

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
FELIPE RODRIGUES OLIVEIRA

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE APARAS DO IONÔMERO SENTRYGLAS NAS
PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DO PEAD E DO PEBD**

São Bernardo do Campo
2018

FELIPE RODRIGUES OLIVEIRA

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE APARAS DO IONÔMERO SENTRYGLAS NAS
PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DO PEAD E DO PEBD**

Dissertação de mestrado apresentado ao Centro universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Orientado pelo Prof. Dr. Baltus Cornelius Bonse.

São Bernardo do Campo

2018

Rodrigues Oliveira, Felipe.

EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE APARAS DO IONÔMERO
SENTRYGLAS NAS PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DO PEAD
E DO PEBD / Felipe Rodrigues Oliveira. São Bernardo do Campo, 2018.
126 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Baltus Cornelius Bonse.

1. Aparas de Sentryglas. 2. Ionômero. 3. HDPE. 4. LDPE. I.
Cornelius Bonse, Baltus, orient. II. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, minhas irmãs e a todos os amigos que ajudaram a construir minha história acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais José Carlos de Oliveira e Maria Rosa Rodrigues Oliveira por me educar e sempre acreditar em meu potencial e que ao longo de uma vida de muito suor e trabalho duro saíram do interior de Pernambuco e Bahia para enfrentar o mundo e então poder proporcionar aos seus filhos a oportunidade de estudar em ótimas instituições de ensino em condições mais favoráveis do que eles mesmos tiveram.

A Louise Mariano Ruiz por todo o auxílio nas conversas construtivas, pelo exemplo de pessoa no que diz respeito à dedicação, paciência, energia e compromisso com o trabalho. Aos bons amigos e técnicos do laboratório de materiais Antônio Magalhães Mirom, Caio Duarte Bezerra, Fabrício Piedade, Geleci Ribeiro da Silva, Jailson Soares da Gama e Lucian Cordeiro da Silva por todo o auxílio dado, seja na orientação do uso do maquinário envolvido neste trabalho, como em discussões construtivas que ajudaram a definir parâmetros de processamento e pela amizade cultivada ao longo dos anos desde a graduação até o presente mestrado. A meus amigos e colegas Jéssica Willveit Ferezin, Juliana Satie Watai, Laerte Almeida, Rafael Galdino Bringel e Elias Augusto Soares pelos momentos nos quais dividimos os mesmos objetivos, lutas e vitórias ao longo deste período.

A todos os professores do departamento de materiais que tiveram parte na construção da minha história acadêmica ao longo de toda a graduação e também ao longo do curso de mestrado e ao meu orientador Baltus Cornelius Bonse pela oportunidade de mais uma vez trabalharmos juntos, pelo auxílio na condução e construção deste trabalho e pela dedicação e preocupação em apresentarmos um tema coerente e importante.

“We don’t need myths. We need examples to be followed. Examples of courage, determination, hope. We need to believe it is possible to win. And is our duty to pursue it”

Ayrton Senna

RESUMO

Neste trabalho foi abordado a incorporação de aparas do ionômero Sentryglas® em duas matrizes termoplásticas à base de polietileno de alta densidade (HDPE) e polietileno de baixa densidade (LDPE). Foram avaliadas as propriedades mecânicas, morfológicas e térmicas do composto resultante, também sendo proposta outra via de processamento para melhora da mistura entre os componentes das blendas. Em trabalho anterior, utilizando uma matriz do termopolímero acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS), foi observado que o material resultante apresentou propriedades mecânicas inferiores ao ABS puro e, sem compatibilizante, não houve boa adesão à matriz de ABS. Por essa razão, foi proposto averiguar se a mudança para uma matriz quimicamente similar ao Sentryglas® melhorará as propriedades mecânicas do composto obtido. Foram avaliadas formulações contendo 0%, 10%, 20% e 40% em massa de aparas do ionômero em polietileno e, para as misturas de maior teor de Sentryglas®, foi feita outra formulação contendo o agente compatibilizante de polietileno graftizado de anidrido maleico (PEgMA), além de formulação extra empregando o uso de *masterbatch* entre o ionômero e o agente compatibilizante PEgMA. Os componentes foram misturados manualmente, extrudados em extrusora dupla rosca e injetados para análise. Para a caracterização foram realizados ensaios mecânicos de tração, flexão e resistência ao impacto, análises térmicas de temperatura de deflexão ao calor (HDT) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) e análise de morfologia através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A adição do agente compatibilizante PEgMA de forma direta não apresentou melhora na adesão entre o Sentryglas® e os polietilenos, enquanto o emprego do *masterbatch* melhorou a adesão entre os componentes nas duas blendas. Sob tração e impacto, a formulação contendo *masterbatch* no HDPE se equiparou com a matriz pura, no LDPE a resistência ao impacto manteve-se estatisticamente estável em todas as formulações. As aparas de Sentryglas® aumentaram a flexibilidade do composto de HDPE além de reduzir em 12% o HDT do composto com o aumento do teor de aparas.

Palavras-chave: Aparas de Sentryglas®. Ionômero. HDPE. LDPE.

ABSTRACT

In the present work the incorporation of Sentryglas® ionomer scraps in two thermoplastic matrixes based on high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) has been discussed. The mechanical, morphological and thermal properties of the resulting compound have been assessed, as well as another processing route to improve mixing between the blend components. In a previous study, using a matrix of acrylonitrile-butadiene-stirene (ABS) terpolymer, the resulting material showed lower mechanical properties compared to neat ABS and, without compatibilizer, there was no good bonding with the ABS matrix. Therefore, an investigation was proposed to verify whether the change to a matrix chemically similar to Sentryglas® would improve the mechanical properties of the resulting compound. Formulations containing 0, 10, 20 and 40 wt% ionomer scraps in polyethylene have been assessed and, for the highest Sentryglas® content, another formulation containing compatibilizer maleic anhydride grafted polyethylene (PEgMA) was prepared, as well as an extra formulation using a *masterbatch* containing the ionomer and the compatibilizer PEgMA. The components were manually mixed, extruded in a twin screw extruder and injection molded for analysis. Characterization included mechanical testing, namely tensile, flexural and impact tests, thermal analysis, namely heat deflection temperature (HDT) and differential scanning calorimetry (DSC), as well as morphology analysis using scanning electron microscopy (SEM). Straightforward addition of PEgMA compatibilizer showed no improvement in bonding between the Sentryglas® and the polyethylenes, whereas the use of the *masterbatch* improved bonding between the constituents in the two blends. Tensile and impact strength of the HDPE formulation containing *masterbatch* equalled that of the neat matrix, whereas for LDPE the impact strength remained statistically stable in all formulations. Sentryglas® scraps increased the flexibility of HDPE compound and reduced HDT by 12% as scrap content increased.

Palavras-chave: Sentryglas® scrap. Ionomer. HDPE. LDPE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura química do polietileno puro	17
Figura 2 – Sentryglas® intercadas.....	25
Figura 3 – Polimerização do Poli(etileno ácido metacrílico)	28
Figura 4 – Representação gráfica da regra de mistura.....	45
Figura 5 – Espectro de FTIR das aparas de Sentryglas®	46
Figura 6 – Sobreposição dos espectros das aparas de Sentryglas® e de um ionômero de etileno ácido metacrílico, íon sódio	47
Figura 7 – Índice de fluidez para todas as formulações	48
Figura 8 – Valores médios de resistência à tração para todas as formulações do PEAD e PEBD	49
Figura 9 – Comparação da resistência à tração de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	51
Figura 10 – Comparação da resistência à tração das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	53
Figura 11 – Valores médios do módulo elástico à tração para todas as formulações do PEAD e PEBD.....	54
Figura 12 – Comparação do módulo elástico de tração das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	55
Figura 13 – Comparação do módulo elástico de tração das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	57
Figura 14 – Valores médios de alongamento para todas as formulações de PEAD e PEBD.....	58
Figura 15 – Comparação da deformação da ruptura das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	59
Figura 16 – Comparação da deformação na ruptura das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	61
Figura 17 – Valores médios de tenacidade para todas as formulações do PEAD e PEBD	62
Figura 18 – Comparação da tenacidade das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	63
Figura 19 – Comparação da tenacidade das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	64

Figura 20 – Valores médios de resistência à flexão para todas as formulações do PEAD e PEBD	65
Figura 21 – Comparação da resistência à flexão das blendas de PEAD/SG com alinha da regra de mistura	67
Figura 22 – Comparação da resistência à flexão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	69
Figura 23 – Valores médios de módulo de flexão a 0,3% para todas as formulações do PEAD e PEBD.....	69
Figura 24 – Comparação do módulo elástico em flexão das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	71
Figura 25 – Comparação do módulo elástico em flexão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	72
Figura 26 – Valores médios de quantidade de energia absorvida em kJ/m ² para formulações de PEAD	73
Figura 27 – Valores médios de quantidade de energia absorvida em kJ/m ² para formulações de PEBD	75
Figura 28 – Comparação da resistência ao impacto Charpy das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura.....	76
Figura 29 – Valores médios de temperatura de deflexão térmica para todas as formulações do PEAD e PEBD	77
Figura 30 – Comparação do HDT das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	78
Figura 31 – Comparação do HDT das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	79
Figura 32 – Comparação da entalpia de fusão das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura	81
Figura 33 – Comparação da entalpia de fusão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura	82
Figura 34 – Superfície de fratura SG puro	83
Figura 35 – Superfície de fratura PEAD-SG 90-10.....	84
Figura 36 – Superfície de fratura PEAD-SG 60-40.....	84
Figura 37 – Superfície de fratura PEAD-SG-PEgMA 60-40-4.....	85
Figura 38 – Superfície de fratura PEAD-MB 60-40-4	86
Figura 39 – Superfícies de fratura das formulações de PEAD com 40% de SG.....	87

Figura 40 – Superfície de fratura PEBD-SG 90-10	88
Figura 41 – Superfície de fratura PEBD-SG 60-40	88
Figura 42 – Superfície de fratura PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	89
Figura 43 – Superfície de fratura PEBD-MB 60-40-4	90
Figura 44 – Superfícies de fratura das formulações de PEBD com 40% de SG	90
Figura 45 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEAD em tração	98
Figura 46 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEBD em tração	99
Figura 47 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEAD em flexão	101
Figura 48 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEBD em flexão	102
Figura 49 – ANOVA Resistência à Tração PEAD	104
Figura 50 – ANOVA Resistência à Tração PEBD	104
Figura 51 – ANOVA Módulo de Tração PEAD	106
Figura 52 – ANOVA Módulo de Tração PEBD	107
Figura 53 – ANOVA Deformação na Ruptura PEAD	107
Figura 54 – ANOVA Deformação na Ruptura PEBD	108
Figura 55 – ANOVA Tenacidade PEAD	109
Figura 56 – ANOVA Tenacidade PEBD	110
Figura 57 – ANOVA Resistência à Flexão PEAD	111
Figura 58 – ANOVA Resistência à Flexão PEBD	111
Figura 59 – ANOVA Módulo de Flexão a 0,3% PEAD	113
Figura 60 – ANOVA Módulo de Flexão a 0,3% PEBD	113
Figura 61 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEAD	116
Figura 62 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEAD	117
Figura 63 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEBD	118
Figura 64 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEBD	119
Figura 65 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do SG puro	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estruturas das diferentes classes de polietileno	19
Tabela 2 – Características gerais do PEBD	22
Tabela 3 – Características gerais do PEAD	24
Tabela 4 – Formulações utilizadas e sua composição	36
Tabela 5 – Quantidade de massa por formulação	37
Tabela 6 – Perfil de temperatura de extrusão	38
Tabela 7 – Parâmetro de injeção para ambos os materiais	39
Tabela 8 – Valor P na comparação de resistência à tração de formulações de PEAD ...	50
Tabela 9 – Valor P na comparação da resistência à tração de formulações de PEBD ...	52
Tabela 10 – Valor P na comparação do módulo de tração de formulações de PEAD ...	55
Tabela 11 – Valor P na comparação do módulo de tração de formulações de PEBD....	56
Tabela 12 – Valor P na comparação da deformação na ruptura de formulações de PEAD	58
Tabela 13 – Valor P na comparação da deformação na ruptura de formulações de PEBD	60
Tabela 14 – Valor P na comparação da tenacidade de formulações de PEAD	63
Tabela 15 – Valor P na comparação da tenacidade de formulações de PEBD	64
Tabela 16 – Valor P na comparação da resistência à flexão de formulações de PEAD.	66
Tabela 17 – Valor P na comparação da resistência à flexão de formulações de PEBD.	68
Tabela 18 – Valor P na comparação do módulo de flexão de formulações de PEAD ...	70
Tabela 19 – Valor P na comparação do módulo de flexão de formulações de PEBD ...	72
Tabela 20 – Valor P na comparação da resistência ao impacto de formulações de PEAD	74
Tabela 21 – Valor P na comparação da resistência ao impacto de formulações de PEBD	76
Tabela 22 – Valor P na comparação do HDT de formulações de PEAD	78
Tabela 23 – Valor P na comparação do HDT de formulações de PEBD	79
Tabela 24 – Comparação dos resultados de DSC nas formulações de PEAD/SG e PEBD/SG.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Terpolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CPB	Companhia de Polímeros da Bahia
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EVA	Copolímero de etileno e acetate de vinila
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i>
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>
HDT	Temperatura de Deflexão Térmica
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
LPE	<i>Linear Polyethylene</i>
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>
LLDPE	<i>Linear Low Density Polyethylene</i>
MB	<i>Masterbatch</i>
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
pcr	Partes por Cem partes de Resina
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PELBD	Polietileno Linear de Baixa Densidade
PEUAPM	Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular
PEUBD	Polietileno de Ultra Baixa Densidade
PEgMA	Polietileno graftizado com anidrido maleico
PPgMA	Polipropileno graftizado com anidrido maleico
PVB	Poli(vinil butiral)
SAN	Copolímero Estireno-Acrilonitrila
SG	Sentryglas®
TGA	Análise Termogravimétrica
ULDPE	<i>Ultra Low Density Polyethylene</i>
XLPE	<i>Cross-linked Polyethylene</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	POLIETILENO (PE).....	17
2.2	POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE (PEBD).....	22
2.3	POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD).....	23
2.4	SENTRYGLAS®.....	24
2.4.1	Propriedades do Sentryglas®	25
2.4.2	Perspectivas do Sentryglas® no Brasil e no mundo	26
2.5	IONÔMEROS EM BLENDS POLIMÉRICAS.....	27
2.6	ESTADO DA ARTE.....	29
3	METODOLOGIA	35
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	35
3.2	ESPECTROCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR).....	35
3.3	FORMULAÇÕES.....	35
3.4	EXTRUSÃO.....	36
3.5	INJEÇÃO DE CORPOS DE PROVA.....	38
3.6	ENSAIOS MECÂNICOS.....	39
3.6.1	Ensaio de tração	40
3.6.2	Ensaio de flexão	40
3.6.3	Ensaio de impacto	40
3.6.4	Ensaio de HDT (Temperatura de Deflexão Térmica)	41
3.6.5	Índice de fluidez	41
3.6.6	Ensaio de DSC (Análise Térmica Diferencial Exploratória)	42
3.6.7	Microscopia Eletrônica de Varredura	42
3.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA.....	43
3.8	REGRA DE MISTURA.....	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO (FTIR).....	46
4.2	ÍNDICE DE FLUIDEZ.....	48
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	49
4.4	ENSAIO DE FLEXÃO.....	65
4.5	ENSAIO DE IMPACTO.....	73
4.6	ENSAIO DE HDT.....	77
4.7	ENSAIO DE DSC.....	80
4.8	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	83
5	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS	93
	APENDICE A – ENSAIO DE TRAÇÃO	97
	APENDICE B – ENSAIO DE FLEXÃO	100
	APENDICE C – TABELAS ANOVA	103
	APENDICE D – ENSAIO DE DSC	115
	ANEXO A – FOLHETO TÉCNICO DO SENTRYGLAS®	121
	ANEXO B – FOLHETO TÉCNICO DO PEAD	123
	ANEXO C – FOLHETO TÉCNICO DO PEBD	125

1 INTRODUÇÃO

Devido à constante procura por novos meios de reduzir as perdas dos materiais utilizados em processos produtivos, seja na economia gerada na reincorporação e reutilização ou agregando valor a um refugo quando este tem o direcionamento correto para fins de reciclagem, torna-se imprescindível saber das características e propriedades que um material de refugo pode oferecer quando misturado a outro.

Um exemplo disso é o Sentryglas®, que é um ionômero de poli (etileno ácido metacrílico) que possui propriedades mecânicas elevadas, sendo utilizado em aplicações em vidros laminados para engenharia. Este material é utilizado em compósitos de engenharia, por ser mais leve, apresentar boa translucidez, alta resistência mecânica sob tensão e altíssima resistência ao estilhaço pós-quebra, por conta disso este material vem sendo amplamente utilizado em aplicações tais como fachadas, adornos, balaústres, escadas, telhados, em elementos de segurança blindada, entre outros (DUPONT, 2009).

Apesar de sua versatilidade, o Sentryglas® apresenta dificuldades na reciclagem, pois durante seu processo produtivo há a geração de resíduos que não são facilmente reincorporados ao processo e, sendo assim, estes passam a se tornar um problema de proporção econômica para a empresa no que diz respeito ao gerenciamento de resíduos. Partindo desta situação, gerou-se a necessidade de desenvolver estudos direcionados à gestão e reciclagem deste resíduo, o que pode abrir uma nova opção no desenvolvimento e aplicação para novos materiais.

Tendo em vista o cenário acima, será levantada a possibilidade da incorporação de aparas deste ionômero Sentryglas® em matrizes de PEAD e PEBD, por este possuir estrutura quimicamente similar ao ionômero, ter boa processabilidade, facilidade de dispersão, ótimas propriedades mecânicas e se tratar de um material commodity que possui baixo custo. Uma vez que ainda há poucos trabalhos relacionados à reciclagem deste material, este estudo apresenta uma nova alternativa de aplicação aos resíduos.

O objetivo principal deste trabalho foi dar uma finalidade às aparas de Sentryglas® investigando as mudanças nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas do PEAD e do PEBD aplicando metodologia de incorporação de 10, 20 e 40% em massa de ionômero por meio de extrusão. O material foi injetado e então corpos de prova foram produzidos para os ensaios de tração, flexão, resistência ao impacto e HDT (temperatura de deflexão térmica). Esses métodos foram empregados

visando a obtenção de informações relevantes referente ao composto resultante e se houve melhoria em relação aos materiais puros.

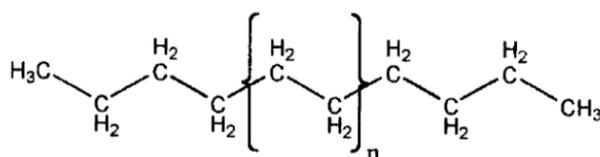
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será abordado um breve resumo sobre os materiais envolvidos no trabalho, o estado da arte, assim como os processos inseridos na obtenção dos corpos de prova e os ensaios utilizados.

2.1 POLIETILENO (PE)

Em sua forma mais simples, a molécula de polietileno consiste em uma cadeia longa contendo inúmeras ligações covalentes entre átomos de carbono ligados a um par de átomos de hidrogênio onde, a cadeia polimérica é terminada por grupos metílicos. Diferentemente dos materiais orgânicos convencionais, os polietilenos não apresentam estruturas com moléculas idênticas e suas resinas compreendem cadeias de tamanhos e comprimentos diversos. Sua fórmula molecular é descrita por $C_{2n}H_{4n+2}$ onde, n é grau de polimerização que pode chegar naturalmente a 100 e ultrapassar os 250.000, assim como seu peso molecular pode variar entre 1.400 e chegar a mais de 3.500.000 (PEACOCK, 2000). A figura 1 abaixo mostra a estrutura química do polietileno puro.

Figura 1 – Estrutura química do polietileno puro



Fonte: PEACOCK, 2000

Existem diversos tipos de polietilenos e todos possuem a mesma composição química e basicamente a mesma estrutura com ligações covalentes entre carbonos e hidrogênio, as variações irão surgir de grupos laterais ou ramificações que mudam a natureza do material. Estas ramificações podem ser de grupos alquila simples, de ácidos e ésteres e em menor escala, podem ser provenientes de defeitos na cadeia principal do polímero que geralmente estão associados a grupos vinila ligado às extremidades das cadeias. No estado sólido, os defeitos e as ramificações na estrutura da cadeia irão controlar o grau de cristalinidade onde, as cadeias que apresentarem defeitos em menor quantidade, terão um grau de cristalinidade maior. A cristalinidade bem como a

presença de ramificações também tem influência direta na densidade do polietileno, no sentido de que quanto maior a quantidade de cristais, maior é a densidade e quanto maior o número de ramificações, a densidade diminui (PEACOCK, 2000).

As principais classes de polietileno estão divididas em pelo menos sete tipos tal como estão ilustradas na tabela 1 a seguir.

a) PEAD é o material quimicamente mais próximo à estrutura do polietileno puro, ele consiste principalmente de moléculas desprovidas de ramificações e com baixa concentração de defeitos onde, sua elevada linearidade auxilia na obtenção de altos graus de cristalinidade, o que resulta em uma alta densidade quando comparado a outros tipos de polietileno. Algumas de suas resinas são copolimerizadas com pequenas concentrações de alcenos para reduzir ligeiramente sua cristalinidade e, usualmente, as resinas de PEAD possuem densidade em torno de 0,94-0,97 g/cm³. Devido à presença em baixíssimos teores das ramificações, o polietileno de alta densidade também é conhecido como polietileno linear (LPE) (PEACOCK, 2000).

b) PEBD possui essa nomenclatura em função da concentração substancial de ramificações que, durante seu processamento, dificulta o processo de cristalização resultando em densidades relativamente baixas. As ramificações presentes nessa classe de polietileno consistem principalmente de grupos etil e butil juntamente com ramificações de cadeias longas. Devido às altas pressões envolvidas em seu processo de polimerização, as ramificações à base dos grupos de etil e butil são agrupadas juntas, separados por longos trechos de cadeia não ramificada. As ramificações de cadeias longas aparecem de forma aleatória por todo o comprimento da cadeia principal. O grande teor de ramificações presentes na molécula do PEBD inibe a ocorrência da cristalização, reduzindo a densidade da resina quando comparada a de PEAD, a densidade do PEBD está na faixa entre 0,90-0,94 g/cm³ (PEACOCK, 2000).

Tabela 1 – Estruturas das diferentes classes de polietileno

TIPOS	NOME IUPAC	SIGLA BRASIL	ESTRUTURA
a)	HDPE	PEAD	
b)	LDPE	PEBD	
c)	LLDPE	PELBD	
d)	ULDPE	PEUBD	
e)	EVA	EVA	
f)	XLPE	XLPE	
g)	IONOMERS	IONÔMERO	

Fonte: Autor

c) PELBD é uma resina que consiste de moléculas contendo polietileno linear ligado a pequenos grupos alquila em intervalos aleatórios. Esse material é obtido pela

copolimerização de etileno com alcenos, e as ramificações mais comuns de serem encontradas são as dos grupos etil, butil e hexil, mas também podem ser de variações de grupos alquila tanto lineares quanto ramificados. A separação média das ramificações ao longo da cadeia principal está na faixa entre 25-100 átomos de carbono, e as resinas de PELBD também podem conter baixos teores de ramificações de cadeias longas, mas não na mesma proporção que as presentes no PEBD. A resina de PELBD pode ser considerada quimicamente como sendo a combinação entre o polietileno linear e o polietileno de baixa densidade, onde as ramificações dificultam a cristalização até certo ponto e reduzem a densidade quando comparado ao PEAD. O resultado dessa dificuldade é que a densidade desse material está aproximadamente entre 0,90-0,94 g/cm³ (PEACOCK, 2000).

d) PEUBD é um formato especial do PELBD que contém uma concentração muito maior de ramificações de cadeias curtas. Neste caso, a separação média entre as ramificações ao longo da cadeia está em torno de 7-25 átomos de carbono, devido à grande presença de ramificações curtas, a cristalização é inibida de forma efetiva criando um material predominantemente não cristalino. O alto grau de desordem em sua estrutura se reflete nas baixas densidades que estão em torno de 0,86-0,90 g/cm³ (PEACOCK, 2000).

e) EVA é um copolímero produzido a partir do mesmo processo de polimerização envolvendo altas pressões do PEBD e, sendo assim, apresenta ramificações curtas e longas juntamente com grupos de acetato (“VA” na estrutura da tabela 1) Os grupos de acetato interagem entre si através de forças dispersivas tendendo a se agruparem e a inclusão de grupos polares confere a esse copolímero alta reatividade química, sendo maior que as apresentadas pelo PEAD, PEBD ou PELBD. Os grupos de acetato dificultam a cristalização conforme seu teor de incorporação aumenta e, estando em proporções menores, apresentam propriedades físicas similares as do PEBD, mas em grandes proporções, possuem o comportamento de um elastômero. Devido à incorporação do oxigênio, o copolímero EVA possui maior densidade que as resinas de polietileno a um dado grau de cristalinidade (PEACOCK, 2000).

f) XLPE consiste em um polietileno que foi quimicamente modificado para realizar uma ligação covalente entre cadeias adjacentes. As ligações cruzadas podem ocorrer da ligação direta entre os carbonos ou entre espécies de ligações diferentes como os siloxanos. Elas estão presentes em intervalos aleatórios ao longo da cadeia polimérica e sua concentração pode variar entre uma em vários milhares de átomos de

carbono até uma em apenas algumas dúzias de átomos de carbono. A finalidade da ligação cruzada é a de criar uma rede parecida com a de um gel entre as cadeias interconectadas, essas cadeias são insolúveis podendo também ser preenchidas por diversos solventes orgânicos. As ligações cruzadas dificultam a cristalização em função da limitação do movimento livre entre as cadeias e, devido à combinação dessas características, a densidade do XLPE é menor que às das resinas de polietileno que ele se baseia (PEACOCK, 2000).

g) IONÔMERO (ou ionômeros) são copolímeros de etileno e ácidos acrílicos que foram neutralizados em sua totalidade ou parcialmente para formar sais metálicos. A copolimerização dessas moléculas ocorre em condições similares àquelas usadas para a polimerização do PEBD e, além da presença dos grupos polares, os ionômeros possuem ramificações que são normalmente associadas ao PEBD. As funções ácidas neutralizadas nas cadeias adjacentes interagem com os cátions dos metais associados para formarem grupos que promovem as ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. A estrutura complexa das ramificações de um ionômero aliados a existência dos grupos polares reduz drasticamente a cristalinidade, mas apesar do baixo grau de cristalinidade, sua densidade é a maior dentre todos os polietilenos devido ao elevado peso atômico do oxigênio e dos átomos metálicos nos grupos iônicos (PEACOCK, 2000).

O Polietileno é um polímero semicristalino, flexível, cujas propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas com sua estrutura e pela quantidade de fases amorfas e cristalinas presentes. Esses materiais são quimicamente inertes em comparação com a maioria dos produtos químicos comuns, muito devido à sua natureza parafínica, o alto peso molecular e a sua estrutura semicristalina. Em condições normais esse polímero não é tóxico e pode ser usado em contato com alimentos e até produtos farmacêuticos, mas na presença de certos aditivos, pode ser agressivo. Em polímeros com ramificações longas, tal como o PEBD, as ramificações grandes aumentam a resistência ao impacto, diminuem a densidade e melhoram a processabilidade enquanto que em polímeros com ramificações menores/curtas, como aquelas presentes no PEAD, aumenta-se a cristalinidade, resistência à tração em relação ao PEBD. O PEAD, por apresentar maior linearidade em suas cadeias, possui maior densidade em função do maior e empacotamento de suas cadeias em relação ao PEBD, sendo assim, as forças intermoleculares também são maiores e agem com mais intensidade, aumentando a cristalinidade e elevando o ponto de fusão (COUTINHO, 2003).

2.2 POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE (PEBD)

O polietileno de baixa densidade é um polímero semicristalino que possui temperatura de fusão entre 110 e 115°C, cristalinidade em torno de 50 a 60% e, segundo dados obtidos por espectroscopia no infravermelho, apresenta dois tipos diferentes de ramificações: a primeira é composta por cadeias formadas a partir de um radical livre que ataca diretamente a ligação carbono-hidrogênio que forma ramificações tão longas quanto a própria cadeia principal; e outra composta de ligações que são produzidas via radicais livres que por sua vez formam ramificações curtas (COUTINHO, 2003).

O processo de obtenção deste material passa por uma reação extremamente exotérmica onde as pressões envolvidas podem ficar entre 1000 e 3000 atmosferas e com temperaturas entre 100 e 300°C, pois acima de 300°C o polímero tende a degradar. Um dos iniciadores mais utilizados na obtenção de PEBD é o oxigênio, mas também se utilizam muitos peróxidos orgânicos. A maior dificuldade encontrada durante o processo de fabricação é o controle e diminuição das temperaturas no meio reacionário, devido a todas essas características, a reação produz um material com grande quantidade de ramificações, que possuem grande relação com as propriedades do polímero. O PEBD pode ser produzido em processos de extrusão, moldagem por sopro e moldagem por injeção. Suas aplicações no formato de filmes incluem embalagens tanto no setor industrial quanto no alimentício, farmacêutico, utensílios domésticos e revestimentos de fios e cabos, tubos e mangueiras (COUTINHO, 2003). A tabela 2 apresenta algumas características do PEBD com índice de fluidez próximo ao utilizado neste trabalho.

Tabela 2 – Características gerais do PEBD

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (190°C/2,16Kg)	D 1238	g/10 min	8,3
Densidade	D 792	g/cm ³	0,918
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	9
Resistência à Tração na Ruptura	D 638	MPa	12
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	200

Fonte: Folheto técnico Braskem PEBD BC818, Abr./2018

2.3 POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

Uma das principais diferenças entre o processamento do etileno sob baixas pressões (utilizado na obtenção de PEAD) e o processo sob altas pressões (utilizado na obtenção de PEBD) está no tipo de sistema iniciador utilizado. Os iniciadores, também chamados de catalisadores, que são utilizados para polimerizar o etileno a pressões próximas da atmosférica foram descobertos por Ziegler-Natta. A polimerização sob a ação de catalisadores Ziegler-Natta acontece a pressões de etileno em torno de 10 a 15 atm e em temperaturas na faixa de 20 a 80°C em um meio rico em hidrocarbonetos parafínicos com a presença de um composto alquil-alumínio e um sal de Ni, Co, Zr ou Ti onde, esses sistemas catalíticos são ativos o suficiente para permitir que a reação ocorra a temperaturas inferiores a 100°C e a pressões atmosféricas. Em processos industriais o peso molecular do polímero é controlado na faixa entre 50.000 a 100.000 (Mn) pelo processo de transferência de cadeia, geralmente com a presença de hidrogênio (COUTINHO, 2003).

O polietileno linear possui um grau de cristalização acima de 90% por apresentar baixo teor de ramificações, outro dado importante é que ele apresenta pelo menos uma cadeia lateral por 200 átomos de carbono em sua cadeia principal além de apresentar temperatura de fusão cristalina de aproximadamente 132°C, densidade entre 0,94 e 0,97 g/cm³ e peso molecular numérico médio na faixa entre 50.000 a 250.000 (Mn). Comparando a estrutura cristalina lamelar dos polietilenos de alta e baixa densidade, as cadeias do PEAD são dobradas e os segmentos entre essas dobras contém 100 átomos de carbono, enquanto que o PEBD as cadeias são estendidas e apresentam segmentos com cerca de 73 átomos de carbono em sua zona cristalina ligados a zonas amorfas que contém dobras longas e terminais de cadeia (COUTINHO, 2003).

A maior orientação das cadeias e consequente maior densidade do PEAD resultam em um alinhamento, empacotamento e orientação mais eficientes fazendo com que as forças intermoleculares de Van der Waals atuem de forma mais intensa e consequentemente, aumentem a cristalinidade e a temperatura de fusão. O peso molecular tem influência sobre as propriedades do PEAD no que diz respeito a cinética de cristalização, cristalinidade final e morfologia, essa influência irá depender da extensão desse peso molecular pois, o PEAD de baixo peso molecular tem comportamento frágil e se rompe a baixas deformações, sem formar pescoço quando sujeito a tração. Quando a faixa de peso molecular está acima de 80.000, há sempre a

formação de pescoço. O peso molecular também exerce influência sobre a resistência ao impacto onde, amostras com pesos moleculares menores também são mais frágeis e as que apresentam pesos moleculares na faixa entre 5×10^5 a 10^6 são altamente resistentes ao impacto (COUTINHO, 2003). A tabela 3 apresenta as propriedades do PEAD puro com índice de fluidez próximo ao utilizado neste trabalho.

Tabela 3 – Características gerais do PEAD

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de Fluidez (190°C/2,16Kg)	D 1238	g/10 min	7,0
Densidade	D 792	g/cm ³	0,957
Resistência à Tração no Escoamento	D 638	MPa	28
Resistência à Tração na Ruptura	D 638	MPa	22
Módulo de Flexão Secante a 1%	D 790	MPa	1350

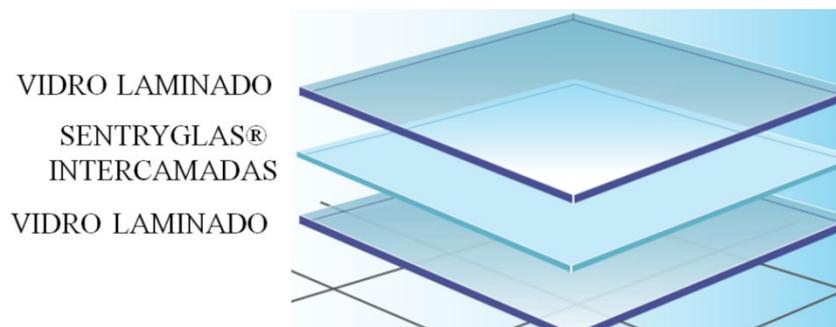
Fonte: Ficha técnica Braskem PEAD JV060U, Mar./2018

2.4 SENTRYGLAS®

O ionômero Sentryglas® (SG) é um composto polimérico de engenharia desenvolvido pela Dupont, aplicado entre camadas de vidros laminados. Este material tem mudado os horizontes no setor de plataformas de vidro, permitindo que laminados mais finos consigam suportar carregamentos maiores e atender determinadas funções estruturais. Vidros laminados feitos com esse material podem suportar grandes cargas de tensão, o que confere a arquitetos e engenheiros liberdade para criação e desenvolvimento de novos pontos de suporte, o que permite manufaturar fachadas maiores com o mínimo de partes metálicas expostas (DUPONT, 2009).

