade de opções sendo exploradas, como por exemplo, sisal (BRANCO *et al.*, 2016), curauá (SANTOS *et al.*, 2016), coco verde (FLORENTINO *et al.*, 2017), casca de ovos (ANDRADE, 2017), piaçava (LIMA, 2017) e casca de arroz (COSTA; ANDRADE; ALMEIDA, 2018). Desse modo, com a utilização de resíduos naturais como material de reforço, tem-se uma forma de baratear o custo de produção e aumentar a biodegradabilidade de tais materiais, além de aprimorar-se as propriedades dos mesmos.

De acordo com dados divulgados pela Associação Brasileira de Proteínas de Animais (ABPA) em uma matéria da revista Globo Rural, no ano de 2018 o Brasil bateu o recorde de consumo de ovos, contabilizando em torno de 212 ovos consumidos por pessoa durante o ano, o que acarretou no aumento de 11% da produção de ovos em relação ao ano anterior. Em 2020, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o número de dúzias de ovos produzidos chegou a quase 3 milhões.

A casca de ovo é rica em sais minerais, o que faz com que esse material sirva como base para o desenvolvimento de produtos na indústria cosmética, fertilizantes, suplementos alimentares e até mesmo implantes ósseos. Diante disto e com o intuito de minimizar a gigantesca deposição de rejeitos deste alimento, a casca de ovo vem sendo aplicada também na produção de materiais compósitos, embora que seja pouco explorada. (ANDRADE, 2017).

Como comenta Oliveira (2014) o constituinte principal da casca de ovo é o carbonato de cálcio (CaCO_3), o qual vem se destacando na aplicação como carga em compósitos pelo fato de poder apresentar-se em forma de nanopartículas, fazendo com que haja uma otimização na homogeneização entre matriz e fase dispersa.

Diante das considerações expostas acima e buscando colaborar para o progresso do desenvolvimento sustentável, o presente trabalho teve como objetivo obter, caracterizar e analisar materiais compósitos feitos a partir de polietileno verde e reforçados com cascas de ovos de galinha e carbonato de cálcio extraído das mesmas. Em vista disso, os corpos de prova foram preparados e posteriormente

caracterizados a fim de analisar suas propriedades mecânicas e térmicas, e investigar suas características morfológicas e estruturais.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Obter, caracterizar e comparar materiais compósitos de matriz termoplástica de polietileno verde de baixa densidade, utilizando como agentes de reforço casca de ovos de galinha (*in natura*) e carbonato de cálcio extraído das mesmas (bio- CaCO_3).

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral foi preciso atingir os seguintes objetivos específicos:

- Comparar as propriedades das cascas de ovos e do carbonato de cálcio extraído;
- Estimar o efeito dos diferentes agentes de reforço (*in natura* e bio- CaCO_3) nos compósitos;
- Avaliar a influência do agente compatibilizante nas propriedades finais do compósito;
- Analisar as características e propriedades finais dos compósitos por meio de caracterizações morfológicas, térmicas, mecânicas e estruturais;
- Demonstrar o potencial de matérias-primas provenientes de resíduos e de baixo custo;
- Certificar a utilização de métodos simples e viáveis para a obtenção de novos materiais;

3 Referencial teórico

3.1 Materiais compósitos

A busca por tecnologias modernas sofre uma constante demanda de materiais com as mais variadas propriedades e campos de aplicação, porém, nem sempre essa demanda pode ser atendida pelos materiais convencionais, cerâmicos, metais e polímeros. Diante dessa situação surgem os materiais compósitos, que tem como objetivo reunir materiais com características e propriedades específicas para a aplicação requerida (CALLIESTER; RETHWISCH, 2016).

Ainda de acordo com Calliester e Retchwisch (2016) os compósitos, também chamados de conjugados, contêm uma significativa proporção de propriedades de ambas as fases constituintes. Essas fases são chamadas de fase matriz e fase dispersa, onde a fase matriz apresenta-se de forma contínua e envolve a fase dispersa (Figura 1). As propriedades e características dos materiais compósitos são ditadas pelas propriedades das fases constituintes, quantidade relativa destas e pela geometria de fase dispersa, que trata-se da forma, tamanho, distribuição e orientação das partículas. Além disso, um fator importante é a interação entre as fases, que influenciará na compatibilidade do compósito.

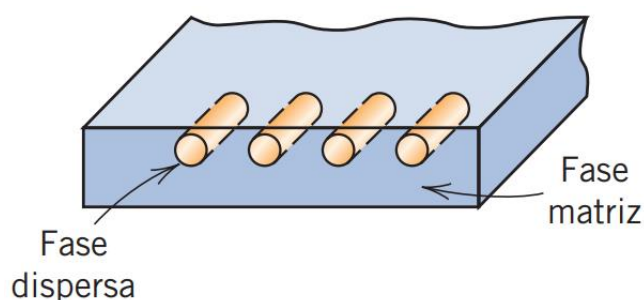


Figura 1 – Representação das fases que constituem um compósito.
Fonte: Adaptado de CALLIESTER; RETCHWISCH, 2016, p. 583.

Os compósitos são materiais que podem provir tanto de origem natural como também sintética, onde a madeira e o osso são exemplos de compósitos naturais. Estes materiais são classificados em três principais divisões: compósitos estruturais, compósitos reforçados por fibra e compósitos reforçados por partícula. A Figura 2

mostra as divisões e subdivisões em que os compósitos podem ser classificados (CALLIESTER; RETHWISCH, 2016).

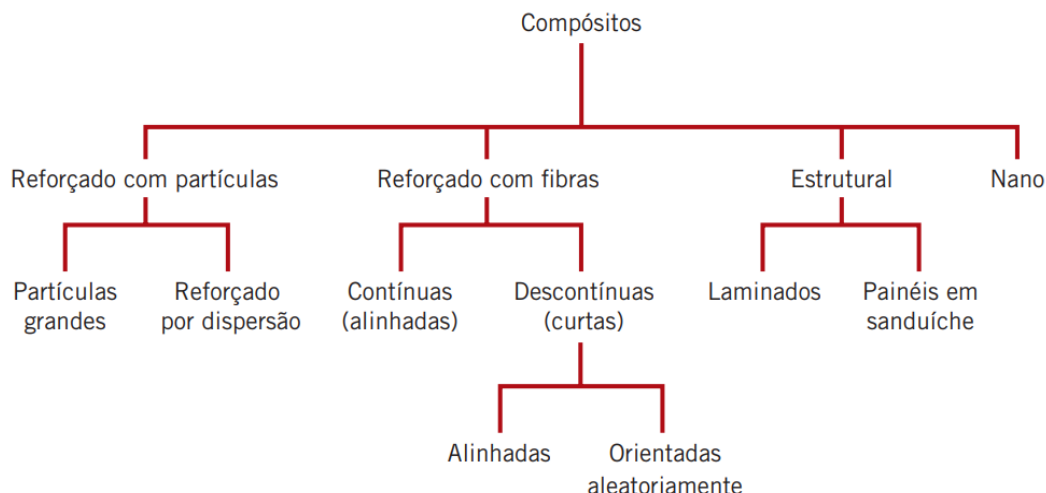


Figura 2 – Fluxograma de classificação dos compósitos.

Fonte: Adaptado de CALLIESTER, RETCHWISCH, 2016, p. 584.

Rezende; Costa; Botelho (2011) considera os compósitos materiais de engenharia multifásicos que possuem dois componentes como já mencionado anteriormente. O reforço (componente estrutural) é responsável por fornecer a resistência ao esforço, enquanto a matriz (componente matricial) é o meio de transferência do esforço. Materiais compósitos podem ser obtidos através de inúmeras técnicas de processamento, como, por exemplo, moldagem por compressão a quente, bobinagem, laminação manual, moldagem por transferência de resina, pultrusão, entre outras.

O desenvolvimento de materiais compósitos visa combinar na maioria das vezes, baixa massa específica com elevada rigidez e resistência. Por esse motivo, as indústrias aeronáutica e espacial são grandes motivadoras da produção e aprimoração da área de materiais compósitos. Com a aplicação desse material consegue-se produzir aeronaves mais leves sem perder a resistência necessária para suportar a carga a ser transportada (REZENDE; COSTA, BOTELHO; 2011).

3.2 Matrizes para compósitos

Como já apontado os compósitos são classificados em três classes em relação ao tipo de reforço utilizado (partículas, fibras, estruturas). Entretanto,

Calliester; Rethwisch (2016) apresenta outra forma de classificar os materiais compósitos, desta vez referindo-se ao tipo de material empregado como matriz: matrizes cerâmicas, matrizes metálicas e matrizes poliméricas. Onde os compósitos de matriz polimérica são subdivididos em compósitos de matriz termoplástica e compósitos de matriz termorrígida.

3.2.1 Matrizes termoplásticas

Canevarolo (2013) explica que os polímeros termoplásticos são materiais reversíveis, isto é, quando submetidos a um aumento substancial de pressão e temperatura amolecem podendo ser moldados novamente. Algumas vantagens dos termoplásticos são baixa densidade, elevado volume de produção e a principal delas, reaproveitamento desse material a partir da reciclagem (MARINUCCI, 2011).

Surgidos no final da década de 1980, os compósitos de matriz termoplástica apareceram posteriormente aos compósitos de matriz termorrígida. Comparado a esses materiais, as matrizes termoplásticas podem apresentar características como maior resistência ao impacto, menor absorção de água, maior temperatura de trabalho, menor custo de processamento, maior facilidade na realização de reparos, etc (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

Ainda segundo o autor, existem vários polímeros termoplásticos que podem ser utilizados como matrizes em materiais compósitos, como cita Brito *et al.* (2011) e Neto; Pardini (2016): polietileno (PE), polipropileno (PP), poliamida (PA), poliácido láctido (PLA), polihidroxibutirato (PHB), policaprolactona (PCL), entre outros.

Os compósitos de matriz termoplásticas podem ser produzidos a partir de inúmeros processos, dentre eles conformação por diafragma duplo, deposição de fibra, conformação a vácuo e autoclave. Recomenda-se ter certo cuidado ao processar esses materiais, pois propriedades importantes como a morfologia cristalina podem ser afetadas durante o processamento do material (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011).

3.2.1.1 Polietileno

De acordo com Eagan *et al.* (2017), o polietileno (PE) é o material polimérico com produção mais abundante no mundo, excedendo 70 milhões de toneladas produzidas por ano. Termoplástico, semicristalino e reciclável, pode-se encontrar

esse material em quatro variantes: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) e polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) (CANEVAROLO, 2013).

Em específico, cada polímero se cristaliza de determinada maneira. O modo como ocorre tal cristalização pode influenciar nas propriedades mecânicas, físicas e termodinâmicas desses materiais. Quanto maior for a cristalinidade, maior serão os valores de densidade, rigidez, resistência química, temperatura de fusão (T_c) e temperatura de transição vítrea (T_g). Em compensação, se a cristalinidade for reduzida, as propriedades de resistência ao impacto, alongação na ruptura e claridade óptica também serão diminuídas. Tipo de estrutura química (como a existência ou não de ramificações), presença de impurezas e condições de processamento, são fatores que afetam a cristalinidade dos polímeros (CANEVAROLO, 2013).

A célula unitária ortorrômbica e o arranjo das cadeias moleculares do polietileno é mostrado na Figura 3. Na Figura 4 é apresentada uma micrografia de luz polarizada que revela a estrutura esferulítica do polietileno, onde aparece em forma de uma cruz de Malta, em razão da birrefringência do polímero. Canevarolo (2013) explica que os esferulitos são compostos por estruturas finas lamelares na forma de feixes, os quais crescem radialmente a partir do núcleo e são interligados pela fase amorfa. As lamelas inicialmente são paralelas umas às outras, conforme vão crescendo, se torcem e se ramificam, formando assim estruturas esferulíticas radialmente simétricas.

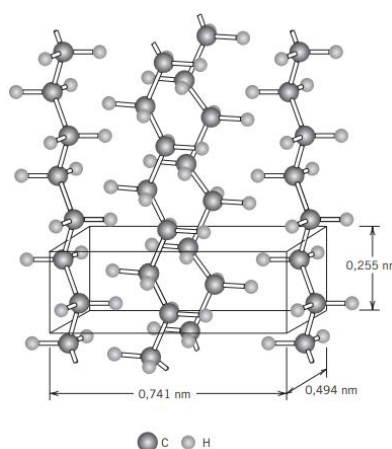


Figura 3 – Arranjo das cadeias em uma célula unitária do polietileno.
Fonte: CALLIESTER; RETHWISCH, 2016, p. 517.

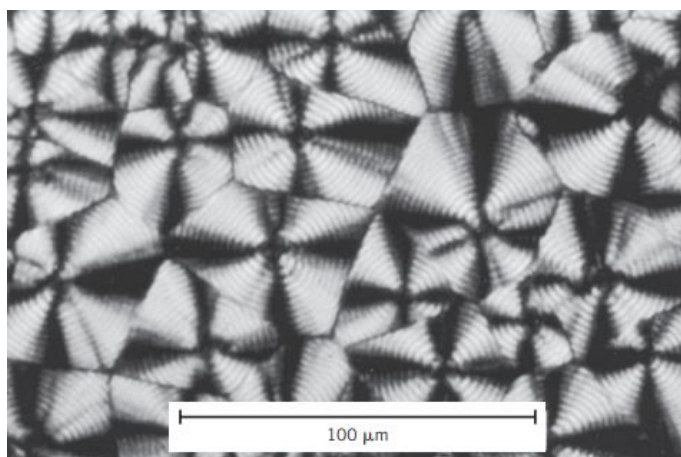


Figura 4 - Microscopia óptica com luz polarizada da estrutura esferulítica do PE. Ampliação de 525x.
Fonte: CALLIESTER; RETHWISCH, 2016, p. 521.

É atribuído ao polietileno (PE) propriedades e característica como, boa resistência química, isolante elétrico, tenaz e com baixo coeficiente de atrito. Entretanto, se for exposto a altas temperaturas em atmosfera rica em oxigênio, o PE sofre a degeneração das suas propriedades mecânicas, tornando-se frágil. Tal material é usualmente utilizado na fabricação de brinquedos, peças de baterias, embalagens, tanques automotivos (CALLIESTER; RETHWISCH, 2016).

De acordo com Canevarolo (2013), o polietileno tem como característica ser um polímero ceroso, isto é, possuir maior facilidade em ser riscado com a unha, tendo como exemplo e a título de comparação o polipropileno (PP). Ao que se além as variantes mais comuns do polietileno, PEBD e PEAD, estes são diferenciados por serem de cadeia ramificada e linear, respectivamente. Na Tabela 1 são descritas algumas propriedades e características desses materiais e a Tabela 2 mostra como se comportam em relação a resistência a degradação quando expostos a determinados meios.

Tabela 1 – Propriedades e características do PEBD e PEAD.

	PEBD	PEAD
Densidade (g/cm ³)	0,917–0,932	0,952–0,965
Resistência a tração (MPa)	8,3–31,4	22,1–31
Limite de escoamento (Mpa)	9–14,5	26,2–33,1
Alongamento na ruptura (%)	100–650	10–1200
T _m (°C)	115	137
T _g (°C)	-110	-90
Custo (US\$/kg)	1,6–1,85	1,2–1,75
Código de reciclagem	4	2

Fonte: Adaptado de CALLIESTER; RETHWISCH, 2016, p. 533, 551, 809, 843.

Tabela 2 – Comportamento degradativo do PEBD e PEAD em determinados meios^a.

	Ácido não oxidante	Ácido oxidante	Solução aquosa salina	Solução aquosa alcalina	Solvente polar	Solvente não polar	Água
PEBD	S	Q	S	–	S	S	S
PEAD	S	Q	S	–	S	I	S

^aS = satisfatório; Q = questionável, I = insatisfatório.

Fonte: Adaptado de CALLIESTER; RETHWISCH, 2016, p. 656.

A Figura 5 mostra as curvas de tensão-deformação do polietileno de baixa e alta densidade, onde nota-se que o PEAD tem módulo e tensão de escoamento mais elevados que o PEBD. No caso do PEAD este possui maior módulo e tensão de escoamento já que têm suas cadeias poliméricas lineares e as ligações intramoleculares mais fortes. As cadeias poliméricas do PEBD possuem ramificações, que são capazes de reduzir as ligações intramoleculares e por conseguinte, reduzir a cristalinidade desses materiais.

Como citado anteriormente por Canevarolo (2013), cristalinidade e densidades são propriedades proporcionais quando falamos dos polímeros. Sendo assim, com o aumento da densidade, o módulo elástico também será ampliado e fatores como processamento, tratamentos térmicos e qualquer outro que altere a cristalinidade dos polímeros, irá acarretar na alteração do módulo elástico e rigidez

desses materiais e, conseqüentemente, influenciar no comportamento de tensão-deformação desses materiais.

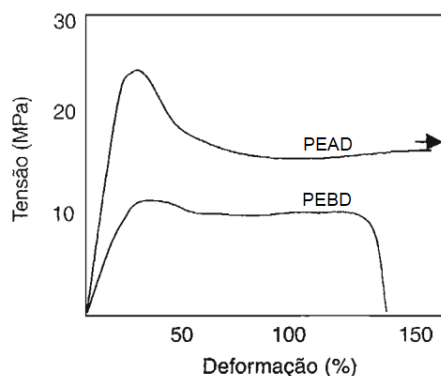


Figura 5 - Curvas de tensão-deformação do PEBD e PEAD.
Fonte: Adaptado de CANEVAROLO, 2013, p. 210.

Neste estudo será utilizado o polietileno verde de baixa densidade (PEVBD).

3.2.1.1.1 Polietileno verde

O polietileno verde *I'm green™* (PE verde) é a combinação de inovação, tecnologia e sustentabilidade. Desenvolvido desde 2010 pelo Centro de Tecnologia e Inovação da petroquímica brasileira Braskem (Figura 6), o PE verde é obtido a partir da cana-de-açúcar brasileira, uma matéria-prima de fonte renovável, diferente do polietileno convencional, o qual é produzido por meio de fontes fósseis, como o petróleo ou gás natural (BRASKEM, 2010).



Figura 6 - Fotografia do Centro de Inovação e Tecnologia do pólo petroquímico da Braskem na cidade de Triunfo, RS.
Fonte: BRASKEM, 2010.

O etanol da cana-de-açúcar chega até a Braskem através dos seus fornecedores por meio de ferrovia, cuja relação com a empresa é regida pela Compra Responsável de Etanol. Em seguida, é feita a desidratação do etanol, onde Resende (2018) relata ser utilizado ácido ou alumina como catalisador a temperaturas elevadas. Com o eteno verde obtido, este segue para as plantas de polimerização onde será transformado em polietileno verde. Seguidamente, o polímero será armazenado e poderá então ser distribuído aos clientes. Uma relação do rendimento da produção do PE verde é mostrado na Figura 7.

