

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - CAMPUS AVANÇADO ARCOS

Aryelton Dias Gonçalves

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS
DO POLIETILENO EXPANDIDO DE BAIXA
DENSIDADE.**

Arcos - MG

2021

Aryelton Dias Gonçalves

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIETILENO EXPANDIDO DE BAIXA DENSIDADE.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
como requisito parcial para obtenção de título
de Bacharel em Engenharia Mecânica pelo
Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus*
Arcos.

Instituto Federal de Minas Gerais

Campus Avançado Arcos

Bacharelado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Msc. Marcelo Teodoro Assunção

Arcos - MG

2021

Gonçalves, Aryelton Dias

G635 Análise das propriedades mecânicas do polietileno expandido de baixa densidade [manuscrito]. / Aryelton Dias Gonçalves. - 2021.

36 f. : il.

Orientadores: Prof. Msc. Marcelo Teodoro Assunção.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Arcos*.

1. Polietileno – Propriedades mecânicas. – Monografia. 2. Termoplásticos – Propriedades mecânicas. – Monografia. I. Assunção, Marcelo Teodoro. II. Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Arcos*, Bacharelado em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 678.742.2



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Arcos
Diretoria de Ensino
Docentes Área Técnica
Av. Juscelino Kubitschek, 485 - Bairro Brasília - CEP 35588000 - Arcos - MG
3733515173 - www.ifmg.edu.br

Ata de Avaliação de Defesa de TCC

Aos dezesseis dias do mês de novembro de dois mil e vinte e um, às vinte horas, se reuniu por meio de webconferência na plataforma *Google Meet* a banca composta pelo **Prof. Me. Marcelo Teodoro Assunção** (orientador), Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos; **Prof. Me. Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana**, Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos; **Prof. Dr. Reginaldo Gonçalves Leão Junior**, Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Avançado Arcos; para avaliar o trabalho intitulado **“ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO POLIETILENO EXPANDIDO DE BAIXA DENSIDADE”**, apresentado pelo aluno **Aryelton Dias Gonçalves**, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico. Após apresentação e arguição, emitiu-se o parecer **“APROVADO”**, sendo a verificação das modificações sugeridas de responsabilidade do orientador. Para fins de registro na disciplina Trabalho Acadêmico Integrador X, a banca avaliadora emite, em consenso, o conceito final 95. Nada mais havendo a tratar a defesa foi encerrada às vinte e uma horas e trinta minutos e eu, Marcelo Teodoro Assunção, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada por todos os avaliadores.

Arcos, 18 de novembro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Teodoro Assunção, Professor**, em 18/11/2021, às 13:43, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Augusto Ferreira de Campos Viana, Professor**, em 18/11/2021, às 15:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Reginaldo Goncalves Leao Junior, Professor**, em 18/11/2021, às 15:48, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1011817** e o código CRC **B1498482**.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Cadeia polimérica, a) representação do mero inserido na cadeia e b) ilustração em perspectiva.	11
2	Estruturas poliméricas: a) linear, b) ramificado, c) de ligações cruzadas e d) de rede.	12
3	Estrutura polimérica do polietileno.	13
4	Simplificação da influência das ramificações na cristalinidade do PE. . .	14
5	Imagem de microscopia eletrônica de varredura.	15
6	Configuração das células do polietileno expandido.	16
7	Colaminação de mantas de EPE.	16
8	Processo de extrusão do polietileno expandido.	17
9	<i>Boom</i> - Barreiras de contenção de petróleo <i>offshore</i>	18
10	Calço protetor de EPE ESD.	19
11	Molde de EPE para lajes.	19
12	Manta acústica de EPE.	20
13	EPE para isolamento térmico.	20
14	Curvas Tensão-Deformação, a Figura (a) é demonstrado Curva Tensão-Deformação padrão, os pontos "A" representa o limite de escoamento, o ponto "B" representa o início da deformação plástica e por fim o ponto "C" representa a ruptura do material. Já a Figura (b) é demonstrado a variação da curva em relação a temperatura de 4°C, 20°C, 40°C, 50°C e 60°C.	24
15	Máquina de tração e compressão, marca Hebert Lambert.	24
16	Aspectos visuais dos corpos de prova de 123 e 28 kg/m^3 , respectivamente. . .	27
17	Polietileno expandido com zoom de 2000x	28
18	Comparação dos resultados das análises métricas com variação da densidade.	29
19	Curva de tensão-deformação compressiva para espuma LDPE.	30
20	Variação da altura obtida no ensaio de <i>creep</i> com EPE de 28 kg/m^3 . . .	31
21	Variação da altura obtida no ensaio de <i>creep</i> com EPE de 123 kg/m^3 . . .	31
22	Teste para determinação da resiliência da espuma de polietileno.	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
PE	Polietileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
EPE	Expanded Polyethylene
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
ESD	Electrostatic Discharge
LDPE70	Low Density Polyethylene 70