A figura 2 mostra o esquema de aplicação da película de Sentryglas® entre camadas de vidros laminados.

Figura 2 – Sentryglas® intercamadas



Fonte: DuPont Laminated Glas Interlayers, 2008

Os laminados de Sentryglas® apresentam boa estabilidade de borda e são menos suscetíveis à umidade ou efeitos relacionados a condições climáticas. Misturado a uma grande variedade de selantes na base de silicone em vidros laminados, o Sentryglas® apresenta excelente compatibilidade, permanecendo livre de efeitos de curvatura e de escurecimento mesmo quando exposto muitos anos a condições climáticas. O Sentryglas® é utilizado em vidros planos ou curvos, inclusive em vidros recozidos, temperados, semitemperados, coloridos, aramados, impressos e serigrafados, apresenta boa estabilidade quando comparado ao PVB e ao EVA que são os compostos mais utilizados em vidros laminados, mantendo-se translucido e com boa claridade mesmo depois de anos de uso (DUPONT, 2009).

2.4.1 Propriedades do Sentryglas®

Sob condições normais de pressão e temperatura as propriedades mecânicas do Sentryglas® intercamadas da DuPont são: Modulo de Young de 300 MPa, resistência a tração de 34,5 MPa, 400% de alongamento, densidade aparente de 0,95 g/cm³, modulo de flexão a 23°C de 345 MPa e temperatura de deflexão térmica a 0,46 MPa de 43°C. Além de apresentar maior resistência e rigidez quando comparado ao PVB e ao EVA, o Sentryglas® apresenta ótima resistência à quebra, por manter os estilhaços presos ao intercamada, ótima durabilidade, flexibilidade em design e controle de radiação UV (DUPONT, 2009).

2.4.2 Perspectivas do Sentryglas® no Brasil e no mundo

Originalmente lançado com 1,52 e 2,28 mm de espessura, o DuPont™ Sentryglas® ajudou arquitetos e engenheiros a atender às rígidas regras de construção em regiões como a Flórida, que sofre com furacões de alto nível de destruição (DUPONT, 2016). A adição de laminados mais finos na linha de produtos da Dupont aumentou o número de aplicações para o produto segundo Hayati Yarkadas, diretor global da DuPont para a divisão Advanced Interlayers. Seguindo a mentalidade de “menos é mais”, a inserção do Sentryglas® mais fino no mercado abriu a possibilidade de entrada no ramo de energia solar, permitindo a produção de energia limpa com menor custo através do desenvolvimento de aquecedores mais leves e mais duráveis (DUPONT, 2016).

A *DuPont Glas Laminating Solutions*, que comercializava no Brasil o interlayer de vidro de segurança de alto desempenho *DuPont™ Sentryglas®* somente em folhas planas, passou a disponibilizar o produto em forma de rolos, aumentando a rapidez e a conveniência no uso de vidros laminados mais resistentes em aplicações de arquitetura. Segundo o fabricante, a nova versão em rolo do Sentryglas® utiliza as mesmas matérias-primas das folhas planas mantendo, portanto, suas vantagens estruturais e de rigidez (SENTRYGLAS..., 2016).

No Brasil, a Fanavid, uma das líderes do mercado vidreiro, possuindo 53 anos de experiência no mercado, que se destaca no atendimento aos setores automotivo e da construção civil e arquitetura, foi a grande responsável pela comercialização do Sentryglas® no Brasil, atuando de forma importante na inserção do ionômero no segmento automotivo. Em 2012 o produto foi aplicado pela Fanavid nos para-brisas dos carros da prova Stock Car a fim de garantir maior proteção, nitidez óptica e conforto ao ocupante do veículo (MAXPRESS, 2016).

O Sentryglas® tem sido um elemento-chave em alguns dos projetos mais notáveis do mundo envolvendo vidros laminados, como as lojas de equipamentos eletrônicos de ponta (Apple) em várias partes do globo, os balaústres dos terraços no piso superior do Marina Bay Sands em Cingapura e as estruturas de vidro especiais como as da Torre Willis em Chicago e as do Alice Tulley Hall no Lincoln Center em Nova York. A rigidez e a resistência extras do interlayer conferem ao Sentryglas® vantagens em termos de segurança quando o vidro é usado em balaústres, coberturas

elevadas, fachadas claras, aplicações de alta segurança e projetos para uso em zonas de vento extremo (SENTRYGLAS..., 2016).

2.5 IONÔMEROS EM BLENDA POLIMÉRICAS

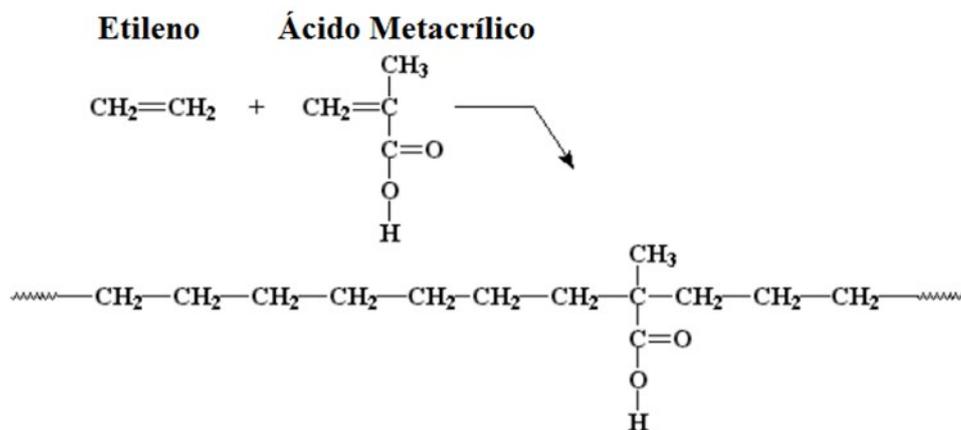
Os ionômeros são definidos como polímeros que contêm cadeias principais hidrofóbicas e pequenas quantidades de grupos iônicos unidos a seus grupos laterais ou terminais. Estes materiais possuem aplicações comerciais diversas devido a suas propriedades físico-mecânicas, térmicas e óticas originadas pelas interações iônicas produzidas na presença de íons metálicos. Devido às excelentes propriedades adesivas os ionômeros são utilizados em recobrimentos por extrusão, co-extrusão e laminação, sendo também utilizados na fabricação de peças moldadas por sopro e em embalagens de alimentos. Seu uso se estende desde a indústria automotiva, médica até a elétrica (GUTIÉRREZ; BRAHAM, 1999).

Segundo os autores Marx, Caulfield e Cooper (1972), que apresentaram um novo modelo “agregado” para ionômeros em seu trabalho sobre morfologia de ionômeros, esses polímeros são geralmente preparados através da copolimerização de uma olefina tal como o etileno, butadieno ou estireno, juntamente com um ácido carboxílico tal como o ácido acrílico e o metacrílico. Depois da formação do copolímero, estes são ionizados para então formarem os ionômeros (MARX; CAULFIELD; COOPER, 1972).

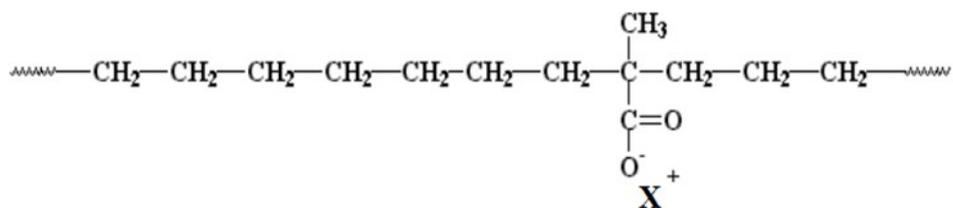
Os autores ainda comentam que o ionômero pode apresentar modelos de formas, sendo os dois mais importantes o modelo homogêneo e o de clusters (grupos). O modelo homogêneo consiste na presença de uma fase cristalina e outra amorfa onde, os grupos ácidos e seus sais estão distribuídos de forma aleatória na forma de dímeros (dois meros) na fase amorfa. Enquanto que o modelo de grupos consiste na combinação de uma fase cristalina e outra amorfa contendo grupos iônicos de 100 Å de diâmetro embutidos na fase amorfa (MARX; CAULFIELD; COOPER, 1972).

A figura 3 mostra o processo de polimerização de um ionômero de poli (etileno ácido metacrílico), que é o objeto de estudo deste trabalho.

Figura 3 – Polimerização do Poli(etileno ácido metacrílico)



(a) Copolimerização de etileno e ácido metacrílico (1ª etapa)



(b) Estrutura do ionômero neutralizado por hidróxido metálico, acetato ou sal similar (MX) (2ª etapa)

Fonte: Ionomers, 2016

Os ionômeros podem ter até 15% de suas unidades monoméricas funcionalizadas com grupos iônicos, e estes grupos irão causar modificações de estrutura e de propriedades. Essa capacidade aumenta o interesse científico nesses componentes. As interações iônicas e suas associações com a matriz orgânica podem ser mudadas dependendo da estrutura do grupo iônico, do tipo de íon metálico, grau de neutralização, cristalização, flexibilidade das cadeias poliméricas, presença de agentes plastificantes e comportamento reológico. O comportamento dos ionômeros em blendas poliméricas promove alterações estruturais que são identificadas pela variação de temperaturas de cristalização, fusão e de transição vítrea. Essas mudanças podem afetar também a resistência ao impacto (GALVANI; PESSAN, 2003).

2.6 ESTADO DA ARTE

No que diz respeito à incorporação de Sentryglas® que é um ionômero à base poli (etileno ácido metacrílico) em matrizes termoplásticas, Bonse e De Almeida (2015) incorporaram 10 e 20% em massa de ionômero com e sem agente compatibilizante de PPgMA em uma matriz de PP/EPDM/talco, obtendo um material com propriedades mecânicas superiores ao composto PP/EPDM/talco puro onde, a resistência à tração e o módulo elástico apresentaram melhora de 8 e 20% respectivamente e sem a ação direta do agente compatibilizante. Apesar da melhora em alguns aspectos, houve redução de cerca de 90% na deformação na ruptura e queda de 75% na resistência ao impacto, aumento de cerca de 10% no HDT e diminuição do índice de fluidez do composto.

Em outro trabalho semelhante, Bonse e Oliveira (2016) incorporaram 10, 20 e 40% em massa de Sentryglas® em ABS e adicionando os agentes compatibilizantes PPgMA (Polipropileno graftizado com anidrido maleico) e PEgMA (Polietileno graftizado com anidrido maleico) em mais duas formulações contendo 40% de material incorporado também em ABS para fins de comparação sobre a eficácia dos compatibilizantes. Neste trabalho as propriedades mecânicas foram inferiores às do ABS puro, não havendo boa adesão na ausência de agente compatibilizante. O HDT diminuiu cerca de 15%, a flexibilidade aumentou com o aumento do teor de incorporação e o PEgMA atuou melhorando a adesão, resistência ao impacto e a deformação à ruptura comparando com a blenda não compatibilizada.

Estudar uso de ionômeros como forma de melhorar as propriedades mecânicas não é um assunto novo à comunidade científica, uma vez que os primeiros relatos sobre o termo “ionômero” datam do início da década de 60, Litterman e Marvel (1965) foram um dos primeiros autores a abordar um exemplo de como sintetizar um material deste tipo. Na mesma década, impulsionados pelo crescimento exponencial nas pesquisas sobre a característica dos ionômeros, Rembaum; Baumganner; Eisenberg (1968) vulcanizaram um elastômero carboxilado baseado em copolímeros de butadieno e ácido acrílico com enxofre, utilizando o ZnO como catalizador, averiguando posteriormente que a incorporação de grupos carboxilatos em elastômeros influenciaram fortemente suas propriedades (SAMUEL, 2002).

Desenvolvendo sobre o assunto de incorporação de ionômeros em matrizes termoplásticas, Samuel (2002), abordou a síntese e caracterização de novos ionômeros baseados em copolímeros de butadieno estireno pela sulfonação seguida de

neutralização com Zinco. Dentre os resultados obtidos, o autor destaca a melhora na estabilidade térmica a oxidação, melhora nas propriedades físicas introduzidas pela funcionalização dos grupos iônicos provenientes do ionômero, melhora nas propriedades mecânicas em função da incorporação das partículas de enchimento à base de sílica e estearato de zinco contido no estireno sulfonado e uso do ionômero produzido como agente compatibilizante para a obtenção de uma blenda miscível contendo duas borrachas imiscíveis (SAMUEL, 2002).

Em anos anteriores estudos semelhantes abordando o uso de ionômeros combinados a matrizes à base de elastômeros foram investigados por diversos autores, entre eles estão Bellinger, Sauer e Hara (1994) que analisaram o efeito nas propriedades de tensão a fratura de blendas feitas com o ionômero de poliestireno sulfonado combinado a poliestireno puro. Os autores constataram que houve um desvio positivo da regra das misturas onde a tenacidade a fratura e resistência a tração tiveram melhora em todas as composições estudadas e, principalmente, nas formulações com menores teores de incorporação de ionômero (10% em massa). Esse resultado foi atribuído a boa dispersão da fase rígida do ionômero na matriz de poliestireno puro aliada a boa adesão interfacial entre as fases onde, aparentemente as partículas do ionômero foram determinantes para a obtenção desses resultados (BELLINGER; SAUER; HARA, 1994). Posteriormente Hara e Sauer (1998) chegam a mesma constatação de que a melhora das propriedades mecânicas ocorre em concentrações relativamente pequenas do ionômero na mistura, mas este efeito só é possível caso o ionômero, que possui maior densidade de ligações físicas de emaranhamento (cross-links), tiver boa aderência entre suas partículas dispersas e a matriz polimérica (HARA; SAUER, 1998). Em ano anterior ao trabalho apresentado por Bellinger, Sauer e Hara (1994), os autores Cho e Jeon (1993) já partilhavam do conceito de que devido ao caráter da estrutura do ionômero, os grupos iônicos deles formariam agregados iônicos resultando em ligações físicas fortes de caráter parecido ao de ligações cruzadas, promovendo grandes alterações nas propriedades físicas do material nos quais são inseridos (CHO; JEON, 1993).

Ainda sobre o uso de ionômeros em blendas envolvendo elastômeros, Antony e De (1999) estudaram o efeito do estearato de zinco em blendas de ionômeros processáveis por fusão à base de sais de zinco de PEAD e borracha de EPDM maleatados onde, a blenda contendo ionômero apresentou maior viscosidade do que a correspondente sem adição de ionômero. Os autores constataram que a adição do

estearato de zinco reduziu a viscosidade do fundido da blenda ionomérica e que ela apresentou propriedades físicas superiores à blenda sem ionômero, mostrando também que a adição do estearato de zinco aumentou a resistência à tração, a alongação, resistência ao rasgo e menores tensões internas quando aliado ao ionômero. Através de análises de infravermelho foi possível constatar a presença de interações iônicas entre o estearato de zinco e a blenda contendo ionômero e que estudos relacionados ao reprocessamento revelaram o caráter de elastômero termoplástico do composto (ANTONY; DE, 1999).

Fundamentando sobre a microestrutura, o trabalho desenvolvido pelos autores Sauer e Hara (1998) demonstra que as blendas poliméricas contendo um ionômero como um de seus componentes podem criar combinações interessantes de propriedades mecânicas que podem conferir vantagens específicas às blendas, se comparadas a homopolímeros não iônicos. Em uma blenda polimérica contendo um ionômero, é importante saber como suas propriedades variam em função da quantidade de íons disponíveis em sua composição. Em grupos iônicos polares, o ionômero tende a formar agregados e aglomerados que interagem com pares iônicos ricos e formam uma segunda fase. Esta fase tem sua própria temperatura de transição vítrea que é significativamente maior que a porção que possui a fase da matriz. Análises dinâmicas (tal como o TGA) mostram dois picos distintos de perda/queda, indicando a presença de duas temperaturas de transição vítrea ocorrendo acima da Tg de um homopolímero (HARA; SAUER, 1998).

Hara e Sauer (1998) dizem que microestrutura do ionômero pode exercer grande influência no aumento das propriedades mecânicas e, sendo assim, é importante ter informações sobre como é a morfologia deste componente. A complexidade da microestrutura de ionômeros parcialmente cristalinos baseados em polietileno de baixa e de alta densidade onde, a complexidade da microestrutura aumenta conforme ocorre a adição de agregados iônicos mais parecidos com a fase amorfa do ionômero. Como resultado desta mudança na microestrutura, a melhora nas propriedades mecânicas pode acontecer com uma conversão de 30 a 50% do copolímero ácido do qual o ionômero é formado, em ionômeros amorfos, a conversão completa do copolímero ácido em geral irá apresentar o melhor balanço de propriedades mecânicas.

A influência das interações iônicas na miscibilidade entre os materiais passou a ser investigada e, neste estudo feito em 1998, foi abordado a mistura de ionômeros amorfos à base de poliéster e poli (etileno tereftalato) com poliamida (Nylon 66)

contendo o manganês como portador das espécies iônicas. Neste experimento o grau de miscibilidade aumentou devido a reações de transesterificação ocorridas durante o processo de mistura do fundido. Em blendas similares contendo o sódio como portador de espécies iônicas, o efeito de melhora na miscibilidade não se fez presente provavelmente devido à mistura pobre entre os componentes em função da maior viscosidade do fundido. Segundo os autores, a incorporação de um ionômero no polímero precursor do mesmo, produziu um material mais rígido e resistente à fratura. A blenda resultante aparentemente apresentou melhoria em suas propriedades quando a concentração de íons aumentou. Em misturas entre polímeros imiscíveis, a adição mesmo em pequenas quantidades de um ionômero adequado, além de oferecer algum grau de miscibilidade, melhorou algumas propriedades mecânicas (HARA; SAUER, 1998).

No trabalho apresentado por Cho e Jeon (1993), que estudaram as propriedades mecânicas e térmicas de blendas de PEAD/ionômero, a blenda PEAD/ionômero foi imiscível em todas as composições por eles estudadas e propriedades tais como resistência à tração, deformação na ruptura e resistência ao rasgamento diminuíram. Este comportamento se deu em função da pouca adesão entre as interfaces dos componentes da blenda, provocadas pela introdução de grupos polares nas cadeias de polietileno, mas devido à estrutura em rede dos ionômeros, a energia necessária para promover uma mistura em composições com maior concentração de ionômero é reduzida. A superfície de fratura do ionômero apresentou um padrão ondulado, característico de reticulados resistentes e semelhantes à borracha. A análise térmica da blenda evidenciou a presença de dois picos endotérmicos distintos conforme o teor de ionômero aumentou, os resultados apontaram para a formação de dois cristais distintos devido à diferença de polaridade entre as cadeias dos polímeros, o que explicou a imiscibilidade da blenda. Este resultado não era esperado, pois a estrutura química olefina dos polímeros eram praticamente iguais. Os autores comentam que estes resultados também foram observados em blendas contendo PEBD e outros tipos de ionômeros (CHO; JEON, 1993).

Já os autores Jiang, Zhou e Zhang (1993) estudaram a compatibilização em blendas de ionômeros contendo poli(estireno-co-4-vinilpiridina) e poli(butil metacrilato-co-4-vinilpiridina) que continham pequenas unidades comuns de piridina. As blendas foram reagidas com acetato metálico e ácido carboxílico respectivamente e ambas apresentaram cargas positivas. Os resultados obtidos através da análise de DSC

mostraram que houve certo aprimoramento na miscibilidade em função da introdução dos grupos iônicos, mas não havendo uma interação columbica favorável entre os ionômeros. O DSC mostrou que as blendas obtidas formaram um sistema multifásico e que a compatibilização melhorou nas composições onde a proporção de piridina era similar e com cargas positivas, indicando que nas blendas de ionômeros com cargas positivas idênticas apresentam melhora significativa em sua compatibilidade (JIANG; ZHOU; ZHANG, 1993).

Em trabalho parecido, Kalfoglou, Skafidas e Sotiropolou (1994) estudaram a compatibilização da blenda de poli (etileno tereftalato)/PELBD com a adição do ionômero sódico de poli (etileno-co-ácido metacrílico) como agente compatibilizante em diversas concentrações. Através dos resultados obtidos em seus ensaios, os autores constataram as propriedades de tração demonstraram ter características da presença de compatibilização mecânica, uma vez que todas as outras técnicas de caracterização utilizadas indicaram para a presença de um sistema de fases separadas. A razão de concentração entre o PET/PELBD influenciou na compatibilização, assim como com a presença de 10% em massa de agente compatibilizante nas composições contendo maiores teores de PET apresentaram as melhores propriedades mecânicas. Os autores sugerem que a melhora na compatibilização se deu em função da forte ligação interfacial entre a interfase PET/ionômero (KALFOGLOU; SKAFIDAS; SOTIROPOLU, 1994).

Novamente abordando a utilização do etileno-ácido metacrílico, Lahor, Nithitanahul e Grady (2004) estudaram a compatibilização da blenda de PEBD/Nylon6 com o ionômero à base do copolímero de etileno-ácido metacrílico parcialmente neutralizado com sódio. Através de análises morfológicas e térmicas do composto resultante, foi constatado que a adição de 0,5 partes por cem partes de resina (pcr) de ionômero foi suficiente para melhorar a compatibilização da blenda PEBD/Nylon6 evidenciada pela redução do tamanho da fase dispersa. Medições feitas por TGA mostraram melhora na estabilidade térmica de ambos componentes da blenda na presença do ionômero, os resultados do DSC demonstraram que conforme o teor de ionômero aumentou, a temperatura de cristalização do Nylon6 diminuiu, levantando a hipótese de que houve interação na forma de uma reação química entre o ionômero e o Nylon6, posteriormente confirmada pelo teste de Molau (LAHOR; NITHITANAKUL; GRADY, 2004).

Em outro trabalho, envolvendo blendas contendo etileno e ionômero, Mekhilef, Kadi e Ajji (1992) investigaram o efeito dos compatibilizantes de estireno-butadieno-estireno e um ionômero na a morfologia e propriedades mecânicas da blenda de policarbonato modificado com PEAD. Foram comparados os efeitos da adição de 1 e 5% em massa de agentes compatibilizantes com o composto puro, e os autores constataram que a blenda compatibilizada não apresentou diferença em suas propriedades mecânicas em relação à blenda pura. Foi visto que o copolímero de estireno-butadieno-estireno pode interagir somente com uma fase e que a adição de 1% de ionômero foi capaz de aumentar o módulo de elasticidade da blenda. A análise da morfologia mostrou grande mudança no tamanho da fase dispersa (polietileno) atribuída a compatibilização do grupo etileno do ionômero com a fase de menor tamanho e a reação entre o grupo carbonato do policarbonato e o grupo ácido do ionômero. A investigação feita utilizando técnicas de DSC e FTIR da blenda binária contendo policarbonato e o ionômero mostrou a ocorrência de reações químicas do tipo transesterificação (MEKHILEF; KADI; AJJI, 1992).

Continuando o desenvolvimento sobre compostos contendo polietileno com ionômeros, Suh, Damon e Tanaka (1995), estudaram a formação de cargas espaciais nas blendas de polietileno e ionômeros à base de ácido metacrílico, neutralizados com sódio e zinco. Os autores chegaram à conclusão de que as amostras da blenda polietileno/ionômero apresentaram duas fases distintas apesar da semelhança química entre seus componentes, e durante um processo de envelhecimento térmico/voltaico, foi constatado que em ambas as misturas a ocorrência de um pico de corrente na temperatura de 60°C associado ao movimento das cargas espaciais. Nos dois compostos estudados, houve o acúmulo de cargas espaciais negativas e, utilizando uma aproximação da distribuição de cargas espaciais de equilíbrio, mostrou que além de serem negativas e uniformes, a aproximação foi mais rápida na blenda contendo o ionômero neutralizado com sódio do que na de zinco (SUH; DAMON; TANAKA, 1995).

3 METODOLOGIA

Neste tópico serão abordados os materiais envolvidos no trabalho, as formulações que foram utilizadas, a metodologia empregada para obtenção de resultados e o uso da análise de variância para embasar as discussões de resultados.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os seguintes materiais foram utilizados neste trabalho.

- a) Polietileno de alta densidade virgem Braskem, IF: 6,7g/10min;
- b) Polietileno de baixa densidade virgem Braskem, IF: 7,1g/10min;
- c) Aparas do Ionômero de Sentryglas® cedidos pela Dupont;
- d) Agente compatibilizante de polietileno graftizado com anidrido maleico, PEGMA, contendo 1,5% de MA, da empresa Additive (Polybond 3349);

3.2 ESPECTROCOPIA NO INFRAVERMELHO (FTIR)

O Sentryglas® foi caracterizado por análises de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) utilizando-se um espectrofotômetro FT-IR Nicolet 6700 modelo Magna 560. Para esta análise de FTIR foram utilizados filmes finos de amostras do material. O filme foi produzido prensando-se uma pequena amostra de material sobre uma chapa metálica aquecida, amolecendo-a e deslizando-a sobre a superfície, permitindo assim a obtenção do filme fino. O espectro foi obtido no modo transmissão e consistiu de um acúmulo de 32 varreduras com resolução de 4.000 cm^{-1} .

3.3 FORMULAÇÕES

Foram preparadas doze formulações para estudo comparativo de propriedades em relação à incorporação do Sentryglas® contemplando também o uso do *masterbatch* (MB) para observar se houve melhora na mistura dos componentes e mais uma contendo somente o SG puro para fins de comparação. As formulações e seus componentes estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Formulações utilizadas e sua composição

Formulações	Componentes		
	PEAD (%)	Sentryglas® (%)	PEgMA (pcr)
PEAD-SG 100-0	100	0	0
PEAD-SG 90-10	90	10	0
PEAD-SG 80-20	80	20	0
PEAD-SG 60-40	60	40	0
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	60	40	4
PEAD-MB 60-40-4	60	40	4
Formulações	Componentes		
	PEBD (%)	Sentryglas® (%)	PEgMA (pcr)
PEBD-SG 100-0	100	0	0
PEBD-SG 90-10	90	10	0
PEBD-SG 80-20	80	20	0
PEAD-SG 60-40	60	40	0
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	60	40	4
PEBD-MB 60-40-4	60	40	4

Fonte: Autor

3.4 EXTRUSÃO

Antes do procedimento de extrusão, os pellets de PEAD e PEBD e as aparas de SG foram secos em estufa a 60°C por um período de no mínimo oito horas (para os polietilenos) e uma hora (para o SG) para prevenir que ocorressem problemas relacionados ao acúmulo de umidade durante o processamento. Para dar início a extrusão foram pesadas cinco formulações dos materiais utilizados neste estudo, tal como a tabela 5 demonstra a seguir.

Tabela 5 – Quantidade de massa por formulação

Formulações	Massa componentes		
	PEAD (g)	Sentryglas® (g)	PEgMA (pcr)
PEAD-SG 100-0	1000	0	0
PEAD-SG 90-10	900	100	0
PEAD-SG 80-20	800	200	0
PEAD-SG 60-40	600	400	0
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	600	400	40
PEAD-MB 60-40-4	600	400	40
Formulações	Massa componentes		
	PEBD (g)	Sentryglas® (g)	PEgMA (pcr)
PEBD-SG 100-0	1000	0	0
PEBD-SG 90-10	900	100	0
PEBD-SG 80-20	800	200	0
PEAD-SG 60-40	600	400	0
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	600	400	40
PEBD-MB 60-40-4	600	400	40

Fonte: Autor

Após a pesagem dos materiais nas proporções descritas anteriormente, cada formulação foi misturada manualmente (mistura física), a fim de conferir uma distribuição mais homogênea do material das aparas em suas respectivas matrizes. O material misturado foi posto no funil de alimentação em pequenas proporções, até que toda a massa fosse extrudada.

A extrusora foi programada com o perfil de temperatura tal como é demonstrado na tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Perfil de temperatura de extrusão

Temperatura das zonas de aquecimento na extrusão do PEBD (°C)		Velocidade de Alimentação (%)	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	
TS1 - Alimentação	165	10	250	29 a 40	
TS2	170				
TS3	175				
TS4	175				
TS5	180				
TS6 - Saída	170				
Temperatura das zonas de aquecimento na extrusão do PEAD (°C)		Velocidade de Alimentação (%)	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	Torque (N.m) SG puro
TS1 - Alimentação	190	10	250	29 a 45	45 a 52
TS2	195				
TS3	195				
TS4	195				
TS5	195				
TS6 - Saída	190				

Fonte: Autor

O sistema de extrusão foi montado de modo a simular as condições reais de trabalho, onde a massa polimérica extrudada passa por um sistema de resfriamento a água e em seguida é cortado em um moinho de facas.

Após o término da extrusão, todas as treze formulações foram identificadas e devidamente armazenadas para dar início ao processo de injeção que será descrito no tópico a seguir.

3.5 INJEÇÃO DE CORPOS DE PROVA

Tal como foi feito no processo anterior, o material resultante da extrusão foi seco em estufa por um período de no mínimo oito horas antes do início da injeção para evitar problemas relacionados com o acúmulo de umidade dos quais poderiam ser prejudiciais a obtenção de corpos de prova.

Após alguns acertos nos parâmetros de injeção, a programação dos perfis de temperatura ficaram idênticas para os dois tipos de materiais. Esta ação foi tomada devido à dificuldade em encontrar uma faixa de temperatura ideal onde o fluxo de

material contendo as maiores concentrações de Sentryglas® fosse perfeito a ponto de evitar a ocorrência da aderência entre o corpo de provas e as paredes do molde. Esta ação permitiu que a injeção dos corpos de prova fosse garantida. A tabela 7 a seguir descreve os parâmetros de injeção utilizados.

Tabela 7 – Parâmetro de injeção para ambos os materiais

Parâmetros de injeção - Matrizes		Parâmetros de injeção - SG puro	
Pressão de injeção (bar)	700	Pressão de injeção (bar)	1000
Pressão de recalque (bar)	500	Pressão de recalque (bar)	700
Temperatura Bico (°C)	200	Temperatura Bico (°C)	200
T zona 1 (°C)	195	T zona 1 (°C)	195
T zona 2 (°C)	190	T zona 2 (°C)	190
T zona 3 (°C)	185	T zona 3 (°C)	185
T molde (°C)	50	T molde (°C)	50
Tempo de refrigeração (s)	15	Tempo de refrigeração (s)	15

Fonte: Autor

Após os parâmetros estarem definidos, cada formulação foi injetada seguindo a programação descrita anteriormente. A massa polimérica após ser depositada no funil de alimentação, foi transportada até a zona de aquecimento onde aqueceu até fundir, em seguida houve o transporte da massa fundida por intermédio da rosca que também funciona como pistão, pressionando o polímero fundido através do canal de entrada do molde até preenchê-lo completamente. A pressão de recalque foi aplicada para garantir o preenchimento completo da cavidade do molde até a completa solidificação do polímero. Ao término do processo de resfriamento o molde se abriu e ejetou a árvore de fundição através dos pinos extratores. Os corpos de prova foram destacados de seus galhos, identificados e então armazenados em ambiente controlado para posteriormente serem submetidos a ensaios mecânicos.

3.6 ENSAIOS MECÂNICOS

Neste tópico serão abordados os tipos de análises e ensaios mecânicos utilizados no presente trabalho, comentando as variáveis de ensaio.

3.6.1 Ensaio de tração

Para o ensaio de tração em ambos os materiais foi utilizado um extensômetro de 50 mm com abertura para a leitura de até 500% de deformação, a velocidade de ensaio para o PEBD foi de 50 mm/min enquanto que para o PEAD a mesma foi aumentada para 100 mm/min para acelerar a sua ruptura. Foram selecionados cinco corpos de prova de forma aleatória para cada formulação, desta forma os resultados seriam mais abrangentes no que diz respeito ao comportamento dos materiais resultantes. Para conseguir levantar uma amostragem de no mínimo cinco corpos de prova, só foram considerados aqueles que romperam dentro da região de leitura do extensômetro. Para o cálculo de maior precisão do módulo de tração, mais cinco corpos de prova de cada formulação foram tracionados até atingirem a deformação de 1% com a velocidade de 5 mm/min, a leitura foi feita com um extensômetro de 50 mm e abertura de +50, com leitura máxima de 100% de deformação. A máquina utilizada para obtenção dos resultados foi a Instron 5567 com a célula de carga específica para tração (5KN). Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM D638.

3.6.2 Ensaio de flexão

No ensaio de flexão em três pontos a distância entre apoios foi de 50 mm, a velocidade de ensaio foi de 1,3 mm/min e a deformação máxima ficou em 5%. Neste ensaio foi usada novamente a máquina universal de ensaios Instron 5567, mas com a célula de carga específica para o ensaio de flexão seguindo as instruções encontradas na norma ASTM D790. Foram selecionados cinco corpos de prova de forma aleatória para cada formulação e o ensaio transcorreu levando em consideração o deslocamento vertical do apoio superior de tal forma que garantisse a leitura até 5% de deformação.