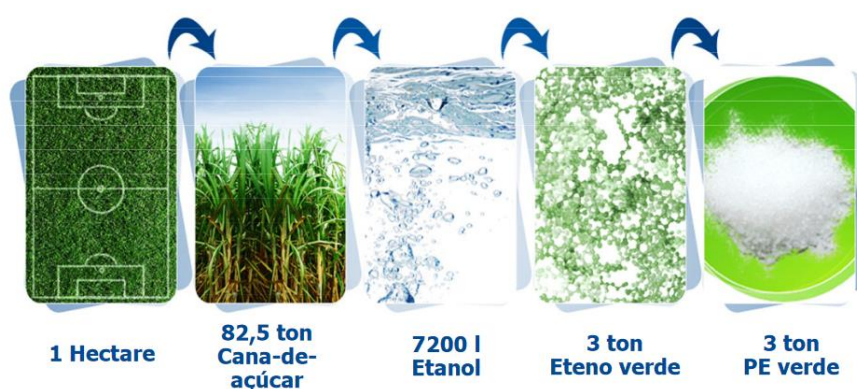


Figura 7 – Esquema da relação do rendimento da produção de PE verde.
Fonte: BELLOLI, 2010, p. 14.

Mores *et al.* (2018) explica que a absorção de dióxido de carbono (CO_2) pelo polietileno verde se dá a partir das plantações de cana-de-açúcar que realizam fotossíntese e captam CO_2 da atmosfera, garantindo ao PE verde a característica de “sequestrador de carbono”. Desse forma, a cada uma tonelada produzida do PE verde, são retidos da atmosfera em torno de três toneladas de CO_2 . Já com o polietileno convencional ocorre o contrário, seu processo de produção libera para a atmosfera duas toneladas de dióxido de carbono. A Figura 8 exibe o comparativo entre as rotas químicas de obtenção do polietileno verde e polietileno petroquímico.



Figura 8 – Rota química do polietileno verde e polietileno convencional.
Fonte: BETAEQ, 2015.

Para entender melhor o meio em que o polietileno verde está inserido é importante ficar a par de alguns conceitos. Desse modo, Brito *et al.* (2011) explica que os polímeros biodegradáveis são materiais que se degradam a partir da ação de microrganismos, como bactérias e fungos. Já os polímeros verdes são definidos como sendo polímeros que durante sua síntese, processamento ou degradação causam menos impacto ambiental se comparados a polímeros convencionais. O termo “verde” também se deve ao fato desses materiais inicialmente terem sido sintetizados através de fontes fósseis, mas devido a progressos tecnológicos passaram a ser produzidos por meio de fontes renováveis. Sendo assim, pode-se dizer que tal material é um polímero verde, no entanto não é biodegradável.

Para diferenciar o polietileno verde e o polietileno convencional, é preciso saber o teor de carbono presente no material. O teste responsável por quantificar esse teor segue a norma ASTM D6866, que de acordo com o laboratório *Beta Analytic* analisa o conteúdo de base biológica do produto através do conteúdo de carbono orgânico total e não por meio do peso do produto. Brito *et al.* Com isso, o PE verde recebeu a certificação de tal laboratório, onde confirmou-se que 100% da sua matéria-prima é proveniente de fonte renovável (BRITO *et al.*, 2011; SOARES, 2012).

Do ponto de vista econômico, o custo de produção e consequentemente o valor do produto tem um custo significativamente maior quando comparado ao polietileno convencional. Siracusa; Blanco (2020) enumera que essa diferença pode

chegar a 30% a mais para cada quilo de polietileno verde. Isso se deve a necessidade de vasta área de plantio de cana-de-açúcar, condições climáticas adequadas, aumento do consumo da água, insumos e competição direta com a produção do etanol combustível à base de cana-de-açúcar (MORES *et al.*, 2018).

Resende (2018) relata um fato interessante sobre o PE verde, este material representa a maior parcela do mercado dos polímeros verdes, alcançando em torno de 50% das vendas. Algumas das vantagens e desvantagens do polímero verde são mostrados na Figura 9 e a Tabela 3 apresenta um comparativo entre o polietileno convencional e o polietileno verde.



Figura 9 – Vantagens e desvantagens do polietileno verde.

Fonte: AGUIAR *et al.*, 2020, p. 49.

Tabela 3 – Comparação entre o polietileno convencional e polietileno verde.

Polietileno convencional	Polietileno verde
Vendido na grande maioria para transformadores de plástico	Vendido na maioria para empresas de contato direto com o consumidor final
Comprado por empresas em busca de um produto padrão	Comprado por empresas que buscam diferenciação
Grande número de clientes de diversos tamanhos	Número limitado de clientes que possuam diretrizes de sustentabilidade
Demanda influenciada por tendências macroeconômicas, como o crescimento chinês	Demanda influenciada por iniciativas próprias e/ou regulamentações específicas
Vasta quantidade de produtores e fornecedores	Baixa disponibilidade e apenas uma empresa produtora no mundo

Fonte: Adaptado de BELLOLI, 2010, p. 30.

Em 2020 a empresa celebrou a primeira década do portfólio *I'm green*. De acordo com os dados relatados pela Braskem, o PE verde evitou durante esse período a emissão de 5,54 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂). Com pesquisas sobre a tecnologia do eteno verde desde 2007, a companhia investiu 290 milhões de dólares para a construção do maior e mais complexo de pesquisa do setor da América Latina, com capacidade de produção de 200 mil toneladas de polímero verde por ano (BRASKEM, 2020).

No mesmo ano, como cita a Associação Brasileira de Bioinovação (ABBI), a produção de polietileno *I'm green* foi reconhecida pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) das Nações Unidas (ONU) e pela Rede Brasil do Pacto Global, como sendo um fato dos casos mais transformadores tratando-se de desenvolvimento sustentável no Brasil.

Uma previsão de mercado feita por Silva *et al.* (2020) mostra que a demanda por bioplásticos tem uma curva crescente, ocorrendo a duplicação dessa procura a cada biênio. Embora o PE verde hoje em dia seja um produto de empresas que buscam diferenciação e estão preocupados com a sustentabilidade, estima-se que

em cinco anos este material terá um decréscimo de 20 a 25% no seu valor de custo. Isso deverá ocorrer pelo fato da escassez de fontes fósseis e por consequência o aumento do preço do petróleo, gerando assim um interesse pelo polímero verde de maior abrangência por parte das empresas.

Outra suposição que o autor faz é que o mercado global do polietileno verde dará um salto de 490 milhões de dólares em 2018 para 1980 milhões de dólares no ano de 2025, à uma taxa de crescimento anual composta (do inglês, *Compound Annual Growth Rate* – CAGR) de 19% durante o período em questão. Ainda diz que o maior segmento para a utilização do PE verde é o setor de embalagens, o qual iniciou o seu desenvolvimento em 2002 sendo aplicado em embalagens para alimentos orgânicos.

3.3 Compósitos reforçados por partículas

Calliester; Rethwisch (2016) comenta que as partículas tem uma ampla variedade de geometrias, mas necessitam ser equiaxiais, ou seja, apresentar aproximadamente a mesma dimensão em todas as direções. Como visto na Figura 2, os compósitos reforçados por partículas apresentam duas subclassificações, partículas grandes e reforçado por dispersão. A diferenciação entre estes está relacionada com o mecanismo de reforço e com a resistência mecânica adquirida pelo compósito. O termo “grande” é empregado para explicar que as interações de partícula-matriz não se enquadram em níveis atômico ou molecular. Em contrapartida nos compósitos reforçados por dispersão as partículas são muito menores (10 a 100 nm).

Os compósitos particulados são compostos por partículas de um ou mais materiais dispersos em uma matriz de outro material, podendo ser metálicos ou não-metálicos. Quando falamos desse tipo de material o exemplo mais comum que pode-se citar é o concreto, ele é um compósito não metálico, constituído por cimento (matriz) e areia de cascalho (reforço) (MARINUCCI, 2011; CALLIESTER; RETHWISCH, 2016).

Segundo Neto; Pardini (2016) existem vários meios de produção para obter um material em forma de pó, desde o processo mais simples, como moagem, como também processos de precipitação em solução, atomização e sol-gel. Arrisca-se dizer que qualquer material pode ser convertido em pó, o que ocasiona a aparência

de uma série de materiais que podem ser empregados como reforços particulados. Diante disso, a disponibilidade de materiais para reforços em forma de partícula é consideravelmente maior quando comparados a reforços na forma de fibras.

As propriedades térmicas e mecânicas do compósito particulado serão influenciadas por características da partícula, como tamanho, interface, compatibilidade, distribuição e fração volumétrica presente no compósito. A partir dos estudos feitos com compósitos reforçados com partículas nota-se que estes contribuem em maior parte para o aumento da rigidez, mas também atuam no aprimoramento da resistência mecânica do compósito (MARINUCCI, 2011; NETO; PARDINI, 2016).

3.3.1 Cascas de ovos

A casca de ovo trata-se de um material cerâmico poroso que apesar de ser leve, possui uma elevada resistência que garante a segurança do ovo em caso de ação de predadores. Além disso, é a principal fonte de procriação da espécie de aves. Nys *et al.* (2004) descreve as funções da casca do ovo da seguinte maneira:

- a) Proteger o conteúdo do ovo do ambiente microbiano e físico.
- b) Controlar a troca de água e gases através dos poros durante o desenvolvimento extra-uterino do embrião.
- c) Fornecer cálcio para o desenvolvimento embrionário, uma vez que as reservas de gema estiverem esgotadas (NYS *et al.*, 2004, p. 550.)

Esse material é constituído em sua maior parte, aproximadamente 93% por carbonato de cálcio (CaCO_3) na forma mineral de calcita. A casca dos ovos de cada espécie podem diferenciar-se em forma, tamanho e espessura, no entanto o componente mineral é o mesmo para todas as espécies aviárias. Além da parte inorgânica, há a parte orgânica, que abrange as membranas interna e externa, compostas por colágeno do tipo I, V e X, e glicosaminoglicanos (DENNIS *et al.*, 2000; NYS *et al.*, 2004; GROSS, 2014). Na Tabela 4 são mostrados todos os constituintes de uma casca de ovo.

Tabela 4 – Constituintes da casca de ovo de aves.

Composição	Porcentagem
Carbonato de cálcio (CaCO_3)	93%
Matéria orgânica	5%
Água (H_2O)	1,5%
MgCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	0,5%

Fonte: Adaptado de GROSS, 2014, p. 20.

Segundo Camaratta (2013) a casca de ovo se organiza estruturalmente em seis camadas: membranas externa (50 μm), localizada entre a membrana interna e parte calcificada; membrana interna (20 μm), onde fica em contato direto com o albúmen; camada ou cone mamilar (70 μm), camada esta que contém as reservas de cálcio, onde é aderida a parte inorgânica (CaCO_3); camada paliçada (200 μm), constituída de grãos colunares de calcita; e cutícula (~10 μm), que trata-se da camada mais externa e contém a maioria dos pigmentos do ovo. Ainda na parte interna da cutícula, tem-se uma camada cristalina, constituída por cristais de hidroxiapatita. Pode-se visualizar as camadas citadas acima a partir da Figura 10 que ilustra esquematicamente a estrutura de uma casca de ovo e por meio da Figura 11 que mostra a micrografia eletrônica de varredura das camadas que compõem uma casca de ovo de galinha.

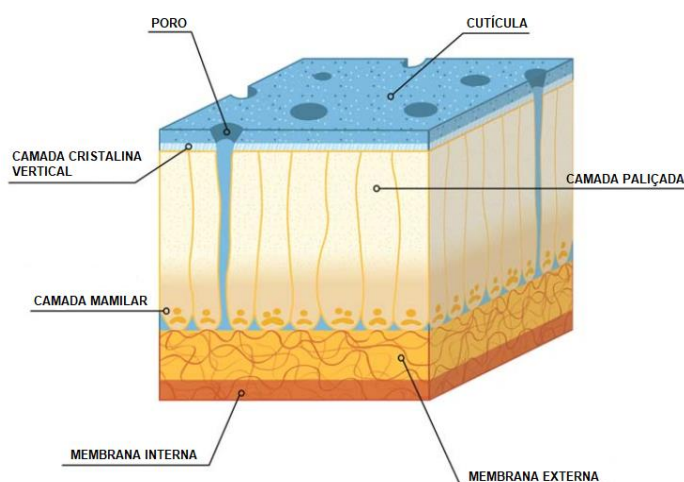


Figura 10 – Esquema apresentando a estrutura de uma casca de ovo.
Fonte: Adaptado de HINCKE *et al.*, 2012, p. 1270.

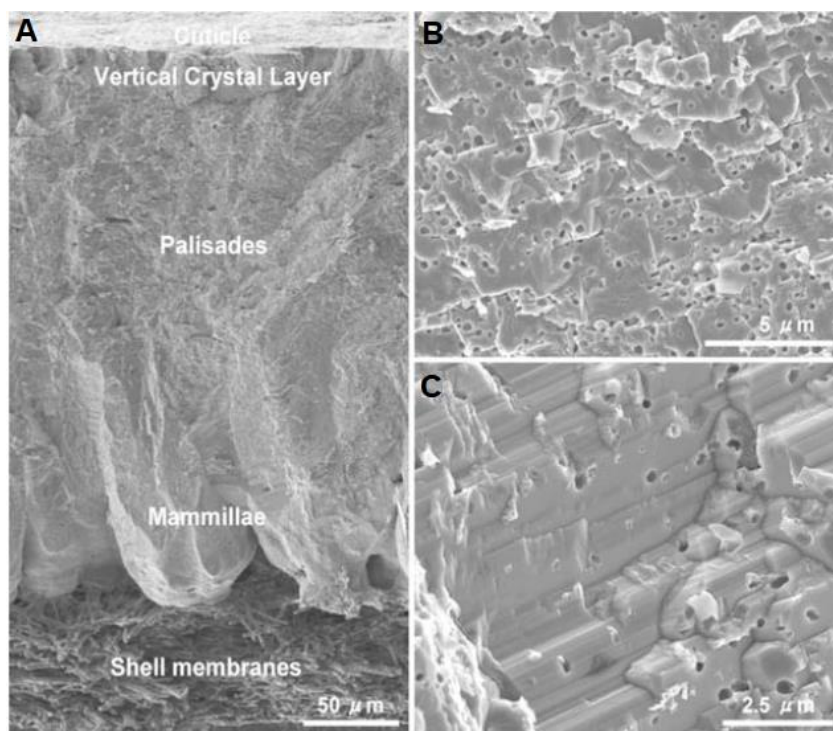


Figura 11 – Micrografia eletrônica de varredura mostrando (A) as camadas de uma casca de ovo, onde de cima para baixo: cutícula, camada cristalina vertical, camada paliçada, camada mamilar e membranas. Em (B-C) apresenta-se uma ampliação da camada paliçada, a qual apresenta numerosos vazios esféricos.

Fonte: HINCKE, 2012, p. 1269.

3.3.1.1 Carbonato de cálcio

A calcificação da casca do ovo é proveniente do processo de precipitação que ocorre na membrana através da passagem do ovo pela região do oviduto. Esse fato é conhecido como sendo um dos processos de precipitação mais rápidos. À medida que a gema percorre o oviduto, adquire gradativamente a clara de ovo por meio do magnum, e as membranas por meio do istmo. O istmo é a região onde os agregados orgânicos são depositados na superfície das membranas, ocorrendo assim a nucleação heterogênea do carbonato de cálcio a partir dos agregados policristalinos (NYS *et al.*, 2004).

Ainda segundo Nys *et al.* (2004), a formação da casca se dá no momento em que o óvulo adentra o útero e adquire a forma de ovóide pelo albúmen. Especificamente, o crescimento dos cristais de carbonato de cálcio ocorre no fluído uterino, que trata-se de um meio acelular contendo cálcio ionizado e bicarbonato. Desse modo, o ovo faz um movimento giratório a medida que deposita carbonato de cálcio, formando as camadas mamilar e paliçada sequencialmente. Após uma hora e

meia, ocorre a expulsão do ovo e a mineralização acaba, depositando-se pôr fim a cutícula orgânica.

Pereira *et al.* (2009) descreve que a principal função do carbonato de cálcio é conferir dureza e resistência mecânica as cascas de ovos aviários, dessa forma há variados estudos para discutir e analisar o teor de carbonato contido nestes materiais e de que forma isso pode influenciar em possíveis aplicações.

O carbonato de cálcio (CaCO_3) pode apresentar-se em três formas minerais: calcita, forma mais comum e presente na maioria das rochas sedimentares de calcário; aragonita, geralmente encontrada em depósitos calcários de águas termais; e veterita, forma mais escassa do mineral. Nas casca de ovos de aves se encontra exclusivamente o poliformo calcita, enquanto em ovos de répteis o que predomina é aragonita (BESSLER; RODRIGUES, 2008). Algumas propriedades do mineral calcita são exibidas na Tabela 5.

Tabela 5 – Algumas propriedades do polimorfo de carbonato de cálcio encontrado na casca de ovos aviários (calcita).

Propriedades do carbonato de cálcio – calcita	
Densidade (gcm^{-3})	2,8
Dureza (Mohs)	3,0
Sistema cristalino	Trigonal
Forma cristalina mais comum	Romboedros ou prismas
Número de coordenação do Ca	6
Solubilidade em H_2O pura (pK_s) a 25°C e 1 bar	8,35

Fonte: Adaptado de BESSLER; RODRIGUES, 2008, p. 79.

O carbonato de cálcio após tratamentos químicos e físicos pode ser empregado como aditivo e utilizado por inúmeras indústrias, desde indústrias de papel à indústrias de polímeros e elastômeros (FIGUEIRA, 2014).

3.4 Agente de acoplamento ou compatibilizante

Como comenta Torres (2017) para que um material compósito tenha uma boa usabilidade, este precisa alcançar determinadas propriedades mecânicas, como boa resistência a tração, compressão, abrasão, e rigidez e dureza consideráveis, dependendo da aplicação de interesse. Com isso, para que tais propriedades sejam conseguidas, o material compósito precisa ter uma perfeita adesão e interação entre matriz e reforço, essa adesão fará total diferença no resultado final do material.

Desse modo, é muito comum em estudos envolvendo matrizes termoplásticas a adição do que chamamos de agentes de acoplamento ou compatibilizantes, que tratam-se de polímeros modificados com aditivos funcionais que reduzem a tensão interfacial entre os polímeros, evitam que a fase dispersa forme aglomerados, e assim, conferem maior adesão entre as interfaces do compósito, proporcionando a alteração e melhoramento de determinadas propriedades (PLÁSTICO INDUSTRIAL, 2017; BOSQUETTI, 2019).