3.6.3 Ensaio de impacto

No ensaio de impacto Charpy foram ensaiados dez corpos de prova entalhados para cada formulação utilizando o martelo de 5,4 J. O entalhe em V foi feito em um dos lados do corpo de prova exatamente em seu ponto médio, realizado por entalhadora da marca *Instron*. Antes de iniciar a obtenção de resultados, um exemplar de cada formulação foi testado para averiguar se todos atenderiam as condições de ensaio, mas

foi averiguado que para as formulações do PEBD os corpos de prova só romperam a partir das concentrações acima de 20% de incorporação de Sentryglas® e, portanto, para a obtenção de resultados satisfatórios, foi realizado o procedimento de impacto criogênico, que consistiu em mergulhar cinco corpos de prova de cada formulação, já entalhados em nitrogênio líquido por dez minutos, para que depois fossem impactados imediatamente após serem retirados do banho criogênico. O ensaio foi realizado em equipamento da marca *Instron*, modelo Ceast 9050, conforme a norma ASTM D6110.

3.6.4 Ensaio de HDT (Temperatura de Deflexão Térmica)

Para conseguir levantar uma amostragem de no mínimo dois corpos de prova, suficientes para fazer uma repetição de acordo com a norma, foram selecionados quatro corpos de prova de forma aleatória para cada formulação. Antes de iniciar o ensaio, os corpos de prova foram medidos para que então o software calculasse a quantidade de massa a ser acoplada em cada estação para aplicar carga de 0,455 MPa, conforme a norma ASTM D648. Os ensaios foram realizados no equipamento HDT-VICAT da CEAST *Italy*. No decorrer do ensaio, o software levantou as temperaturas na qual cada corpo de prova atingiu a deflexão de 0,25mm.

3.6.5 Índice de fluidez

Como uma forma de determinar o comportamento do composto resultante quando fundido, foi realizado o índice de fluidez de todas as formulações utilizando uma massa padrão de 2,16 kg e temperatura de 190°C (utilizada para PEs) gerando uma tensão de cisalhamento correspondente a $\tau_w = 1,94 \times 10^4$ Pa conforme a norma ASTM D1238. Após o corte das dez partes do extrudado proveniente da máquina do ensaio em um intervalo de tempo conhecido, as partes foram pesadas para então ser calculado o índice de fluidez em g/10min. O equipamento utilizado foi da marca *Ceast* modelo *Melt Flow Modular Line*.

3.6.6 Ensaio de DSC (Análise Térmica Diferencial Exploratória)

Neste ensaio as amostras de cada formulação foram cortadas, usando furador de rolha e alicate, em formato de discos circulares, a partir de corpos de prova injetados. A massa de cada amostra ficou entre 5 e 15 mg, de acordo com a especificação da máquina de análise. Cada amostra foi hermeticamente fechada em pequenas painéis de alumínio sendo sempre comparadas a uma painél de referência vazia. O aquecimento ocorreu sob taxa de 10°C/min até chegar ao patamar de 180 °C, ao chegar nesta temperatura o sistema de refrigeração é acionado até que o sistema chegue a temperatura de 26°C. Neste ensaio não foi registrado os dados da curva de resfriamento. O forno então pode ser aberto, outra amostra pode ser inserida e os procedimentos serem repetidos. Conforme a análise acontece, o software *Thermo Analysis* compila as informações ilustrando-as em curvas de fluxo de energia calorífica associadas a transições nos materiais em função da temperatura. O equipamento utilizado no ensaio foi da marca *TA Instruments*, modelo *Q20*.

3.6.7 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para dar início à análise estrutural dos corpos de prova, foi selecionado um exemplar de cada formulação para serem submetidos a impacto criogênico para então levantar informações sobre a superfície de fratura. Cada corpo de prova foi devidamente cortado para nivelar sua altura em aproximadamente 10 mm. Para remover eventuais sujeiras e poeira da superfície de fratura utilizou-se um bulbo de sopro de borracha.

Os corpos de prova foram identificados e dispostos num porta amostras em estações numeradas para auxiliar a rastreabilidade. Por se tratar de um material pouco condutor, foi feita a metalização com partículas de ouro em equipamento da marca *Boc Edwards*, modelo *Scancoat Six*. O porta-amostras foi posicionado num suporte acoplado a porta da câmara de vácuo do MEV, a porta foi fechada, criou-se vácuo então a análise teve início. O microscópio utilizado era de bancada da marca *Jeol*, modelo *JSM6010LA*. Todos os resultados obtidos neste procedimento e em todos os anteriores serão apresentados no tópico de resultados e discussões.

3.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA – ANOVA

A análise de variância é uma ferramenta que consiste em decompor e avaliar simultaneamente a variação total de duas ou mais amostras envolvidas num experimento, testando se existem diferenças significativas entre elas. O experimento é dividido em partes das quais podem ser atribuídas causas controladas (conhecidas) e causas não controladas ou não controláveis (desconhecidas). O erro ou resíduo experimental estará atrelado ao material ou ao ambiente no qual o experimento está sendo conduzido. Essa análise auxilia na interpretação dos efeitos desconhecidos que causam uma variação ao acaso nos dados obtidos experimentalmente (ANJOS, 2005).

Em outras palavras, a análise de variância ANOVA é uma ferramenta estatística utilizada para averiguar se há variação entre os grupos populacionais envolvidos em experimentos diversos através da comparação entre as médias aritméticas destes grupos e análise de variâncias amostrais. Essa ferramenta foi utilizada para verificar a variância nos resultados dos ensaios mecânicos deste estudo para o fator único onde, foi levantado um teste de hipótese com intervalo de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) para que os resultados da probabilidade “valor p” fossem interpretados com o intuito de embasar as discussões dos resultados e auxiliar nas conclusões.

3.8 REGRA DE MISTURA

Segundo Rabelo (2000), ao se adicionar uma carga em um polímero com o intuito de formar um material conjugado bifásico, têm-se como ideia principal que as propriedades mecânicas do material resultante serão intermediárias às propriedades apresentadas pelos dois componentes da mistura e, sendo assim, as propriedades mecânicas efetivas de um material compósito podem ser matematicamente estimadas relacionando as propriedades dos materiais constituintes e seus respectivos volumes relativos (RABELO, 2000). A regra de mistura na qual a propriedade P de um material compósito é dada pela equação 1 a seguir:

$$P = P_a \times V_a + P_b \times V_b \quad (1)$$

Os índices a e b se referem aos dois componentes e V é a fração volumétrica relativa destes mesmos componentes. A regra de mistura neste caso só está sendo

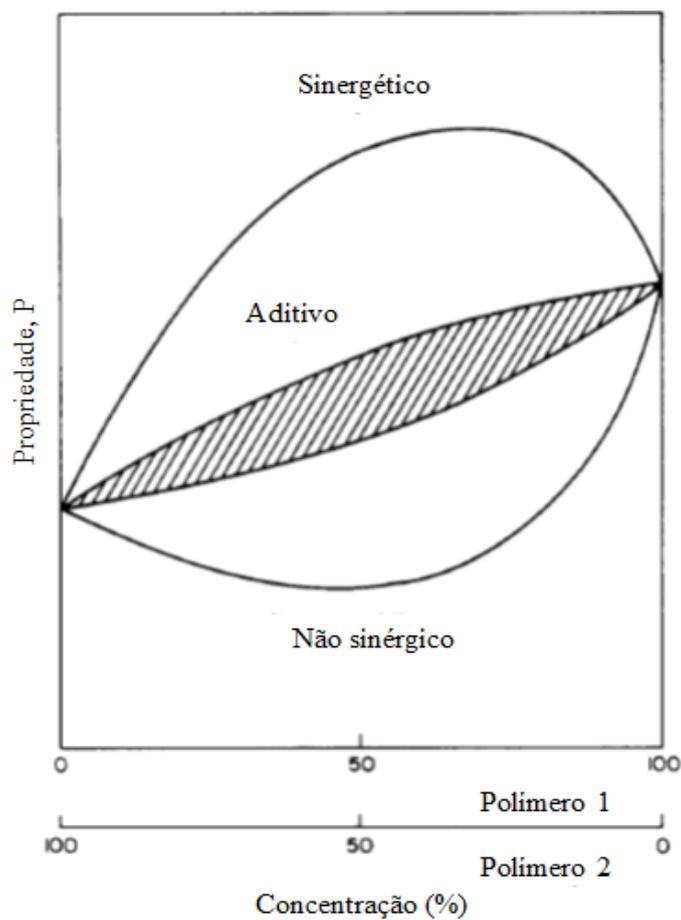
aplicada na prática supondo que a adesão entre os materiais é perfeita (RABELO, 2000).

Okoroafor *et al.* (1992) afirmam que quando o valor P de uma propriedade mecânica proveniente de uma blenda fica acima da média aritmética ponderada da propriedade de seus componentes, é utilizado o termo “sinérgico” para indicar esta melhora, enquanto que o contrário é utilizado “não sinérgico” para descrever o caráter desta combinação (OKOROAFOR, 1992). Em seu estudo há a representação gráfica do efeito das concentrações dos componentes em uma blenda, onde o termo “sinérgico” corresponde ao desvio positivo em relação à regra de mistura, “não sinérgico” ao desvio negativo e “aditivo” corresponde ao comportamento teórico da combinação dos componentes da blenda. A figura 4 a seguir demonstra essa representação.

Porém não é fácil obter sinergismo para componentes de uma blenda. Geralmente, a incompatibilidade faz com que as propriedades fiquem bem abaixo dos valores previstos pela regra de misturas (MEISTER, 2000).

Segundo El-Hibri e Shari (2016), como consequência da compatibilidade em blendas poliméricas, as propriedades mecânicas, químicas e térmicas, bem como outras características de mistura, ficam geralmente próximas daquelas previstas pela regra da mistura. Além disso, a melhoria de propriedade sinérgica pode ocorrer, dando origem a materiais economicamente atraentes para certas aplicações (EL-HIBRI; SHARI, 2016).

Figura 4 – Representação gráfica da regra de mistura



Fonte: Autor

Por meio de cálculos utilizando a equação 1, porém substituindo-se a fração volumétrica pela mássica, o conceito da regra de mistura será utilizado neste trabalho para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos e averiguar se há sinergia entre os componentes da blenda.

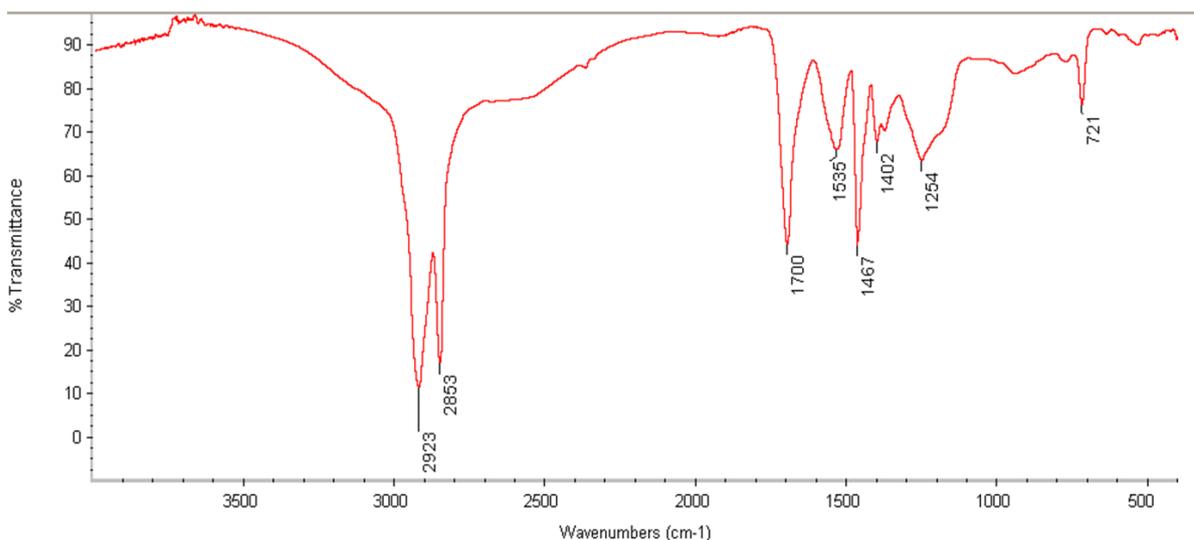
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos nas análises e ensaios mecânicos juntamente com um breve comentário e discussão sobre o comportamento dos materiais estudados.

4.1 ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO (FTIR)

Conforme investigado por Oliveira (2016), cujo trabalho abordou a incorporação de SG e matriz de ABS, o espectro de FTIR obtido das aparas que confirmaram sua composição está ilustrado na figura 5 a seguir.

Figura 5 – Espectro de FTIR das aparas de Sentryglas®



Fonte: Espectrofotômetro de infravermelho *Thermo Scientific Nicolet 6700* (OLIVEIRA, 2016)

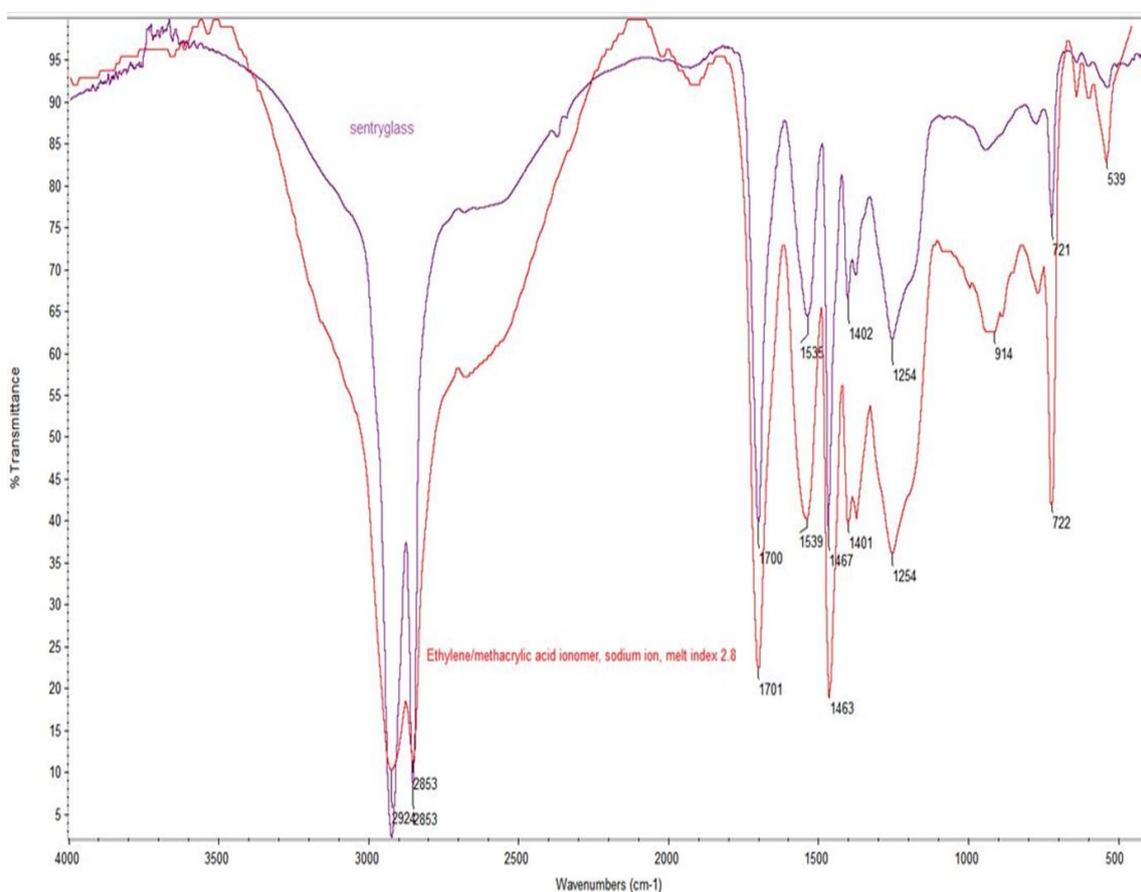
O espectro de FTIR obtido do resíduo apresenta as bandas características de polietileno e do ácido metacrílico, quais sejam:

- 2923 cm^{-1} : absorção da deformação axial assimétrica de CH_2 , banda típica de polietileno;
- 2853 cm^{-1} : absorção da deformação axial simétrica de CH_2 , banda típica de polietileno;
- 1700 cm^{-1} : absorção da deformação axial simétrica de $\text{C}=\text{O}$ de ácido carboxílico;
- 1535 cm^{-1} : absorção da deformação axial assimétrica do grupo carboxilato;

- 1467 cm^{-1} : sobreposição da absorção da deformação angular assimétrica de CH_3 e da deformação angular (tipo tesoura) de CH_2 , banda típica de polietileno;
- 1254 cm^{-1} : absorção da deformação axial de $\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}$;
- 723 cm^{-1} : absorção do movimento conjunto tipo balanço dos grupos CH_2 quando ligados em uma sequência de 4 ou mais, banda típica de polietileno.

Fez-se ainda uma sobreposição do espectro das aparas de Sentryglas® com o espectro de um ionômero de etileno ácido metacrílico, íon sódio da biblioteca Aldrich Condensed Phase, conforme ilustrado na figura 6.

Figura 6 – Sobreposição dos espectros das aparas de Sentryglas® e de um ionômero de etileno ácido metacrílico, íon sódio



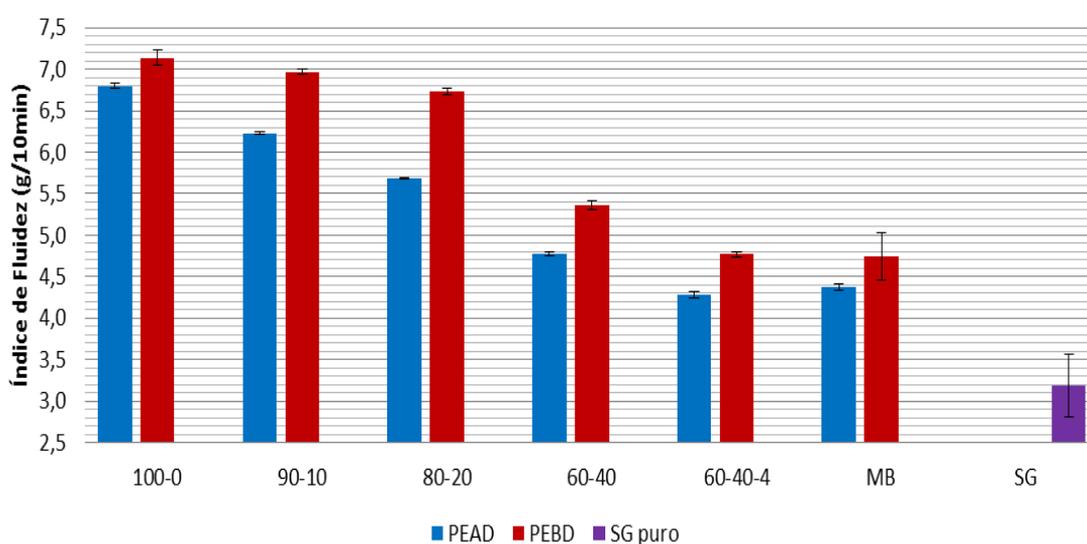
Fonte: Espectrofotômetro de infravermelho *Thermo Scientific Nicolet 6700* (OLIVEIRA, 2016)

A partir da interpretação das bandas do espectro das aparas e a sobreposição com o espectro do ionômero de etileno ácido metacrílico, íon sódio da biblioteca Aldrich Condensed Phase, a sobreposição indica que o material das aparas se trata mesmo de um ionômero de etileno ácido metacrílico (OLIVEIRA, 2016).

4.2 ÍNDICE DE FLUIDEZ

Este ensaio foi realizado utilizando o material dos galhos (polímero congelado dos canais de alimentação e de distribuição) de cada formulação obtida. Foram feitas duplicatas para caracterizar o comportamento dos fundidos e a figura 7 a seguir mostra a média dos valores obtidos neste cálculo.

Figura 7 – Índice de fluidez para todas as formulações



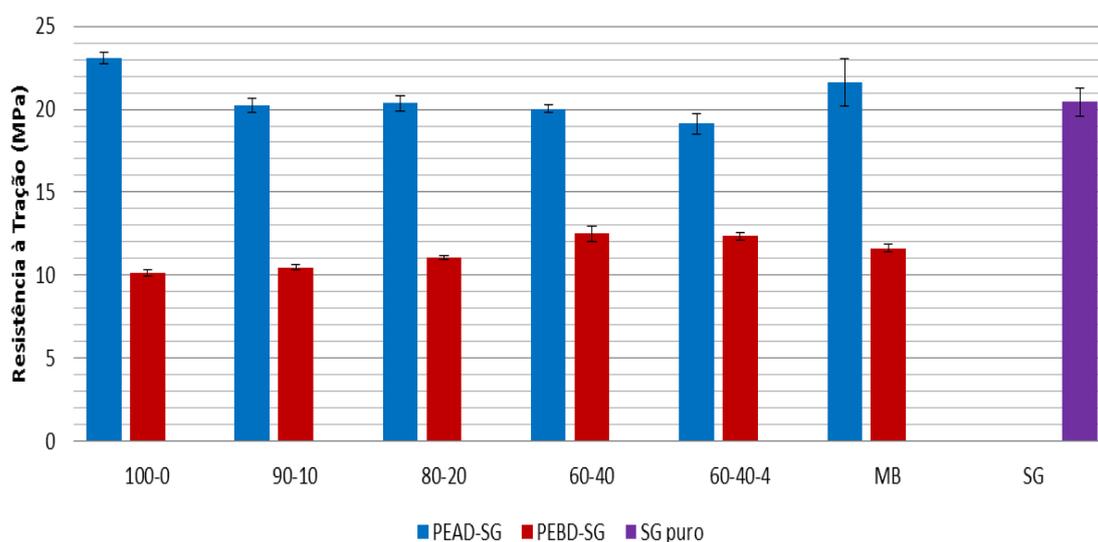
Fonte: Autor

A figura 7 demonstra como a incorporação de SG, que possui índice de fluidez igual a aproximadamente 3,2 g/10min (menor que os dois polietilenos), diminuiu o índice de fluidez do composto resultante conforme seu teor aumentou. Determinar o índice de fluidez das aparas de SG puro foi importante para saber seu comportamento no estado fundido, e juntamente com o auxílio de informações obtidas da literatura, que fosse possível descobrir a faixa de temperatura na qual este material pudesse ser processado. Através desse resultado, o SG puro pôde ser extrudado e injetado utilizando praticamente os mesmos parâmetros empregados nas formulações de PEAD, havendo somente um leve aumento no torque durante a extrusão (de 45 N.m até aproximadamente 52 N.m) e diferença nas pressões de injeção e recalque (aumento de 700 para 1000 bar e de 500 para 700 bar respectivamente).

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os gráficos de tensão x deformação obtidos no ensaio de tração para cada formulação encontram-se no apêndice A. A partir da figura 8 serão mostrados os gráficos da média dos valores obtidos para cada composição avaliada, envolvendo os dois tipos de materiais utilizados neste trabalho. Os dados estatísticos calculados pela ferramenta ANOVA também serão apresentados, juntamente com os gráficos da lei de mistura em sequência ilustrando primeiramente a resistência à tração, o valor do módulo elástico de tração, o alongamento e os valores de tenacidade.

Figura 8 – Valores médios de resistência à tração para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

Observa-se pela figura 8 que o valor da resistência à tração no escoamento das blendas apresentou redução na propriedade mecânica em relação ao PEAD puro, o que pode ser justificado pela menor resistência à tração apresentada pelas aparas de SG e também pela provável falta de adesão entre às aparas e a matriz, o que poderia estar gerando pontos de concentração de tensão, reduzindo a propriedade mecânica. Nota-se que o SG puro apresentou resistência à tração menor que a especificada pelo fabricante (34,5 MPa), indicando que pode ter ocorrido redução em sua propriedade mecânica em função de alguma degradação sofrida pelo material ao longo do processo de obtenção das aparas, que pode ter sido agravado com o processamento empregado neste trabalho

na obtenção dos corpos de prova, o que poderia explicar a redução da resistência à tração para as formulações de PEAD. Outra hipótese é que, conforme foi constatado no trabalho apresentado por Cho e Jeon (1993), a blenda PEAD/ionômero é imiscível e a queda na propriedade de resistência à tração se deu em função da pouca adesão entre as fases dos componentes da blenda, mas vale ressaltar que para concentrações maiores de ionômero, a energia necessária para a mistura dos componentes ocorrer diminui (este efeito também foi constatado para o PEBD) (CHO; JEON, 1993).

Para verificar se houve ou não diferença significativa entre as formulações de PEAD, foi utilizado a ferramenta estatística ANOVA comparando somente as colunas onde há dúvida se houve alguma diferença, conforme é ilustrado na tabela 8.

Tabela 8 – Valor P na comparação de resistência à tração de formulações de PEAD

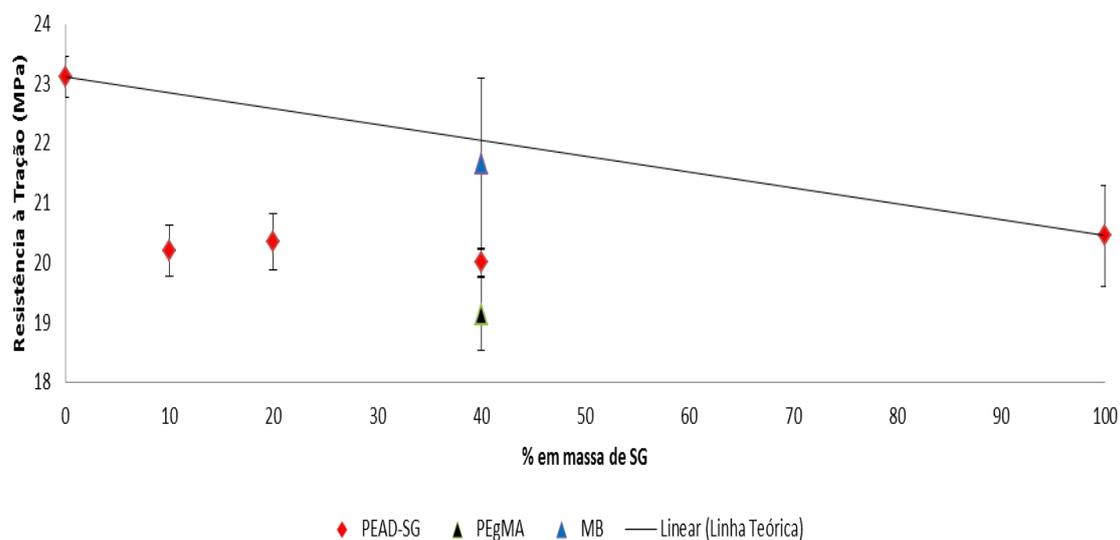
Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,1378182
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,0098725

Fonte: Autor

Observou-se que a incorporação direta de 4 pcr do agente compatibilizante PEgMA não foi estatisticamente significativa a ponto de determinar que o agente compatibilizante foi efetivo na transferência da carga aplicada para o material incorporado conforme é demonstrado no valor P acima de 0,05.

Comparando as formulações ilustradas na tabela 8, aparentemente a incorporação de 4 pcr de PEgMA usando o *masterbatch* surtiu efeito positivo na propriedade de resistência à tração, indicando haver a provável melhora na adesão entre os componentes onde, a ferramenta de cálculo estatístico ANOVA, demonstra haver diferença significativa na variação apresentada em função do valor P abaixo de 0,05.

Figura 9 – Comparação da resistência à tração de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

Pela figura 9, para as formulações de PEAD observa-se que, as blendas de PEAD/SG apresentam resistência à tração abaixo dos valores previstos pela regra de mistura, indicando falta de sinergia entre os componentes da blenda para esta propriedade.

Voltando a observar a figura 8, as colunas referentes ao PEBD demonstram que a incorporação das aparas de SG foi favorável ao aumento da resistência à tração em relação ao PEBD puro. Este resultado, diferentemente do que foi visto com o PEAD, seguiu como o esperado, pois o SG apresenta maior valor de resistência à tração que o PEBD e conforme o teor de aparas aumentou, a blenda resultante apresentou um comportamento de maior resistência à tração.

Novamente, observando os dados do ANOVA foi possível averiguar que houve diferenças significativas em praticamente todas as formulações de PEBD, tal como é demonstrado na tabela 9.

Tabela 9 – Valor P na comparação da resistência à tração de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 100-0 e PEBD-SG 90-10	0,0075520
PEBD-SG 90-10 e PEBD-SG 80-20	0,0023049
PEBD-SG 80-20 e PEBD-SG 60-40	0,0008259
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,8772477
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,0300973

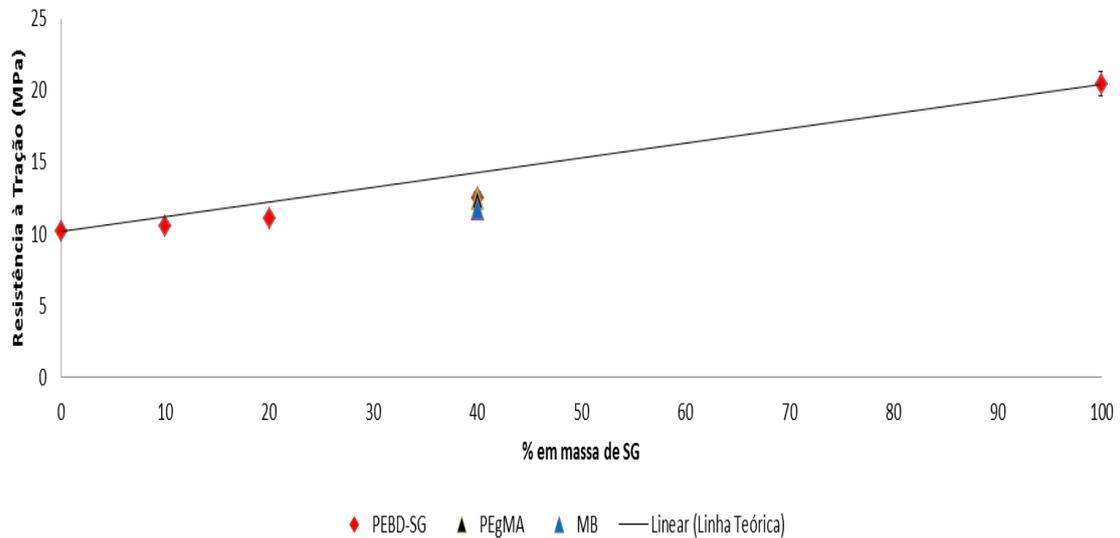
Fonte: Autor

Logo na comparação da formulação 90-10 houve aumento significativo segundo o ANOVA apesar de parecer sutil quando observado na figura 8. Essa tendência continua até a formulação de maior teor de SG, como é evidenciado pelos valores P abaixo de 0,05.

A incorporação de 4 pcr do PEgMA, tal como apresentado nas formulações do PEAD, não foi estatisticamente significativa. Aparentemente nessas condições de processamento o agente compatibilizante não foi efetivo.

Observando a figura 8 e as formulações ilustradas na tabela 9, novamente o *masterbatch* aparentemente teve influência na mistura dos elementos da blenda, mas neste caso atuando na redução na propriedade de resistência à tração. O ANOVA demonstrou haver diferença significativa na variação apresentada, apresentando valor P ficando abaixo de 0,05.

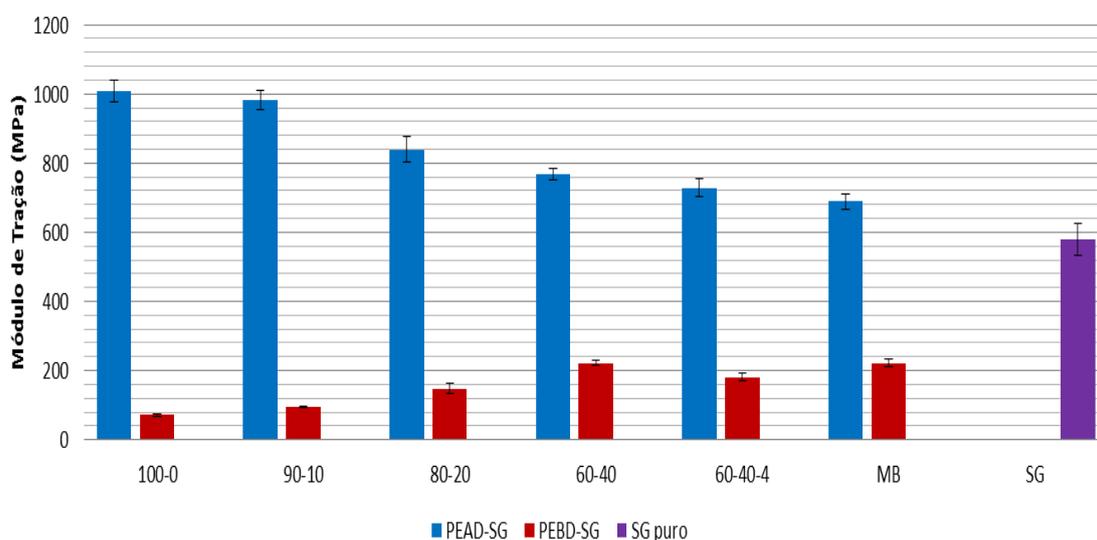
Figura 10 – Comparação da resistência à tração das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

De acordo com o gráfico da regra de mistura da figura 10, as formulações de PEBD apresentaram tendência de aumento na resistência à tração, com resultados seguindo bem próximo a regra de mistura, sem mostrar sinergia entre os componentes da blenda.

Figura 11 – Valores médios do módulo elástico à tração para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

Segundo Hara e Sauer (1998), em algumas blendas de caráter miscível podem desenvolver sinergismo em certas propriedades mecânicas tal como o módulo elástico. Esta situação acontece devido a interações favoráveis entre os componentes da blenda em condições específicas ao longo de segmentos de suas moléculas, que podem levar a redução de propriedades mecânicas (HARA; SAUER, 1998).

Observando a figura 11 e comparando o módulo elástico de tração do PEAD puro com suas demais formulações, houve queda nos valores de módulo elástico da blenda conforme aumentou o teor de incorporação de aparas, indicando que o composto resultante aparentemente é mais flexível que o PEAD puro. Esse comportamento era esperado, uma vez que o módulo elástico de tração do Sentryglas® (especificado em 300 MPa pelo fabricante) é menor que o apresentado pelo PEAD.

Apesar das aparas de SG puro apresentar módulo elástico duas vezes maior que o especificado pelo fabricante, este ainda pôde conferir flexibilidade ao composto resultante. Este resultado pode estar relacionado a possíveis degradações relacionadas a perda de transparência, devido ao aumento da cristalinidade sofridas pelo Sentryglas® ao longo do processo de fabricação, de corte (para formação das aparas) e do reprocessamento para obtenção de corpos de prova para este trabalho.

Para saber se houve variações significativas na propriedade mecânica estudada, novamente foi utilizada a ferramenta de cálculos estatísticos ANOVA, tal como é demonstrado na tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Valor P na comparação do módulo de tração de formulações de PEAD

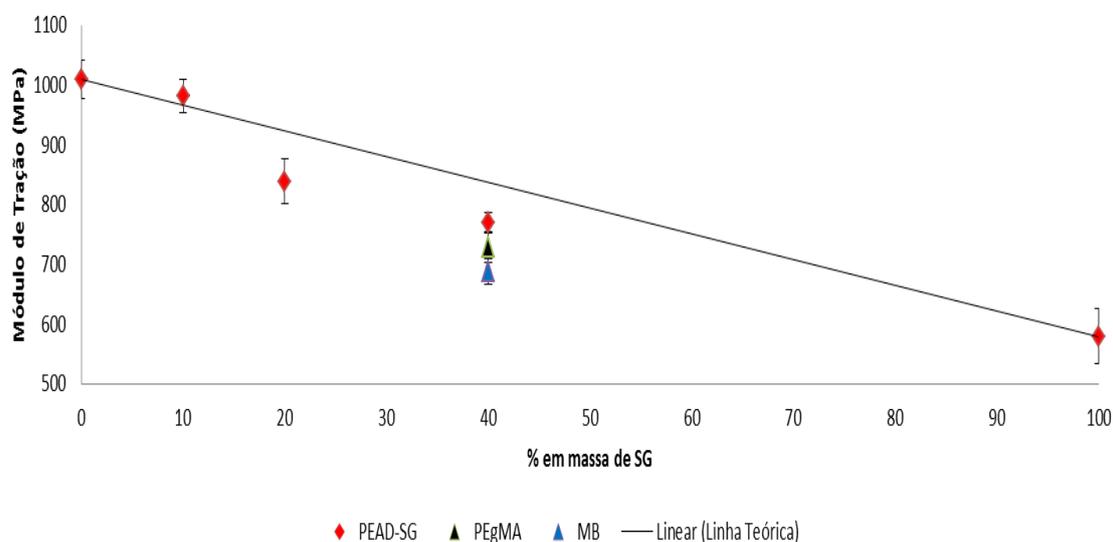
Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,0530505
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,0012039

Fonte: Autor

Observando o valor P calculado, pode-se constatar que a aparente redução no módulo de tração não foi significativa, uma vez que ficou acima de 0,05 e, portanto, nessas condições de processamento, provavelmente, o PEgMA não surtiu o efeito esperado de conferir melhora na adesão entre a fase dispersa e a matriz.

No caso da comparação com o *masterbatch*, o valor P calculado demonstra que a redução no módulo de tração (aumento da flexibilidade) foi significativa ficando abaixo de 0,05 e que, para essa condição de processamento, provavelmente o agente compatibilizante teve o efeito esperado atuando na melhora de adesão entre os componentes da blenda.

Figura 12 – Comparação do módulo elástico de tração das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

De acordo com o gráfico ilustrado na figura 12 referente à regra de mistura, fica evidente que era esperado uma tendência de aumento da flexibilidade do composto resultante e que somente a formulação contendo 10% de incorporação se encontra na linha dos valores teóricos calculados. As outras formulações, embora abaixo desta linha, ainda se encontram próximas e indicam a necessidade de melhoria nas condições de mistura dos componentes ao longo do processamento.

Novamente observando a figura 11 e observando as colunas de resultados do PEBD, os valores de módulo de resistência à tração aumentaram conforme aumenta o teor de incorporação de aparas, indicando que houve o efeito inverso ao ocorrido no PEAD com a diminuição da flexibilidade do composto resultante. Segundo Hara e Sauer (1998), em blendas bifásicas imiscíveis pode acontecer o aumento de uma ou mais propriedades elásticas tal como o módulo elástico, que se estende para todas as composições da blenda (HARA; SAUER, 1998).

Novamente esse comportamento era esperado, pois conforme aumentou-se o teor de aparas, a blenda resultante apresentou valores de módulo de tração maiores e mais próximos aos do SG puro. A formulação contendo agente compatibilizante sem o *masterbatch* foi a única a apresentar redução no módulo de tração. A tabela 11 demonstra os cálculos do ANOVA comparando as formulações de maior concentração de SG com as contendo agente compatibilizante.

Tabela 11 – Valor P na comparação do módulo de tração de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,0030054
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,7172454

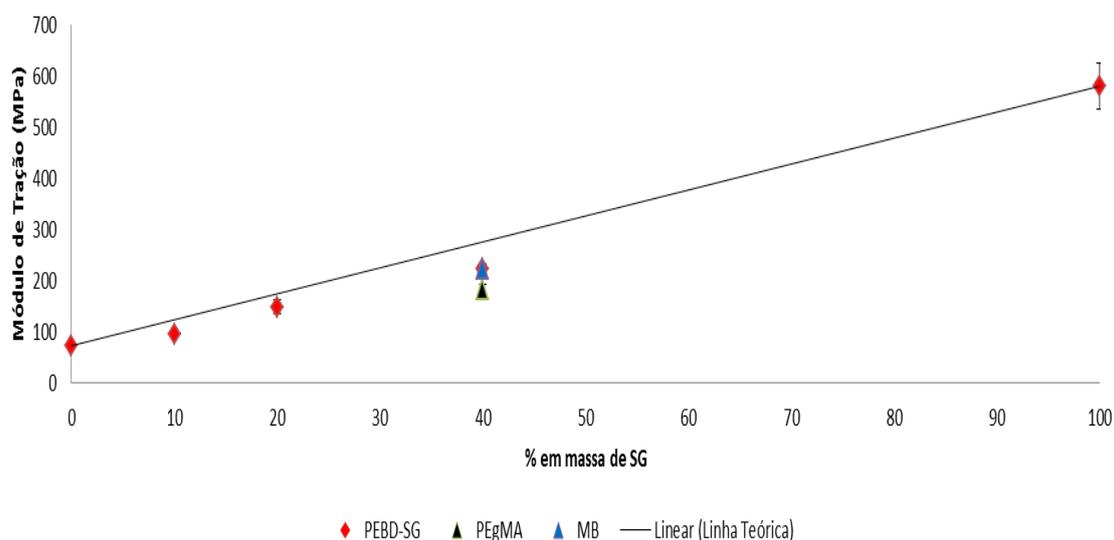
Fonte: Autor

Nesse caso a adição de PEgMA atuou de forma a desviar o módulo elástico negativamente em relação à linha da regra de mistura conforme visto na figura 12, aumentando a flexibilidade do material, este resultado pode indicar que não houve boa compatibilidade e/ou adesão entre a fase dispersa e a matriz, o que pode ter impedido a resposta mais parecida com as demais formulações. O cálculo do valor P do ANOVA, na formulação com adição direta de agente compatibilizante, aponta para uma variação

significativa ficando abaixo de 0,05, corroborando a hipótese de não ter ocorrido boa adesão entre os componentes da blenda.

Comparando a formulação de PEBD-SG 60-40 com o *masterbatch*, o comportamento do módulo de tração se manteve o mesmo, não apresentando variação significativa, conforme expressado pelo valor P calculado (ficando acima de 0,05). Este resultado não conclusivo para apontar se há melhora na adesão entre os componentes da blenda em função do *masterbatch*, também sendo possível dizer que o agente compatibilizante não surtiu o efeito esperado, por não aumentar seu módulo de tração quando comparado à formulação contendo 40% de SG.

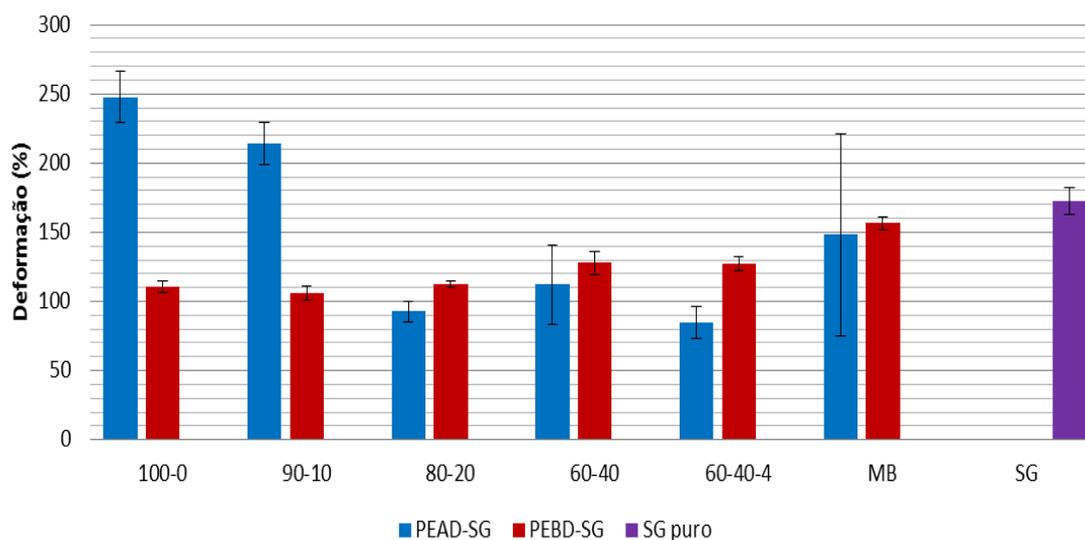
Figura 13 – Comparação do módulo elástico de tração das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

Comparando os resultados obtidos com a linha da regra de mistura, a figura 13 demonstra que os valores estão muito próximos da linha da regra de mistura, indicando que para os teores estudados, o PEBD possa ter uma compatibilidade com o SG um pouco melhor que o PEAD.

Figura 14 – Valores médios de alongamento para todas as formulações de PEAD e PEBD



Fonte: Autor

O comportamento visto no gráfico de deformação na ruptura demonstrado na figura 14 mostra, no caso do PEAD, como o alongamento do material sofreu alterações com o aumento da concentração de SG. Conforme o teor de aparas aumentou, nas formulações PEAD-SG 90-10 e PEAD-SG 80-20, houve redução média nesta propriedade de 13 e 62% respectivamente em comparação com o PEAD puro, provavelmente em função da falta de adesão entre os materiais, causando falhas na interface que funcionariam como concentradores de tensão e resultando na ruptura prematura do material.

Analisando as formulações de PEAD-SG 60-40 com a PEAD-SG 80-20 e as contendo agente compatibilizante observa-se a importância da análise estatística, tal como a tabela 12 demonstra a seguir.

Tabela 12 – Valor P na comparação da deformação na ruptura de formulações de PEAD

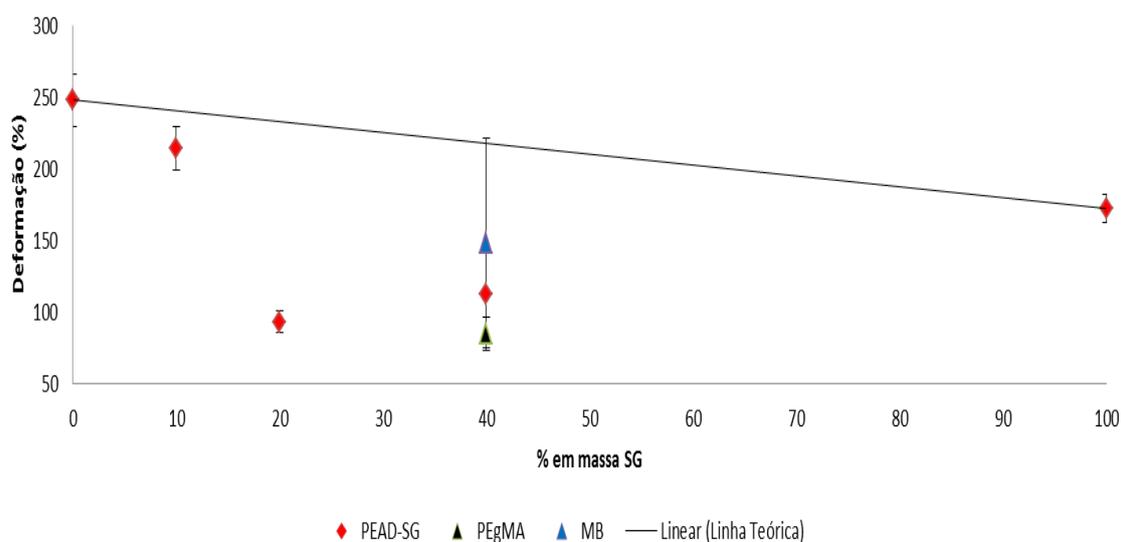
Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 80-20 e PEAD-60-40	0,1298959
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,0600714
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,2131350

Fonte: Autor

O cálculo do valor P na comparação entre PEAD-SG 80-20 e 60-40 demonstra não haver diferença estatisticamente significativa entre elas, bem como a formulação contendo agente compatibilizante aplicado de forma direta, também mostra não haver variação estatisticamente significativa no alongamento, em função destes valores estarem acima de 0,05, justamente pelos desvios apresentados na medida.

Continuando a análise e observando a coluna de resultados apresentados pelo *masterbatch*, novamente o valor P calculado pelo ANOVA demonstrou que não haver variação significativa para esta propriedade mecânica, e que estatisticamente as formulações analisadas possuem o mesmo comportamento, podendo indicar que o agente compatibilizante não surtiu o efeito desejado.

Figura 15 – Comparação da deformação da ruptura das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

O gráfico da figura 15 evidencia que era esperada a tendência de redução no alongamento da blenda resultante, mas que devido à provável presença de heterogeneidades na estrutura e/ou incompatibilidade, a capacidade de deformação foi severamente prejudicada.

Segundo Utracki e Dumoulin (1995), para misturas não compatibilizadas, as propriedades do estado sólido (alongamento na ruptura) versus composição geralmente apresentam um forte desvio negativo da aditividade (regra da mistura). Assim, recomendam que a preparação ou misturas comercialmente viáveis devem envolver

compatibilização, por meio de adição de agente compatibilizante ou mistura reativa (UTRACKI; DUMOULIN, 1995).

Observando o comportamento do alongamento para as colunas de resultados do PEBD na figura 14, com exceção da formulação de PEBD-SG 90-10 onde há queda na deformação de aproximadamente 4% em relação ao PEBD puro, todas as outras formulações apresentaram crescimento em seu alongamento conforme o teor de aparas aumentou. Apesar do composto resultante apresentar um comportamento estatisticamente estável, é a partir da formulação com 20% de SG que surge a primeira variação significativa segundo o ANOVA. A tabela 13 a seguir demonstra as variações em função do valor P.

Tabela 13 – Valor P na comparação da deformação na ruptura de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 80-20 e PEBD-SG 60-40	0,0184325
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,6976280
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,0013008

Fonte: Autor

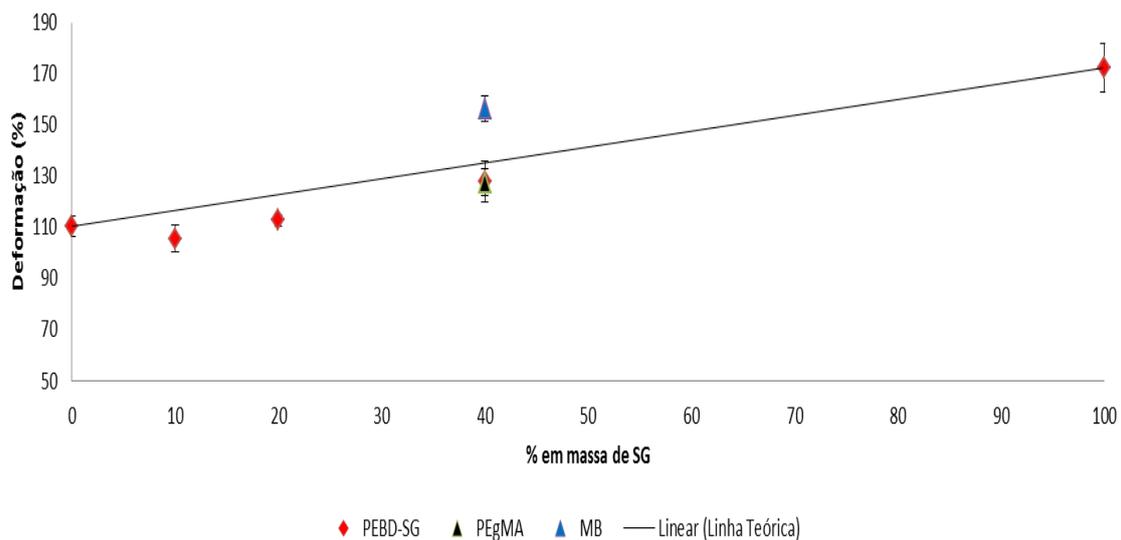
O aumento no alongamento para a formulação de PEBD-SG 60-40 foi de aproximadamente 15% em relação ao PEBD puro e essa resposta pode ter acontecido em função da maior concentração de material incorporado e por esse ter características de um elastômero, o que aumentou sua capacidade de deformação. Analisando as formulações contendo agente compatibilizante, a alteração significativa na deformação ocorre somente no *masterbatch*.

Observando o comportamento das formulações analisadas na tabela 13 juntamente com o gráfico ilustrado pela figura 14 e o cálculo do valor P do ANOVA, fica evidente que houve alteração estatisticamente significativa na propriedade de deformação, indicando que nessas condições de processamento, somente a adição direta de agente compatibilizante não foi efetiva.

Continuando com a análise, a formulação contendo o *masterbatch* apresentou melhora de aproximadamente 22% em relação à de PEBD-SG 60-40, sendo uma variação estatisticamente significativa segundo o valor P calculado pelo ANOVA (ficando abaixo de 0,05). Essa constatação demonstra que para essas condições de

processamento a mistura dos componentes da blenda foi mais efetiva, e que consequentemente o agente compatibilizante provavelmente cumpriu seu papel.

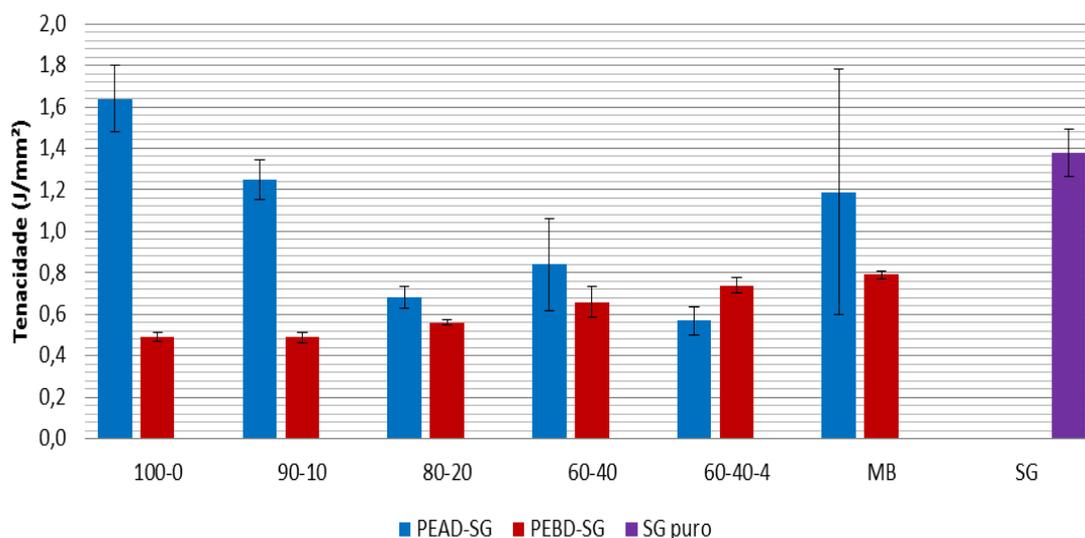
Figura 16 – Comparação da deformação na ruptura das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

Observando o gráfico da figura 16 é possível dizer que novamente a propriedade de deformação ficou próximo da linha da regra de mistura e, além disso, foi possível averiguar que o emprego do *masterbatch* foi eficaz, a ponto de provocar um desvio positivo em relação à linha da regra da mistura, sugerindo um aumento na compatibilidade, como pode ser visto no ponto acima da linha da regra de mistura.

Figura 17 – Valores médios de tenacidade para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

O comportamento da tenacidade na figura 17 mostra como a capacidade de absorção de energia até a ruptura nos dois materiais (a área sob a curva tensão deformação) portou-se de maneira semelhante à deformação na ruptura. Ou seja, no PEAD foi possível observar a tendência de redução na propriedade até a formulação contendo 20% de SG, seguida de leve aumento. No PEBD ficou evidente para todas as formulações a tendência de aumento de tenacidade.

Observou-se que o material resultante nas formulações de PEAD reduziu drasticamente a sua capacidade de absorção de energia antes de romper, mas a partir da composição contendo 40% de SG sem agente compatibilizante a tenacidade aumentou e tornou a cair na formulação seguinte contendo agente compatibilizante. Esse comportamento pode estar relacionado a falta ou a pouca adesão entre os componentes da blenda, que por sua vez podem estar sendo causados pelo mau emprego do agente compatibilizante que provavelmente, por não promover a adesão, atuou como concentrador de tensão reduzindo a tenacidade. A utilização do *masterbatch* aparentemente promoveu a melhor adesão entre os componentes da blenda, conferindo aumento nessa propriedade mecânica. A tabela 14 mostra estatisticamente como as formulações contendo agente compatibilizante variaram.

Tabela 14 – Valor P na comparação da tenacidade de formulações de PEAD

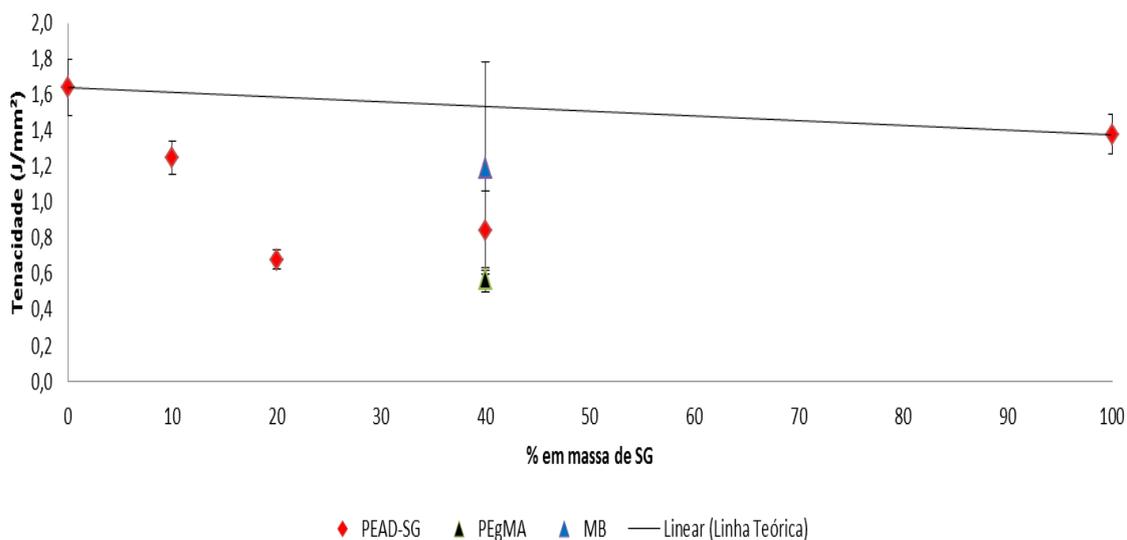
Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,0284164
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,1014767

Fonte: Autor

De acordo com valor P calculado pelo ANOVA, a redução na tenacidade entre os grupos analisados foi significativa, sendo evidenciada pelo valor abaixo de 0,05.

Apesar de aparentar uma melhora na tenacidade em função do *masterbatch*, demonstrada no gráfico da figura 17, o valor P calculado mostra que não houve variação estatisticamente significativa (ficando acima de 0,05), justamente pelo grande desvio padrão nas medidas.

Figura 18 – Comparação da tenacidade das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

De acordo com o gráfico da figura 18, novamente as formulações de PEAD demonstram ter baixa sinergia entre seus componentes, mas também foi possível observar que o *masterbatch* promoveu a melhoria desta interação, enquanto somente a incorporação do agente compatibilizante levou a piora desta propriedade mecânica.

Prosseguindo com a análise, mas observando o comportamento demonstrado pelas colunas do PEBD na figura 17, os resultados indicaram para a melhoria na

propriedade mecânica calculada conforme o teor de incorporação das aparas aumentou, mas de maneira sutil a ponto de não serem consideradas estatisticamente significativas segundo o ANOVA. A tabela 15 demonstra estes valores calculados.

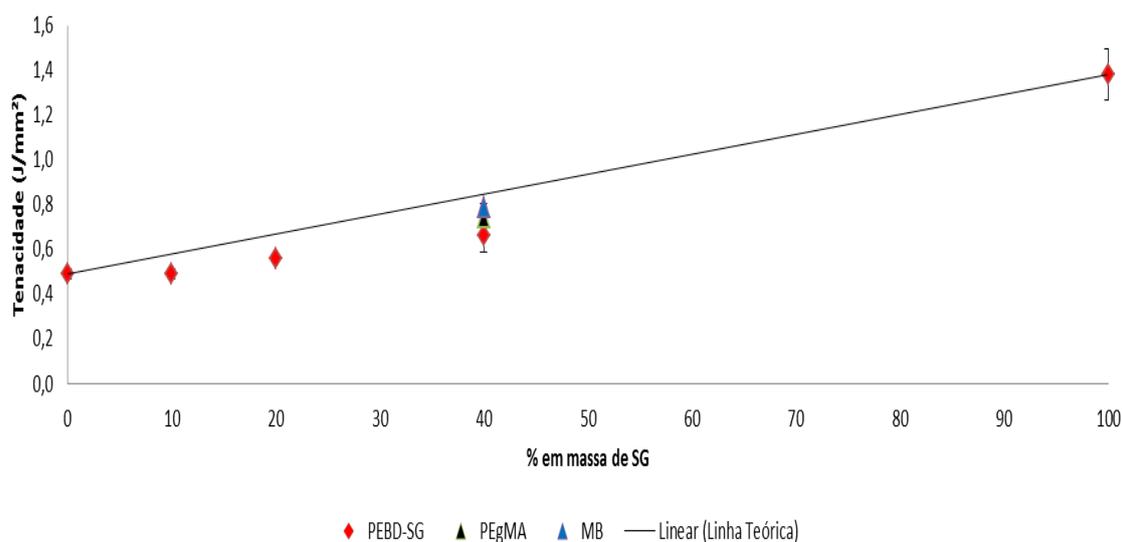
Tabela 15 – Valor P na comparação da tenacidade de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,6277217
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,0901820
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4 e PEBD-MB 60-40-4	0,0519158

Fonte: Autor

Analisando a tabela 15, o valor P calculado comparando cada grupo entre si a partir da formulação contendo 40% de SG, demonstra que não há variação estatisticamente significativa entre eles, portanto o aparente aumento da tenacidade está relacionado a grande dispersão de dados obtidos como é visto na figura 17. Neste caso, não há como dizer se a presença do agente compatibilizante bem como a utilização do *masterbatch* foi efetiva para o aumento da tenacidade.

Figura 19 – Comparação da tenacidade das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



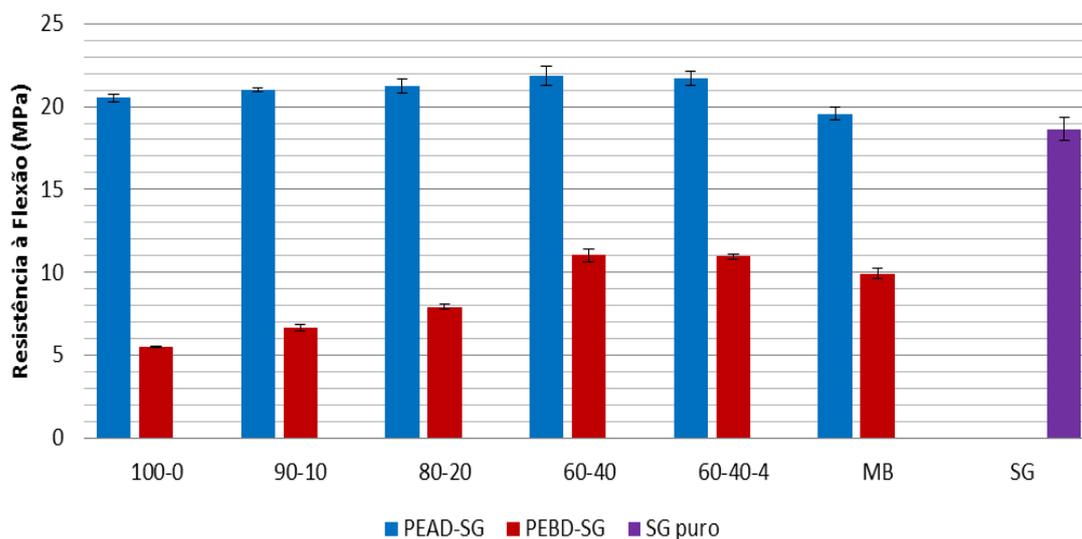
Fonte: Autor

Apesar do que foi exposto nos comentários anteriores, o gráfico da figura 19 demonstra novamente que os valores de tenacidade ficaram próximos, porém abaixo da linha da regra de mistura, mas também foi possível observar que tanto a incorporação do agente compatibilizante como o emprego do *masterbatch* agiu no sentido de aproximar mais essa linha, podendo indicar uma melhora na compatibilidade entre os componentes da blenda resultante, levando a melhoria desta propriedade mecânica.

4.4 ENSAIO DE FLEXÃO

Os gráficos de tensão x deformação e de propriedades mecânicas obtidos no ensaio de flexão de cada formulação encontram-se no apêndice B. As figuras 20 e 23 mostram a média dos valores obtidos para cada um dos corpos ensaiados para o PEAD e PEBD, ilustrando primeiramente a resistência à flexão (figura 20) e em seguida o valor do módulo elástico de flexão a 0,3% de deformação (figura 23).

Figura 20 – Valores médios de resistência à flexão para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

Na figura 20, analisando as colunas de resultados do PEAD, observou-se que houve leve aumento, mas com subsequente manutenção do comportamento de resistência à flexão conforme aumentou o teor de aparas de SG. Esse comportamento

não era esperado, uma vez que o SG apresenta resistência à flexão menor que a da matriz utilizada e, nesse caso, por se tratar de um ensaio de flexão os corpos de prova ficaram sujeitos a esforços de tração e compressão ao mesmo tempo, não foi possível identificar o efeito do agente compatibilizante. Neste experimento os esforços de tração tendem a ampliar o tamanho das falhas enquanto que os de compressão tendem a diminuir, tornando difícil a determinação correta da ação do PEgMA.

Segundo Cho e Jeon (1993), que estudaram a incorporação de ionômeros em polietileno, blendas de polímeros quimicamente similares podem ser imiscíveis e apresentar comportamentos difíceis de prever. Essa característica é recorrente em blendas envolvendo poliolefinas e é atribuída a diferença de polaridade entre as cadeias poliméricas da blenda (CHO; JEON, 1993).

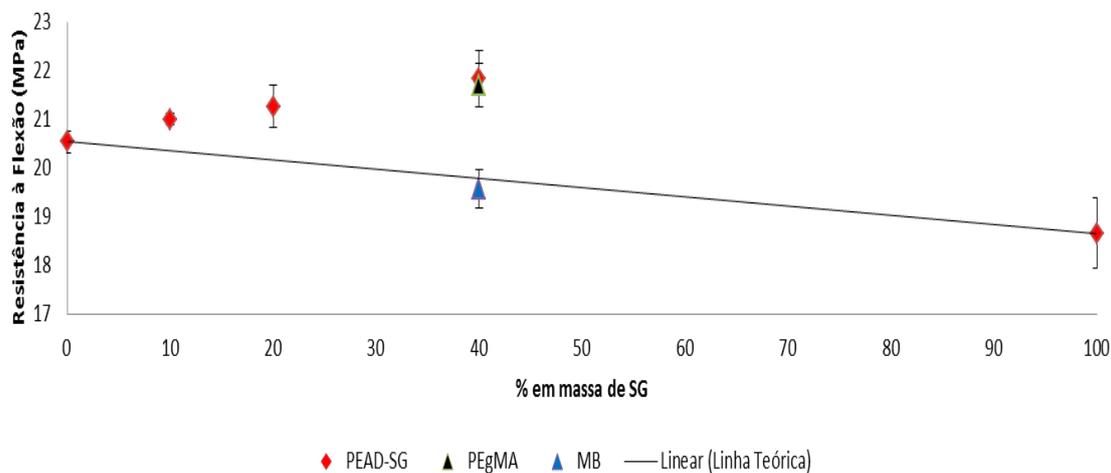
Na figura 20 é possível perceber que há uma leve queda na resistência à flexão a partir das formulações contendo agente compatibilizante, e utilizando o ANOVA, para determinar se houve alguma diferença estatisticamente significativa, fica evidente que há diferenças significativas na formulação com 10% de SG e na que contém o *masterbatch*. Ao que tudo indica o emprego do *masterbatch* para estas condições pode ter promovido a melhora na adesão entre os componentes da blenda. A tabela 16 demonstra os valores calculados.