Gomes; Barbosa; Soares (2013) explica que a escolha dos compatibilizantes vai depender do peso molecular e da estrutura química dos materiais a serem misturados, e até onde se sabe não existe um compatibilizante universal para todos os compósitos poliméricos concebíveis. Podemos citar como tipos de agente compatibilizantes mais utilizados os copolímeros em bloco e os graftizados.

De acordo com a literatura, os compatibilizantes quando utilizados em compósitos poliméricos, são adicionados de 3% a 5% em massa para a formulação preparada. Esses valores variam conforme os componentes das fases constituintes, condições de processamento e propriedades desejadas pelo material final. Vale salientar que as propriedades do agente compatibilizante variam de acordo com o fabricante e com teor de anidrido maleico adicionado ao copolímero.

3.4.1 Polietileno graftizado com anidrido maleico (PE-g-AM)

O processo de graftização do polietileno é usado para obter melhor dispersão do reforço e/ou carga em uma matriz termoplástica ou até mesmo em blendas poliméricas. No caso do anidrido maleico, este aumenta a polaridade das cadeiras poliméricas, atraindo a superfície da partícula e fazendo com que haja uma boa interação entre os componentes. Com uma boa dispersão e interação, a formação

de aglomerados será dificultada e com isso o compósito alcançará uma adesão ideal entre suas fases (TORRES, 2017).

Bosquetti (2019) explica que o polietileno graftizado com anidrido maleico (PE-g-AM) trata-se de uma reação de funcionalização, exibido na Figura 12, onde é adicionado um monômero de anidrido maleico a cadeia de polietileno. Essa funcionalização pode ser feita através de processo de fusão de uma mistura polimérica ou por meio de reação do polímero em solução, na presença de um peróxido orgânico.



Figura 12 – Esquema reacional da graftização do polietileno com anidrido maleico (PE-g-AM).
Fonte: BOSQUETTI, 2019, p. 32.

Não foi quantificada a concentração de anidrido maleico presente no PE-g-AM utilizado nesta pesquisa, visto que a empresa que disponibilizou o material tinha como segredo de indústria tal informação.

4 Processo de extrusão

A extrusão é um dos processos mais utilizados na conformação de materiais, principalmente dos polímeros. Tal processo é realizado por meio de um equipamento chamado extrusora, que é formado das seguintes partes: rosca, cilindro (barril), motor, sistema de alimentação, aquecimento e resfriamento, matriz, sistema de fixação de rosca e sistema de degasagem. As variáveis mais importantes do processo de extrusão são velocidade rotação da rosca e perfil de temperatura utilizado ao decorrer do barril (SOARES, 2016). A Figura 13 apresenta a vista de uma extrusora monorrosca.

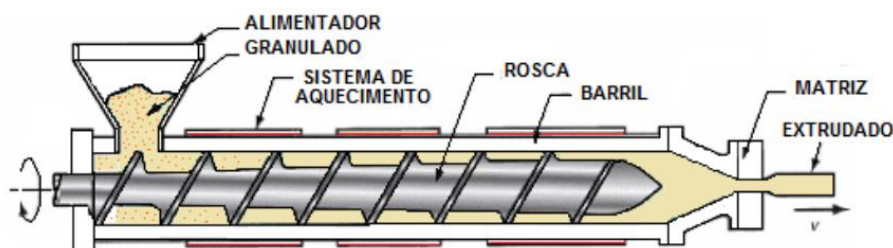


Figura 13 – Representação da vista de uma extrusora monorrosca.
Fonte: SOARES, 2016, p. 22.

Soares (2016) explica que o processo de extrusão consiste basicamente na alimentação do material, na forma de *pellets* ou pó, a partir de um funil conectado ao barril, onde este é aquecido por meio de resistência elétricas. Através do movimento da rosca, o polímero é aquecido, fundido, plastificado, homogeneizado e transportado, onde será comprimido e forçado para a matriz, a qual terá a forma final da peça. Após a ejeção da peça, o extrudado deve ser resfriado por jato de ar ou arrefecimento a água para conferir estabilidade dimensional. A Figura 13 apresenta a vista de uma extrusora monorrosca.

Ainda de acordo com o autor, a rosca pode ser considerada o componente mais importante de uma extrusora, ela é responsável fundir o material a ser processado. Uma extrusora pode ser monorrosca ou dupla rosca, isso irá depender do tipo de material a ser processado e das condições requeridas no momento de processamento. Comumente a rosca apresenta três zonas distintas: zona de alimentação, onde o material é adicionado ao barril e inicia-se o processo de mistura; zona de compressão, onde o polímero é submetido a temperatura e maior taxa de cisalhamento e assim será fundido; zona de dosagem, onde ocorre a homogeneização do polímero e ele bombeado para a matriz para que atinja a forma final.

4.1 Extrusão de materiais compósitos

O processo de extrusão para produção de materiais compósitos parte do mesmo princípio comentado anteriormente, todavia, além de adicionar ao barril o polímero ou matriz de interesse, será também adicionado o material de reforço, que poderá estar na forma de partículas ou fibras. Materiais que aperfeiçoam a compatibilidade entre as fases do compósito, como os agentes de acoplamento,

também podem ser adicionados pelo funil de alimentação. Desse modo, A rosca terá a função de misturar os componentes e fundir a mistura para que seja obtido o material compósito.

O processamento por extrusão embora seja o meio mais utilizado na obtenção de materiais compósitos, não é o único, existem outros processos e tipos de mistura as quais pode-se produzir tais materiais, como, por exemplo: *solvent casting*, pultrusão, “prepreg”, enrolamento de filamento, entre outros (CALLIESTER; RETHWISCH, 2016).

5 Revisão da literatura

Nesta seção serão apresentados alguns estudos envolvendo os materiais de interesse do referido trabalho: polietileno verde, cascas de ovos e carbonato de cálcio extraído das mesmas.

5.1 Polietileno verde utilizado como matriz em compósitos

O polietileno verde como mencionado anteriormente é um material que começou a ser produzido a partir de 2010, diante desse fato e por ser um assunto relativamente novo, é importante evidenciar a escassez de trabalhos referentes a esse material (RESENDE, 2018).

Visando investigar a influência de determinados fatores nas propriedades mecânicas, morfológicas, cristalinidade e viscosidade do fundido, Oliveira *et al.* (2016) desenvolveu compósitos a base de polietileno verde de alta densidade (PEVAD), poliácido láctico (PLA) e nanopartículas de carbonato de cálcio. Fatores como velocidade de rotação da rosca, influência do teor de PLA e teor CaCO_3 foram investigados. Ao fim do estudo, constatou-se que o conteúdo de CaCO_3 acarretou em um decréscimo do índice de fluidez do polímero, fazendo com que as cadeias poliméricas se prendessem as partículas e assim tornando a mistura mais viscosa. No que refere-se a morfologia, as imagens mostraram uma boa dispersão dos domínios de PLA na matriz de PEVAD, que pode ser explicado pela velocidade da rosca e a alta taxa de cisalhamento que esta operou.

Siqueira *et al.* (2018) por meio de processamento de extrusão (monorroscas) obteve nanocompósitos de polietileno verde reforçado com argila vermiculita organofílica, buscando avaliar as propriedades mecânicas e comportamento quanto à retardância de chamas. Analisando os resultados verificou-se que a argila não apresentou boa dispersão e adesão, que pode estar relacionado ao tipo de processamento utilizado. O módulo de elasticidade aumentou comparado ao polietileno verde puro, entretanto, a tensão de escoamento e o limite de resistência a tração diminuíram. A propriedade de barreira que agiria como inibidor de chama também não apresentou bons resultados devido a dispersão deficiente da argila na matriz.

Com o intuito de estudar propriedades mecânicas, térmicas e a hidrodegradação, Mazur *et al.* (2020) obteve a partir de moldagem por injeção compósitos de polietileno verde, empregando como materiais de reforço, serragem, fibra de basalto, fibra de linha e farinha de casca de noz. O módulo elástico e a resistência à tração dos compósitos sofreram um aumento significativo com a incorporação das fibras de basalto. No que diz respeito a hidrodegradação, os compósitos que continham em sua formulação fibras lignocelulósicas apresentaram alta capacidade de absorção de água e com isso, deterioração das suas propriedades ao longo do tempo. De outro lado, a matriz polimérica sem a adição de reforço e os compósitos reforçados com fibras de basalto, não apresentaram grande capacidade para absorção de água, mantendo assim as suas propriedades.

Oyama *et al.* (2020) utilizando um homogeneizador termocinético produziu compósitos de polietileno verde de baixa densidade, empregando como reforço carbono vítreo, visando a aplicação em embalagens antiestáticas, devido ao caráter condutor que o carbono vítreo detém. Foram avaliadas propriedades mecânicas, ópticas e térmicas dos compósitos, como também, características estruturais, permeabilidade a vapor de água e potencial elétrico. Os compósitos que mostraram melhores resultados foram aqueles que continham menor teor de carbono, os quais tiveram um acréscimo no módulo elástico e apresentaram baixa resistividade elétrica.

5.2 Casca de ovos e carbonato de cálcio como agentes de reforço

A fim de melhorar as propriedades tribológicas do policarbonato (PC), Charde *et al.* (2018) produziu por meio de processo de extrusão um compósito de PC e carbonato de cálcio nanoparticulado como material de reforço. Os corpos de prova foram submetidos a ensaio de resistência a arranhões e constatou-se uma melhora de 30% quando este é comparado ao PC puro. Entretanto, a partir das análises de TGA e DSC, observou-se que a estabilidade térmica dos compósitos sofreu uma redução com a adição do particulado de CaCO_3 .

Yahya; Tahir; Rosli (2019) empregando processamento por extrusão e moldagem por prensa hidráulica, combinaram um compósito a base de polipropileno e casca de ovos. As propriedades mecânicas e térmicas foram estudadas por meio de FTIR, TGA e ensaio de tração. Foram feitas três formulações de compósitos: 9:1,

7:3 e 5:5, a formulação que se mostrou mais eficaz foi a que continha 70% de polímero e 30% de reforço. Houve um aprimoramento significativo nas propriedades mecânicas de tais compósitos e a casca de ovo mostrou-se uma ótima alternativa para aperfeiçoamento de propriedades mecânicas, além de tratar-se de um material de origem residual.

Utilizando nanocelulose e carbonato de cálcio, Hafez; Amini; Tajvidi (2020) produziram um biofilme a partir de filtração a vácuo, com o intuito de avaliar as suas propriedades térmicas e de biodegradação. Ao final do estudo e após a discussão dos resultados, foi constatada a viabilidade de produzir tal biomaterial, pois a partir da análise de morfologia viu-se que o CaCO_3 distribuiu-se uniformemente na superfície do filme. Além disso, o CaCO_3 conferiu maior estabilidade térmica ao filme e retardou a degradação térmica da celulose a altas temperaturas.

Mazlan; Sapari; Sambasevan (2020) através de polimerização *in situ* criaram um filme de polianilina e casca de ovos. Como a polianilina é conhecida por deter de uma condutividade elétrica excelente, o intuito do estudo era investigar tal propriedade e a sensibilidade do filme em detectar amônia. Foram preparadas três formulações para a produção dos filmes de acordo com a porção de reforço utilizado: 20mg, 40mg e 60mg de particulado de casca de ovos. Após os filmes serem analisados por FTIR, UV-Vis e MEV/EDX, observou-se que o filme contendo 20mg de particulado apresentou a mais alta condutividade elétrica e o melhor desempenho em detectar a presença de amônia. Sendo assim, tal filme poderia atuar como um sensor sensível com limite de detecção de 6ppm.

6 Materiais e métodos

6.1 Materiais utilizados

Neste trabalho foi empregado como matriz polimérica o polietileno verde de baixa densidade (PEVBD) da linha *I'm green™* da Braskem, o qual é conhecido comercialmente como resina SLD4004 e foi fornecido pela própria empresa. Algumas propriedades desse material são descritas no Anexo A. Tal material foi disponibilizado na forma de *pellets*.

Como materiais de reforço foram utilizadas casca de ovos de galinha, também empregadas como meio de extração de carbonato de cálcio. Estas foram doadas pela padaria Sonho da Manhã, localizada na Rua Francisco Lima, número 205, no bairro Porto, na cidade de Pelotas/RS.

O polietileno graftizado com anidrido maleico (PE-g-AM) foi usado como agente de acoplamento (ou compatibilizante). Foi disponibilizado em doação pela empresa Cristal Master, que tem sua sede matriz em Joinville/SC.

6.2 Metodologia

Para melhor entendimento do estudo serão atribuídas nomenclaturas ao material de reforço, sendo o particulado obtido a partir das cascas de ovos sem a extração denominado *in natura* e o particulado obtido com a extração denominado bio-carbonato de cálcio (bio-CaCO₃). Os dois tipos de reforço foram utilizados para a produção dos compósitos, a fim de investigar a interferência da matéria orgânica.

A metodologia deste trabalho divide-se em quatro etapas principais, que são apresentadas na Figura 14 e serão explicadas especificamente nos tópicos a seguir.

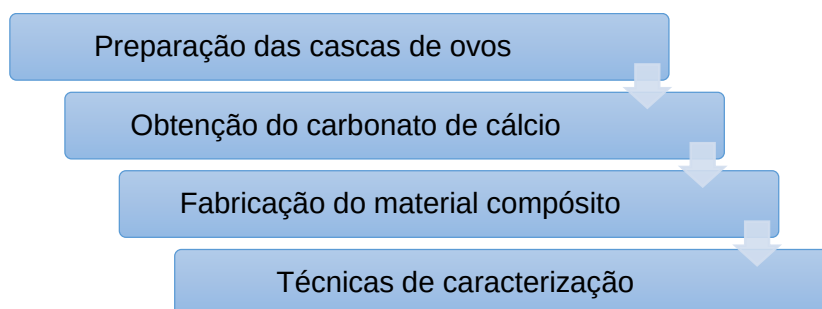


Figura 14 – Fluxograma apresentando as principais etapas da metodologia aplicada.

6.2.1 Preparação das cascas de ovos

Nesta primeira etapa do trabalho foi feita a coleta e posterior limpeza das cascas de ovos. Estas foram lavadas em água corrente para remoção de sujidades, como exibido na Figura 15, e secas a 100°C por 24h em uma estufa da marca Quimis, modelo Q317M-52.



Figura 15 – Cascas de ovos após limpeza e remoção de sujidades.

Já secas, as cascas foram moídas em um moinho de facas da marca Marconi, modelo MA. Após esse processo as cascas passaram por uma segunda moagem, onde foram reduzidas por meio de moinho analítico IKA A11 Basic, o qual obteve-se um pó fino (Figura 16. A). Para alcançar uma melhor granulometria, esse pó foi peneirado em malha de 200 Mesh Tyler (Figura 16. B). Para a produção dos compósitos foi utilizado as partículas de menor granulometria (Figura 16. B).



Figura 16 – Casca de ovos, em A) moída, B) peneirada.

6.2.2.1 Obtenção do carbonato de cálcio

A extração de carbonato de cálcio (CaCO_3) a partir de cascas de ovos trata-se de um processo onde a matéria orgânica e água são removidas. A extração foi feita a partir do pó obtido através da moagem das cascas de ovos (Figura 15. B). O método mais eficaz, simples e acessível para desempenho de tal procedimento, foi a calcinação.

O método por meio de calcinação consistiu em um tratamento térmico do pó obtido a partir das cascas de ovos, onde este foi calcinado durante 2h a 600°C em um forno mufla da marca Quimis, modelo Q-318. Posterior esse intervalo, a matéria orgânica e água foram removidas restando apenas o carbonato de cálcio. As queimas foram feitas fracionadas, calcinando 5g do pó por vez, até obter a quantidade total necessária para a fabricação do material compósito.

O bio- CaCO_3 obtido pelo método de calcinação é apresentado na Figura 17.



Figura 17 – Bio- CaCO_3 obtido por meio do método de calcinação.

6.2.3 Fabricação do material compósito

A matriz polimérica e os materiais de reforço (*in natura* e bio- CaCO_3) antes de serem processados, foram secos durante 24h a 60°C , em uma estufa da marca Quimis, modelo Q317M-52. Já secos, foram pré-misturados manualmente em um recipiente de vidro para alcançar uma melhor homogeneização de mistura. Logo após, a pré-mistura foi processada em estado fundido, utilizando para isto uma extrusora monorroscas de baixo cisalhamento da marca Eco Soluções com L/D de 20, localizada no Laboratório de Materiais Compósitos (LabCom) do curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas (UFPeI).

O polímero puro (sem adição de carga) também foi processado nas mesmas condições que os compósitos para fins de comparação. As condições de processamento via extrusão são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Condições de processamento dos materiais compósitos via extrusão.

Condições de processamento – via extrusão	
Temperatura zona de alimentação	140°C
Temperatura zona de compressão	145°C
Temperatura zona de dosagem	150°C
Temperatura da matriz	90°C
Velocidade da rosca	60rpm

Foi incorporado ao PEVBD a concentração de 5% em massa de cada material de reforço. Para melhor análise dos resultados, foram feitas formulações com e sem agente de acoplamento, nas formulações em que o PE-g-AM estava presente, utilizou-se uma proporção de 3% em massa do mesmo.

O material extrudado foi granulado para obtenção de *pellets* e em seguida, armazenado para posterior moldagem via injeção. A Figura 18 apresenta os *pellets* obtidos e na Tabela 7 pode-se ver as suas determinadas formulações.



Figura 18 – *Pellets* obtidos pelo processo de extrusão, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/*in natura*, C) PEVBD/bio-CaCO₃, D) PEVBD/*in natura*/PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM.

Tabela 7 – Formulações dos *pellets* obtidos pelo processo de extrusão.

Formulação dos pellets, respectivamente (%)	
PEVBD puro	100
PEVBD/ <i>in natura</i>	95/5
PEVBD/bio-CaCO ₃	95/5
PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM	92/5/3
PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM	92/5/3

Para a etapa de injeção foi utilizada uma injetora de bancada da marca AX Plásticos, modelo AXINJET, com molde de aço inox nas dimensões da norma ASTM D638, tipo IV, também localizada no Laboratório de Materiais Compósitos (LabCom). As condições de processamento utilizadas foram temperatura de injeção de 190°C e temperatura do molde de 50°C. A velocidade de injeção não foi especificada, pois a injeção do material ocorreu de forma manual, usando a força do ar comprimido.

Os corpos de prova fabricados a partir de moldagem por injeção são ilustrados nas Figura 19 (para ensaio de tração uniaxial) e Figura 20 (para ensaio de resistência ao impacto Izod).