Tabela 16 – Valor P na comparação da resistência à flexão de formulações de PEAD

Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 100-0 e PEAD-SG 90-10	0,0243766
PEAD-SG 90-10 e PEAD-SG 80-20	0,7735326
PEAD-SG 80-20 e PEAD-SG 60-40	0,0564531
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,4131741
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,0004250

Fonte: Autor

Figura 21 – Comparação da resistência à flexão das blendas de PEAD/SG com alinha da regra de mistura



Fonte: Autor

Apesar de ser esperada uma tendência de redução na resistência à flexão como mostra a figura 21, aparentemente ocorreu o inverso nas formulações de PEAD. Neste caso a regra de mistura indica haver sinergia entre os componentes da blenda. A única exceção ocorre na formulação onde é empregado o *masterbatch* indicando que a mistura foi efetiva em função da melhora na adesão que gerou o subsequente aumento da flexibilidade.

Segundo Xie, Xu e Zhou (1990), blendas envolvendo poliolefinas e ionômeros, podem ter comportamento aditivo, segundo a regra de misturas, e ainda assim apresentar comportamentos antagônicos. A sinergia entre os componentes de uma blenda não é só dependente da melhoria da adesão promovida por agentes compatibilizantes, mas também pelo grau de similaridade entre a estrutura dos componentes envolvidos (XIE; XU; ZHOU, 1991).

Voltando a figura 20 e observando as colunas de resultados do PEBD, aparentemente ele apresentou um comportamento análogo ao exposto pelo PEAD, onde ocorreu aumento na resistência à flexão conforme o aumento do teor de SG. Neste caso, pelo fato do SG ser mais resistente à flexão que o PEBD puro, o aumento na resistência à flexão era esperado. Com o auxílio do ANOVA, fica evidente que houve variações significativas em praticamente todas as formulações, exceto na primeira contendo agente compatibilizante. A tabela 17 demonstra estas variações.

Tabela 17 – Valor P na comparação da resistência à flexão de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 100-0 e PEBD-SG 90-10	0,0000078
PEBD-SG 90-10 e PEBD-SG 80-20	0,0000231
PEBD-SG 80-20 e PEBD-SG 60-40	0,0000024
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,8090295
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,0356130

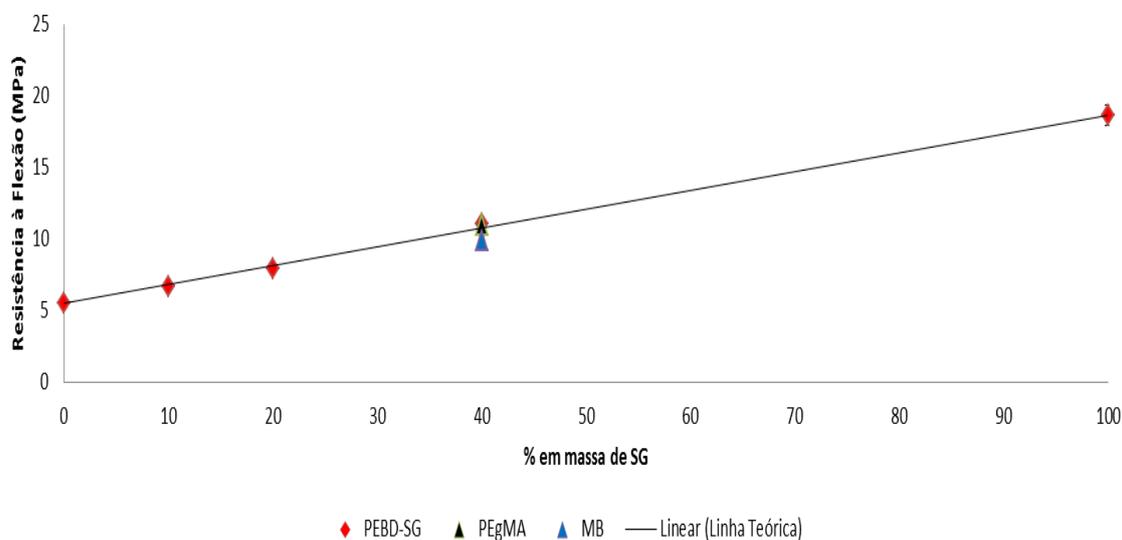
Fonte: Autor

Os grupos comparados nas três primeiras linhas demonstram através do valor P calculado que houve variações estatisticamente significativas conforme o teor das aparas de SG aumentou, corroborando a afirmação de que a incorporação das aparas aumentou a resistência à flexão.

A quarta linha da tabela 17 além de mostrar que não houve variação na propriedade mecânica (em função do valor P maior que 0,05), demonstra que novamente não foi possível identificar qualquer alteração no comportamento do material em função do agente compatibilizante devido ao tipo de solicitação que é imposta no ensaio de flexão.

Continuando a análise dos grupos que contém agente compatibilizante, a formulação na qual foi empregado um *masterbatch* no processamento, apresentou variação estatisticamente significativa para a redução da resistência à flexão do material. Este resultado provavelmente aconteceu em função da melhor adesão entre os componentes da blenda que levou a um comportamento mais próximo ao da matriz de PEBD.

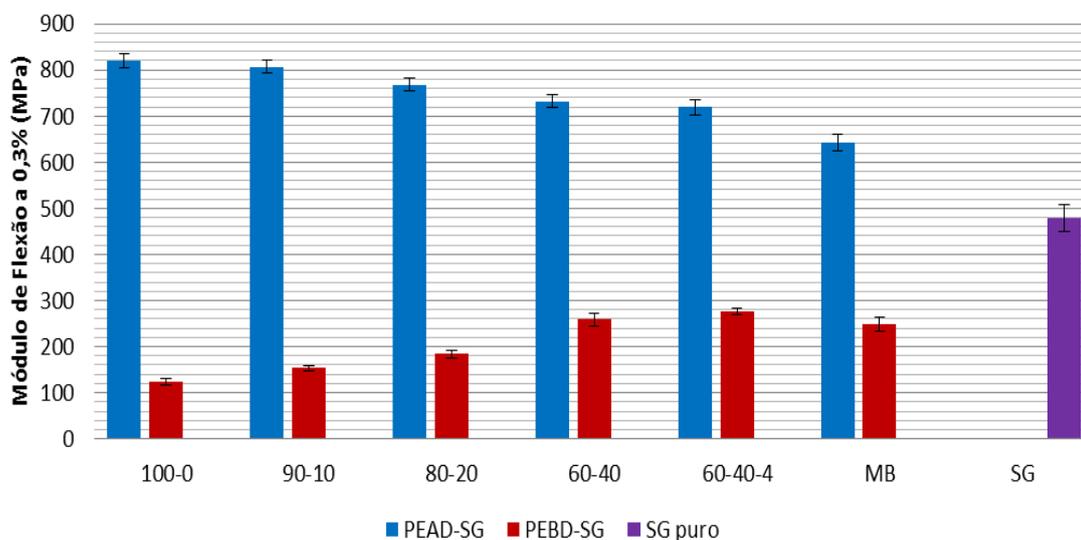
Figura 22 – Comparação da resistência à flexão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

No caso do PEBD, o gráfico da figura 22 indica haver a tendência de aumento na resistência à flexão do composto resultante conforme o teor de SG aumenta, mas essa redução seguiu bem próximo aos valores teóricos calculados segundo a regra de mistura, sendo possível dizer que houve boa sinergia entre os componentes da blenda.

Figura 23 – Valores médios de módulo de flexão a 0,3% para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

Observando a coluna de resultados do PEAD da figura 23, diferente do comportamento da resistência à flexão, observa-se uma redução gradativa no módulo elástico de flexão com o aumento do teor de aparas de SG, indicando haver aumento na flexibilidade do composto de PEAD. Este comportamento era esperado, uma vez que o módulo de flexão do SG é menor que o da matriz em que foi incorporado.

Nas formulações contendo agente compatibilizante só é possível dizer que houve variação estatisticamente significativa naquela onde foi empregado o *masterbatch*, pois segundo o ANOVA, houve alteração significativa na propriedade mecânica. A tabela 18 demonstra os valores calculados.

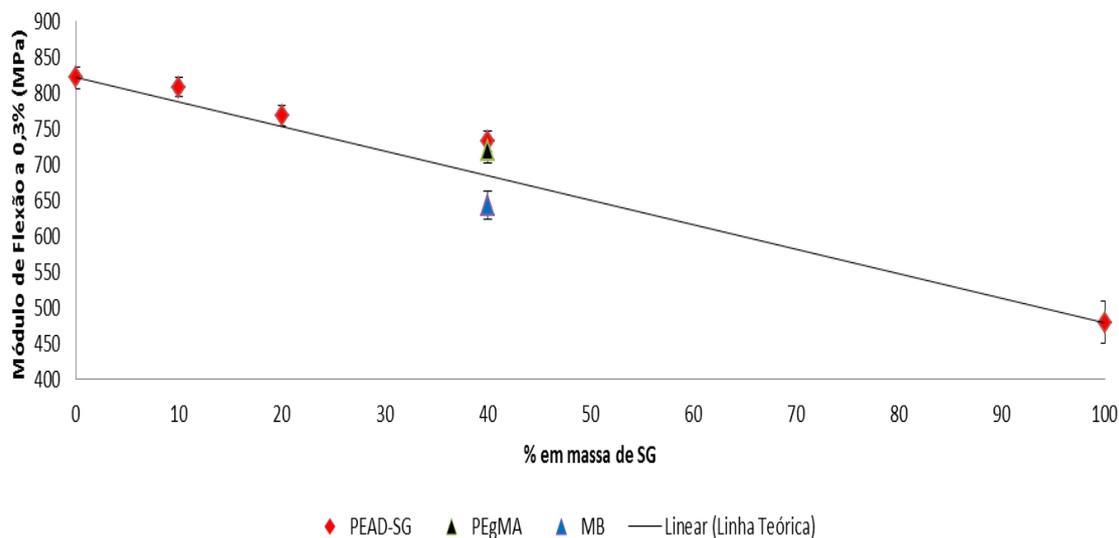
Tabela 18 – Valor P na comparação do módulo de flexão de formulações de PEAD

Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,1573650
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,0002123

Fonte: Autor

O valor P estando abaixo de 0,05 corrobora a afirmação feita anteriormente indicando que houve variação significativa desta propriedade mecânica na comparação entre os grupos analisados na tabela.

Figura 24 – Comparação do módulo elástico em flexão das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

A aplicação da regra de mistura ilustrada pelo gráfico da figura 24 mostra a tendência de aumento na flexibilidade em função da diminuição do módulo de flexão em cada formulação. A baixa adesão entre os componentes da blenda pode ter sido responsável pela obtenção dos resultados de módulo de flexão um pouco acima da linha da regra de mistura. O único ponto que aparece abaixo da linha de valores teóricos é justamente a da formulação que contém o *masterbatch*, indicando haver melhora na adesão de seus componentes em função do aumento na flexibilidade.

Partindo para a análise do PEBD na figura 23, o composto resultante demonstra ter um crescimento gradativo e estatisticamente significativo no módulo elástico de flexão conforme aumenta-se o teor de SG, indicando que houve redução na flexibilidade do material resultante. Esta resposta provavelmente se dá em função do material resultante ter um comportamento mais próximo do SG.

Nas formulações contendo agente compatibilizante, apesar de aparentemente haver diferenças nas colunas de resultados, os cálculos do ANOVA demonstram não haver variações significativas, conforme a tabela 19 ilustra.

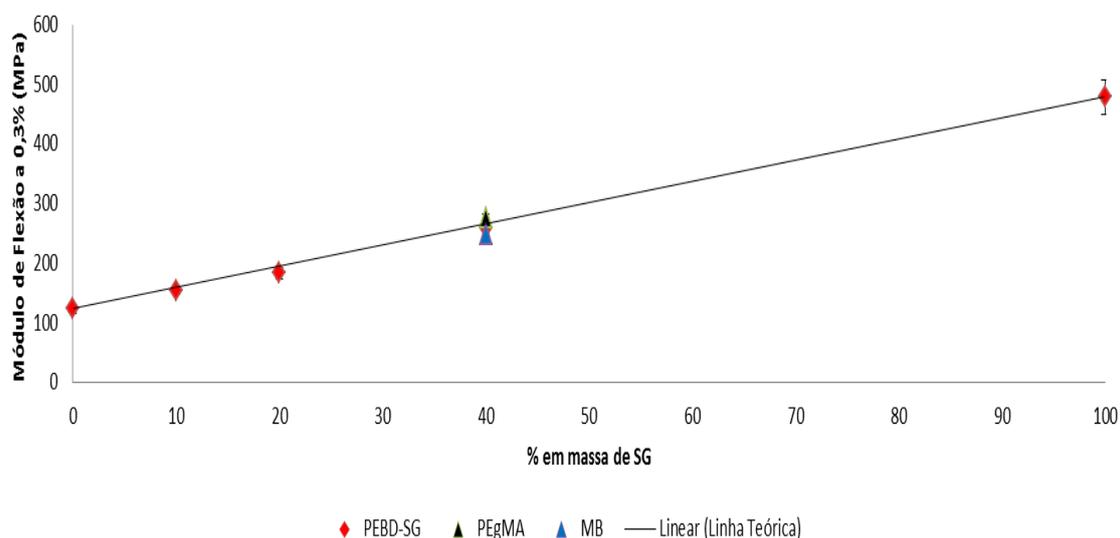
Tabela 19 – Valor P na comparação do módulo de flexão de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,0707834
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,5444851

Fonte: Autor

Não há variações estatisticamente significativas em ambas as comparações entre os grupos estudados, evidenciadas pelo valor P acima de 0,05.

Figura 25 – Comparação do módulo elástico em flexão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

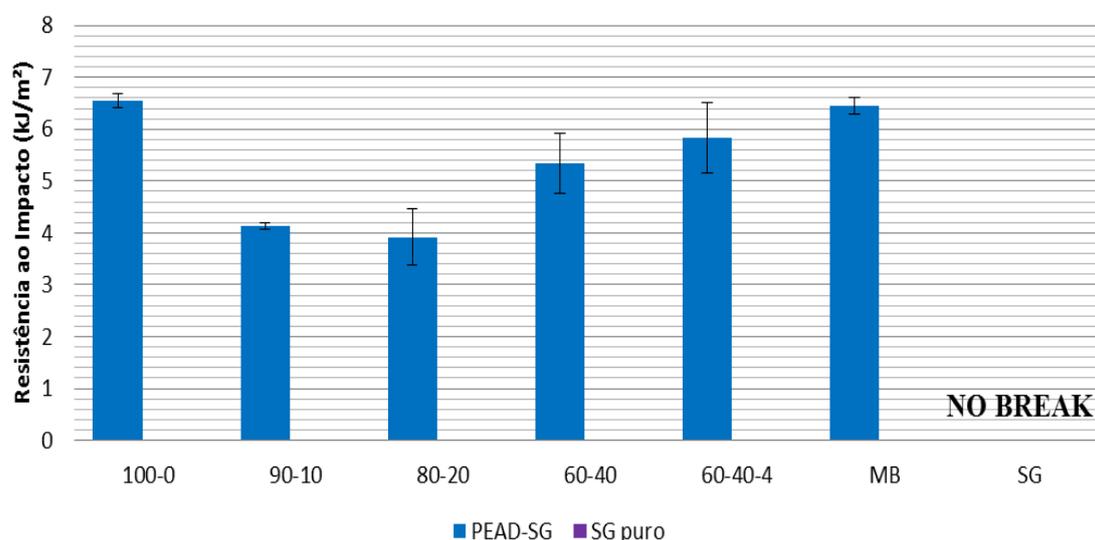
De forma análoga ao ocorrido com a resistência à flexão do PEBD, a figura 25 demonstra que os valores de módulo elástico de flexão ficaram praticamente em cima da linha da regra de mistura, e ficou evidente que a incorporação de SG reduziu a flexibilidade do composto resultante.

Vale ressaltar que de acordo com o fabricante o SG puro possui um módulo de flexão de 345 MPa, mas ao observar a coluna do SG puro é visível que este valor está acima do especificado, indicando que aparentemente o material das aparas sofreu algum tipo de degradação que pode estar relacionada ao aumento da cristalização e perda de transparência, tendo como consequência a perda de suas características originais. O que poderia explicar o aumento em seu módulo de flexão e a queda em sua flexibilidade.

4.5 ENSAIO DE IMPACTO

Neste ensaio, dez corpos de prova foram selecionados aleatoriamente de cada formulação, vale dizer que os corpos de prova de PEBD e SG puro não romperam à temperatura ambiente utilizando o martelo de 5,4J e, sendo assim, se fez necessário realizar o ensaio de impacto criogênico, tal como explicado na seção 3.6.3 deste trabalho. As figuras 26 e 28 a seguir demonstram as colunas calculadas a partir da média dos valores obtidos nos ensaios dos polietilenos comparados ao SG.

Figura 26 – Valores médios de quantidade de energia absorvida em kJ/m^2 para formulações de PEAD



Fonte: Autor

Na figura 26, as colunas do PEAD mostram que houve redução significativa na propriedade de absorção de impacto já na primeira formulação contendo apenas 10% de SG, partindo de $6,54 \text{ kJ/m}^2$ no PEAD puro para $4,14 \text{ kJ/m}^2$ (redução de 36%). Os corpos de prova contendo 20% de SG absorveram em média $3,92 \text{ kJ/m}^2$ no impacto (queda de 40% em relação ao PEAD puro). A redução na capacidade de absorção de energia é notável e significativa segundo os cálculos do ANOVA. A tabela 20 ilustra essa diferença.

Tabela 20 – Valor P na comparação da resistência ao impacto de formulações de PEAD

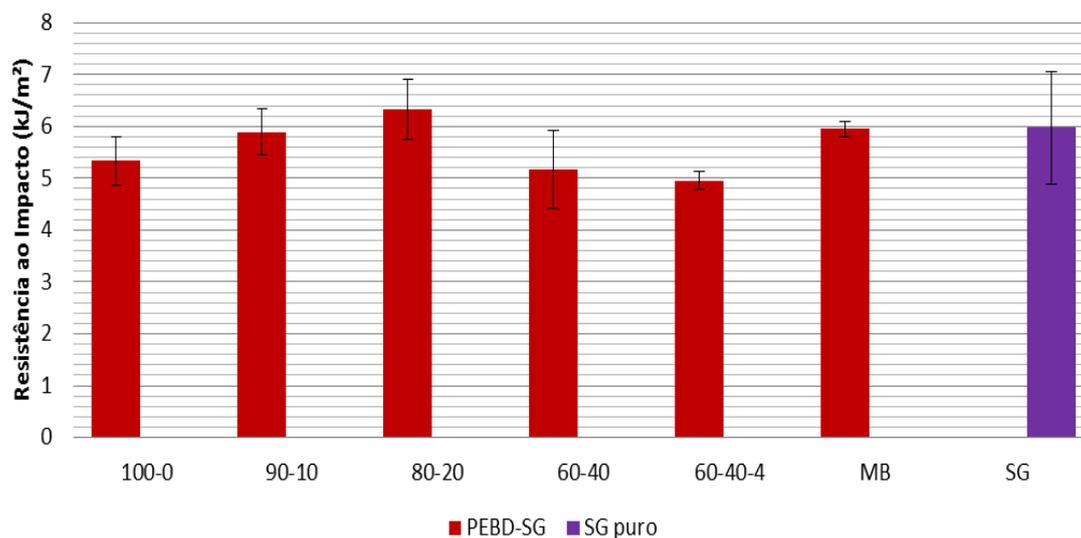
Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 100-0 e PEAD-SG 90-10	7,3782E-18
PEAD-SG 90-10 e PEAD-SG 80-20	0,0163585
PEAD-SG 80-20 e PEAD-SG 60-40	8,1917E-06
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,8085240
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,0012105
PEAD-SG 100-0 e PEAD-MB 60-40-4	0,6994829

Fonte: Autor

As últimas formulações contendo 40% de SG com e sem agente compatibilizante e a de *masterbatch*, apesar de também ficarem abaixo do valor atingido pelo PEAD puro, apresentaram melhora significativa da propriedade de absorção de impacto absorvendo 5,34; 5,83 e 6,42 kJ/m² (queda de 18; 11 e 2% respectivamente), vale ressaltar que houve melhora de aproximadamente 9% na absorção da formulação contendo PEgMA em relação à sem agente compatibilizante e de 20% na que foi empregada o *masterbatch* mas, segundo a ferramenta estatística ANOVA só houve diferença significativa na comparação entre a formulação contendo 40% de SG e a última, conforme é ilustrado na terceira linha da tabela 20.

A redução da capacidade de absorção de impacto pode estar relacionada à pouca adesão entre os materiais constituintes, e o aumento observado nas formulações contendo 40% de SG, relacionado à maior concentração de aparas. O único ponto onde é possível dizer que a adesão aparentemente melhorou a compatibilidade é justamente o da formulação contendo *masterbatch*, onde a capacidade de absorção de energia no impacto se equiparou a matriz de PEAD puro.

Figura 27 – Valores médios de quantidade de energia absorvida em kJ/m² para formulações de PEBD



Fonte: Autor

Observando as colunas do PEBD da figura 27, fica evidente a melhora na propriedade de absorção de impacto somente em baixas concentrações de SG onde, já na formulação contendo 10% de SG, há um aumento da energia absorvida partindo de 5,33 kJ/m² para 5,89 kJ/m² (aumento de aproximadamente 10%). A coluna correspondente à incorporação de 20% de SG o aumento na propriedade de absorção de impacto fica ainda mais pronunciada, chegando a 6,32 kJ/m² (aumento de 18% em relação ao PEBD puro). As formulações contendo 40% de SG e 40% de SG com 4% de PEGMA foram as únicas que ficaram pouco abaixo do valor atingido pelo PEBD puro, absorvendo 5,17 e 4,95 kJ/m² (queda de apenas 3 e 8% respectivamente), ainda comparando as duas formulações entre si, a que contém o agente compatibilizante apresentou queda de aproximadamente 4% em relação àquela sem agente compatibilizante e, segundo a ferramenta de análise de dados estatísticos ANOVA, não houve diferença significativa entre elas como a tabela 21 ilustra.

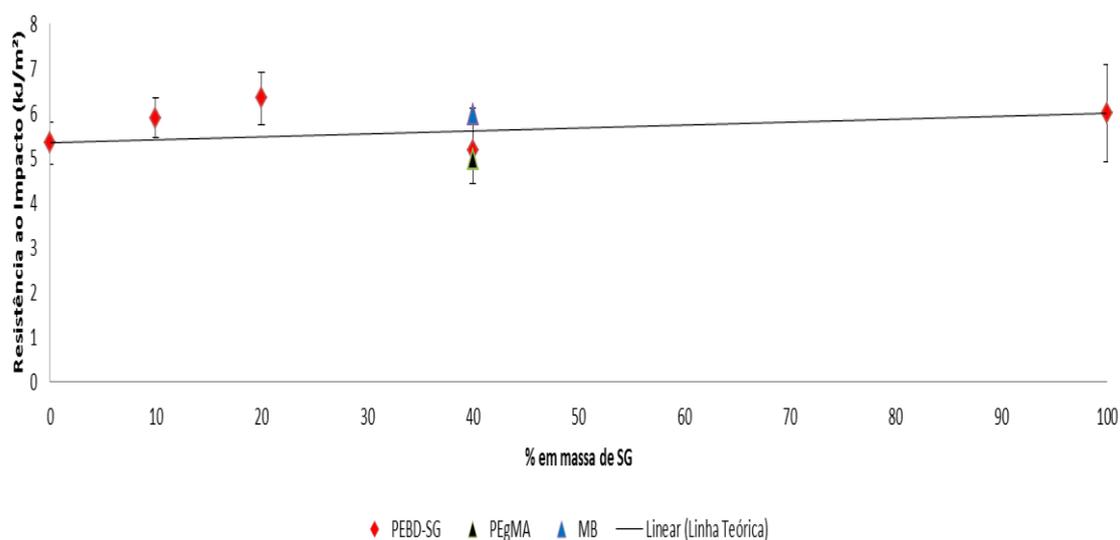
Tabela 21 – Valor P na comparação da resistência ao impacto de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 100-0 e PEBD-SG 90-10	0,1595629
PEBD-SG 90-10 e PEBD-SG 80-20	0,3547237
PEBD-SG 80-20 e PEBD-SG 60-40	0,1153503
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,5096973
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,2155538
PEBD-SG 100-0 e PEBD-MB 60-40-4	0,0639003

Fonte: Autor

Analisando a formulação na qual foi empregado o *masterbatch* e apesar de haver aumento de 11,6% na resistência ao impacto em relação ao PEBD puro, esta variação não foi significativa quando comparada a formulação contendo 40% de SG sem agente compatibilizante. Os resultados mostrados pela tabela 21 indicam que o composto resultante apresentou comportamento estatisticamente estável com o aumento do teor de SG, ou seja, a resistência ao impacto não foi significativamente afetada pela presença das aparas.

Figura 28 – Comparação da resistência ao impacto Charpy das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

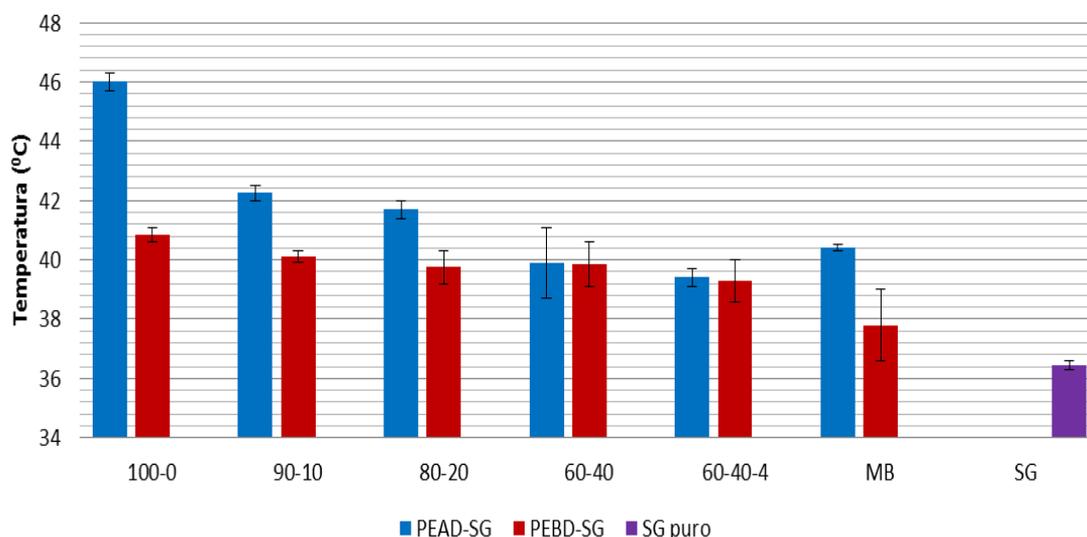
O gráfico ilustrado pela figura 28 demonstra que, segundo a regra de mistura, a incorporação de SG teve boa sinergia em praticamente todas as formulações do PEBD.

Aparentemente, na maior concentração de SG, há um desvio negativo em relação à regra de mistura provavelmente devido à dificuldade de dispersão das aparas na matriz, mas que a aplicação do *masterbatch* foi suficiente para promover a melhor adesão na blenda a ponto de aproximar o resultado obtido à linha de valores previstos pela regra.

4.6 ENSAIO DE HDT

Para conseguir levantar uma amostragem de no mínimo dois corpos de prova, suficientes para fazer uma repetição de acordo com a norma, foram selecionados quatro corpos de prova de forma aleatória para cada formulação. Conforme o ensaio seguiu, o software levantou as temperaturas na qual cada corpo de prova atingiu a deflexão de 0,25mm. A figura 29 ilustra as colunas contendo os valores médios de temperatura de deflexão para cada formulação, mostrando os dados obtidos para o PEAD e PEBD.

Figura 29 – Valores médios de temperatura de deflexão térmica para todas as formulações do PEAD e PEBD



Fonte: Autor

Observa-se que na figura 29 o valor de HDT para o PEAD puro foi de 46°C sob uma tensão de 0,455 MPa e que conforme o teor de SG aumentou a temperatura de deflexão térmica diminuiu. A redução de temperatura em cada formulação ficou evidente, mas esta só foi estatisticamente significativa comparando o PEAD puro com a formulação contendo 10% de aparas, conforme exibido na tabela 22.

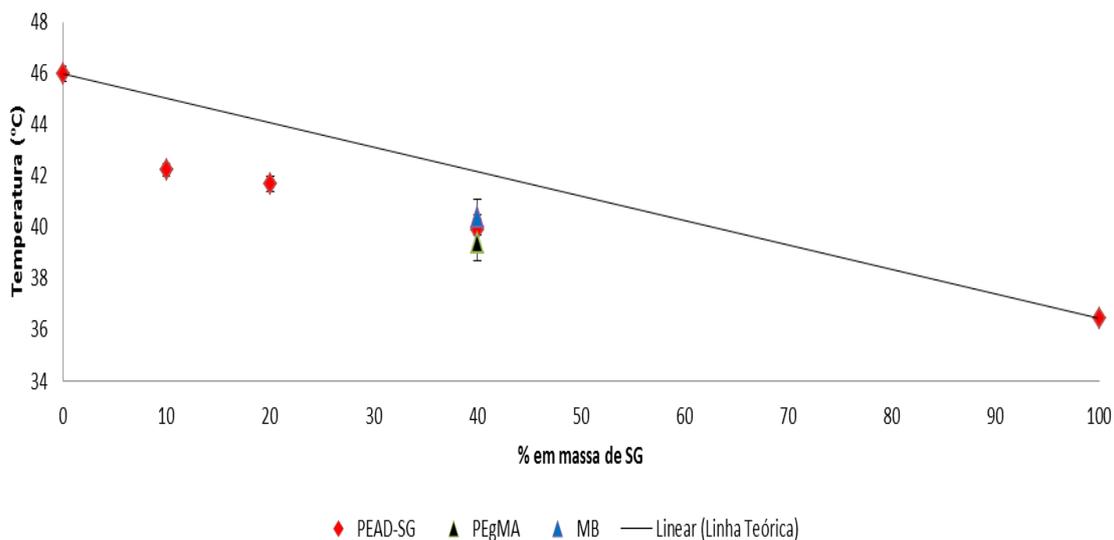
Tabela 22 – Valor P na comparação do HDT de formulações de PEAD

Formulações Comparadas	Valor P
PEAD-SG 100-0 e PEAD-SG 90-10	0,0106712
PEAD-SG 90-10 e PEAD-SG 80-20	0,2943497
PEAD-SG 80-20 e PEAD-SG 60-40	0,2828628
PEAD-SG 60-40 e PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	0,7251751
PEAD-SG 60-40 e PEAD-MB 60-40-4	0,7182819

Fonte: Autor

Analisando as temperaturas apresentadas, é possível constatar que o SG interferiu negativamente na temperatura de deflexão térmica do material de estudo, apresentando redução de aproximadamente 12% no HDT.

Figura 30 – Comparação do HDT das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

A comparação com a linha da regra de mistura demonstrada na figura 30 indica haver baixa sinergia entre os componentes da blenda, pelo desvio negativo em relação aos valores previstos na regra, como visto na tabela 22, não houve alterações estatisticamente significativas entre as formulações contendo 40% de aparas.

Observando as colunas do PEBD na figura 29, o valor de HDT para o PEBD puro foi de 40,85°C sob uma tensão de 0,455 MPa e conforme o teor de SG aumentou a

temperatura de deflexão térmica novamente diminuiu, mas em menor intensidade. Segundo o ANOVA não houve variações estatisticamente significativas em todas as formulações. A tabela 23 demonstra esses valores.