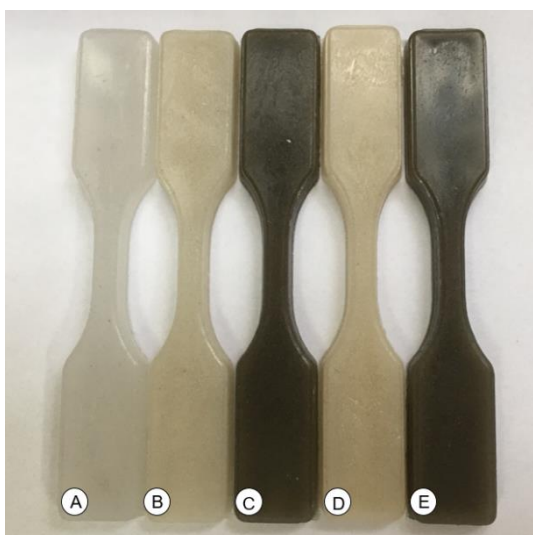


Figura 19 – Corpos de prova obtidos a partir de moldagem por injeção para ensaio de tração uniaxial, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/*in natura*, C) PEVBD/bio-CaCO₃, D) PEVBD/*in natura*/PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM.

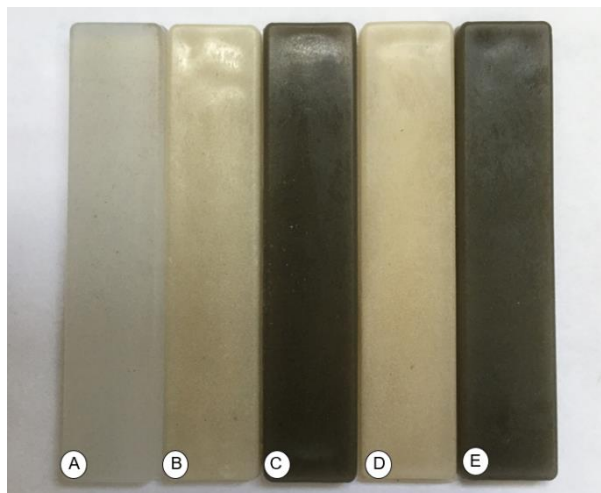


Figura 20 – Corpos de prova obtidos a partir de moldagem por injeção para ensaio de resistência ao impacto Izod, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/*in natura*, C) PEVBD/bio-CaCO₃, D) PEVBD/*in natura*/PE-g-AM, E) PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM.

Foram selecionados oito corpos de prova de cada composição para cada caracterização mecânica. Os corpos de prova foram medidos utilizando um paquímetro digital da marca Starrett, modelo EC799, e pesados em uma balança de precisão da marca Shimadzu, modelo UX8200S.

Os Apêndices A e B apresentam, respectivamente, as dimensões e peso dos corpos de provas obtidos, onde para ensaio de tração uniaxial foi medido comprimento, largura e espessura do corpo de prova e para ensaio de resistência ao impacto Izod, mediu-se a largura do entalhe no corpo de prova.

6.3 Técnicas de caracterização

6.3.1 Caracterização das partículas *in natura* e de carbonato de cálcio

6.3.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A fim de visualizar a morfologia dos pós obtidos, estes foram caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando para isso um equipamento da marca Tescan, modelo VEGA3, pertencente Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Regional de Blumenau (FURB). As imagens foram geradas por elétrons secundários, obtidas previamente à metalização da superfície de fratura das amostras com ouro.

6.3.1.2 Granulometria por difração a laser

Para quantificar o tamanho de partícula dos pós utilizados como reforço foi empregado a análise de granulometria por difração a laser, que consiste no princípio de difração de um feixe de laser para medir e obter o tamanho e o percentual das partículas estudadas. A análise foi realizada no Laboratório de Verificação e Validação da Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau (FURB). O equipamento utilizado é da marca Malvern Mastersizer, modelo 2000E.

6.3.1.3 Difração de raios-x (DRX)

Os pós obtidos a partir da casca de ovo foram caracterizados por difração de raios-X (DRX) para análise da estrutura cristalina, bem como o grau de cristalinidade. Para isso foi utilizado um difratômetro da marca Bruker, modelo D8 ADVANCE, situado no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEME-SUL) da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). As análises foram realizadas com comprimento de onda (λ) = 1,541 Å, operando a 40 kV e 40 mA, utilizando uma velocidade de varredura de 1°/min, para valores de 2θ entre 10° e 90°.

6.3.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Para a avaliação de grupos funcionais e ligações presentes, os pós de interesse foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Para a realização desta análise foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo Prestige-21, localizado no laboratório do Centro de Desenvolvimento e Controle em Biomateriais (CDCBio) da Universidade Federal de Pelotas. Os ensaios foram feitos em duplicata, utilizando a região 400 a 4000 cm^{-1} .

6.3.1.5 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise da estabilidade térmica dos pós obtidos foi realizada a partir de termogravimetria, onde foi empregado um equipamento da marca TA Instruments, modelo SDT Q600, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, a partir da temperatura ambiente até 800°C, em atmosfera inerte de nitrogênio. As análises foram realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Materiais Avançados da Universidade Federal do Piauí.

6.3.2 Caracterização da matriz polimérica e dos compósitos produzidos

6.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia dos compósitos estudados foi analisada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando para isso as mesmas condições e equipamento descrito no item 6.3.1.1. Neste caso, as imagens foram obtidas a partir da área de fratura das amostras.

6.3.2.2 Análise termogravimétrica (TGA)

A fim de caracterizar termicamente os compósitos produzidos foi realizada análise termogravimétrica (TGA) para avaliação da estabilidade térmica. O equipamento utilizado é da marca Shimadzu, modelo DTG-60. Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10°C/min, a partir da temperatura ambiente até 800°C, em atmosfera inerte de argônio. Esta análise foi realizada no Laboratório de Ensaios de Química, pertencente ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau (FURB).

6.3.2.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

Com o intuito de investigar a temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização (T_c), e grau de cristalinidade dos compósitos, estes foram caracterizados por calorimetria exploratória diferencial (DSC). As amostras foram inicialmente aquecidas da temperatura ambiente até 190°C a uma taxa de

aquecimento de 10°C/min, permanecendo nesta temperatura por cinco minutos. Logo após, foram resfriadas até 30°C a uma taxa de 10°C/min para a determinação da temperatura de cristalização (T_c) e novamente foram aquecidas até 190°C a uma taxa de 10 °C/min, seguindo a norma ASTM D3418-15. Para a realização das análises foram utilizadas os termogramas do segundo aquecimento por não possuírem influência da história térmica das amostras.

Tal análise foi realizada no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), utilizado um equipamento da marca TA Instruments, modelo Q2000, com nitrogênio como gás de arraste, em fluxo constante de 50 mL/min.

A partir da análise de DSC, o grau de cristalinidade da matriz e dos compósitos foi calculado utilizando a Equação 1:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f}{\Delta H^*_f} \times \frac{1}{W} \times 100\% \quad (1)$$

Em que:

X_c = grau de cristalinidade

ΔH_f = entalpia de fusão cristalina

ΔH^*_f = entalpia de fusão de uma amostra 100% cristalina

W = quantidade de polímero

O valor teórico utilizado para entalpia de fusão do PEVBD foi de 293 J/g (OLESIK; GODZIERZ; KOZIOL, 2019).

6.3.2.4 Resistência ao impacto tipo Izod

Uma das caracterizações mecânicas que os compósitos e o polímero puro foram submetidos foi ensaio de resistência ao impacto Izod. Os corpos de prova com entalhe foram medidos empregando-se um equipamento de impacto tipo pêndulo Ceast, modelo RESIL 25, acoplado a um sistema de aquisição de dados DAS 4000, via software. É importante mencionar que os testes iniciaram utilizando um pêndulo de 2,75J, e aumentou-se o peso até se atingir o valor máximo do martelo, que seria o de 11J. Oito amostras foram testadas para cada composição. Os corpos de prova obtidos por moldagem por injeção foram entalhados em uma máquina de entalhe marca Ceast, com profundidade de 2,54 +/- 0,1mm, com velocidade mínima de

entalhe e segundo a norma ASTM D256A, verificando-se a profundidade do entalhe em um micrômetro apropriado.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

6.3.2.5 Ensaio de tração uniaxial

A matriz polimérica e os compósitos também foram submetidos a ensaio de tração uniaxial para avaliação de suas propriedades mecânicas. Os testes de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D638 tipo IV, onde foi utilizado o equipamento Instron modelo 5569, a uma velocidade de 5mm/min. Foi aplicado uma célula de carga de 50kN, com deformação dos corpos de prova até a ruptura. Não foi possível utilizar o extensômetro para medir a deformação elástica em função do tamanho dos corpos de prova.

Assim como o ensaio de impacto, o ensaio de tração também foi realizado no Laboratório de Polímeros do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Para cada um dos ensaios mecânicos, foram analisadas oito amostras para todas as cinco formulações.

7 Resultados e discussão

7.1 Partículas de reforço (*in natura* e bio-CaCO₃)

7.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma análise importante para visualizar a forma final e a morfologia de uma determinada amostra ou material. A Figura 21 mostra as micrografias obtidas dos pós *in natura* e bio-CaCO₃, os quais apresentaram-se com forma irregular e de superfície lisa.

Entretanto, não alcançou-se uma uniformidade no que está relacionado a tamanho de partícula, resultando em partículas de tamanhos variados. Essa variação nos tamanhos de partícula pode influenciar na adesão do material compósito, já que partículas maiores têm maior dificuldade em aderir-se a matriz polimérica. O melhor neste caso é visar obter partículas pequenas e de tamanhos uniformes para assim, aprimorar as propriedades mecânicas dos compósitos.

Morfologias similares foram encontradas por Abdelmalik; Ogbodo, Momoh (2019) e Almomani; Hayajneh; Mu'ayyad (2020).

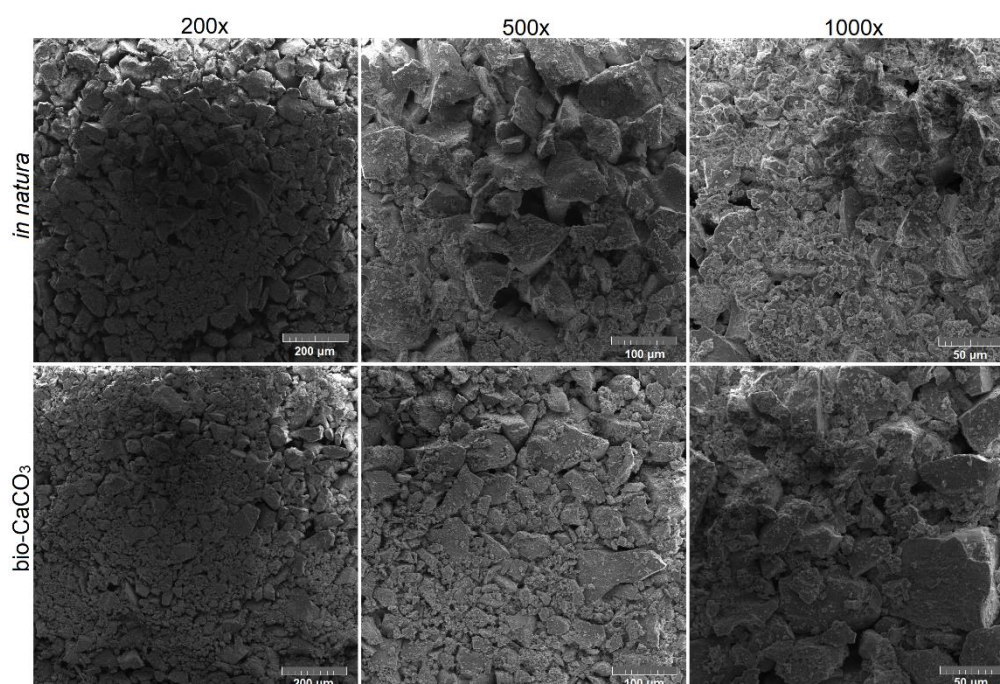


Figura 21 – Micrografias de MEV dos pós *in natura* e bio-CaCO₃ – ampliação de 200x, 500x, 1000x.

7.1.2 Granulometria por difração a laser

Com o intuito de estimar o tamanho de partículas dos pós utilizados como reforço neste estudo, estes foram submetidos a granulometria por difração a laser. A Tabela 8 aponta os tamanhos de partícula obtidos em maior predominância, junto ao valor de área superficial também obtido pela análise granulométrica.

Tabela 8 – Tamanho de partícula e área superficial determinados para os materiais obtidos a partir das cascas de ovos.

	Predominância (%)	Tamanho de partícula (μm)	Área superficial (m^2/g)
<i>In natura</i>	90	1605,3	0,123
Bio- CaCO_3	90	86,5	0,653

Como esperado o bio- CaCO_3 apresentou tamanho de partícula inferior ao pó *in natura*. Essa redução no tamanho de partícula pode ser atribuído ao processo de calcinação do qual foi obtido. Um menor valor no tamanho de partícula confere ao bio- CaCO_3 o crescimento da sua área superficial se comparado ao pó *in natura*. Nesse caso, valores maiores de área superficial tendem a garantir ao reforço maior viabilidade para que este tenha melhor adesão a matriz polimérica (MEL'GUNOV; AYUPOV, 2017).

Informações mais detalhadas da análise de granulometria por difração a laser são disponibilizadas nos Anexos B e C.

7.1.3 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 22 mostra os difratogramas obtidos a partir das amostras em pó (*in natura* e bio- CaCO_3). Pode-se observar um material cristalino, com picos definidos, onde o pico de maior intensidade acontece em aproximadamente $29,5^\circ(2\theta)$, indicando que o pó *in natura* e o bio- CaCO_3 obtidos têm como principal fase constituinte a calcita, de estrutura romboédrica e densidade $2,72 \text{ g/cm}^3$, corroborando com Mosaddegh (2013), Khan *et al.* (2019) e Novais *et al.* (2019).

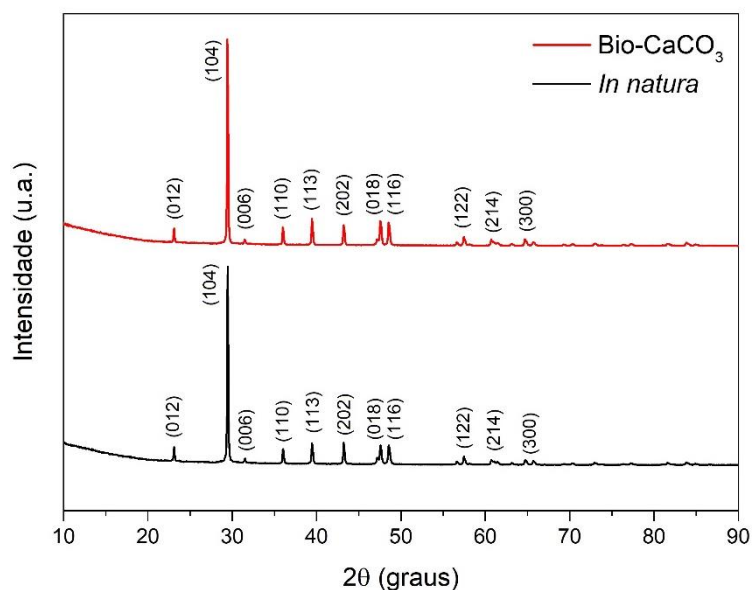


Figura 22 – Difratogramas de raios-x das partículas *in natura* e de bio-CaCO₃.

7.1.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 23 são mostrados os espectros de infravermelho das partículas obtidas, os quais apresentam bandas características do carbonato de cálcio. Pode-se notar uma banda larga em 1415 cm⁻¹, a qual caracteriza a ligação C-O. Em 711 e 875 cm⁻¹ há duas bandas evidentes, também provenientes da ligação C-O. O pó *in natura* e o bio-CaCO₃ apresentam correspondência nas bandas, exceto pela suave banda em 2360 cm⁻¹, que representa a ligação N-H, referente a aminas e amidas presentes na parte orgânica da casca de ovo. Estes resultados também foram reportados por Luna Vera *et al.* (2018) e Habte *et al.* (2019).

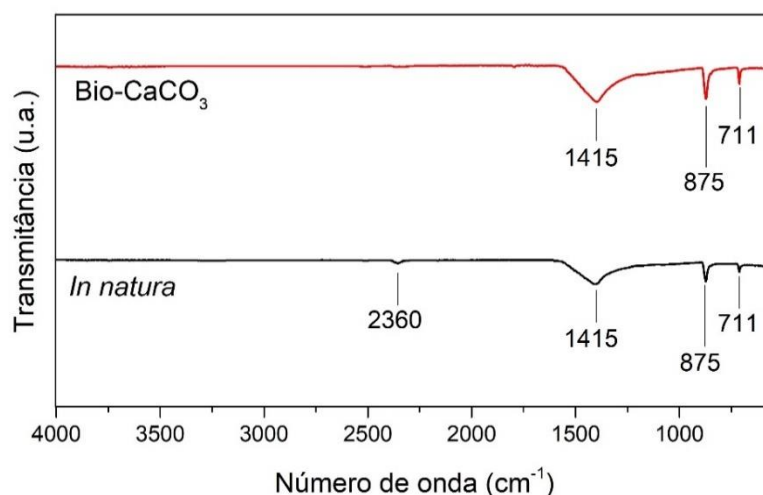


Figura 23 – Espectros de FTIR das partículas de interesse (*in natura* e bio-CaCO₃).

7.1.5 Análise termogravimétrica (TGA)

As curvas de TG/DTG (derivada da variação de massa) da análise de decomposição térmica dos pós *in natura* e bio- CaCO_3 estão representadas na Figura 24. Observa-se três estágios de perda de massa do pó *in natura*: o primeiro entre 0 e 100°C, referente a perda de umidade do material; o segundo estágio um pouco mais acentuado, ocorrendo entre 200 e 400°C, atribuído a decomposição da matéria orgânica; e o terceiro estágio em 750°C, faixa de temperatura característica onde há a decomposição térmica do carbonato de cálcio (CaCO_3), liberando dióxido de carbono (CO_2) e se formando em óxido de cálcio (CaO). Já as partículas de bio- CaCO_3 apresentaram apenas um estágio de perda de massa (750°C), atribuída a conversão de CaCO_3 em CaO . Eventos semelhantes foram relatados por Kristl *et al.* (2019).

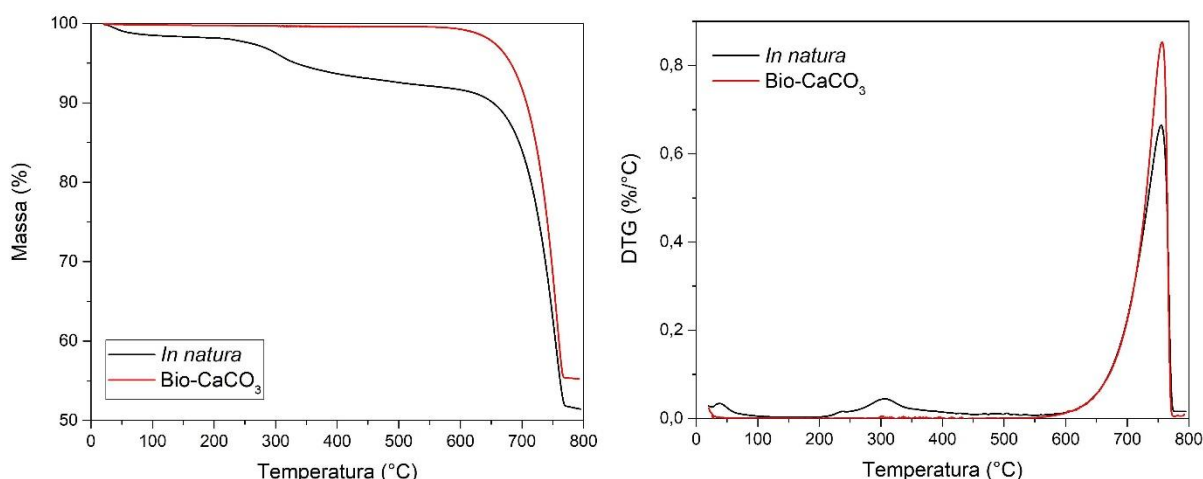


Figura 24 – Curvas de TG/DTG dos pós *in natura* e bio- CaCO_3 .

7.2 Materiais compósitos

7.2.1 Caracterizações morfológicas e estruturais

7.2.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A micrografia do PEVBD puro é apresentada na Figura 25, a qual observa-se uma superfície lisa, sem a presença de bolhas ou trincas e com leve aparecimento de determinada impureza. Na Figura 26 é mostrado as micrografias de MEV dos

materiais compósitos produzidos, as imagens foram obtidas da área de fratura dos corpos de prova de tração.

Analisando a Figura 26, nota-se que os materiais de reforço alcançaram boa dispersão na matriz e a formação de aglomerados não foi identificada. Em contrapartida, observa-se uma adesão baixa adesão entre as fases, para as amostras sem o PE-g-AM, pois pode ser visto nas imagens as partículas em tamanho integral e a presença de vazios na interface entre partícula e matriz.

O tamanho de partícula pode influenciar na adesão entre fase matriz e fase dispersa. Com base nas micrografias dos compósitos, repara-se que as partículas de menor tamanho incorporam-se melhor na matriz quando comparadas as partículas de tamanho maior. Isso pode ser aperfeiçoado com o controle do tamanho de partícula, o que acarretará em uma uniformidade das partículas de reforço e quanto menores forem estas, melhor adesão será alcançada.

As diferenças entre os reforços deu-se no tamanho de partícula e consequentemente na adesão das fases, onde as partículas de bio-CaCO₃ apresentaram melhor resultado quando comparadas as partículas *in natura*. A dispersão dos dois tipos de reforço equiparou-se. Nas formulações onde foi utilizado o agente compatibilizante, percebe-se uma melhora no envolvimento da matriz nas partículas de reforço, o que indica que o PE-g-AM melhorou a adesão entre matriz e o reforço.

Micrografias semelhantes foram encontradas por Schlickmann *et al.* (2019) e Wu *et al.* (2020).

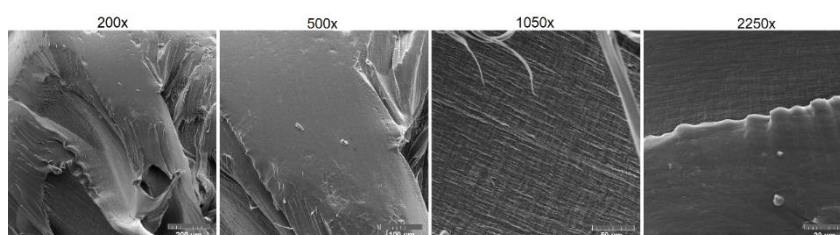


Figura 25 – Micrografias de MEV do PEVBD puro – aplicação de 200x, 500x, 1050x, 2250x.

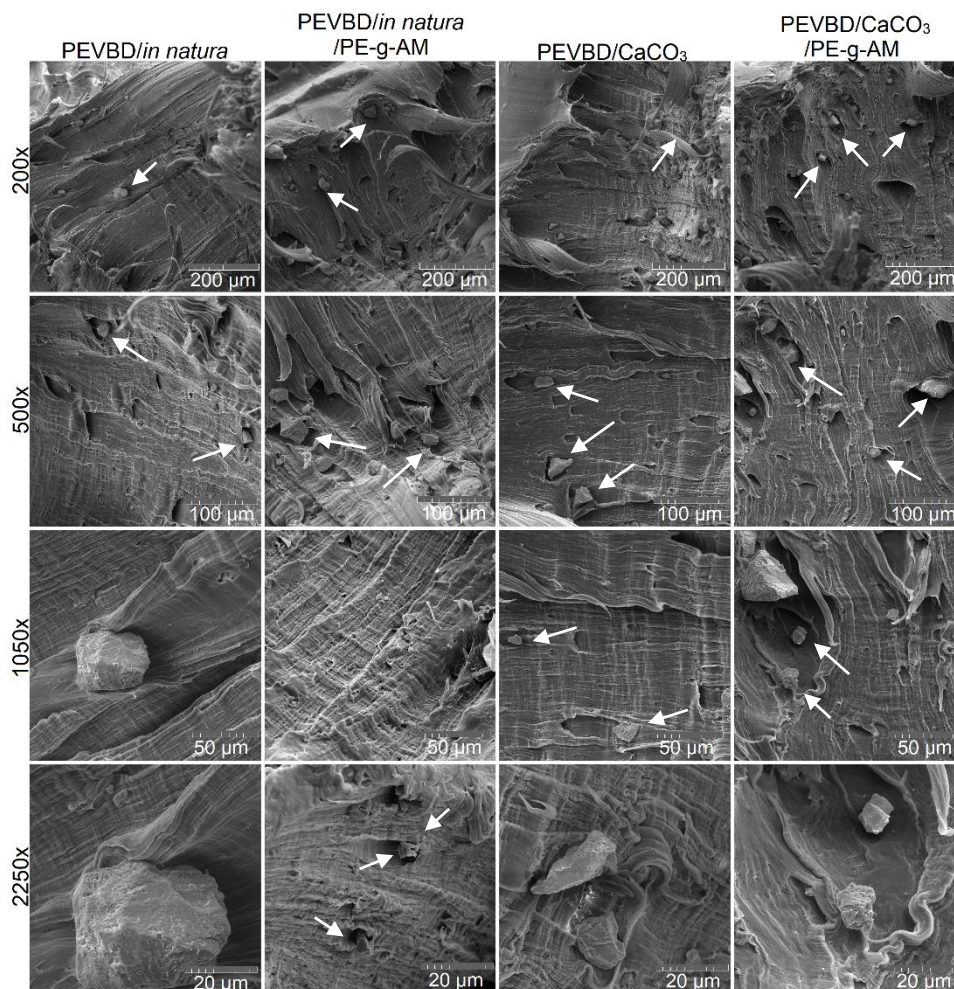


Figura 26 - Micrografias de MEV dos compósitos obtidos – ampliação de 200x, 500x, 1050x, 2250x.

7.2.2 Caracterizações térmicas

7.2.2.1 Análise termogravimétrica (TGA)

Na Figura 27 são apresentadas as curvas de TG/DTG da matriz polimérica e dos compósitos produzidos. Nota-se que os termogramas apresentam apenas um estágio de perda de massa, logo, podemos afirmar que o processo de degradação térmica do PEVBD acontece em uma única etapa. O único estágio de perda de massa apresentado deu-se em aproximadamente 475°C para todas as amostras, como visto por Wang *et al.* (2018), Hajinezhad; Razavizadeh; Niazmand (2019) e Duque *et al.* (2020) em estudos semelhantes utilizando o PEBD.

As dissimilaridades estão na quantidade de perda de massa de cada formulação. O PEVBD puro perdeu em torno de 78% de massa, assim como o compósito PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM. Os compósitos reforçados com as

partículas *in natura* tiveram perdas de massa bastante próximas (88-90%). Estas formulações foram as que obtiveram os maiores decréscimos de massa, que provavelmente é devido as partículas *in natura* serem um material pouco estável a altas temperaturas, em razão de possuírem matéria orgânica em sua composição.

Já o compósito que apresentou a menor perda de massa (~70%) foi o PEVBD/bio-CaCO₃, esse comportamento pode ser justificado pelas partículas de reforço calcinadas a altas temperaturas, que acabaram conferindo maior estabilidade térmica ao compósito. Outro fator que confirma tal melhora na estabilidade térmica é o deslocamento do pico para a direita quando este é comparado ao polímero puro e aos compósitos reforçados com o pó *in natura*.

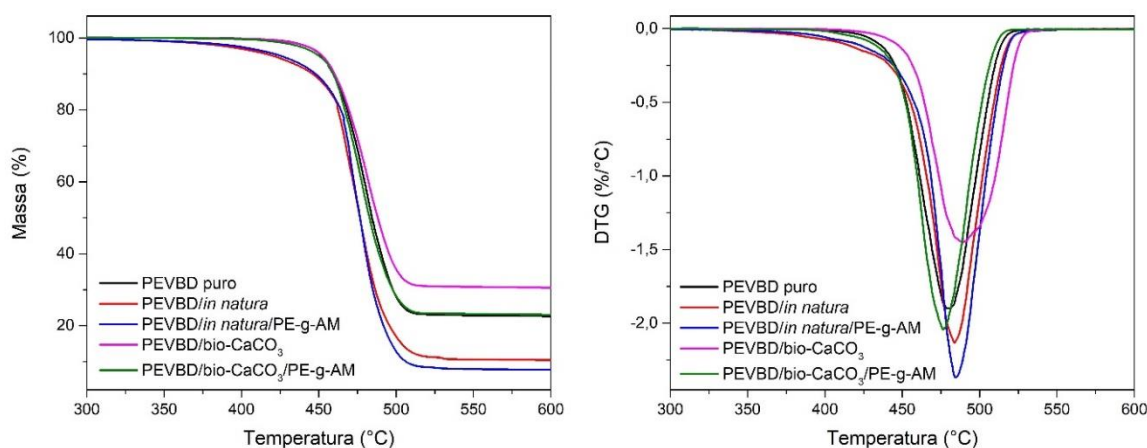


Figura 27 – Curvas de TG/DTG dos compósitos produzidos.

7.2.2.2 Calorimetria exploratório diferencial (DSC)

Os termogramas de DSC das amostras de PEVBD puro e dos compósitos poliméricos obtidos durante o resfriamento (Figura 28. A) e segundo aquecimento (Figura 28. B) são apresentados a seguir. Nota-se nos termogramas de segundo aquecimento que o pico exotérmico de fusão do PEVBD e dos demais compósitos aparece aproximadamente em 112°C, valor que é característico e esperado para este polímero. Todas as amostras apresentaram formas similares dos picos, alguns variando em largura e intensidade. Comportamento aproximado foi apresentado por Santos *et al.* (2018).

Protuberâncias podem ser notadas durante o resfriamento, em torno de 60°C, Jaerger *et al.* (2017) chama tais protuberâncias de picos de relaxamento do PEVBD. Durante o segundo aquecimento também é observado esse pico no compósito

PEVBD/*in natura*/PE-g-AM em aproximadamente 80°C, que pode ser explicado pela amostra apresentar domínios cristalinos mais abundantes quando comparado com os demais compósitos.

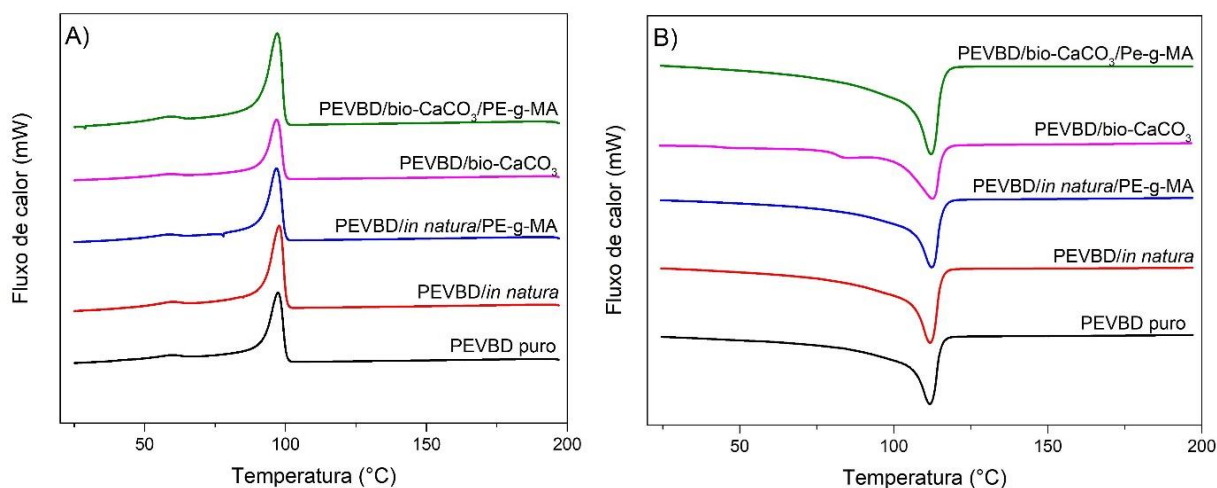


Figura 28 - Termogramas de DSC obtidos para os compósitos produzidos, em A) resfriamento e B) segundo aquecimento.

A Tabela 9 apresenta os parâmetros térmicos obtidos a partir da análise de DSC para a matriz e demais formulações de compósitos.

Tabela 9 - Dados térmicos obtidos a partir da análise de DSC.

	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	X_c (%)
PEVBD puro	104,3	114,3	97,3	74,0	39,0
PEVBD/ <i>in natura</i>	104,4	103,5	97,8	74,0	37,4
PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM	104,4	92,5	96,9	57,1	38,7
PEVBD/bio-CaCO ₃	107,5	7,8	97,0	55,5	38,5
PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM	104,1	99,56	97,2	69,1	38,6

Onde: T_m : temperatura de fusão cristalina medida no segundo ciclo de aquecimento; ΔH_f : entalpia de fusão cristalina medida no segundo aquecimento; T_c : temperatura de cristalização medida no ciclo de resfriamento; ΔH_c : entalpia de cristalização medido no ciclo de resfriamento e; X_c : grau de cristalinidade calculado para o segundo ciclo de aquecimento.

Os valores obtidos demonstram que não houve variação significativa nos parâmetros de T_m e T_c . Contudo, houve uma redução para os valores de variação de entalpia, o que provém das partículas de reforço não sofrerem fusão durante a etapa

de aquecimento, como visto anteriormente nas curvas de TG/DTG. A entalpia de fusão cristalina apresentada para a amostra PEVBD/bio-CaCO₃ não é um valor real, acredita-se ter ocorrido um erro no momento da execução da análise.

No que diz respeito a cristalinidade, Li *et al.* (2019), Oyama *et al.* (2020) e Saikrishnan *et al.* (2020) encontraram valores para o grau de cristalinidade do PEBD/PEVBD entre 30 e 50%, neste estudo o valor encontrado para o PEVBD puro foi de 39%. Esse baixo valor é explicado pela presença de ramificações da cadeia principal, esses curtos “ramais” não se acomodam na rede cristalina, resultando em uma maior desordem da mesma. Outro fator que pode influenciar a cristalinidade são as partículas de dimensões maiores, as quais dificultam a formação da lamela cristalina e assim, não conferem maior cristalinidade a amostra.

Tratando-se dos compósitos, houve um decréscimo da cristalinidade a medida que foi adicionado o material de reforço, tanto para as partículas *in natura* quanto para o bio-CaCO₃. Isso pode ser explicado pelas partículas de reforço adentrarem e romperem a rede cristalina do polímero, provocando assim o desempacotamento das cadeias poliméricas e consequentemente, a redução na cristalinidade do compósito, como indicado por Hassen *et al.* (2015).

Os compósitos que continham o agente de acoplamento tiveram um suave acréscimo na cristalinidade quando comparadas com as amostras sem compatibilizante, mas o valor não se sobrepôs ao PEVBD puro. A variação de tais valores estão dentro do erro experimental, portanto pode ser desconsiderada.

7.2.3 Caracterizações mecânicas

7.2.3.1 Resistência ao impacto Izod

Os corpos de prova da matriz e dos compósitos produzidos foram submetidos a ensaio de resistência ao impacto Izod, utilizando pêndulo de até 11J. Apesar disso, nenhum dos corpos de prova sofreu ruptura, como é mostrado na Figura 29. Com isso os valores de resistência ao impacto não foram quantificados, lê-se na Tabela 10 como *no break* (NB).

Contudo percebe-se maior deformação plástica na região de ponta do entalhe, após as amostras serem submetidas ao ensaio. Isso pode ter acontecido devido as partículas de reforço terem agido de forma a trinca não se propagar.

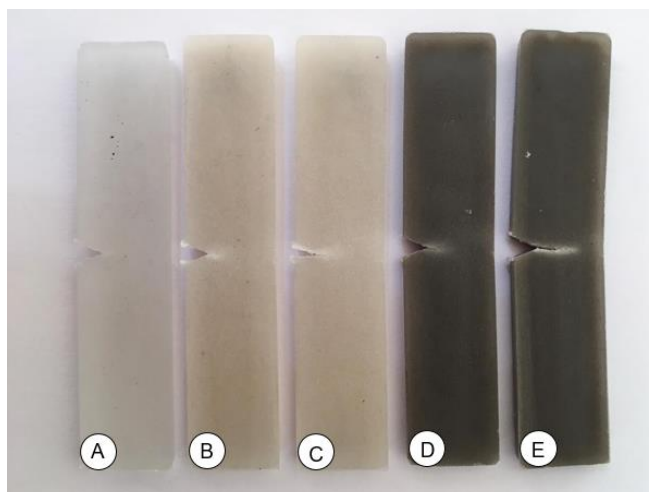


Figura 29 – Corpos de prova após ensaio de impacto (*no break*), em A) PEVBD puro, B) PEVBD/*in natura*, C) PEVBD/*in natura*/PE-g-AM, D) PEVBD/bio-CaCO₃, E) PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM.

Ainda assim, podemos deduzir que os compósitos detêm de uma considerável resistência ao impacto, já que de maneira geral, quando trata-se desses materiais, uma boa adesão entre matriz-reforço favorece a melhora da resistência ao impacto, assim como a utilização de cascas de ovos e carbonato de cálcio como reforço, conforme comprovado por Oladele *et al.* (2020) e Petchwattana; Naknaen; Narupai (2020) em seus estudos.

O tamanho de partícula dos materiais de reforço é outro fator que é capaz de influenciar a resistência ao impacto dos compósitos. Tal fato foi estudado por Sosiati *et al.* (2020), onde este compreendeu que compósitos reforçados com partículas menores apresentam melhores resultados de resistência ao impacto, já que partículas de menor tamanho possuem uma alta área superficial, acarretando em melhor adesão entre matriz e reforço.