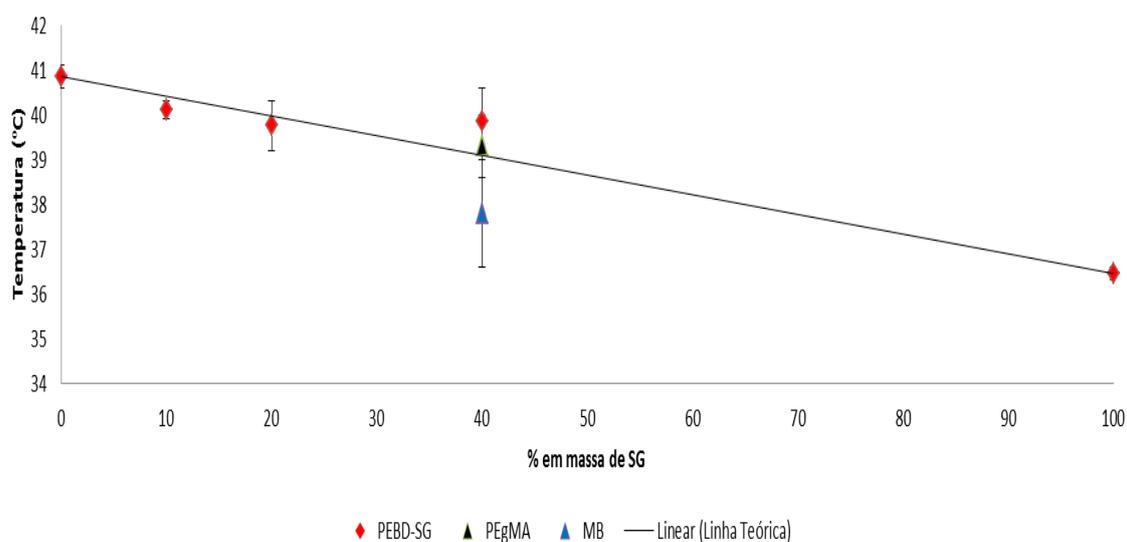
Tabela 23 – Valor P na comparação do HDT de formulações de PEBD

Formulações Comparadas	Valor P
PEBD-SG 100-0 e PEBD-SG 90-10	0,1439048
PEBD-SG 90-10 e PEBD-SG 80-20	0,6105096
PEBD-SG 80-20 e PEBD-SG 60-40	0,9241902
PEBD-SG 60-40 e PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	0,6455300
PEBD-SG 60-40 e PEBD-MB 60-40-4	0,2844361

Fonte: Autor

Segundo dados do folheto técnico, o HDT do ionômero de SG é de 43°C sob o carregamento de 0,455 MPa, mas este valor ficou na faixa de 36°C conforme apresentado na figura 29. Este resultado representa queda de 15% no HDT do ionômero que provavelmente está atrelado a degradação sofrida ao longo de seu processo de reciclagem e, por isso no caso do PEBD, o SG interferiu negativamente em sua temperatura de deflexão térmica.

Figura 31 – Comparação do HDT das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

A figura 31 mostra que o aumento da concentração de SG melhorou a sinergia entre os componentes da blenda apesar da redução na temperatura do HDT. Tanto a utilização direta de agente compatibilizante quanto o emprego do *masterbatch* atuaram de forma negativa na sinergia dos componentes, reduzindo ainda mais o HDT.

4.7 ENSAIO DE DSC

Todos os gráficos das transformações térmicas obtidas pelo software *Thermo Analysis Instruments* do DSC Q20 encontram-se no apêndice C. O DSC pôde determinar as temperaturas de fusão do composto resultante e do SG, a temperatura de transição vítrea do ionômero e a ação de cada matriz nesta Tg e também as entalpias de fusão envolvidas em cada transformação. Os resultados são apresentados na tabela 24.

Tabela 24 – Comparação dos resultados de DSC nas formulações de PEAD/SG e PEBD/SG

Formulação	PEAD-SG				PEBD-SG			
	T _{gl} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	ΔH _m (J/g)	T _{gl} (°C)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	ΔH _m (J/g)
100-0	---	---	137 ± 1,0	185 ± 0,2	---	---	109 ± 0,1	110 ± 0,6
90-10	48 ± 1,8	---	135 ± 1,8	183 ± 5,5	51 ± 0,1	---	109 ± 0,4	81 ± 1,4
80-20	47 ± 1,0	---	134 ± 1,2	166 ± 1,8	49 ± 1,1	---	108 ± 0,6	78 ± 2,8
60-40	49 ± 0,2	84 ± 0,6	135 ± 0,7	112 ± 3,1	49 ± 0,9	---	109 ± 0,6	60 ± 3,8
60-40-4	44 ± 1,6	83 ± 0,1	134 ± 0,6	107 ± 0,4	49 ± 0,7	---	109 ± 0,3	65 ± 0,8
MB	46 ± 0,1	84 ± 0,0	135 ± 0,3	109 ± 0,3	48 ± 0,5	---	109 ± 0,3	65 ± 0,4
SG	46 ± 0,4	88 ± 0,8	---	19 ± 1,5	46 ± 0,4	88 ± 0,8	---	19 ± 1,5

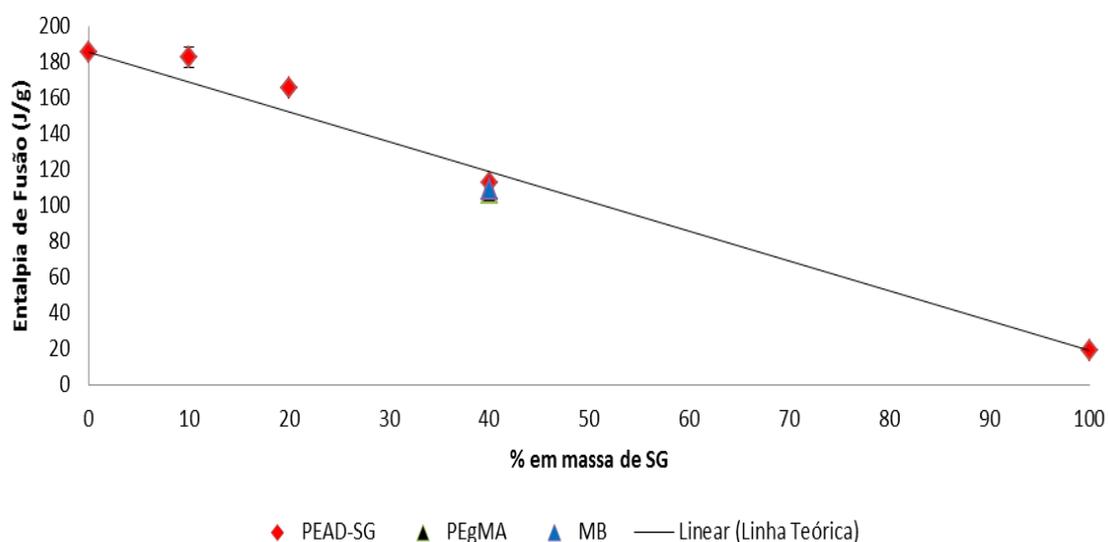
1 refere-se à fase SG e 2 à fase matriz

Fonte: Autor

Observando os resultados na tabela 24 para ambos os materiais, fica evidente que a incorporação de SG não teve efeito significativo na temperatura de fusão da fase matriz em nenhuma das concentrações estudadas.

A entalpia de fusão, que se subentende como sendo a energia necessária para que ocorra a fusão dos cristais do material, diminuiu conforme o teor de SG aumentou. Nesta análise, não é possível observar se as adições de agente compatibilizante bem como o emprego do *masterbatch* tiveram influência na entalpia de fusão.

Figura 32 – Comparação da entalpia de fusão das blendas de PEAD/SG com a linha da regra de mistura

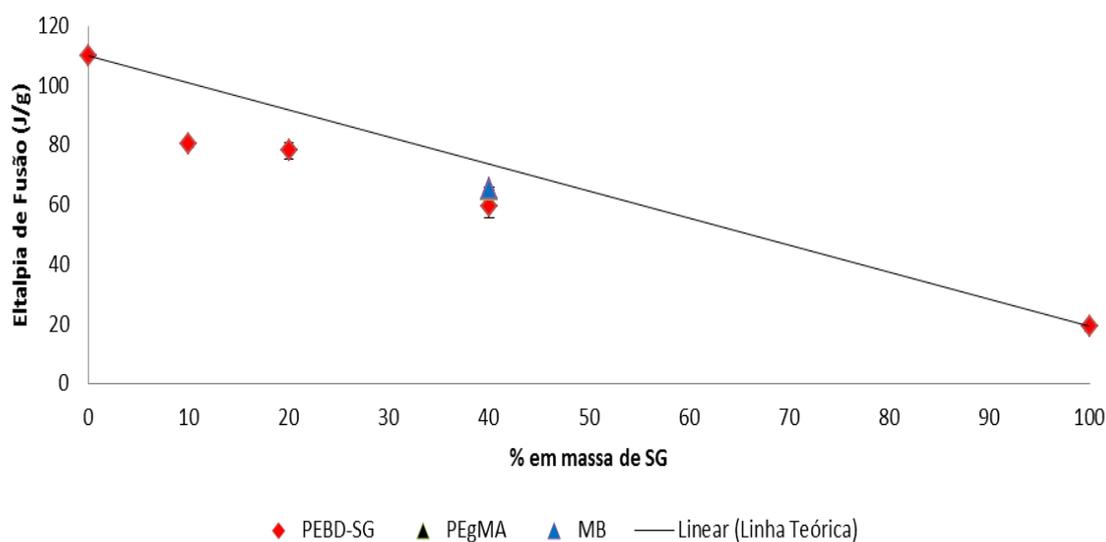


Fonte: Autor

A comparação com a linha da regra de mistura da figura 32, correspondente às formulações de PEAD, mostra um desvio positivo para as blendas de menor concentração de SG e, a partir de 40% de incorporação, a entalpia de fusão, que é proporcional ao grau de cristalinidade, é diminuída em todas as condições estudadas.

Segundo Ibnelwaleed e Hameed (2005), quando em uma blenda o grau de cristalização segue a regra de misturas, isso indica que cada fase cristalizou separadamente e quando ocorre um desvio positivo ou negativo, é um indicativo que ocorreu uma co-cristalização (IBNELWALEED; HAMEED, 2005). Portanto acredita-se que para as misturas possa ter ocorrido a co-cristalização, ou seja, as fases cristalizaram juntas.

Figura 33 – Comparação da entalpia de fusão das blendas de PEBD/SG com a linha da regra de mistura



Fonte: Autor

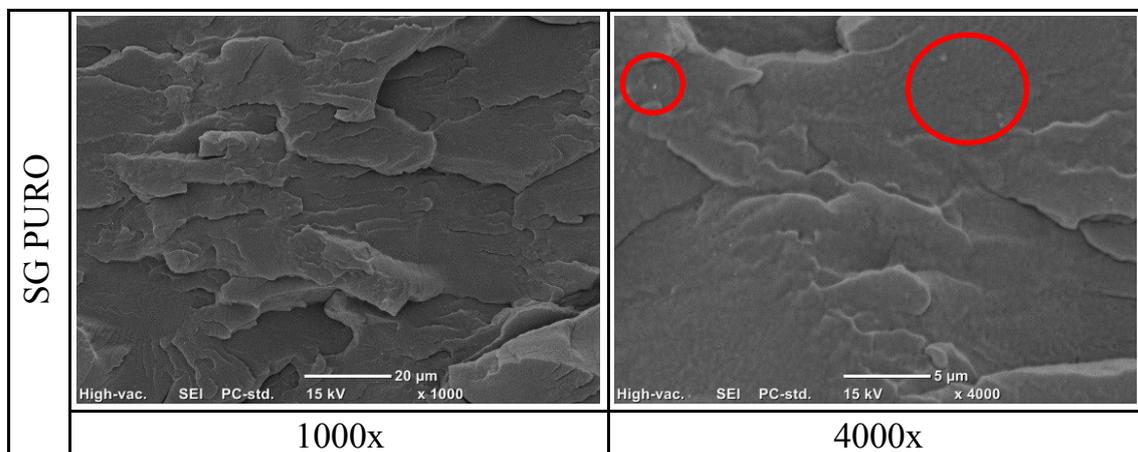
Diferente do que foi visto na figura 32, a comparação da entalpia de fusão com a linha da regra de mistura da figura 33 demonstra um desvio negativo, não havendo diferença visível nas formulações contendo o agente compatibilizante de forma direta e o *masterbatch*. Conforme mencionado anteriormente tanto o desvio negativo como o positivo indicam que para as misturas possa ter ocorrido a co-cristalização, ou seja, as fases cristalizaram juntas.

Seguindo com a análise, a tabela 24 demonstra como a Tg do SG se comportou ao ser incorporado as matrizes de PEAD e PEBD. É evidente o aumento da Tg em ambos os materiais, mas este é mais elevado na matriz de PEBD. O uso de agente compatibilizante reduziu a Tg do SG na matriz de PEAD enquanto que no PEBD ela se manteve estável. Ao que tudo indica a combinação do SG com matriz de PEBD confere menor mobilidade às regiões amorfas do composto resultante e que tendem a suavizar ou aumentar, conforme a concentração de SG aumenta. Em ambas as matrizes o *masterbatch* atuou de modo a aproximar a Tg aos valores do SG puro, demonstrando que a melhoria na mistura dos componentes aumentou a mobilidade geral das regiões amorfas dos compostos resultantes.

4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Nesta análise foram separados corpos de prova de impacto de cada formulação, a fim de observar o perfil das fraturas e averiguar se houve grandes alterações na estrutura do composto resultante. Todos os corpos de prova foram cortados e nivelados na região próxima à fratura, dispostos em sequência e recobertos por uma camada fina de ouro para possibilitar a observação da microestrutura. Foram utilizados diversos aumentos para auxiliar a visualização das superfícies de fratura. As figuras 34 a 44 mostram o caráter das fraturas resultantes.

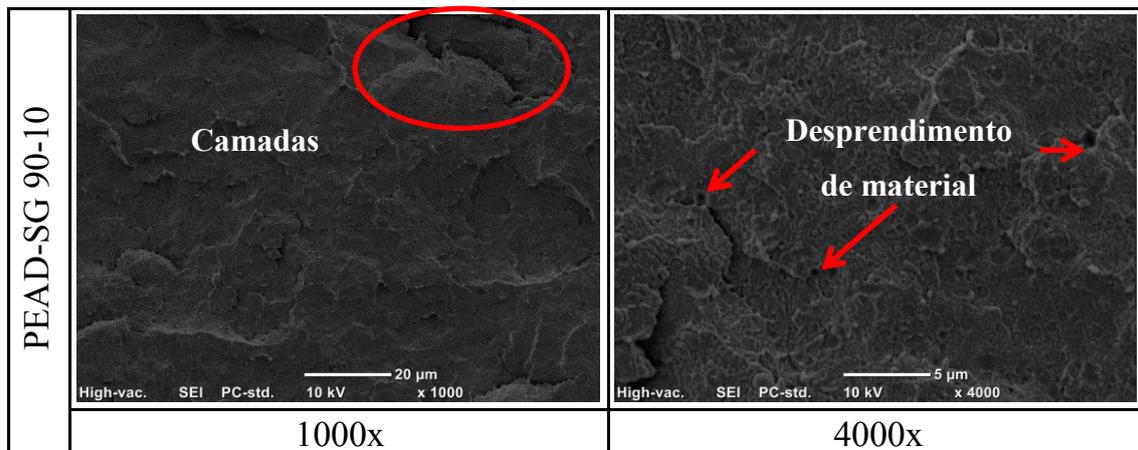
Figura 34 – Superfície de fratura SG puro



Fonte: Autor

Na figura 34, o SG puro apresentou uma fratura plana e com desprendimento de material aparentemente uniforme e em único plano e direção específica, provavelmente em função do fator de concentração de tensão gerado pelo entalhe. No maior aumento é possível enxergar pontos diferentes da matriz (assinalados nos círculos em vermelho), podendo ser atribuídos à presença de impurezas provenientes do processo de reciclagem.

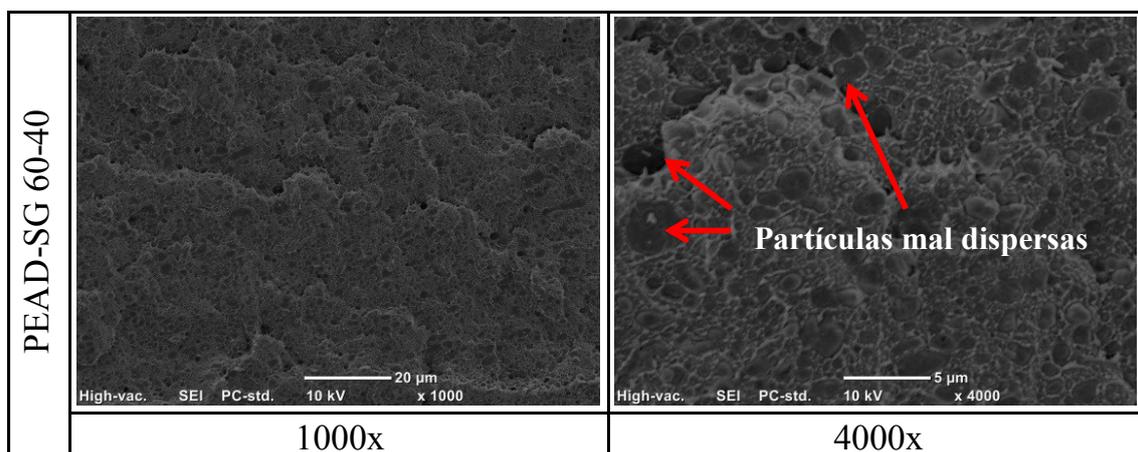
Figura 35 – Superfície de fratura PEAD-SG 90-10



Fonte: Autor

A figura 35 representa a superfície de fratura da formulação PEAD-SG 90-10, os aumentos disponíveis demonstram uma superfície plana, mas contendo certa rugosidade, o aparecimento de uma superfície em camadas e pontos de desprendimento de material. É possível enxergar a formação de duas fases distintas onde o SG aparece no formato de partículas mais claras que a matriz de PEAD.

Figura 36 – Superfície de fratura PEAD-SG 60-40

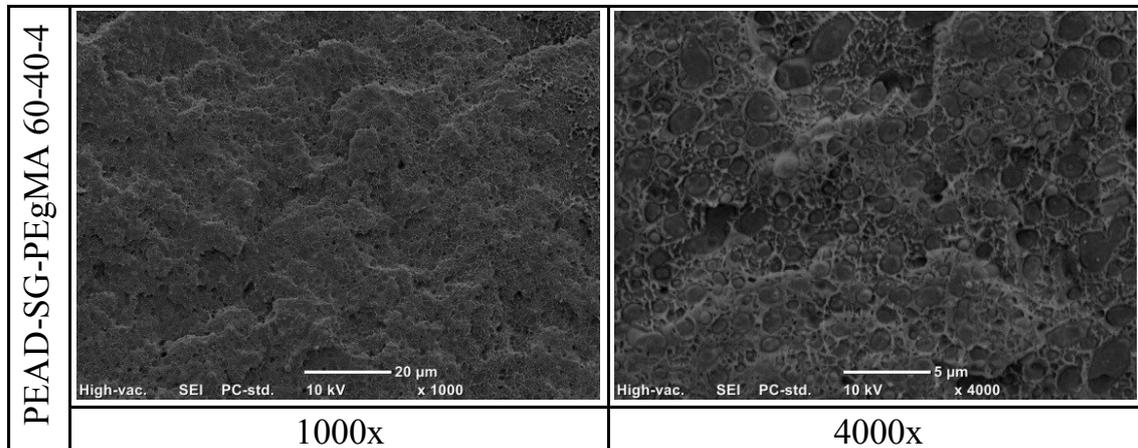


Fonte: Autor

Conforme o teor de SG aumenta, fica mais evidente a formação de uma estrutura bifásica. A figura 36 ilustra a superfície de fratura do PEAD-SG 60-40 onde, novamente é possível observar a formação de camadas, juntamente com diversos pontos de desprendimento de material (visíveis com 1000x de aumento). A superfície ganha maior

rugosidade e a dispersão do SG na matriz não é uniforme em função de presença de partículas de tamanhos variados no interior da fase matriz.

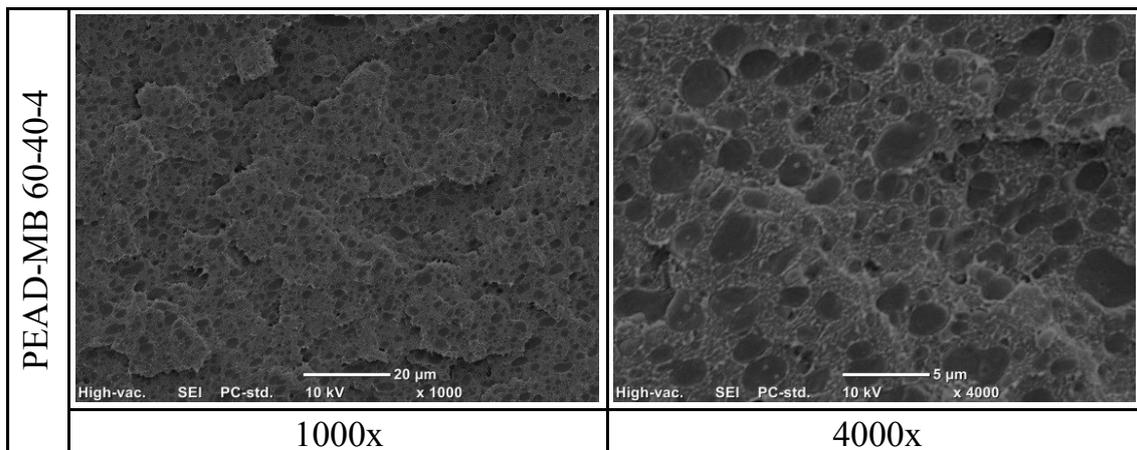
Figura 37 – Superfície de fratura PEAD-SG-PEgMA 60-40-4



Fonte: Autor

A superfície de fratura do PEAD-SG-PEgMA 60-40-4 da figura 37 demonstra que o agente compatibilizante aparentemente potencializou a separação das fases, ficando ainda mais evidente a falta de adesão entre elas. Todos os fatores apresentados desde a figura 34 até aqui corroboram a constatação de que a falta de adesão entre os componentes da blenda gerou uma condição de mistura física e não química entre eles e, sendo assim, pode ter gerado uma condição onde havia diversos pontos de concentração de tensão, o que explica a não uniformidade das superfícies de fratura. Outra constatação é de que nessas condições de processamento, o agente compatibilizante realmente não foi efetivo.

Figura 38 – Superfície de fratura PEAD-MB 60-40-4

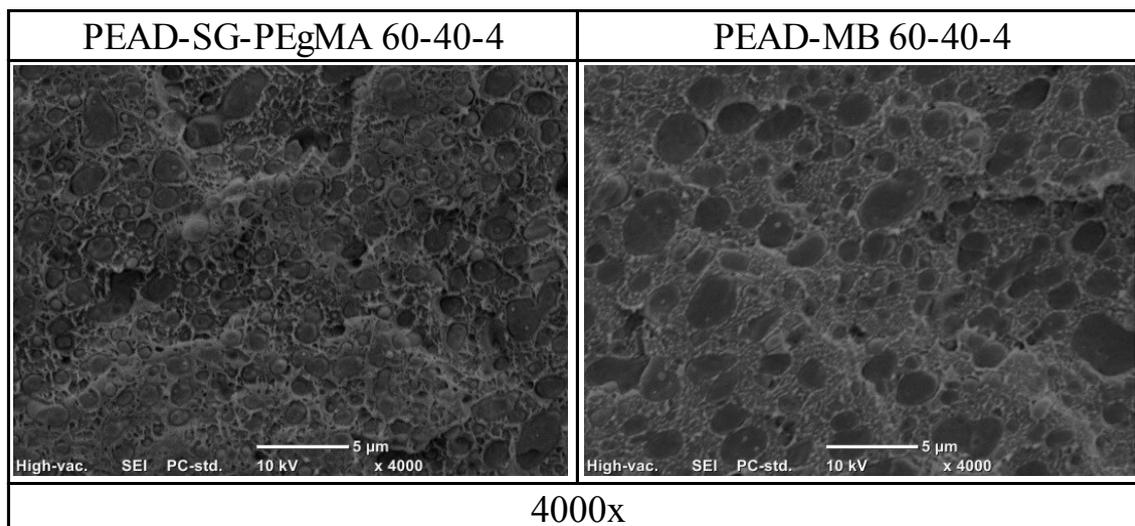


Fonte: Autor

A figura 38 demonstra que o emprego do *masterbatch* além de atenuar as imperfeições na superfície de fratura deixando-a com um aspecto mais plano, provavelmente também reduziu as tensões internas das aparas, melhorando a mistura com o agente compatibilizante e posteriormente com a matriz. Outro aspecto a ser ressaltado foi a redução de pontos de desprendimento de material, provavelmente devido à melhora na adesão e no envolvimento do SG ao redor da matriz de PEAD.

Ainda assim foi possível identificar a presença de duas fases, indicando se tratar de uma blenda imiscível. A melhoria nesses aspectos citados provavelmente foi o responsável pela melhoria nas propriedades mecânicas do material resultante, indicando que para essa condição de processamento, o agente compatibilizante foi efetivo.

Figura 39 – Superfícies de fratura das formulações de PEAD com 40% de SG

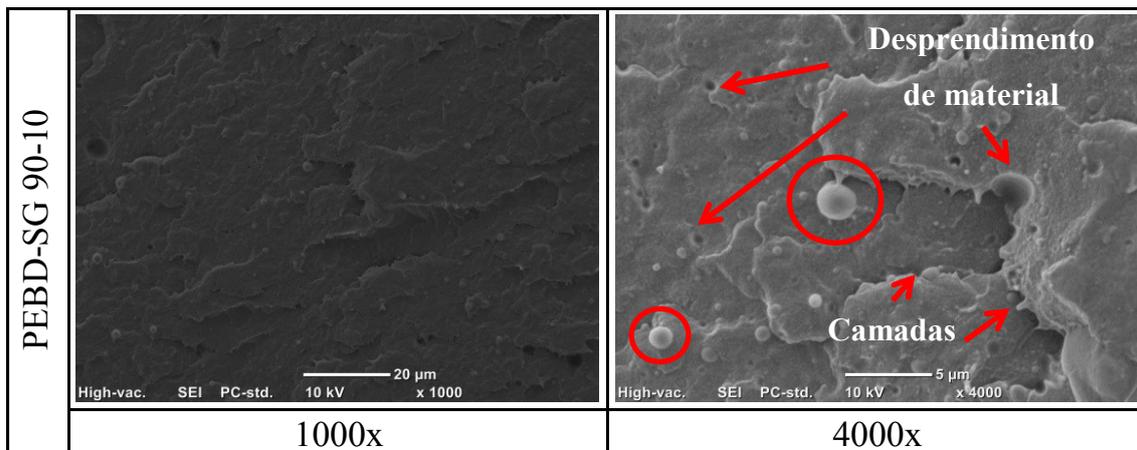


Fonte: Autor

A figura 39 mostra a comparação das superfícies de fratura das formulações de PEAD com 40% de SG para os dois tipos de processamento. A adição de agente compatibilizante via processamento direto a esquerda da imagem mostra que a fase SG/PEgMA envolveu a matriz de PEAD, mas sem promover boa adesão. Esta condição pode estar relacionada a quantidade de energia necessária para promover a interação entre os componentes da blenda ser mais elevada que a apresentada no processamento via uso de *masterbatch*.

O processamento ilustrado à direita da imagem mostra uma superfície mais homogênea e sem grandes deformidades. O emprego do *masterbatch* que consistiu em misturar inicialmente SG + PEgMA e em seguida incorporá-lo na matriz de polietileno, provavelmente diminuiu a quantidade de energia necessária para promover a interação entre os componentes e a matriz, o que pode ter auxiliado na melhora da adesão da blenda.

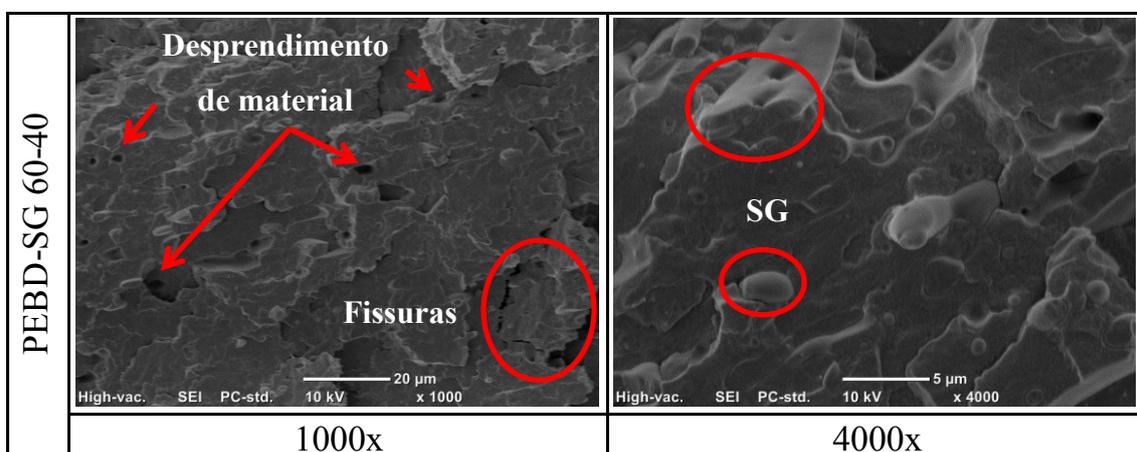
Figura 40 – Superfície de fratura PEBD-SG 90-10



Fonte: Autor

Partindo para análise da superfície de fratura do PEBD, a figura 40 mostra uma estrutura disposta em camadas onde é possível observar pontos de desprendimento de material e o SG disposto no formato de gotas ao longo do PEBD e uma morfologia quase co-contínua da matriz (Assinalados com os círculos em vermelho).

Figura 41 – Superfície de fratura PEBD-SG 60-40

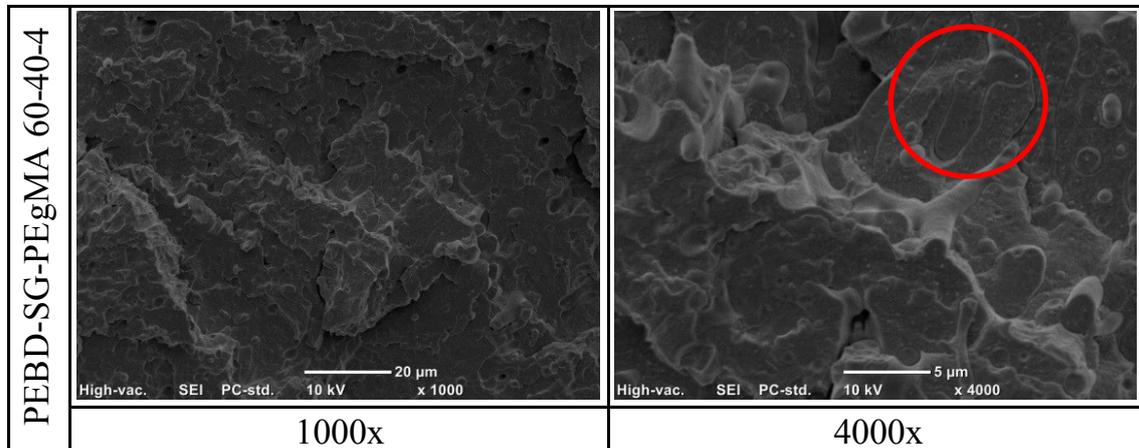


Fonte: Autor

Com o aumento no teor de SG aparentemente a estrutura se mantém predominantemente dividida em camadas onde existem diferentes relevos ao longo da superfície. A figura 41 também apresenta diversos pontos de desprendimento de material e algumas fissuras não uniformes ao longo da estrutura. Ainda é possível enxergar o SG disposto no formato de bolhas maiores e mais alongadas onde

aparentemente o material incorporado não está completamente aderido a matriz, mas sim emaranhado.

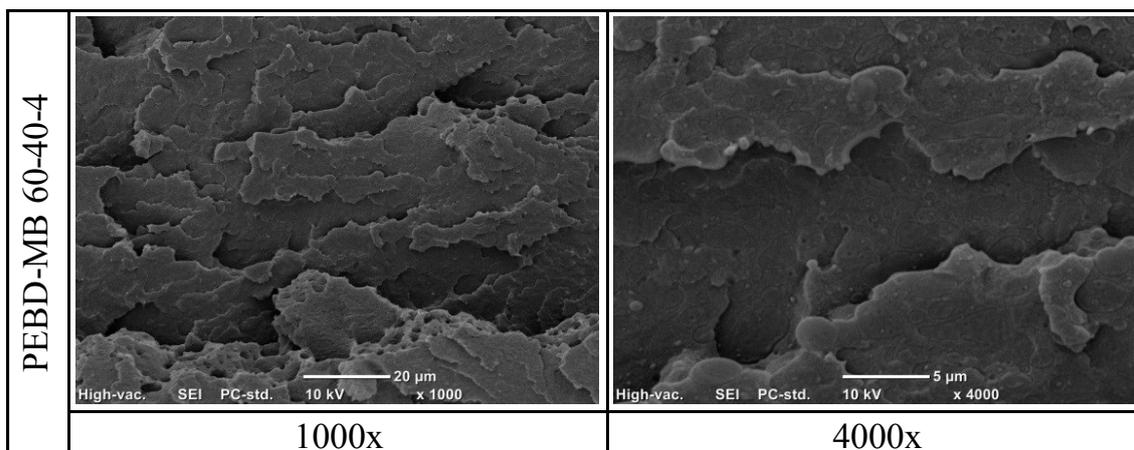
Figura 42 – Superfície de fratura PEBD-SG-PEgMA 60-40-4



Fonte: Autor

A figura 42 demonstra a superfície de fratura na formulação onde há a incorporação juntamente com o uso do agente compatibilizante. A estrutura ainda se apresenta contendo diversos relevos, menos pontos de desprendimento de material, mas é possível observar que a matriz está envolta mais intimamente com o que parece ser a segunda fase constituída da mistura entre o SG e o PEgMA. Ainda é possível enxergar o SG no formato de gotas ou cilindros alongados. Essa mistura mais íntima entre os componentes, ainda que não tenha sido a mais adequada, melhorou a tenacidade do composto resultante, mas não houve grandes alterações nas demais propriedades, indicando que a ação do agente compatibilizante para essas condições de processamento não foi efetiva.