Como visto anteriormente a partir do MEV, o agente compatibilizante PE-g-AM conferiu ao compósitos uma melhora na adesão entre as fases constituintes. Sendo assim, essa melhora contribuiu para o aumento da resistência ao impacto dos compósitos que continham o compatibilizante em sua formulação.

Valores obtidos de energia absorvida pelos corpos de prova no ensaio de impacto são disponibilizados no Apêndice C.

7.2.3.2 Tração uniaxial

A partir das curvas obtidas pelo ensaio de tração uniaxial, onde os corpos de prova atingiram a ruptura (Figura 30), obteve-se os dados de módulo de Young, resistência à tração e alongamento na ruptura, os quais são apresentados na Tabela 10.

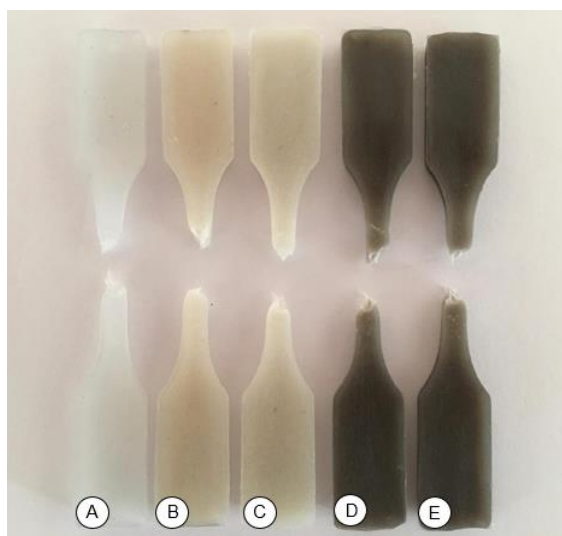


Figura 30 – Corpos de prova após ensaio de tração, em A) PEVBD puro, B) PEVBD/*lin natura*, C) PEVBD/*lin natura*/PE-g-AM, D) PEVBD/bio-CaCO₃, E) PEVBD/bio-CaCO₃/PE-g-AM.

Dentre as propriedades analisadas, o módulo de Young foi o que mais se destacou, pois quando comparado ao polímero puro, os compósitos produzidos dobraram de valor no módulo obtido, onde o que apresentou o melhor comportamento foi o compósito PEVBD/*lin natura* (aumento de aproximadamente 124%). Tal aumento pode ser explicado pela boa dispersão do material de reforço na matriz polimérica, que de alguma forma está ligada à geometria e tamanho das partículas, facilitando a interação na matriz e não formando aglomerados. Resultados similares foram reportados por GBADEYAN *et al.* 2020, MUSTAPHA *et al.* 2020 e ASADI *et al.* 2021.

Tabela 10 – Dados obtidos a partir dos ensaios mecânicos (tração e impacto), para o polímero puro e os compósitos.

	Módulo de Young (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência ao impacto (J/m)
PEVBD puro	242,4 ± 132,1	19,7 ± 1,2	33,7 ± 3,5	NB
PEVBD/ <i>in natura</i>	544,8 ± 150,3	20,1 ± 0,9	22,7 ± 2,9	NB
PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM	494,3 ± 66,6	19,5 ± 1,2	23,7 ± 1,4	NB
PEVBD/bio-CaCO ₃	463,4 ± 24,4	19,1 ± 1,1	25,3 ± 2,2	NB
PEVBD/bio-CaCO ₃ /PE-g-AM	458,8 ± 23,6	18,6 ± 0,6	24,1 ± 1,8	NB

No entanto, no que refere-se a resistência à tração, o compósito PEVBD/*in natura* foi único que apresentou resultado superior ao polímero puro. Mas de forma geral, a adição das partículas do material de reforço não aumentou significativamente essa propriedade em relação a matriz polimérica.

Oladele *et al.* (2020) preparou compósitos utilizando os mesmos materiais de reforço e igualmente não obteve resultados aperfeiçoados de resistência à tração. Segundo o autor, a transferência de carga de tração para os reforços pode ter ocorrido de forma inadequada, ou melhor dizendo, o compósito desenvolvido pode não ser adequado para ser submetido a esforços de tração. Owuamanam (2019) ressalta que dependendo da aplicação final do compósito, uma redução pequena na resistência à tração pode ser aceitável.

O alongamento na ruptura sofreu um decréscimo a medida que foi incorporado os materiais de reforço na matriz polimérica. Isso indica que os compósitos são menos dúcteis quando comparados ao polímero puro, ou seja, não sofrem grande deformação até atingir a ruptura, sendo assim se rompem com maior facilidade.

Nos compósitos compatibilizados, não percebeu-se aumento das propriedades mecânicas quando estes são comparados aos compósitos não compatibilizados. Este comportamento provavelmente é devido a quantidade insuficiente de compatibilizante e assim, não haver grupos funcionais o bastante para melhorar as propriedades mecânicas. Levando em consideração que não se tem conhecimento neste trabalho da quantidade de anidrido maleico presente na

formulação do compatibilizante, pois esta informação não foi fornecida pelo fabricante.

Para melhor observação, a Figura 31 apresenta os histogramas dos resultados obtidos a partir do ensaio de tração uniaxial os quais a matriz polimérica e os compósitos produzidos foram submetidos.

Nos Apêndices D, E e F podem ser encontrados os dados detalhados sobre módulo de Young, resistência à tração e alongamento na ruptura dos materiais produzidos.

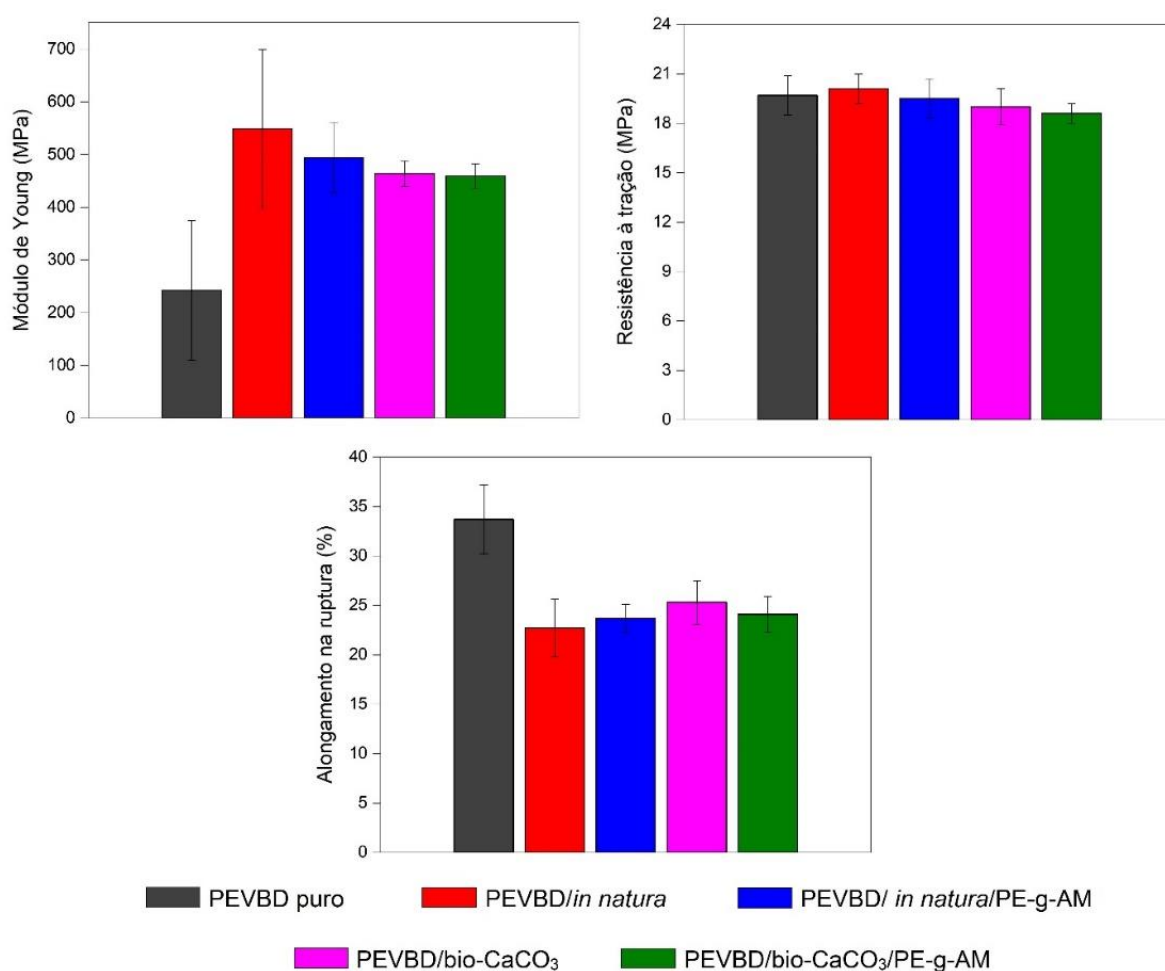


Figura 31 – Histogramas de dados obtidos a partir do ensaio de tração das amostras estudadas.

8 Considerações finais

Após a análise e discussão dos resultados chegou-se a algumas conclusões sobre o estudo feito neste trabalho. O tratamento térmico por calcinação mostrou-se um método simples e adequado para obtenção de carbonato de cálcio a partir de cascas de ovos (bio-CaCO₃), como confirmado pelas caracterizações de DRX e FTIR.

No que diz respeito a comparação entre os materiais de reforço (*in natura* e bio-bio-CaCO₃), não houve diferença significativa entre os mesmos. Um dos questionamentos feitos anterior ao estudo era se a matéria orgânica e água presente nas partículas *in natura* interfeririam negativamente nas propriedades do compósitos. Isso não sucedeu-se, o pó *in natura* mostrou-se tão eficaz quanto o pó bio-CaCO₃.

Quanto a matriz polimérica utilizada, que foi o polietileno verde de baixa densidade (PEVBD), a partir das análises que o material foi submetido, este apresentou propriedades e características similares ao polietileno de baixa densidade convencional. Dessa forma, constata-se o que é proposto pela empresa fabricante, propriedades e características equivalentes ao polímero convencional, entretanto obtido a partir de fonte renovável.

Em relação aos compósitos produzidos, o módulo de Young e a resistência ao impacto foram as propriedades que mais destacaram-se com a adição das partículas de reforço. Dessa forma, confirma-se que pós provenientes de cascas de ovos, sejam eles *in natura* ou calcinados, atuam principalmente na rigidez e resistência ao impacto dos compósitos.

Os compósitos produzidos nesta pesquisa têm forte competência para serem aplicados no setor de embalagens, onde comumente o PEVBD já vem sendo empregado.

9 Sugestões para trabalhos futuros

Para conseguir alcançar melhores resultados em certas propriedades, pode-se aprimorar alguns fatores neste estudo:

- Realizar um tratamento superficial das partículas para melhorar a compatibilidade e alcançar uma boa interface entre as fases;
- Controlar o tamanho de partícula, visando obter partículas de tamanhos menores e uniformes;
- Caracterizar o agente compatibilizante utilizado por ressonância magnética nuclear de prótons (RMN) para quantificação do teor de anidrido maleico presente.
- Utilizar de uma formulação de PE-g-AM que contenha maior teor de anidrido maleico;
- Testar o emprego de um compatibilizante natural, como o tanino;
- Caracterizar dos pós por espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDS) para mapeamento elementar.
- Produzir os compósitos por diferentes tipos de mistura para avaliar a influência desse parâmetro nas propriedades finais do material;
- Comparar o efeito dos pós provenientes de cascas de ovos e carbonato de cálcio comercial em materiais compósitos.

Referências

AGUIAR, Gisiane de Oliveira; SOUZA, Pollyanna Rodrigues Huguinim; SOARES, Rogério Manhães; CORDEIRO, Yasmim Monteiro; FRANCO, Camila dos Santos Silva. Aplicação da química verde na indústria química como desenvolvimento sustentável com ênfase na produção do plástico verde. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 12, p. 41-58, 2020. Disponível em: http://www.fsma.edu.br/RESA/Edicao12/FSMA_RES_2020_2_06_Quimica_Verde.pdf. Acesso em: 02 fev. 2021.

ABDELMALIK, Ahmadu; OGBODO, M. O.; MOMOH, G. E. Investigating the mechanical and insulation performance of waste eggshell powder/epoxy polymer for power insulation application. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 10, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1259-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-1259-9>. Acesso em: 26 jun. 2021.

ALMOMANI, Mohammed; HAYAJNEH, Mohammed T; MU'AYYAD, Al-Shrida. Investigation of mechanical and tribological properties of hybrid green eggshells and graphite-reinforced aluminum composites. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, n. 1, p. 1-13, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2130-z>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-019-2130-z>. Acesso em: 26 jun. 2021.

ANDRADE, Micaela de Freitas. **Obtenção e estudo de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de pó da casca de ovo de galinha**. 2017. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24013>. Acesso em: 10 set. 2019.

ASADI, Zahra; JAVADI, Azizeh; MOHAMMADZADEH, Fatemeh; ALAVI, Kosar. Investigation on the role of nanoclay and nano calcium carbonate on morphology, rheology, crystallinity and mechanical properties of binary and ternary nanocomposites based on PLA. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, v. 26, n. 1, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/1023666X.2020.1836459>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1023666X.2020.1836459>. Acesso em: 26 abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOINOVAÇÃO. **Bioplástico da Braskem é reconhecido em evento da ONU**. 27 mai. 2020. Disponível em: <https://abbi.org.br/noticia/bioplastico-da-braskem-e-reconhecido-em-evento-da-onu/>. Acesso em: 01 fev. 2021.

BELLOLI, Rodrigo. **Polietileno verde do etanol da cana-de-açúcar brasileira:**

Biopolímero de classe mundial. 2010. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/35204>. Acesso em: 03 set. 2019.

BESSLER, Karl; RODRIGUES, Laécio. Os polimorfos de carbonato de cálcio-uma síntese fácil de aragonita. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 178-180, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000100032>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/6kLsNC9bf58vMk6nnq4bVbJ/?lang=pt>. Acesso em: 07 set. 2019.

BETA ANALYTIC TESTING LABORATORY. **ASTM D6866 para analisar o conteúdo de base biológica.** Mar. 2021. Disponível em: <https://www.betalabservices.com/portugues/base-biologica/astm-d6866.html>. Acesso em: 06 set. 2019.

BETAEQ. **Plástico biodegradável x plástico verde.** 12 out. 2015. Disponível em: <https://betaeq.com.br/index.php/2015/10/12/plastico-biodegradavel-x-plastico-verde/>. Acesso em: 01 fev. 2021.

BORGES, José Flávio; MUGNAINE, Michele; CAMILO JUNIOR, Alexandre; BORGES, Fabiana Cristina Nascimento; CINTHO, Osvaldo Mitsuyuki. Ultra high molecular weight polyethylene doped with iron through high energy mechanical alloying. **Matéria**, v. 25, n. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1091>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/9PsvRgBL9WsVB3JPNh9wqkz/?lang=en>. Acesso em: 03 fev. 2020.

BORONAT, Teodomiro; FOMBUENA, Vicent; GARCÍA-SANOQUERA, David; SÁNCHEZ-NÁCHER, Lourdes; BALART, Rafael. Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. **Materials & Design**, v. 68, p. 177-185, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306914010115>. Acesso em: 11 jul. 2021.

BOSQUETTI, João César. **Desenvolvimento de membranas poliméricas para sistemas de remediação de íons metálicos pesados em soluções aquosas.** 2019. 121f. Dissertação (Mestrado Profissional em Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11836>. Acesso em: 29 mar. 2021.

BRANCO, Cesar Tadeu Nasser Medeiros; KUWAHARA, Moacir; COSTA, Deibson Silva da; EL BANNA, Wassim Raja; FUJIYAMA, Roberto Tetsuo. Mechanical Behavior of Polymer Composites Reinforced by Sisal and Malva Particulate Fibers Adding Wood Waste. **SAE Technical Paper**, n. 2016-36-0365, p. 1-7, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-36-0365>. Disponível em:

<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2016-36-0365/>. Acesso em: 15 set. 2019.

BRASKEM. **Biopolímeros da Braskem evitam a emissão de mais de 5 milhões de toneladas de CO₂ em 10 anos**. 8 dez. 2020. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/detalhe-noticia/biopolimeros-da-braskem-evitam-a-emissao-de-mais-de-5-milhoes-de-toneladas-de-co2-em-10-anos>. Acesso em: 01 fev. 2021.

BRASKEM. **Polietileno verde I'm green™ (PE verde I'm green™)**. 2010. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/PE-Verde-Produtos-e-Inovacao>. Acesso em: 02 set. 2019.

BRITO, Gustavo; AGRAWAL, Pankaj.; ARAÚJO, Edcleide; MÉLO, Tomás. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011. Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/222/204>. Acesso em: 24 ago. 2021.

CALLISTER JR, William; RETHWISCH, David. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 878 p.

CAMARATTA, Rubens. **Síntese de ZnO por biomimetização de membranas de cascas de ovo, e sua comparação com TiO₂ para aplicação como ânodo em células fotovoltaicas sensibilizadas por corante**. 2013. 118f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/87345>. Acesso em: 12 set. 2019.

CANEVAROLO JR, Sebastião. **Ciência dos polímeros**. 3.ed. São Paulo: Artliber, 2013. 280 p.

COSTA, Cristiano Cunha; ANDRADE, George Ricardo Santana; ALMEIDA, Luís Eduardo. Biodegradação em solo simulado de compósitos de PEAD/pró-oxidante/casca de arroz: aplicação em tubetes agrícolas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 4, p. 1-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0598>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/VLsCWQ4SVrstm399TXdFWmS/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2019.

DENNIS, James; CARRINO, David; YAMASHITA, Kikuji; CAPLAN, Arnold. Monoclonal antibodies to mineralized matrix molecules of the avian eggshell. **Matrix Biology**, v.19, n. 7, p. 683-692, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0945-053X\(00\)00118-9](https://doi.org/10.1016/S0945-053X(00)00118-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0945053X00001189>. Acesso em: 05 set. 2019.

DUQUE, João Vitor Ferreira; MARTINS, Marcio Ferreira; DEBENEST, Gerald; ORLANDO, Marcos Tadeu D'Azeredo. The influence of the recycling stress history on LDPE waste pyrolysis. **Polymer Testing**, v. 86, p. 106460, 2020. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106460. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941820301549>. Acesso em: 20 jun. 2021.

EAGAN, James ;XU, Jun; DI GIROLAMO, Rocco; THURBER, Christopher; MACOSKO, Christopher; LAPOINTE, Anne; BATES, Frank; COATES, Geoffrey. Combining polyethylene and polypropylene: Enhanced performance with PE/iPP multiblock polymers. **Science**, v. 355, n. 6327, p. 814-816, 2017. DOI: 10.1126/science.aah5744. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/355/6327/814.abstract>. Acesso em: 03 mar. 2021.

FIGUEIRA, Catarina Henriques. **Aproveitamento de casca de ovo para aplicações industriais**. 2014. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014. Disponível em: <https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/38778/1/Aproveitamento%20de%20casca%20de%20ovo%20para%20aplicacoes%20industriais.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

FLORENTINO, Wagner Martins; BRANDÃO, Amanda; MILÉO, Patrícia Câmara; GOULART, Shane Aparecida Soares; MULINARI, Daniella Regina. Biocompósitos de Poliuretano reforçados com Fibras de Coco Verde. **Cadernos UniFOA**, v. 6, n. 17, p. 11-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v6i17.1076>. Disponível em: <http://revistas.unifoa.edu.br/index.php/cadernos/article/view/1076>. Acesso em: 15 set. 2019.

GBADEYAN, Oluwatoyin Joseph; ADALI, Sarp; BRIGHT, Glen; SITHOLE, Bruce; AWOGBEMI, Omojoola. Studies on the mechanical and absorption properties of achatina fulica snail and eggshells reinforced composite materials. **Composite Structures**, v. 239, p. 112043, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112043>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822319330508>. Acesso em: 23 abr. 2021.

GOMES, Ailton; BARBOSA, Ronilson Vasconcelos; SOARES, Bluma. Agentes compatibilizantes não reativos para blendas poliméricas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 19-24, 2013. Disponível em: <http://www.polimeros.periodikos.com.br/article/588371307f8c9d0a0c8b478d>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GROSS, Flavio; PINTO, Lhuan Junior Freire. **Análise de compósitos poliméricos com reforço de agregados**. 2014. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná,

Medianeira, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/13492>. Acesso em: 10 set. 2019.

GLOBO RURAL. **Brasileiro bate recorde no consumo de ovos**. 15 jan. 2019.

Disponível em:

<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Criacao/noticia/2019/01/brasileiro-bate-recorde-no-consumo-de-ovos.html>. Acesso em: 15 set. 2019.

G1. **Brasil é o 4º maior produtor de lixo plástico do mundo e recicla apenas 1%**.

04 mar. 2019. Disponível em:

<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/03/04/brasil-e-o-4o-maior-produtor-de-lixo-plastico-do-mundo-e-recicla-apenas-1.ghtml>. Acesso em: 14 set. 2019.

HABTE, Lulit; SHIFERAW, Natnael; MULATU, Dure; THENEPALLI, Thriveni; CHILAKALA, Ramakrishna; AHN, Ji Whan. Synthesis of nano-calcium oxide from waste eggshell by sol-gel method. **Sustainability**, v. 11, n. 11, p. 3196, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113196>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3196>. Acesso em: 17 set. 2020.

HAFEZ, Islam; AMINI, Ezatollah; TAJVIDI, Mehdi. The synergy between cellulose nanofibrils and calcium carbonate in a hybrid composite system. **Cellulose**, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03032-w>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10570-020-03032-w>. Acesso em: 29 jun. 2021.

HAJINEZHAD, Somayeh; RAZAVIZADEH, Bibi Marzieh; NIAZMAND, Razieh. Study of antimicrobial and physicochemical properties of LDPE/propolis extruded films. **Polymer Bulletin**, v. 77, n. 8, p. 4335-4353, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-019-02965-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-019-02965-y>. Acesso em: 20 jun. 2021.

HASSEN, Ahmed Arabi; DIZBAY-ONAT, Melike; BANSAL, Dhruv; BAYUSH, Theresa; VAIDYA, Uday. Utilization of chicken eggshell waste as a bio-filler for thermoplastic polymers: thermal and mechanical characterization of polypropylene filled with naturally derived CaCO₃. **Polymer and Polymer Composites**, v. 23, n. 9, p. 653-662, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/096739111502300908>. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/096739111502300908>. Acesso em: 10 ago. 2021.

HINCKE, Maxwell; NYS, Yves; GAUTRON, Joel; MANN, Karlheinz; RODRIGUEZ-NAVARRO, Alejandro; MCKEE, Marc. The eggshell: structure, composition and mineralization. **Front Biosci**, v. 17, n. 1266, p. 120, 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=591edb01dc332dc0a1433b72&assetKey=AS:495695267155968@1495194369824>. Acesso em: 05 set. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Quantidade**

produzida de ovos de galinha (3º trimestre de 2020). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9216-pesquisa-trimestral-da-producao-de-ovos-de-galinha.html?edicao=29670&t=resultados>. Acesso em: 30 jan. 2021.

JAERGER, Silvia; ZAWADZKI, Sonia; LEUTERITZ, Andreas; WYPYCH, Fernando. New alternative to produce colored polymer nanocomposites: organophilic Ni/Al and Co/Al layered double hydroxide as fillers into low-density polyethylene. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, p. 2391-2401, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20170093>. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/New-Alternative-to-Produce-Colored-Polymer-Ni%2FAl-as-Jaerger-Zawadzki/d070ae8fc0c5a236f85550240e615e5d9d28482e>. Acesso em: 28 ago. 2021.

KHAN, Shanza Rauf; SABA, Jamil; RASHID, Hummayun; ALI, Shahid, KHAN, Safyan; JANJUA, Muhammad Ramzan Saeed Ashraf. Agar and egg shell derived calcium carbonate and calcium hydroxide nanoparticles: Synthesis, characterization and applications. **Chemical Physics Letters**, v. 732, p. 136662, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2019.136662>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0009261419306438>. Acesso em: 11 jul. 2021.

KRISTL, Matjaž; JURAK, Sabina; BRUS, Maksimilijan; SEM, Vilma; KRISTL, Janja. Evaluation of calcium carbonate in eggshells using thermal analysis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 138, n. 4, p. 2751-2758, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08678-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10973-019-08678-8>. Acesso em: 12 jul. 2021.

LI, Dawei; ZHOU, Liwei; WANG, Xuan; HE, Lijuan; YANG, Xiong. Effect of crystallinity of polyethylene with different densities on breakdown strength and conductance property. **Materials**, v. 12, n. 11, p. 1746-1758, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12111746>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/11/1746>. Acesso em: 17 jun. 2021.

LIMA, Rudson de Souza. **Desenvolvimento de compósito um de matriz polimérica com carga/reforço de fibras de piaçava e pet pós-consumo.** 2017. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/24142>. Acesso em: 15 set. 2019.

LUNA VERA, Fernando; CHALAPUD, Marcelo Guancha; VIVEROS, Ingrid Castillo; MEDINA, Edgar Alexander Vásquez. From eggshells to quicklime: using carbonate cycle as an integrating concept to introduce students to materials analysis by TGA and FTIR. **Journal of Chemical Education**, v. 95, n. 4, p. 625-630, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.7b00597>. Disponível em:

<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jchemed.7b00597>. Acesso em: 17 set. 2020.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliméricos: Fundamentos e Tecnologia**. 1.ed. São Paulo: Artliber, 2011. 333 p.

MAZLAN, Nurul Aqilla; SAPARI, Jamil; SAMBASEVAM, Kavirajaa Pandian. Synthesis and fabrication of polyaniline/eggshell composite in ammonia detection. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 30, n. 2, 2020. Disponível em: <http://www.jmmm.material.chula.ac.th/index.php/jmmm/article/view/649>. Acesso em: 30 jun. 2021.

MAZUR, Karolina; JAKUBOWSKA, Paulina; ROMÁŃSKA, Paulina; KUCIAL, Stanislaw. Green high density polyethylene (HDPE) reinforced with basalt fiber and agricultural fillers for technical applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 202, p. 108399, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108399>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S135983682033448X>. Acesso em: 28 jun. 2021.

MEL'GUNOV, Maxim; AYUPOV, Artem. Direct method for evaluation of BET adsorbed monolayer capacity. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 243, p. 147-153, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.02.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1387181117300604>. Acesso em: 11 jul. 2021.

MORES, Giana de Vargas; FINOCCHIO, Caroline Pauletto Spanhol; BARICHELLO, Rodrigo; PEDROZO, Eugenio Avila. Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic. **Journal of Cleaner Production**, v. 177, p. 12-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.138>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617330974>. Acesso em: 11 jul. 2021.

MOSADDEGH, Elaheh. Ultrasonic-assisted preparation of nano eggshell powder: A novel catalyst in green and high efficient synthesis of 2-aminochromenes. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 20, n. 6, p. 1436-1441, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.04.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417713001016>. Acesso em: 19 set. 2020.

MULINARI, Daniella Regina. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar**. 2009. 112f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/106312>. Acesso em: 17 set. 2019.

MUSTAPHA, Kabiru; AYINLA, Rashidat; OTTAN, Abdulraman Sikiru; OWOSENI, Tunji Adetayo. Mechanical properties of calcium carbonate/eggshell particle filled polypropylene Composites. **MRS Advances**, v. 5, n. 54, p. 2783-2792, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1557/adv.2020.323>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1557/adv.2020.323>. Acesso em: 26 abr. 2021.

NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**, 2 ed., São Paulo, Edgard Blücher, 2016. 416 p.

NOVAIS, Andréa Ferreira; SANTOS, Arlan Rodrigo da Silva; BEZERRA, Rodrigo Rangel Ribeiro; FERREIRA, Fernanda Carla de Lima; SOUZA, Divanizia do Nascimento. Caracterização estrutural e morfológica de compostos químicos para produção vítrea. **Scientia Plena**, v. 15, n. 7, p. 1-7, 2019. DOI: [10.14808/sci.plena.2019.074810](https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.074810). Disponível em: <https://www.scientiaplenua.org.br/sp/article/view/4837>. Acesso em: 31 ago. 2021.

NYS, Yves; GAUTRON, Joël; GARCIA-RUIZ, Juan; HINCKE, Maxwell. Avian eggshell mineralization: biochemical and functional characterization of matrix proteins. **Comptes Rendus Palevol**, v. 3, n. 6-7, p. 549-562, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crpv.2004.08.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631068304001393>. Acesso em: 22 set. 2019.

OLADELE, Isiaka Oluwole; MAKINDE-ISOLA, Baraka Abiodun; Adediran, ADEOLU ADESOJI; OLADEJO, Michael Olalekan; OWA, Adebayo Felix; OLAYANJU, Adeniyi. Mechanical and wear behaviour of pulverised poultry eggshell/sisal fiber hybrid reinforced epoxy composites. **Materials Research Express**, v. 7, n. 4, p. 045304, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8585>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab8585/meta>. Acesso em: 22 abr. 2021.

OLESIK, Piotr; GODZIERZ, Marcin; KOZIOŁ, Mateusz. Preliminary characterization of novel LDPE-based wear-resistant composite suitable for FDM 3D printing. **Materials**, v. 12, n. 16, p. 2520, 2019. DOI: [10.3390/ma12162520](https://doi.org/10.3390/ma12162520). Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6719240/>. Acesso em: 10 jul. 2021.

OWUAMANAM, Stephen Ifeanyichukwu. **Fabrication and characterization of bio-epoxy eggshell composites**. 2019. 104f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Saskatchewan, Saskatoon, 2019. Disponível em: <https://harvest.usask.ca/handle/10388/12306>. Acesso em: 23 jun. 2021.

OYAMA, Isabela; SOUZA, Gabriel de; REZENDE, Mirabel; MONTAGNA, Larissa; PASSADOR, Fabio. A new eco-friendly green composite for antistatic packaging: Green low-density polyethylene/glass carbon. **Polymer Composites**, v. 41, n. 7, p. 2744-2752, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.25572>. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pc.25572>. Acesso em: 17 jun. 2021.

PEREIRA, Júnia; OKUMURA, Fabiano; RAMOS, Luiz; CAVALHEIRO, Éder; NÓBREGA, Joaquim. Termogravimetria: um novo enfoque para a clássica determinação de cálcio em cascas de ovos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1661-1666, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600052>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/SpXvXHnjdVCRZvNM5B53t9K/?lang=pt>. Acesso em: 07 set. 2019.

PETCHWATTANA, Nawadon; NAKNAEN, Phisut.; NARUPAI, Benjaporn. Combination effects of reinforcing filler and impact modifier on the crystallization and toughening performances of poly (lactic acid). **Express Polymer Letters**, v. 14, n. 9, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Nawadon-Petchwattana/publication/342580780_Combination_effects_of_reinforcing_filler_and_impact_modifier_on_the_crystallization_and_toughening_performances_of_poly\(lactic_acid\)/links/6021600c92851c4ed55b6bf0/Combination-effects-of-reinforcing-filler-and-impact-modifier-on-the-crystallization-and-toughening-performances-of-poly\(lactic-acid\).pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nawadon-Petchwattana/publication/342580780_Combination_effects_of_reinforcing_filler_and_impact_modifier_on_the_crystallization_and_toughening_performances_of_poly(lactic_acid)/links/6021600c92851c4ed55b6bf0/Combination-effects-of-reinforcing-filler-and-impact-modifier-on-the-crystallization-and-toughening-performances-of-poly(lactic-acid).pdf). Acesso em: 26 abr. 2021.

PLÁSTICO INDUSTRIAL. **Agentes adequados melhoram a qualidade de materiais reciclados**. 15 mai. 2017. Disponível em: https://www.arandanet.com.br/revista/pi/materia/2018/04/06/agentes_adequados.html. Acesso em: 25 ago. 2021.

RESENDE, Lorena de Moraes. **Análise das características do polietileno verde como alternativa à substituição do polietileno petroquímico**. 2018. 44f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro Universitário de Formiga, Formiga, 2018. Disponível em: <https://repositorioinstitucional.unifmg.edu.br:21074/xmlui/handle/123456789/733>. Acesso em: 04 set. 2019.

REZENDE, Mirabel; COSTA, Michelle; BOTELHO, Edson. **Compósitos estruturais: tecnologia e prática**. 1.ed. São Paulo: Artliber, 2011. 396 p.

SAIKRISHNAN, Sainiwetha; JUBINVILLE, Dylan; TZOGANAKIS, Costas; MEKONNEN, Tizazu. Thermo-mechanical degradation of polypropylene (PP) and low-density polyethylene (LDPE) blends exposed to simulated recycling. **Polymer Degradation and Stability**, v. 182, p. 109390, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109390>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391020303190>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SANTOS, Luiz Fernando Gomes dos; FORMIGA, Lucas Antônio de Souza; RODRIGUES, Jean da Silva; SILVA, Cléber Silva e. Desenvolvimento de compósitos de amido termoplástico reforçados com fibras de curauá natural da Amazônia eco-compósitos de amido com fibras de curauá. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 17, n. 4, p. 230-239, 2016. Disponível em:

file:///C:/Users/ACER/Desktop/Mestrado/Disserta%C3%A7%C3%A3o/Refer%C3%Ancias/SANTOS%20ET%20AL%202016.pdf. Acesso em: 15 set. 2019.

SANTOS, Maikon Stefano dos; MONTAGNA, Larissa Stieven; REZENDE, Mirabel Cerqueira. A new use for glassy carbon: development of LDPE/glassy carbon composites for antistatic packaging applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 11, p. 47204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47204>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.47204>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SCHLICKMANN, Katlen Priscila; HOWARTH, Janaína Lisi Leite; SILVA, Denise Abatti Kasper; PEZZIN, Ana Paula Testa. Effect of the incorporation of micro and nanoparticles of calcium carbonate in poly (vinyl chloride) matrix for industrial application. **Materials Research**, v. 22, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0870>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/LbzSthkBFJnFRtkWJJ7FN8s/abstract/?format=html&lang=en>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SILVA, Felipe Pereira da; SILVA, Diogo Pimental de Sá da; ESPÍNDOLA, Gabriel Lopes; DIONÍZIO, Thaís Petizero; SILVA, Bruno José Barros da. Prospecção e proposição de roadmap tecnológico para a produção de polietileno verde. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 827-839, 2020. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/3162/0>. Acesso em: 02 fev. 2021.

SILVA, Fernando Afonso da; RABELO, Denilson. O Uso Sustentável de Polímeros. **Revista Processos Químicos**, v. 11, n. 21, p. 9-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19142/rpq.v11i21.387>. Disponível em: http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/387. Acesso em: 15 set. 2019.

SIQUEIRA, Felipe.; COSSE, Renato Lemos; AZEVEDO, Joyce Batista; BARBOSA, Renata.; ALVES, Tatianny Soares. Nanocompósito de polímero verde: Comportamento mecânico e de inflamabilidade. *In: Ciência e Engenharia de Materiais 4*. Ponta Grossa: Atena Editora, 2018. p. 98-107. DOI 10.22533/at.ed.642182910. Disponível em: <https://www.finersistemas.com/atenaeditora/index.php/admin/api/artigoPDF/3834>. Acesso em: 28 jun. 2021.

SIRACUSA, Valentina; BLANCO, Ignazio. Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly (ethylene terephthalate)(Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. **Polymers**, v. 12, n. 8, p. 1641, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12081641>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1641>. Acesso em: 12 jul. 2021.

SOARES, Emanuel Pereira. **Determinação experimental e simulação das curvas de distribuição de tempo de residência no processo de extrusão de polímeros.**

2016. 164f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/1045>. Acesso em: 31 ago. 2021.

SOARES, André Luiz Flores. **Estudo da permeabilidade em filmes de polietileno verde**. 2012. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Pelotas, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/110105>. Acesso em: 07 set. 2019.

SOSIATI, Harini; UTOMO, Cahyo Trisedyo; SETIONO, Iwan; BUDIYANTORO, Cahyo. Effect of CaCO₃ particles size and content on impact strenght of kenaf/CaCO₃/epoxy resin hybrid composites. **Indonesian Journal of Applied Physics**, v. 10, n. 01, p. 24-31, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13057/ijap.v10i01.37748>. Disponível em: <https://jurnal.uns.ac.id/ijap/article/view/37748>. Acesso em: 23 jun. 2021.

TORRES, Giovanni Barrera. **Compósitos de termoplásticos com borracha natural reforçada com cinzas de bagaço de cana**. 2017. 185f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/151278>. Acesso em: 29 mar. 2021.

WANG, Zhi; WEI, Ruichao; NING, Xiaoyao; XIE, Tian; WANG, Jian. Thermal degradation properties of LDPE insulation for new and aged fine wires. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 137, n. 2, p. 461-471, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7957-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-018-7957-5>. Acesso em: 20 jun. 2021.

WU, Hejun; XIAO, Di; LU, Junyu; LI, Ting; JIAO, Chun; LI, Shasha; LU, Ping; ZHANG, Zhiqing. Preparation and properties of biocomposite films based on poly (vinyl alcohol) incorporated with eggshell powder as a biological Filler. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01747-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-020-01747-2>. Acesso em: 12 jul. 2021.