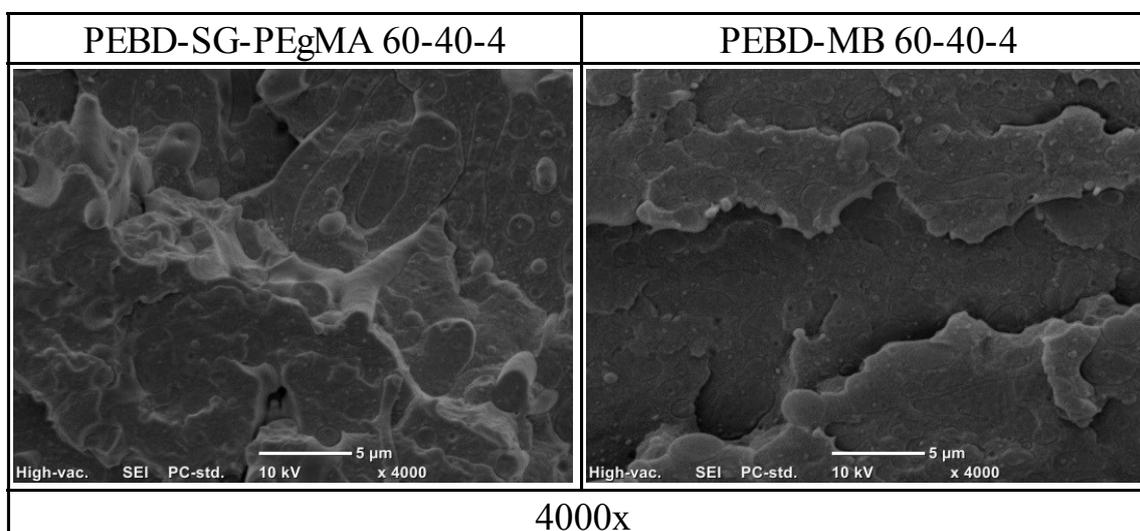
Figura 43 – Superfície de fratura PEBD-MB 60-40-4



Fonte: Autor

Analisando a figura 43, aparentemente houve grande alteração na estrutura resultante, no sentido de criar uma superfície mais plana e orientada. A superfície de fratura apresentou uma estrutura mais alongada e disposta em camadas mais finas, indicando que o emprego do *masterbatch* promoveu melhora significativa na adesão entre os componentes da blenda. Ainda é possível enxergar partículas pequenas, mas bem dispersas do SG ao longo da matriz. A melhor adesão entre os componentes fez o material resultante ter o comportamento mais próximo ao apresentado pelo SG puro, o que pode explicar a diminuição na flexibilidade, aumento no alongamento, tenacidade e resistência ao impacto.

Figura 44 – Superfícies de fratura das formulações de PEBD com 40% de SG



Fonte: Autor

A figura 44 mostra a comparação das superfícies de fratura das formulações de PEBD com 40% de SG para os dois tipos de processamento. A adição de agente compatibilizante via processamento direto a esquerda da imagem mostra que a fase SG/PEgMA também envolveu a matriz de PEBD, mas não gerou uma interação forte pois, existem pontos onde é perceptível a ocorrência de desprendimento de material. Comparando as duas superfícies, a imagem à esquerda apresenta tamanhos de partículas/estruturas maiores e mais heterogêneas que às da direita.

Ao que tudo indica, o processamento onde foi utilizado o *masterbatch* (direita da imagem) mostra uma superfície mais homogênea, com partículas/estruturas menores, melhor adesão entre as partes e sem grandes deformidades. Sendo assim, o uso do *masterbatch* provavelmente auxiliou na diminuição da energia necessária para promover a mistura entre componentes da blenda resultante, o que pode ter auxiliado na melhora da adesão.

5 CONCLUSÕES

A incorporação do ionômero Sentryglas® nas matrizes de polietileno de alta e de baixa densidade foi realizada com êxito, utilizando extrusora dupla rosca corrotante.

O emprego do *masterbatch* entre o ionômero e o agente compatibilizante foi realizado com êxito, havendo melhorias sensíveis na adesão entre os componentes e consequentemente nas propriedades mecânicas.

Sob tração, o PEAD apresentou propriedades inferiores ao composto puro, mantendo a mesma tendência de redução em todos os aspectos dessa análise, tendo melhoria apenas na formulação em que foi empregado o *masterbatch*. O PEBD apresentou aumento em todas as suas propriedades mecânicas em relação ao composto puro, não havendo grandes alterações na formulação contendo o *masterbatch*.

Sob flexão, o material das aparas conferiu ao composto de PEAD um aspecto mais flexível, enquanto no PEBD, a matriz apresentou aumento de suas propriedades conforme aumentou-se o teor de incorporação de ionômero, havendo apenas uma maior aproximação dessas propriedades às características do SG.

No impacto, a matriz de PEAD apresentou melhora sensível em sua capacidade de absorção de energia conforme o teor de aparas aumentou. A formulação com 40% de SG com *masterbatch* se portou igual à matriz de PEAD puro.

O PEBD no impacto manteve-se estatisticamente estável em relação à sua capacidade de absorção de energia, a resistência ao impacto não variou mesmo com o aumento dos teores de SG.

Apenas no composto de PEAD a formulação contendo *masterbatch* aumentou a resistência ao impacto.

O HDT diminuiu no PEAD em aproximadamente 12% com o aumento do teor de aparas. O HDT do SG reciclado reduziu em 15% em relação ao valor especificado pelo fabricante.

O agente compatibilizante de PEgMA não apresentou o efeito desejado no processamento direto, apesar de ter havido mudanças em algumas propriedades, estas não se mostraram estatisticamente significativas.

O emprego do *masterbatch* melhorou a adesão entre os componentes da blenda nas duas matrizes, melhorando também as propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

AGNELLI, J. A. M. **Boletim técnico Braskem**: glossário de termos aplicados em polímeros, n.08 PVC, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1131 – 08**: Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry (Reapproved 2014). Philadelphia PA, Apr. 2008.

_____. **ASTM D648 – 16**: Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position. Philadelphia PA, Apr. 2016.

_____. **ASTM D6110 – 10**: Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics. Philadelphia PA, Apr. 2010.

_____. **ASTM D638 – 10**: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Philadelphia PA, Apr. 2010.

_____. **ASTM D790 – 02**: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Philadelphia PA, Apr. 2002.

ANJOS, A. **Curso Planejamento de Experimentos I**: notas de aula. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2005. 97 f. Apostila. Disponível em: <<https://docs.ufpr.br/~aanjos/CE213/apostila.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2018.

ANTONY, P.; DE, S. K. The effect os zinc stearate on melt-processable ionomeric blends based on zinc salts of maleated high-density polyethylene and maleated EPDM rubber. **Polymer**, v. 40, n. 6, p. 1487-1493, Mar. 1999. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386198003620>>. Acesso em: 10, mai. 2018.

BELLINGER, M. A.; SAUER, A.; HARA, M. Tensile Fracture Properties of Rigid-Rigid Blends Made of Sulfonated Polystyrene Ionomer and Polystyrene. **Macromolecules**, New Jersey, v. 27, n. 21, p. 6147-6155, Oct. 1994. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma00099a033>>. Acesso em: 08, mai. 2018.

SENNA, A. **“We don’t need myths”**: Disponível em: <<https://www.pinterest.com/pin/499969996102983004/>>. Acesso em: 24 maio 2016.

COUTINHO, F. M. B. **Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações**, 2003. p. 1 – 13 Artigo de divulgação Polímeros: Ciência e Tecnologia Vol. 13, nº1 – Instituto de Química, UERJ.

CHO, K.; JEON, H. K.; MOON, T. J. Thermal and mechanical properties of HDPE/ionomer blends. **Journal of Materials Science**, Korea, v. 28, n. 24, p.6650-6656, Jan. 1993. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2F00356410>>. Acesso em: 23, abr. 2018.

DE ALMEIDA, G. A. **Incorporação de refugo de ionômero em composto de PP/EPDM/talco**, 2015. 71p. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Polímeros) – Faculdade SENAI de Tecnologia Ambiental, São Bernardo do Campo, São Paulo.

DUPONT. **Press release 2008**. Disponível em: <http://www2.dupont.com/Media_Center/pt_BR/news_releases/2008/pnip_sentryglas_09mm.html>. Acesso em: 20, mai. 2016.

DUPONT. **Dupont™ Sentryglas® - Laminated Glass Interlayers**, 2009. Catálogo de produto.

EL-HIBRI, M. J.; SHARI, W. A. Handbook of Thermoplastics. **Taylor & Francis Group, LLC**, v. 2, Feb. 2016. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781466577237>>. Acesso em: 01, out. 2018.

GALVAN, D. **Estudos de híbridos de ABS e mistura binária de argilas montmorilonita organofílicas**, 2012. 216 f. Dissertação (Mestrado em engenharia química) – Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GALVANI, F.; PESSAN, L. A. **Efeitos da incorporação de ionômeros de poliéster na estrutura e cristalinidade do poli(tereftalato de etileno) (PET)**, 2003. p. 1075 Anais do 7º Congresso Brasileiro de Polímeros, Minas Gerais – Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais.

GUTIÉRREZ, M.; BRAHAM, E. Ionómeros: poli(etilen-acrilato de metilo) modificado con sales de sodio, calcio y aluminio, **Revista de la Sociedad Química de México**, México. v. 43, n. 6, p. 204-210, Nov./Dec. 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/26465488_Ionomeros_poli-etilen-acrilato_de_metilo_modificado_con_sales_de_sodio_calcio_y_aluminio>. Acesso em: 23, abr. 2018.

HARA, M.; SAUER, J. A. Ionomer Blends: Morphology and Mechanical Properties – Department of Chemical and Biochemical Engineering, Rutgers University, Korean J. **Chem. Eng.**, v. 15, n. 4, p. 353-361, 1998.

IBNEALWALEED A. HUSSEIN; HAMEED, T. Influence of Branching Characteristics on Thermal and Mechanical Properties of Ziegler–Natta and Metallocene Hexene Linear Low-Density Polyethylene Blends with Low-Density Polyethylene. **Wiley Periodicals, Inc.**, v. 97, p. 2488-2498, Jun. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/app.21985>>. Acesso em: 01, out. 2018.

IONOMERS. Disponível em: <<http://pslc.ws/macrog/ionomer.htm>>. Acesso em: 23 maio 2016.

JIANG, M.; ZHOU, J.; ZHANG, Z. Compatibilization in ionomer blends. **Polymer Bulletin**, v. 30, n. 4, p. 449-453, Apr. 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2F978-3-642-00338-4_79>. Acesso em: 23, abr. 2018.

KALFOGLOU, N. K.; SKAFIDAS, D. S.; SOTIROPOLOU, D. D. Compatibilization of blends of poly(ethylene terephthalate) and linear low density polyethylene with the ionomer of poly(ethylene-co-methacrylic acid). **Polymer**, v. 35, n. 17, p. 3624-3630, Aug. 1994. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/003238619490538X>>. Acesso em: 10, mai. 2018.

LAHOR, A.; NITHITANAKUL, M.; GRADY, B. P. Blends of low-density polyethylene with nylon compatibilized with a sodium-neutralized carboxylate ionomer. **European Polymer Journal**, v. 40, n. 11, p. 2409-2420, Nov. 2004. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0014305704002484>>. Acesso em: 10, mai. 2018.

MAXPRESS. **Vidros temperados e laminados com DuPont™ Sentryglas®**.

Disponível em:

<http://www.maxpressnet.com.br/Conteudo/1,479310,Vidros_temperados_e_laminados_com_DuPontTM_SentryGlas_auxiliam_em_estruturas_de_grandes_obras_,479310,6.htm>. Acesso em: 20 maio 2016.

MARX, C. L.; CAULFIELD, D. F.; COOPER, S. L. Morphology of Ionomers.

Macromolecules, Wisconsin, v. 6, n. 3, p. 344-353, May. 1973. Disponível em:

<<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ma60033a007?journalCode=mamobx>>. Acesso em: 17, mai. 2018.

MEISTER, J. Polymer Modification: Principles, Techniques, and Applications.

Organic Process Research & Development, v. 5, n. 2, p. 189-190, Jan. 2001.

Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/op0001133>>. Acesso em: 01, out. 2018.

MEKHILEF, N.; KADI, A. A.; AJJI, A. Blends of modified polycarbonate an high density polyethylene. **Polymer Engineering & Science**, v. 32, n. 13, p. 894-902, Jul. 1992. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.760321309>>. Acesso em: 10, mai. 2018.

MICROSCOPIA Eletrônica de Varredura. Disponível em:

<<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 16, mai. 2016.

OLIVEIRA, F. R. **Efeito da Incorporação de Aparas do Ionômero Sentryglas nas Propriedades de Engenharia do ABS**. 2016. 83 f. TFC (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2016.

OKOROAFOR, E. U.; VILLEMAIRE, J. P.; AGASSANT, J. F. The viscosity of immiscible polymer blends: influences of the interfase and deformability. **Polymer**, v.33, n. 24 p. 5264-5271, 1992. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)90811-A](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)90811-A)>. Acesso em: 24, set. 2018.

RABELO, M. S. **Aditivção de Polímeros**. ed. 1. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2000. p. 179.

SAMUEL, J. *Synthesis and Characterization of Novel Ionomers based on Styrene Butadiene Copolymers*. 2002. 145 p. Doctor of Philosophy – Cochin University of Science and Technology, Kerala, India, 2002.

STYROLUTION. **Product information:** Terluran® GP-22. Ludwigshafen, 2009-2011. Disponível em: <http://www.ineos-styrolution.com/Product/Terluran_Terluran-GP-22_SKU300600120827.html>. Acesso em: 30 maio 2016. Catalogo de produto.

SUH, K. S.; DAMON, D.; TANAKA, J. Space charge in polyethylene/ionomer blends. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n. 1, p. 1-11, Feb. 1995. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/368675/>>. Acesso em: 11, mai. 2018.

SENTRYGLAS AGORA EM ROLOS. **Revista Tecnologia & Vidros**, Taubaté, ed. 72. Disponível em <<http://www.vidros.inf.br/sentryglas-agora-em-rolos/>>. Acesso em: 20 maio 2016.

UTRACKI, L. A.; DEMOULIN, M. M. Polypropylene alloys and blends with thermoplastics. **Springer link**, v. 2, p. 50-94, 1995. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0521-7_3>. Acesso em 01, out. 2018.

XIE, H.Q.; XU, J.; ZHOU, S. Polymer blends with two kinds of elastomeric ionomers. **Polymer**, v. 32, n. 1, p. 95-102, 1991. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0032-3861\(91\)90568-4](https://doi.org/10.1016/0032-3861(91)90568-4)>. Acesso em 05, dez. 2018.

APENDICE A – ENSAIO DE TRAÇÃO

Figura 45 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEAD em tração

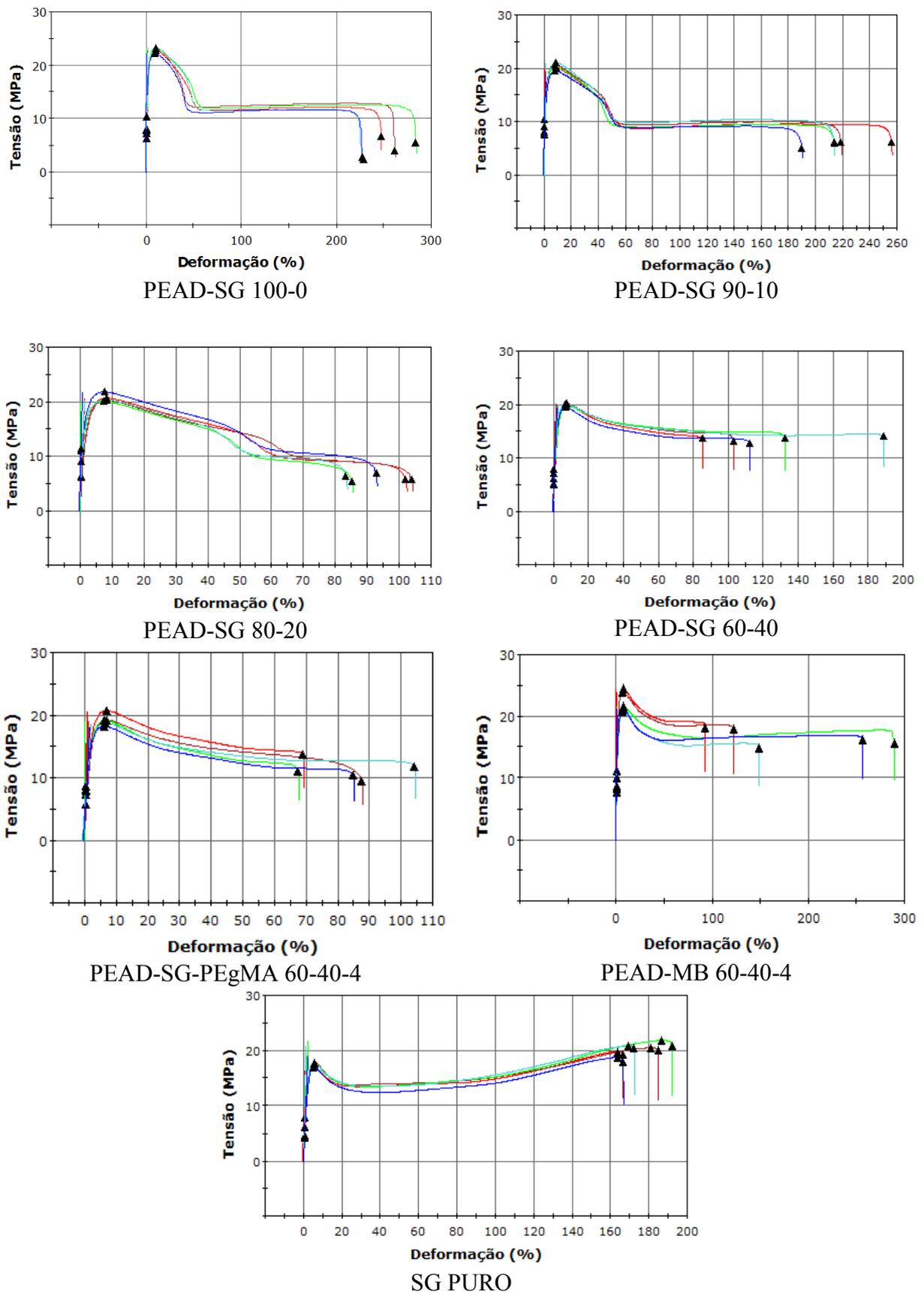
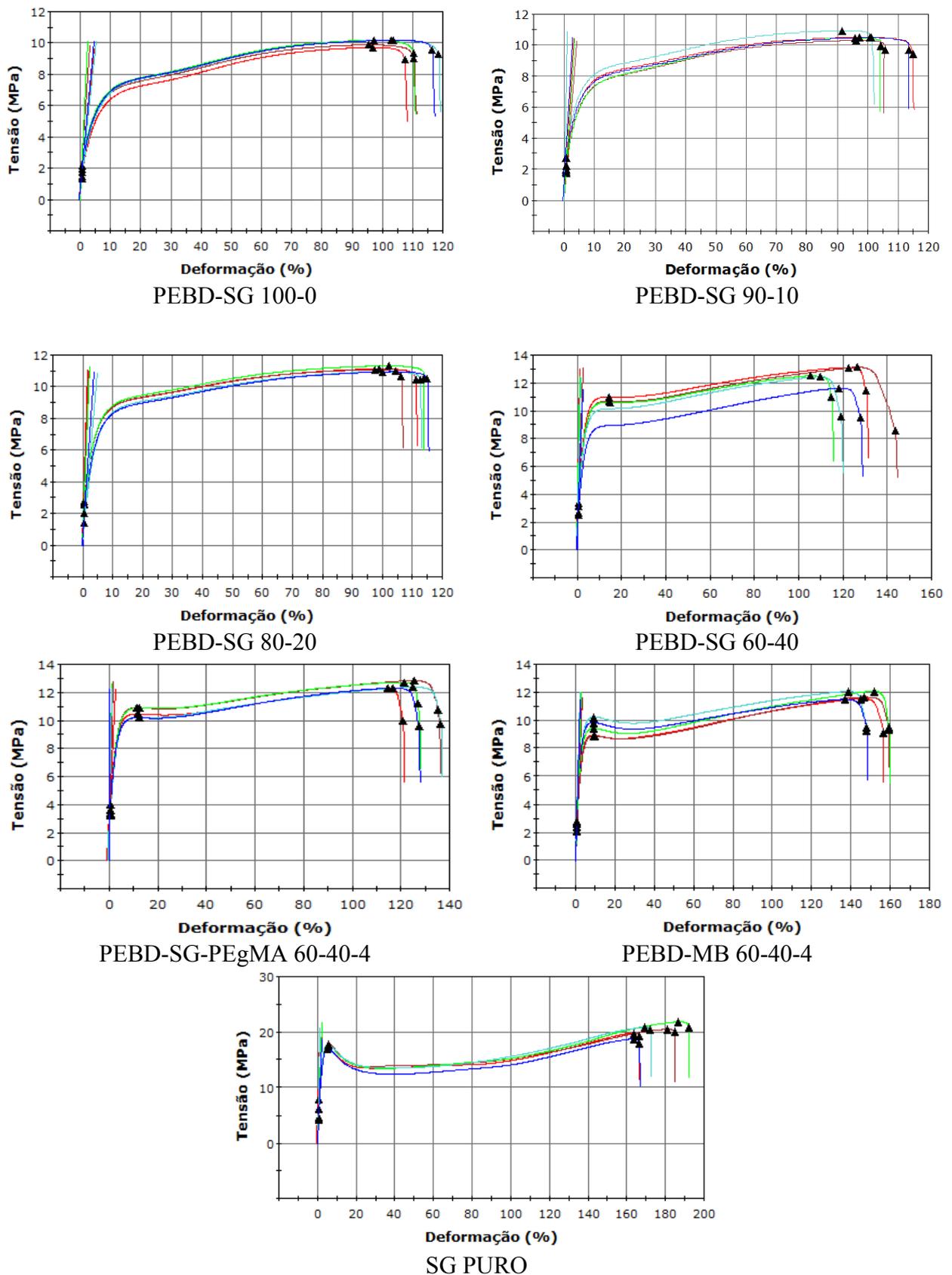


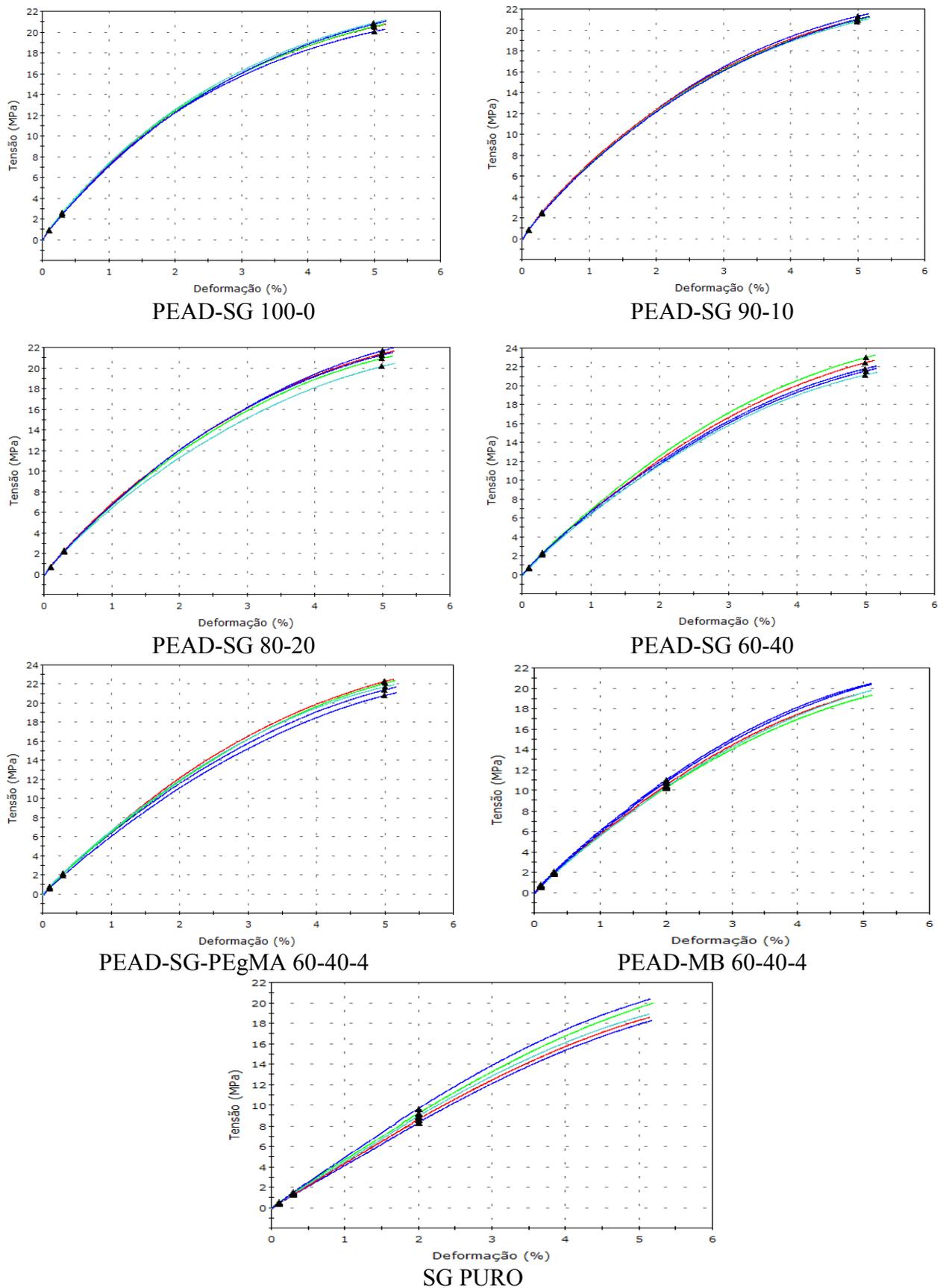
Figura 46 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEBD em tração



Fonte: Autor

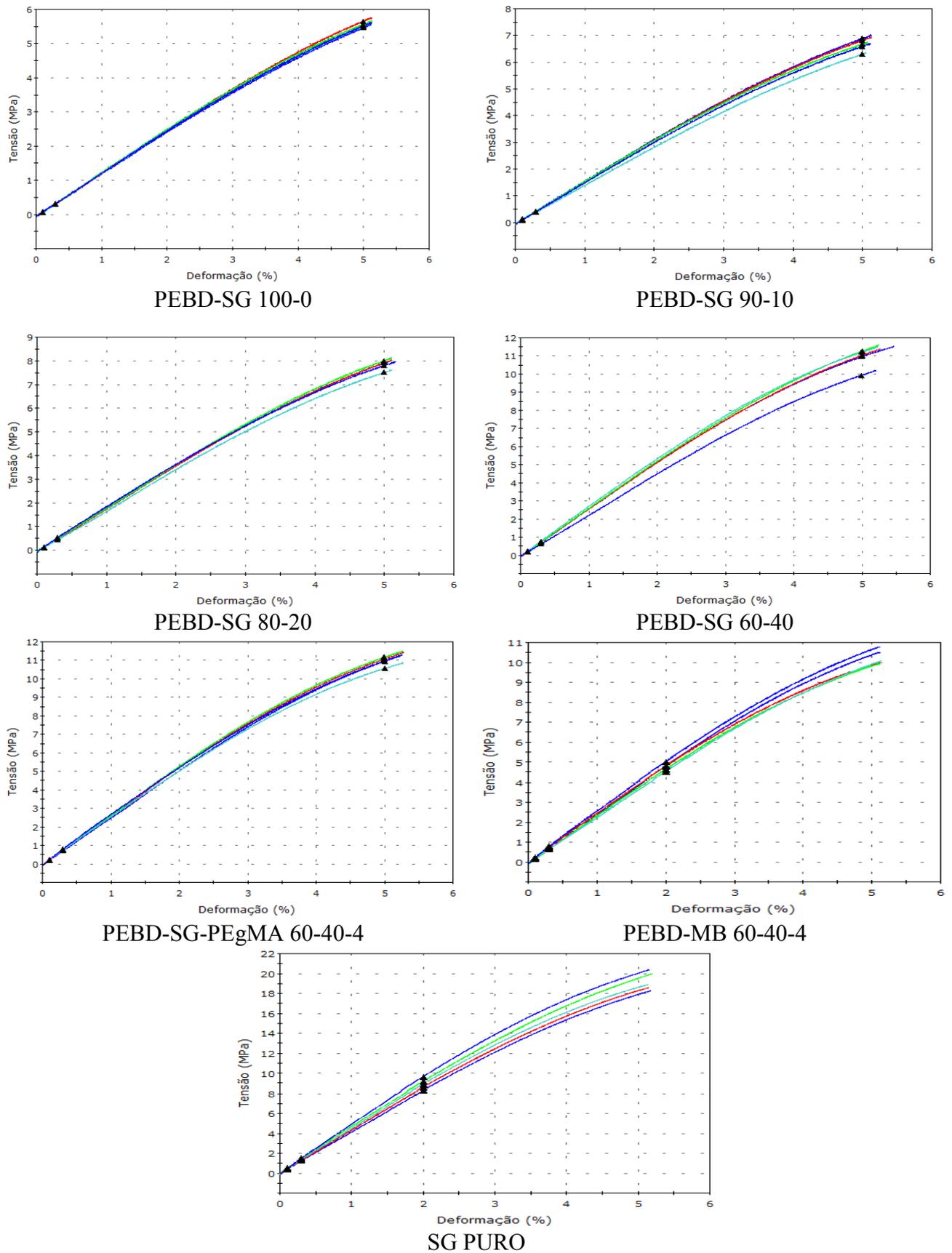
APENDICE B – ENSAIO DE FLEXÃO

Figura 47 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEAD em flexão



Fonte: Autor

Figura 48 – Gráficos de Tensão x Deformação para todas as formulações do PEBD em flexão



Fonte: Autor

APENDICE C – TABELAS ANOVA

Figura 49 – ANOVA Resistência à Tração PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEAD-SG 60-40	5	99,6	19,92	0,09255		
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	95,98	19,196	0,87163		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,31044	1	1,31044	2,71824763	0,13782	5,31766
Dentro dos grupos	3,85672	8	0,48209			
Total	5,16716	9				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEAD-SG 60-40	5	99,6	19,92	0,09255		
PEAD-MB 60-40-4	5	112,37	22,474	2,78943		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	16,30729	1	16,30729	11,31672669	0,00987	5,31766
Dentro dos grupos	11,52792	8	1,44099			
Total	27,83521	9				

Fonte: Autor

Figura 50 – ANOVA Resistência à Tração PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 100-0	5	50,12	10,024	0,04733		
PEBD-SG 90-10	5	52,64	10,528	0,05367		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,63504	1	0,63504	12,575	0,007552	5,31766
Dentro dos grupos	0,404	8	0,0505			
Total	1,03904	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 90-10	5	52,64	10,528	0,05367
PEBD-SG 80-20	5	55,37	11,074	0,02353

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,74529	1	0,74529	19,308	0,0023049	5,31766
Dentro dos grupos	0,3088	8	0,0386			
Total	1,05409	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 80-20	5	55,37	11,074	0,02353
PEBD-SG 60-40	5	62,75	12,55	0,37985

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,44644	1	5,44644	27,004	0,0008259	5,31766
Dentro dos grupos	1,61352	8	0,20169			
Total	7,05996	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	62,75	12,55	0,37985
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	62,51	12,502	0,07312

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00576	1	0,00576	0,02543	0,8772477	5,31766
Dentro dos grupos	1,81188	8	0,22649			
Total	1,81764	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	62,75	12,55	0,37985
PEBD-MB 60-40-4	5	58,76	11,752	0,07987

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,59201	1	1,59201	6,926	0,0300973	5,31766
Dentro dos grupos	1,83888	8	0,22986			
Total	3,43089	9				

Fonte: Autor

Figura 51 – ANOVA Módulo de Tração PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	3801,38	760,276	564,026
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	3601,7	720,34	986,177

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3987,21024	1	3987,21	5,14411	0,0530505	5,31766
Dentro dos grupos	6200,81172	8	775,101			
Total	10188,02196	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	3801,38	760,276	564,026
PEAD-MB 60-40-4	5	3416,89	683,378	670,774

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	14783,25601	1	14783,3	23,9444	0,0012039	5,31766
Dentro dos grupos	4939,2006	8	617,4			
Total	19722,45661	9				

Fonte: Autor

Figura 52 – ANOVA Módulo de Tração PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 60-40	5	1099,2	219,84	106,326		
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	923,99	184,798	242,09		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3069,85441	1	3069,85	17,6218	0,0030054	5,31766
Dentro dos grupos	1393,66488	8	174,208			
Total	4463,51929	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 60-40	5	1099,2	219,84	106,326		
PEBD-MB 60-40-4	5	1115,2	223,04	257,325		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	25,6	1	25,6	0,14079	0,7172454	5,31766
Dentro dos grupos	1454,6028	8	181,825			
Total	1480,2028	9				

Fonte: Autor

Figura 53 – ANOVA Deformação na Ruptura PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEAD-SG 60-40	5	621,5	124,3	1580,24		
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	413,47	82,694	227,07		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4327,64809	1	4327,65	4,78906	0,06007	5,31766
Dentro dos grupos	7229,22372	8	903,653			
Total	11556,87181	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	621,5	124,3	1580,24
PEAD-MB 60-40-4	5	909,56	181,912	7489,3

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	8297,85636	1	8297,86	1,82983	0,21314	5,31766
Dentro dos grupos	36278,13348	8	4534,77			
Total	44575,98984	9				

Fonte: Autor

Figura 54 – ANOVA Deformação na Ruptura PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 80-20	5	558,98	111,796	11,0857
PEBD-SG 60-40	5	635,77	127,154	124,454

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	589,67041	1	589,67	8,70108	0,01843	5,31766
Dentro dos grupos	542,15864	8	67,7698			
Total	1131,8291	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	635,77	127,154	124,454
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	647,37	129,474	41,3961

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	13,456	1	13,456	0,16227	0,69763	5,31766
Dentro dos grupos	663,4004	8	82,9251			
Total	676,8564	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	635,77	127,154	124,454
PEBD-MB 60-40-4	5	771,13	154,226	32,476

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1832,233	1	1832,23	23,351	0,0013	5,31766
Dentro dos grupos	627,71984	8	78,465			
Total	2459,9528	9				

Fonte: Autor

Figura 55 – ANOVA Tenacidade PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	4,84	0,968	0,08697
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	3	0,6	0,0081

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,33856	1	0,33856	7,12233	0,02842	5,31766
Dentro dos grupos	0,38028	8	0,04754			
Total	0,71884	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	4,84	0,968	0,08697
PEAD-MB 60-40-4	5	7,97	1,594	0,48553

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,97969	1	0,97969	3,4225	0,10148	5,31766
Dentro dos grupos	2,29	8	0,28625			
Total	3,26969	9				

Fonte: Autor

Figura 56 – ANOVA Tenacidade PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	3,55	0,71	0,00725
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	3,66	0,732	0,00227

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00121	1	0,00121	0,2542	0,62772	5,31766
Dentro dos grupos	0,03808	8	0,00476			
Total	0,03929	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	3,55	0,71	0,00725
PEBD-MB 60-40-4	5	3,93	0,786	0,00053

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,01444	1	0,01444	3,71208	0,090182	5,31766
Dentro dos grupos	0,03112	8	0,00389			
Total	0,04556	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	3,66	0,732	0,00227
PEBD-MB 60-40-4	5	3,93	0,786	0,00053

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,00729	1	0,00729	5,20714	0,05192	5,31766
Dentro dos grupos	0,0112	8	0,0014			
Total	0,01849	9				

Fonte: Autor

Figura 57 – ANOVA Resistência à Flexão PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEAD-SG 60-40	5	110,054	22,0108	0,52775		
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	108,25	21,6501	0,34567		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,325373052	1	0,32537	0,74505	0,41317	5,31766
Dentro dos grupos	3,493681686	8	0,43671			
Total	3,819054737	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEAD-SG 60-40	5	110,054	22,0108	0,52775		
PEAD-MB 60-40-4	5	98,7459	19,7492	0,24358		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	12,78765181	1	12,7877	33,1576	0,00042	5,31766
Dentro dos grupos	3,085301213	8	0,38566			
Total	15,87295302	9				

Fonte: Autor

Figura 58 – ANOVA Resistência à Flexão PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 100-0	5	27,7098	5,54195	0,00556		
PEBD-SG 90-10	5	33,2623	6,65246	0,05474		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,083044504	1	3,08304	102,263	7,80758E-06	5,31766
Dentro dos grupos	0,241186705	8	0,03015			
Total	3,324231209	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 90-10	5	33,2623	6,65246	0,05474		
PEBD-SG 80-20	5	39,1751	7,83502	0,03688		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3,49616769	1	3,49617	76,3157	2,30554E-05	5,31766
Dentro dos grupos	0,3664954	8	0,04581			
Total	3,86266309	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 80-20	5	39,1751	7,83502	0,03688		
PEBD-SG 60-40	5	54,3947	10,8789	0,29579		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	23,1634824	1	23,1635	139,257	2,43545E-06	5,31766
Dentro dos grupos	1,330692015	8	0,16634			
Total	24,49417441	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 60-40	5	54,3947	10,8789	0,29579		
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	54,7235	10,9447	0,05077		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,01081338	1	0,01081	0,0624	0,80902946	5,31766
Dentro dos grupos	1,38622035	8	0,17328			
Total	1,39703373	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 60-40	5	54,3947	10,8789	0,29579		
PEBD-MB 60-40-4	5	50,6829	10,1366	0,1369		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,377714745	1	1,37771	6,36815	0,035612992	5,31766
Dentro dos grupos	1,730755511	8	0,21634			
Total	3,108470256	9				

Fonte: Autor

Figura 59 – ANOVA Módulo de Flexão a 0,3% PEAD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	3652,47	730,494	354,86
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4	5	3548,63	709,726	531,221

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1078,27456	1	1078,27	2,43381	0,15736	5,31766
Dentro dos grupos	3544,32304	8	443,04			
Total	4622,5976	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEAD-SG 60-40	5	3652,47	730,494	354,86
PEAD-MB 60-40-4	5	3225,15	645,03	540,751

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	18260,23824	1	18260,2	40,7772	0,00021	5,31766
Dentro dos grupos	3582,44512	8	447,806			
Total	21842,68336	9				

Fonte: Autor

Figura 60 – ANOVA Módulo de Flexão a 0,3% PEBD

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
PEBD-SG 60-40	5	1281,27	256,254	395,674
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4	5	1382,06	276,412	72,5819

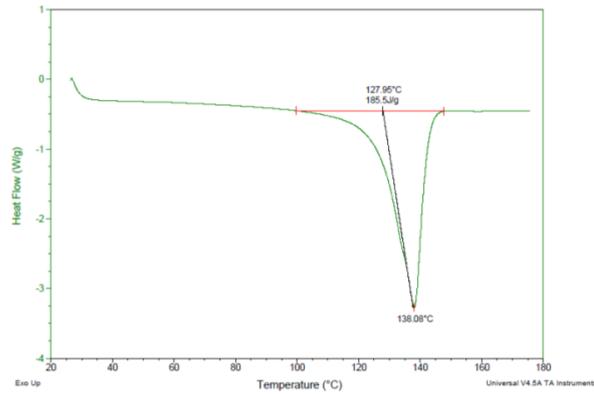
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1015,86241	1	1015,86	4,33892	0,07078	5,31766
Dentro dos grupos	1873,0226	8	234,128			
Total	2888,88501	9				

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
PEBD-SG 60-40	5	1281,27	256,254	395,674		
PEBD-MB 60-40-4	5	1241,29	248,258	402,501		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	159,84004	1	159,84	0,40051	0,54449	5,31766
Dentro dos grupos	3192,698	8	399,087			
Total	3352,53804	9				

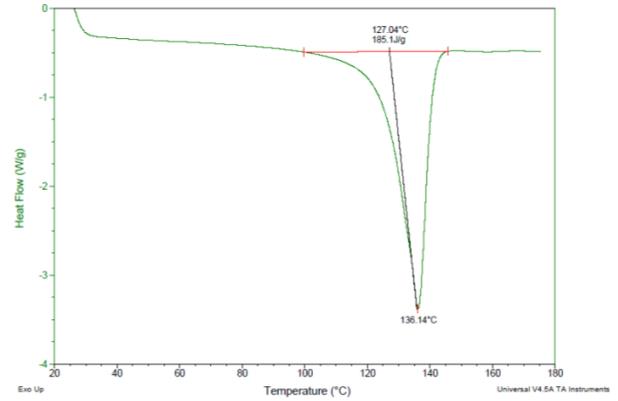
Fonte: Autor

APENDICE D – ENSAIO DE DSC

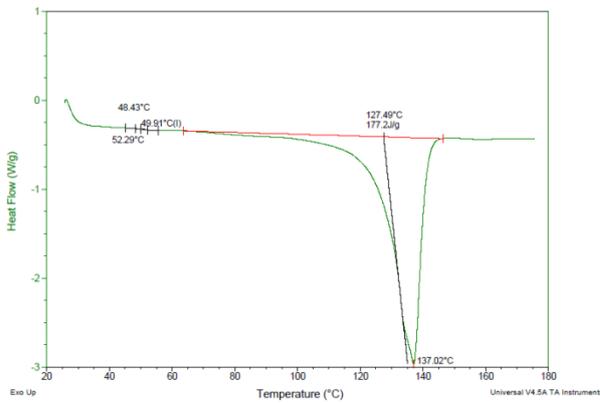
Figura 61 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEAD



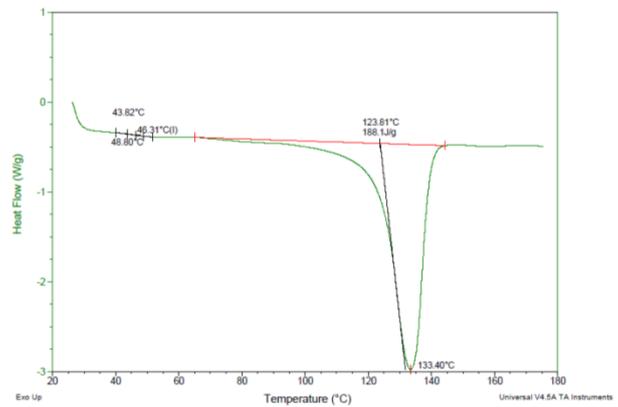
PEAD-SG 100-0 01



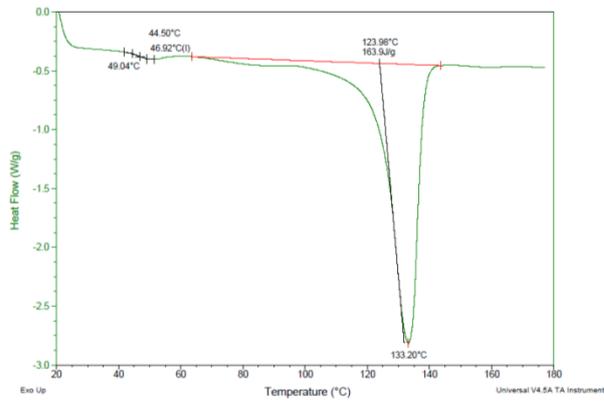
PEAD-SG 100-0 02



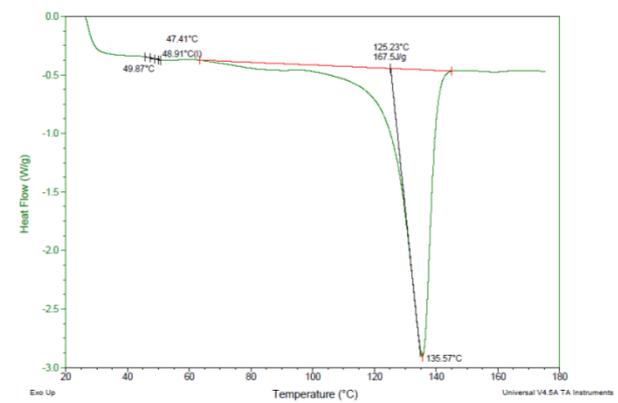
PEAD-SG 90-10 01



PEAD-SG 90-10 02



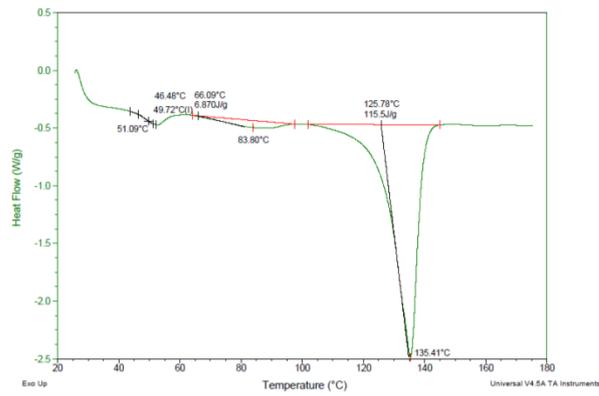
PEAD-SG 80-20 01



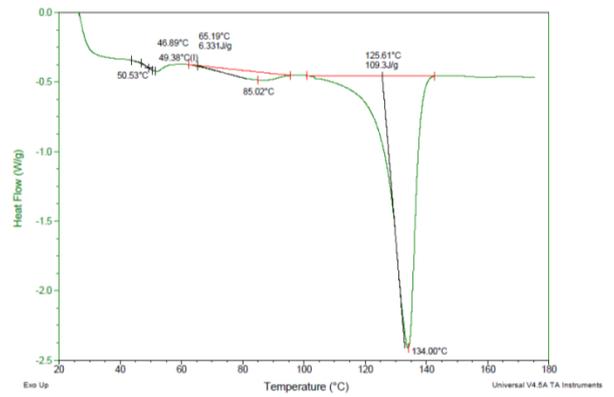
PEAD-SG 80-20 02

Fonte: Autor

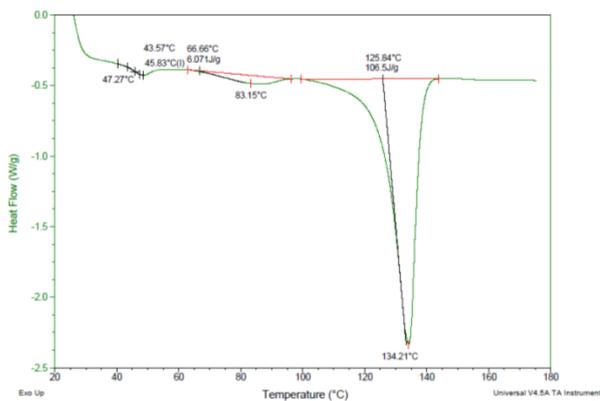
Figura 62 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEAD



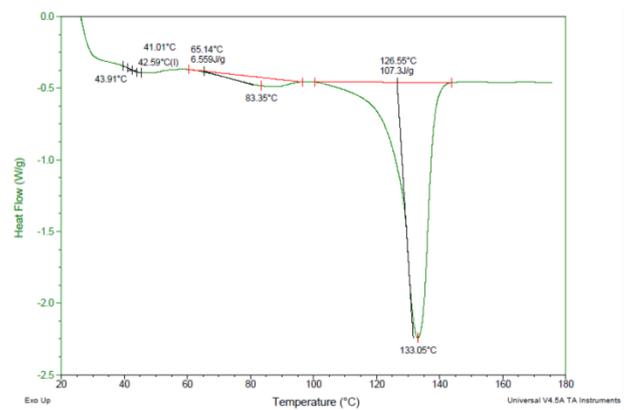
PEAD-SG 60-40 01



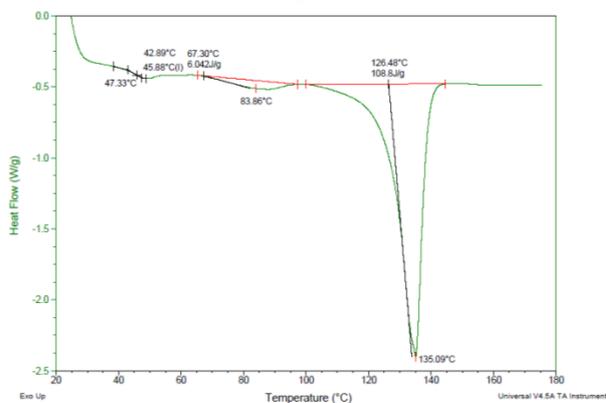
PEAD-SG 60-40 02



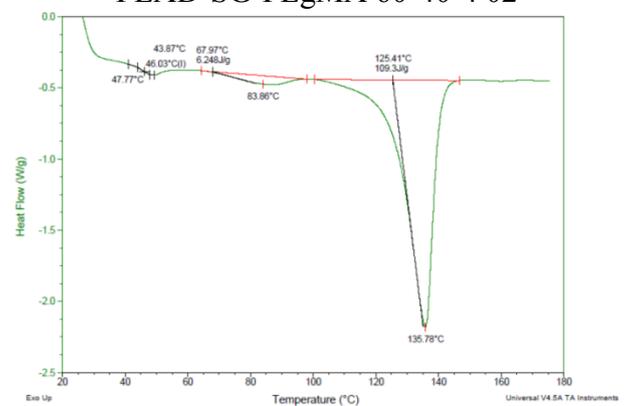
PEAD-SG-PEgMA 60-40-4 01



PEAD-SG-PEgMA 60-40-4 02



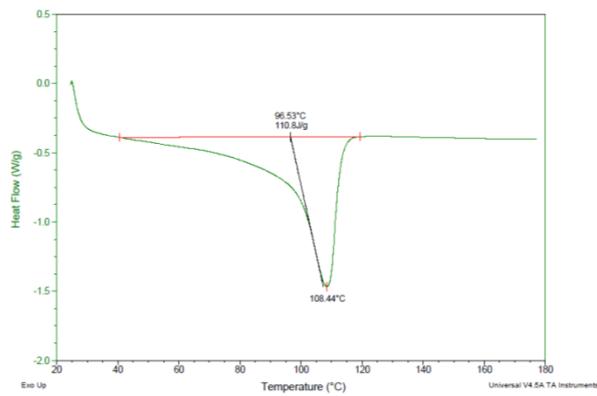
PEAD-MB 60-40-4 01



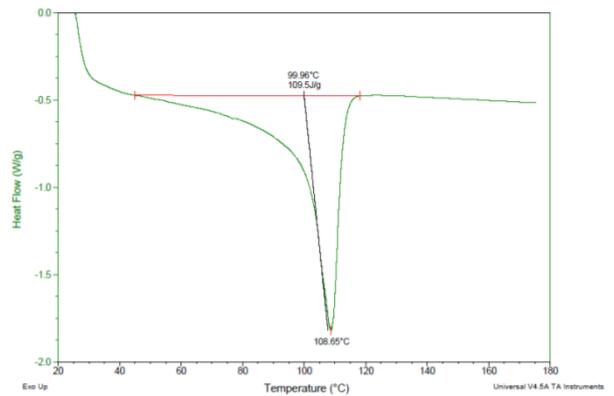
PEAD-MB 60-40-4 02

Fonte: Autor

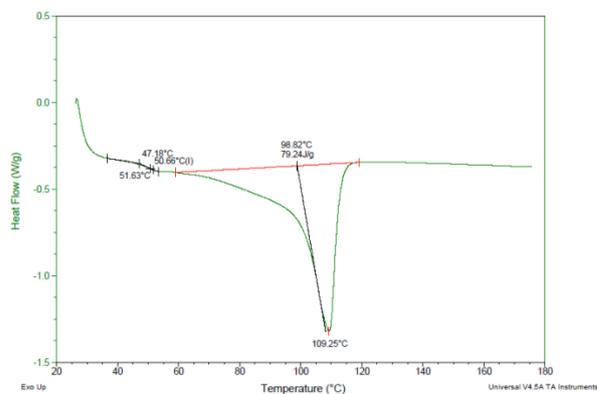
Figura 63 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEBD



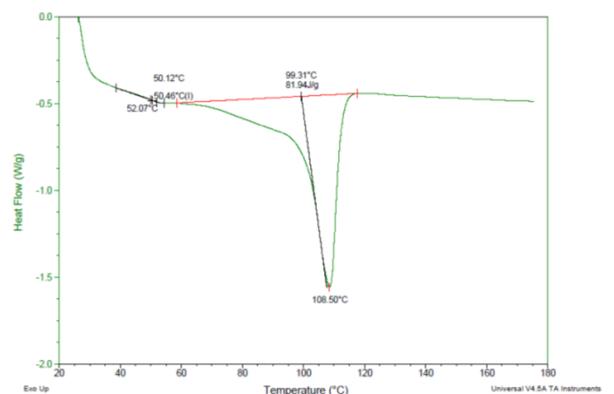
PEBD-SG 100-0 01



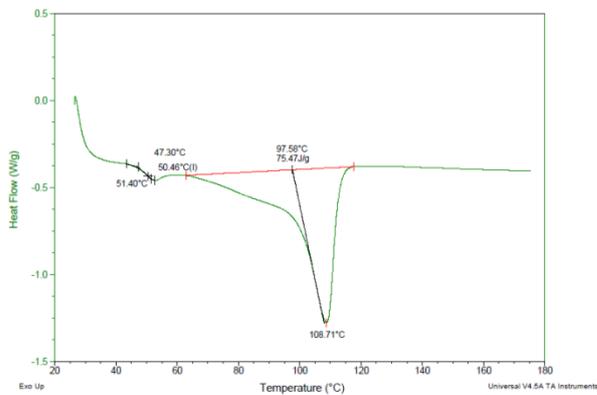
PEBD-SG 100-10 02



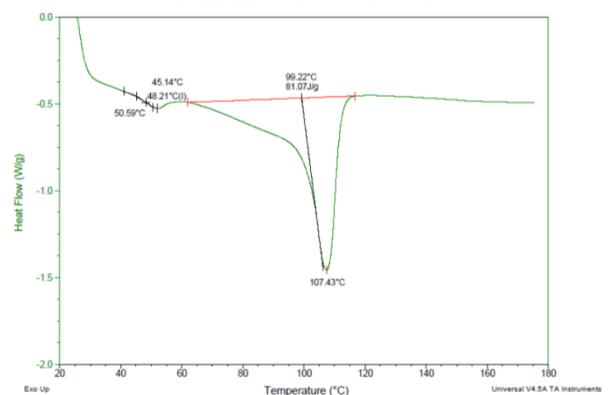
PEBD-SG 90-10-4 01



PEAD-SG 90-10 02



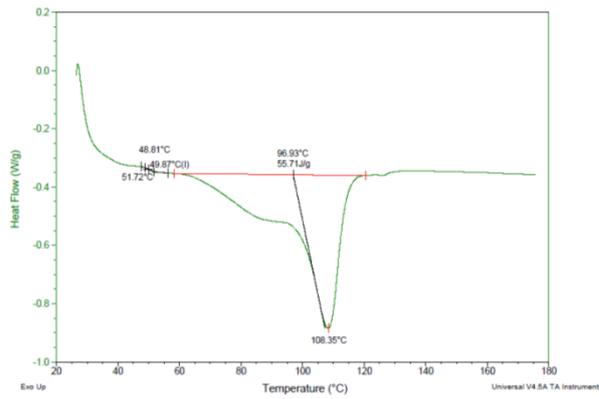
PEBD-SG 80-20-4 01



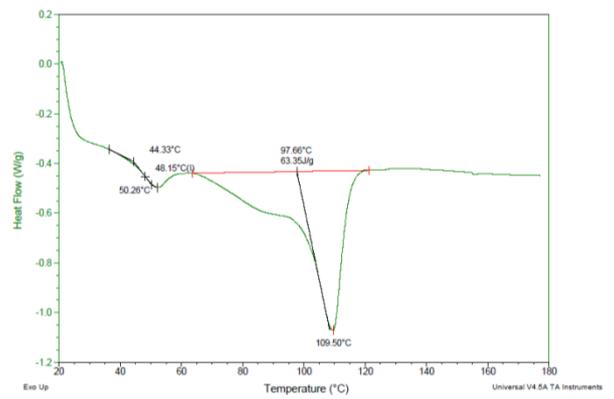
PEBD-SG 80-20 02

Fonte: Autor

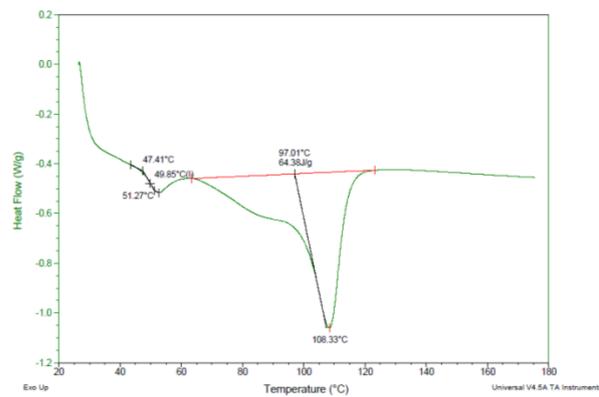
Figura 64 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do PEBD



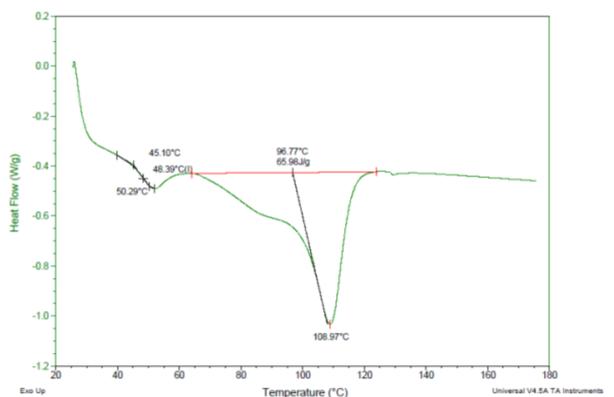
PEBD-SG 60-40 01



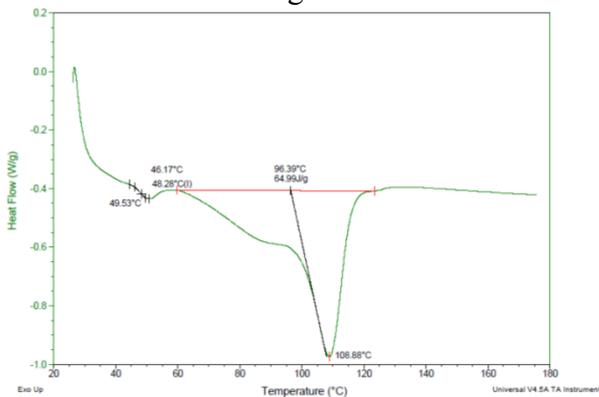
PEBD-SG 60-40 02



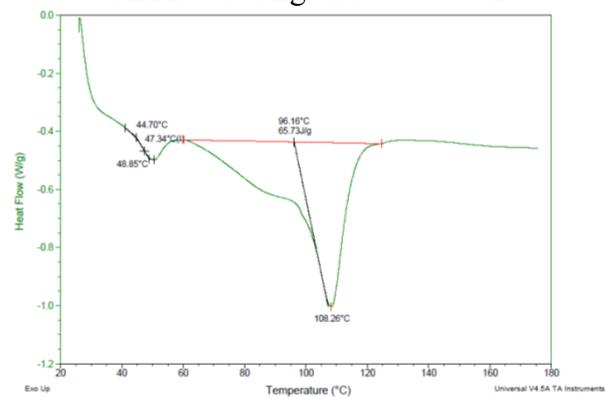
PEBD-SG-PEgMA 60-40-4 01



PEBD-SG-PEgMA 60-40-4 02



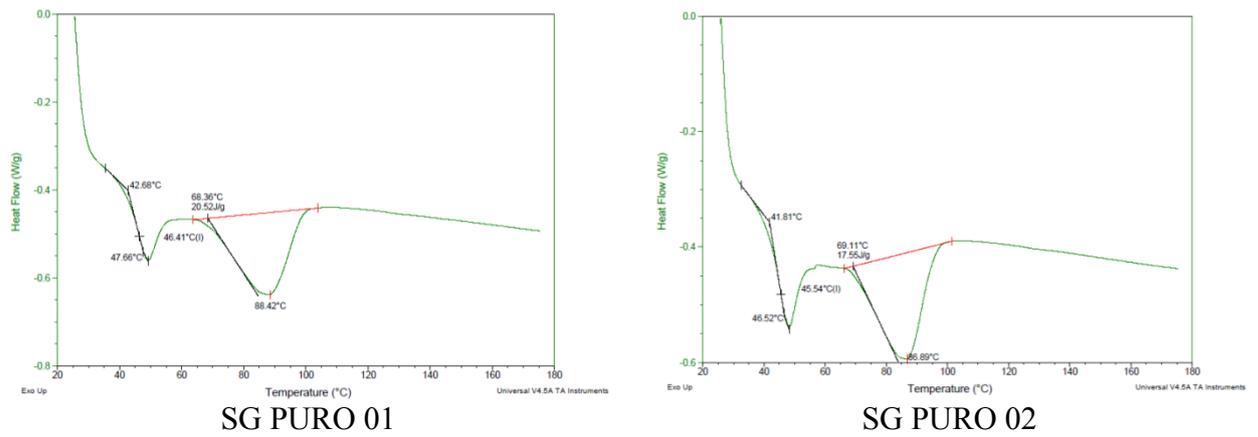
PEBD-MB 60-40-4 01



PEBD-MB 60-40-4 02

Fonte: Autor

Figura 65 – Gráficos das curvas de transformações térmicas do SG puro



Fonte: Autor

ANEXO A – FOLHETO TÉCNICO DO SENTRYGLAS®

SentryGlas® Elastic Properties (SG5000)

In general, 0.76 mm (30 mil) is specified for easy processing when double stacking and not intended to be used as a single ply. Single ply use has not been tested to determine performance against any safety glazing codes or standards. 0.89 mm (35 mil) interlayers typically require high quality tempered glass for flatness. 1.52 mm (60 mil) interlayers are specified as the standard thickness for minimally supported applications. 2.28 mm (90 mil) thickness interlayers are normally specified for anti-intrusion, hurricane and other types of security ap-

plications. Glass producers and laminators require interlayers to be supplied either in sheet form or on rolls. SentryGlas® ionoplast interlayers are available in both formats. For faster deliveries, SentryGlas® ionoplast interlayer is stocked in standard thicknesses (calipers) of 0.89 mm (35 mil), 1.52 mm (60 mil) and 2.28 mm (90 mil) sheets. SentryGlas® ionoplast interlayer on roll is available in 0.76 mm (30 mil) and 0.89 mm (35 mil) thickness.

TABLE 1 – LAMINATE PROPERTIES

Property	Units Metric (English)	Value	Test
Haze	%	< 2	ASTM D1003
Impact test 0.23 kg (0.5 lb)	m (ft)	> 9.14 (> 30)	ANSI Z26.1
Boil test 2 hr	-	No defects	ANSI Z26.1
Bake test 2 hr/100 °C	-	No defects	ANSI Z26.1

TABLE 2 – INTERLAYER TYPICAL PROPERTIES

Property	Units Metric (English)	Value	ASTM Test
Young's Modulus	Mpa (kpsi)	300 (43.5)	D5026
Tear Strength	MJ/m ³ (ft lb/in ³)	50 (604)	D638
Tensile Strength	Mpa (kpsi)	34.5 (5.0)	D638
Elongation	% (%)	400 (400)	D638
Density	g/cm ³ (lb/in ³)	0.95 (0.0343)	D792
Flex Modulus 23 °C (73 °F)	Mpa (kpsi)	345 (50)	D790
Heat Deflection Temperature (HDT) @ 0.46 MPa	°C (°F)	43 (110)	D648
Melting Point	°C (°F)	94 (201)	(DSC)
Coeff. of Thermal Expansion (-20 °C to 32 °C)	10 ⁻³ cm/cm °C (mils/in °C)	10 - 15 (0.10 - 0.15)	D696
Thermal Conductivity	W/M-K (BTU-in/hr-ft ² °F)	0.246 (1.71)	

ANEXO B – FOLHETO TÉCNICO DO PEAD

Polietileno de Alta Densidade JV060U
Descrição:

JV060U é um polietileno de alta densidade com distribuição de massa molar estreita. Apresenta ótima rigidez e estabilidade dimensional, além de boa processabilidade, resistência mecânica e resistência ao impacto.

Aditivação:

Estabilizante à luz.

Aplicações:

Caixas e Garrafeiras, Páletes

Processos:

Moldagem por Injeção

Propriedades de Controle:

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	7.0
Densidade	D 792	g/cm ³	0.957

Propriedades Típicas - Placa¹:
Propriedades de Referência de Placa

Característica	Método	Unidades	Valores
Resistência à Tração no escoamento (a)	D 638	MPa	28
Resistência à Tração na Ruptura (a)	D 638	MPa	22
Módulo de Flexão Secante a 1% (b)	D 790	MPa	1350
Dureza Shore D (c)	D 2240	-	60
Resistência ao Impacto Izod (b)	D 256	J/m	40
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa (b)	D 648	°C	70
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N (b)	D 1525	°C	126

¹ As propriedades típicas se referem ao valor médio dos resultados da propriedade citados 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.

ANEXO C – FOLHETO TÉCNICO DO PEBD

Polietileno de Baixa Densidade BC818
Descrição:

BC818 é um polietileno de baixa densidade utilizado em diversas aplicações. No processo de revestimento por extrusão apresenta ótimas propriedades ópticas, baixo neck-in, boa estabilidade de cortina e boa adesão a substratos porosos. No processo de moldagem por injeção, confere as peças excelente flexibilidade.

Aplicações:

Batoques, Masterbatches, Peças injetadas flexíveis, Revestimento por extrusão, Tampas

Processos:

Extrusão, Moldagem por Injeção

Propriedades de Controle:

Característica	Método	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190°C/2,16kg)	D 1238	g/10 min	8,3
Densidade	D 1505	g/cm ³	0,918

Propriedades Típicas - Placa¹:
Propriedades de Referência de Placa

Característica	Método	Unidades	Valores
Resistência à Tração no Escoamento (a)	D 638	MPa	9
Resistência à Tração na Ruptura (a)	D 638	MPa	12
Módulo de Flexão Secante a 1% (b)	D 790	MPa	200
Dureza Shore D (c)	D 2240	-	49
Resistência ao Impacto Izod (b)	D 256	J/m	NB*
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,455 MPa (b)	D 648	°C	86
Temperatura de Amolecimento Vicat a 10 N (b)	D 1525	°C	41

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

Propriedades Típicas - Filmes:
Propriedades de Referência do Filme Soprado (a)

Característica	Método	Unidades	Valores
Tensão de Ruptura (DM/DT)	D 882	MPa	25/20
Alongamento de Ruptura (DM/DT)	D 882	%	380/870
Módulo Secante a 1% (DM/DT)	D 882	MPa	70
Resistência ao Impacto de Dardo	D 1709	g/F50	70
Resistência ao Rasgo Elmendorf (DM/DT)	D 1922	gF	ND (b)/56
Opacidade	D 1003	%	8
Brilho Ângulo 60°	D 2457	-	76

(a) Filme de 25 µm de espessura, obtido em extrusora de 75mm, com razão de sopro de 2-1, abertura de matriz 1,00mm e produtividade específica 1,73kg/h*cm (DM = Direção de Extrusão e DT = Direção Transversal à Extrusão); (b) Não Determinado