YAHYA, Norihan; TAHIR, Syuhada Mohd; ROSLI, Nor Habibah Mohd. Green eggshell/polypropylene biocomposite. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 386-389, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336140518_Green_EggshellPolypropylene_Biocomposite. Acesso em: 28 jun. 2021.

Anexos

Anexo A – Folha de dados

Folha de dados do polietileno verde de baixa densidade (SLD4004)



Folha de Dados

17/01/2019

Polietileno de Baixa Densidade SLD4004

Descrição:

O SLD4004 é um polietileno de baixa densidade (PEBD) produzido pelo processo em alta pressão, que apresenta bom equilíbrio entre as propriedades mecânicas e processabilidade. Este grade tem conteúdo mínimo de fonte renovável de 96%, determinado conforme ASTM D6866.

Aplicações:

Peças, frascos soprados; Filme de média resistência mecânica; Mantas de PE expandido.

Processos:

Extrusão de Filmes Tubulares, Moldagem por sopro

Propriedades de Controle:

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190°C/2,16kg)	ASTM D 1238	g/10 min	2,0
Densidade	ASTM D 792	g/cm ³	0,923

Propriedades Típicas - Placa¹:

Propriedades de Referência de Placa

Característica	Método	Unidades	Valores
Resistência à Tração na Ruptura (a)	ASTM D 638	MPa	13
Alongamento na Ruptura (a)	ASTM D 638	%	920
Módulo de Flexão Secante a 1% (b)	ASTM D 790	MPa	240
Dureza Shore D (c)	ASTM D 2240	-	45
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N (b)	ASTM D 1525	°C	92
Temperatura de fusão	ASTM D 3417/D 3418	°C	110

¹ As propriedades típicas se referem ao valor médio dos resultados da propriedade obtidos em nossos laboratórios. Corpos de prova moldados por compressão pelo método ASTM D 4703. Ensaios realizados em placas de: a) 2 mm; b) 3 mm; c) 6 mm. NB = No break.

Observações Finais:

1. As informações aqui contidas são dadas de boa fé, indicando valores típicos obtidos em nossos laboratórios, não devendo ser consideradas como absolutas ou como garantia. Apenas as propriedades e os valores que constam no Certificado de Qualidade devem ser considerados como garantia do produto.
2. Para informações regulatórias do produto, consulte o Documento Regulatório ou entre em contato com a área de Serviços Técnicos.
3. Para informações de segurança, manuseio, proteção individual, primeiros socorros e disposição de resíduos, consultar FISPQ - Ficha de Informações de Segurança do Produto Químico.
4. Os valores constantes nesse documento poderão sofrer alterações sem comunicação prévia da Braskem.

Anexo B – Folha de dados

Folha de dados da análise de granulometria por difração a laser do pó *in natura*

MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Casca de ovo - Average

Sample Source & type:
Malvern

Sample bulk lot ref:

SOP Name:

Measured by:
Malvern

Result Source:
Averaged

Measured:
quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:43:17

Analysed:
quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:43:18

Particle Name:
Default

Particle RI:
1.520

Dispersant Name:
Water

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Absorption:
0.1

Dispersant RI:
1.330

Analysis model:
General purpose

Size range:
0.020 to 2000.000 μm

Weighted Residual:
14.445 %

Sensitivity:
Normal

Obscuration:
9.52 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0770 %Vol

Specific Surface Area:
0.123 m^2/g

Span :
1.273

Surface Weighted Mean D[3,2]:
48.679 μm

Uniformity:
0.307

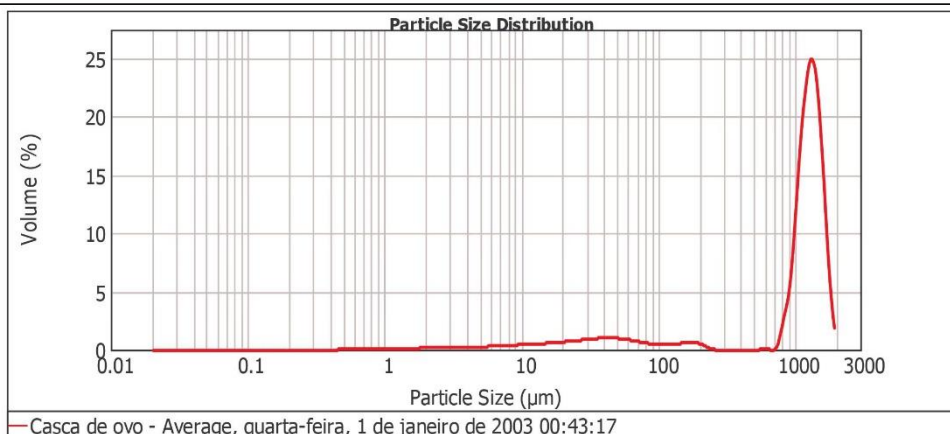
Vol. Weighted Mean D[4,3]:
1091.227 μm

Result units:
Volume

d(0.1): 40.888 μm

d(0.5): 1229.168 μm

d(0.9): 1605.271 μm



— Casca de ovo - Average, quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:43:17

Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %
0.450	0.00	1.876	0.95	7.825	3.00	32.629	8.58	136.059	15.39	567.358	17.34
0.489	0.00	2.041	1.03	8.510	3.20	35.488	9.09	147.981	15.68	617.072	17.34
0.532	0.03	2.220	1.11	9.256	3.42	38.597	9.63	160.948	16.00	671.141	17.34
0.579	0.07	2.414	1.20	10.067	3.65	41.979	10.17	175.050	16.35	729.948	17.30
0.630	0.11	2.626	1.28	10.949	3.89	45.658	10.72	190.389	16.69	793.908	17.69
0.685	0.16	2.856	1.38	11.909	4.14	49.658	11.26	207.071	17.00	863.472	19.26
0.745	0.22	3.106	1.47	12.952	4.41	54.009	11.78	225.215	17.23	939.132	21.79
0.810	0.29	3.378	1.57	14.087	4.69	58.742	12.28	244.949	17.34	1021.421	27.00
0.881	0.35	3.674	1.68	15.321	4.99	63.889	12.74	266.412	17.34	1110.920	35.78
0.958	0.41	3.996	1.79	16.664	5.30	69.487	13.16	289.756	17.34	1208.262	47.35
1.042	0.48	4.346	1.91	18.124	5.63	75.576	13.54	315.145	17.34	1314.132	60.82
1.134	0.54	4.727	2.03	19.712	5.98	82.198	13.87	342.759	17.34	1429.280	74.58
1.233	0.61	5.141	2.16	21.439	6.35	89.400	14.16	372.792	17.34	1554.517	86.40
1.341	0.67	5.592	2.31	23.318	6.75	97.233	14.41	405.457	17.34	1690.728	94.61
1.459	0.74	6.082	2.46	25.361	7.17	105.753	14.65	440.984	17.34	1838.873	98.62
1.586	0.80	6.615	2.63	27.583	7.61	115.020	14.88	479.624	17.34	2000.000	100.00
1.725	0.88	7.194	2.81	30.000	8.08	125.098	15.13	521.650	17.34		

Anexo C – Folha de dados

Folha de dados da análise de granulometria por difração a laser do pó bio-CaCO₃

MASTERSIZER



Result Analysis Report

Sample Name:
Carbonato de cálcio - Average

SOP Name:

Measured:
quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:06:56

Sample Source & type:
Malvern

Measured by:
Malvern

Analysed:
quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:06:57

Sample bulk lot ref:

Result Source:
Averaged

Particle Name:
Default

Accessory Name:
Hydro 2000MU (A)

Analysis model:
General purpose

Sensitivity:
Normal

Particle RI:
1.520

Absorption:
0.1

Size range:
0.020 to 2000.000 um

Obscuration:
13.84 %

Dispersant Name:
Water

Dispersant RI:
1.330

Weighted Residual:
0.867 %

Result Emulation:
Off

Concentration:
0.0217 %Vol

Span :
2.462

Uniformity:
0.764

Result units:
Volume

Specific Surface Area:
0.653 m²/g

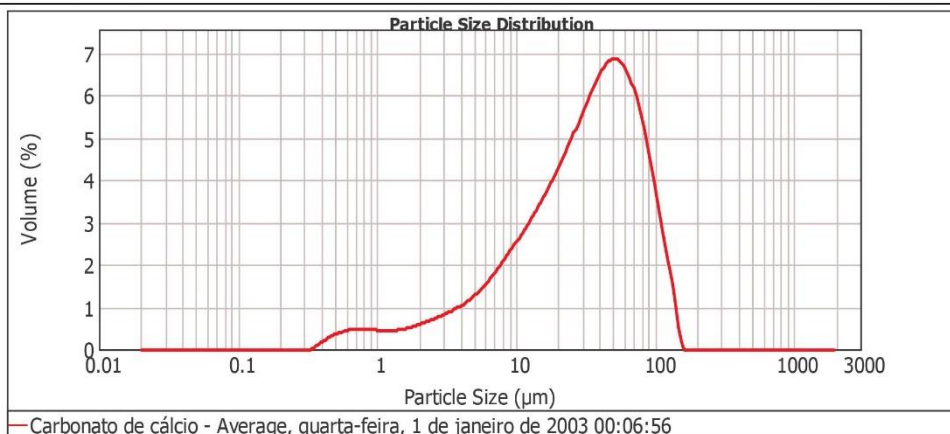
Surface Weighted Mean D[3,2]:
9.182 um

Vol. Weighted Mean D[4,3]:
40.188 um

d(0.1): 5.076 um

d(0.5): 33.062 um

d(0.9): 86.487 um



Carbonato de cálcio - Average, quarta-feira, 1 de janeiro de 2003 00:06:56

Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %	Size (µm)	Vol Under %
0.300	0.00	0.881	2.14	2.590	5.77	7.609	14.23	22.355	36.58	65.683	79.62
0.320	0.00	0.939	2.34	2.759	6.08	8.107	15.06	23.819	38.52	69.981	82.25
0.341	0.00	1.001	2.53	2.940	6.40	8.637	15.95	25.378	40.55	74.562	84.75
0.363	0.01	1.066	2.71	3.132	6.74	9.203	16.89	27.039	42.67	79.442	87.11
0.387	0.06	1.136	2.89	3.337	7.09	9.805	17.89	28.808	44.88	84.641	89.30
0.412	0.13	1.210	3.08	3.556	7.46	10.447	18.95	30.694	47.18	90.181	91.30
0.439	0.21	1.289	3.26	3.788	7.86	11.131	20.06	32.703	49.58	96.084	93.12
0.468	0.33	1.374	3.44	4.036	8.27	11.859	21.24	34.843	52.06	102.372	94.72
0.498	0.47	1.464	3.63	4.300	8.71	12.635	22.47	37.124	54.63	109.073	96.11
0.531	0.62	1.560	3.82	4.582	9.18	13.462	23.77	39.553	57.28	116.212	97.28
0.566	0.79	1.662	4.02	4.882	9.68	14.343	25.13	42.142	60.00	123.818	98.25
0.603	0.97	1.770	4.23	5.201	10.21	15.282	26.55	44.900	62.78	131.922	99.04
0.642	1.15	1.886	4.46	5.542	10.77	16.282	28.05	47.839	65.60	140.556	99.64
0.684	1.35	2.010	4.69	5.905	11.38	17.348	29.61	50.970	68.44	149.755	99.97
0.729	1.55	2.141	4.94	6.291	12.02	18.484	31.24	54.306	71.29	159.557	100.00
0.776	1.75	2.281	5.20	6.703	12.71	19.693	32.94	57.861	74.12	170.000	100.00
0.827	1.95	2.431	5.48	7.141	13.44	20.982	34.72	61.648	76.91		

Apêndices

Apêndice A – Tabela de dados

Especificações dos corpos de provas produzidos para ensaio de tração uniaxial

(continua)

	Corpo de prova	Dimensões (mm) comprimento x largura x espessura	Peso (g)
PEVBD Puro	1	60,73 x 3,26 x 3,46	1,7
	2	61,34 x 3,22 x 3,47	1,7
	3	60,91 x 3,22 x 3,49	1,7
	4	61,22 x 3,27 x 3,44	1,7
	5	61,43 x 3,24 x 3,42	1,7
	6	61,25 x 3,23 x 3,41	1,7
	7	61,27 x 3,21 x 3,43	1,7
	8	60,77 x 3,24 x 3,42	1,8
PEVBD/ <i>lin natura</i>	1	61,13 x 3,26 x 3,47	1,7
	2	60,84 x 3,21 x 3,26	1,7
	3	61,48 x 3,23 x 3,48	1,8
	4	61,05 x 3,20 x 3,48	1,7
	5	61,92 x 3,23 x 3,47	1,7
	6	61,34 x 3,22 x 3,47	1,7
	7	60,82 x 3,19 x 3,45	1,7
	8	61,98 x 3,24 x 3,44	1,7
PEVBD/CaCO ₃	1	61,24 x 3,33 x 3,47	1,7
	2	61,88 x 3,28 x 3,48	1,7
	3	61,22 x 3,24 x 3,48	1,7
	4	60,66 x 3,27 x 3,49	1,7
	5	60,83 x 3,27 x 3,50	1,7
	6	61,18 x 3,27 x 3,42	1,7
	7	61,23 x 3,26 x 3,49	1,7
	8	61,38 x 3,26 x 3,46	1,7

PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM	1	61,25 x 3,25 x 3,46	1,7
	2	61,23 x 3,25 x 3,45	1,7
	3	61,61 x 3,23 x 3,48	1,8
	4	61,61 x 3,30 x 3,44	1,8
	5	61,23 x 3,27 x 3,48	1,8
	6	61,34 x 3,23 x 3,44	1,7
	7	60,90 x 3,23 x 3,44	1,8
	8	61,06 x 3,28 x 3,46	1,7
PEVBD/CaCO ₃ /PE-g-AM	1	60,75 x 3,24 x 3,45	1,7
	2	61,20 x 3,25 x 3,44	1,7
	3	61,55 x 3,26 x 3,44	1,7
	4	60,93 x 3,20 x 3,48	1,7
	5	61,55 x 3,24 x 3,49	1,8
	6	61,44 x 3,25 x 3,43	1,7
	7	61,13 x 3,27 x 3,45	1,8
	8	60,76 x 3,26 x 3,50	1,8

 (conclusão)

Apêndice B – Tabela de dados

Especificações dos corpos de provas produzidos para ensaio de impacto Izod

(continua)

	Corpo de prova	Largura do entalhe (mm)	Peso (g)
PEVBD Puro	1	2,83	2,2
	2	2,80	2,2
	3	2,78	2,2
	4	2,71	2,2
	5	2,78	2,2
	6	2,80	2,2
	7	2,81	2,2
	8	2,81	2,2
PEVBD/ <i>in natura</i>	1	2,83	2,3
	2	2,82	2,3
	3	2,80	2,3
	4	2,78	2,3
	5	2,80	2,3
	6	2,79	2,3
	7	2,83	2,3
	8	2,79	2,3
PEVBD/CaCO ₃	1	2,81	2,3
	2	2,80	2,3
	3	2,82	2,3
	4	2,79	2,3
	5	2,79	2,3
	6	2,78	2,3
	7	2,82	2,3

	8	2,83	2,3
PEVBD/ <i>in natura</i> /PE-g-AM	1	2,81	2,2
	2	2,79	2,3
	3	2,87	2,3
	4	2,89	2,3
	5	2,80	2,3
	6	2,79	2,3
	7	2,80	2,3
	8	2,83	2,2
PEVBD/CaCO ₃ /PE-g-AM	1	2,73	2,2
	2	2,77	2,2
	3	2,82	2,2
	4	2,76	2,3
	5	2,77	2,3
	6	2,78	2,3
	7	2,79	2,3
	8	2,84	2,2
			(conclusão)

Apêndice C – Tabela de dados

Dados detalhados do ensaio de impacto Izod

Energia absorvida (J)					
CPs	PEVBD puro	PEVBD/ <i>in natura</i>	PEVBD/ <i>in</i> <i>natural</i> PE-g-AM	PEVBD/bio- CaCO ₃	PEVBD/bio- CaCO ₃ / PE-g-AM
1	1,05	1,45	1,34	1,36	1,32
2	1,43	1,51	1,47	1,51	1,18
3	1,36	1,43	1,27	1,56	1,32
4	1,43	1,49	1,54	1,51	1,23
5	1,43	1,43	1,49	1,56	1,07
Média	1,34	1,50	1,50	1,54	1,22
Desvio padrão	0,12	0,05	0,11	0,06	0,08

Apêndice D – Tabela de dados

Dados detalhados do ensaio de tração

Módulo de Young (MPa)					
CPs	PEVBD puro	PEVBD/ <i>in natura</i>	PEVBD/ <i>in</i> <i>natural</i> PE-g-AM	PEVBD/bio- CaCO ₃	PEVBD/ CaCO ₃ / PE-g-AM
1	177,9	544,4	425,2	454,5	452,8
2	212,6	738,3	573,2	426,2	441,2
3	474,3	583,1	455,6	485,4	463,1
4	146,1	540,4	557,9	467,1	439,3
5	201,2	317,9	459,6	484	497,4
Média	242,4	544,8	494,3	463,4	458,8
Desvio padrão	132,1	150,3	66,6	24,4	23,6

Apêndice E – Tabela de dados

Dados detalhados do ensaio de tração

Resistência à tração (MPa)					
CPs	PEVBD puro	PEVBD/ <i>in natura</i>	PEVBD/ <i>in</i> <i>natura</i> PE-g-AM	PEVBD/bio- CaCO ₃	PEVBD/ CaCO ₃ / PE-g-AM
1	19,6	19,5	18,5	18,6	19,6
2	18,8	21,4	20,1	17,9	18,1
3	21,3	19,8	18,8	19,7	18,6
4	18,2	20,6	18,9	18,5	18,8
5	20,3	19,2	21,4	20,6	19,4
Média	19,7	20,1	19,5	19,1	18,9
Desvio padrão	1,2	0,9	1,2	1,1	0,6

Apêndice F – Tabela de dados

Dados detalhados do ensaio de tração

Alongamento na ruptura (%)					
CPs	PEVBD puro	PEVBD/ <i>in natura</i>	PEVBD/ <i>in</i> <i>natura</i> PE-g-AM	PEVBD/bio- CaCO ₃	PEVBD/ CaCO ₃ / PE-g-AM
1	34,5	26,2	24,1	23,3	21,8
2	31,9	20,1	25,3	25,5	24,7
3	31,9	23,4	24,4	25,1	26,2
4	39,4	19,5	23,1	28,9	24,8
5	30,7	24,4	21,6	23,7	22,8
Média	33,7	22,7	23,7	25,3	24,1
Desvio padrão	3,5	2,9	1,4	2,2	1,8