RESUMO

O presente trabalho relata um estudo das propriedades da espuma de polietileno, também conhecido como EPE (*Expanded Polyethylene*). Para realização desse estudo foram realizados ensaios de resiliência, fluência, compressão e inspeção visual, com o objetivo de interpretar melhor as características da espuma estudada. Esses ensaios trouxeram características para o entendimento da aplicação e comercialização do material. A justificativa para esse estudo se deve a partir da falta de conhecimento sobre a existência da espuma pela maioria das pessoas e também tendo pouco material disponível em língua portuguesa. Portanto, sendo o objetivo do trabalho o entendimento de propriedades como densidade, fluência, resiliência e a deformação causada quando submetida a carregamentos. Para obtenção dos resultados foram realizados ensaios em densidades diferentes com base em pesquisas exploratórias, e nas normas ASTM D3575 e ABNT 8619. Com isso foi possível obter validação quando comparado com outros trabalhos, onde foi preciso 0,251 MPa de tensão para se obter 10% de deformação. Além disso, foi possível comprovar que a resiliência e a fluência estão diretamente relacionados com a densidade da espuma.

Palavras-chaves: Polietileno Expandido, Resiliência, Fluência e Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

The present work reports a study of the properties of polyethylene foam, also known as EPE (Expanded Polyethylene). To carry out this study, resilience, creep, compression and visual inspection tests were carried out, in order to better interpret the characteristics of the foam studied. These tests brought characteristics to the understanding of the application and commercialization of the material. The justification for this study is due to the lack of knowledge about the existence of foam by most people and also having little material available in Portuguese. Therefore, the objective of this work is the understanding of properties such as density, creep, resilience and the deformation caused when subjected to loads. To obtain the results, tests were carried out at different densities based on exploratory research, and on the ASTM D3575 and ABNT 8619 standards. With this, it was possible to obtain validation when compared to other studies, where 0.251 MPa of tension was needed to obtain 10% of deformation. Furthermore, it was possible to prove that resilience and creep are directly related to foam density.

Palavras-chaves: Expanded Polyethylene, Resilience, Fluency and Mechanical Properties.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVO GERAL	10
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	Polímeros	11
2.2	Polietileno (PE)	13
2.3	Polietileno Expandido (EPE)	15
2.3.1	Microestrutura	15
2.3.2	Macroestrutura	16
2.4	Formação e produção	17
2.5	Interesses para a indústria	18
2.6	Propriedades e ensaios	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Densidade	22
3.2	Inspeção visual	22
3.3	Análise métrica	22
3.4	Ensaio de compressão	23
3.5	Ensaio de <i>creep</i>	25
3.6	Ensaio de resiliência	26
3.7	Instrumentos de medições utilizados	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1	Aspectos visuais	27
4.2	Instabilidade volumétrica	28
4.3	Deformação específica no sentido longitudinal de compressão	29
4.4	Deformação sobre carregamento contínuo	31
4.5	Capacidade de absorver energia mecânica em regime elástico	32
5	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

Nos Estados Unidos, Japão e alguns países da Europa, a espuma de polietileno é usada desde a década de 60. Ao passar dos anos o consumo se intensificou, principalmente na década de 80, quando ocorreu o desenvolvimento de novos mercados, tecnologias e novas aplicações (KLEMPNER, 1991).

No Brasil esse material ainda é pouco conhecido e o setor o qual esse material está inserido ainda está em ascensão. Em 2019, segundo o relatório anual publicado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), o setor plástico era responsável por 314 mil empregos em mais de 11 mil empresas. Hoje esses números são ainda maiores e continua sendo um dos setores mais promissores para o desenvolvimento do país (ABIPLAST, 2019).

O polietileno expandido pode ser reciclável, podendo ser composto de até 94% de material reciclado em alguns casos. Sendo um material leve e resiliente, é destinado a embalagens para proteção de impactos, isolamento acústico e térmico.

Quando o material é reciclável, é preciso a adição de compostos para manutenção de suas propriedades. Já para adição de outras propriedades como o antiestático são necessários aditivos. Estudos recentes apontam que a adição de grafite no polímeros aumentam a condutividade elétrica (ZHUKOV, 2018). Embora o carbono tenha influência nas demais propriedades do material, o mesmo não foi levado em consideração nesse trabalho, para isso seria necessário um ensaio mais específico para aprofundar no assunto.

Já o estudo de Cronin e Ouellet (2016), demonstra que propriedades como tensão-deformação medida de um material de espuma de polietileno pode ser influenciada pelo tamanho da amostra. Devido a isso, para confecção desse trabalho as amostras seguiram dimensões padronizadas pelas normas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho aborda as características do polietileno expandido, uma espuma que pode ser destinada a diferentes aplicações. Devido a ser um material pouco conhecido, é difícil encontrar suas propriedades em uma busca rápida. Ao observar a lacuna existente na exploração acadêmica do material, principalmente em língua portuguesa. Notou-se a viabilidade de elaborar um trabalho com ênfase na disseminação do conhecimento sobre o mesmo.

Esse trabalho veio da necessidade de divulgar esse conhecimento técnico, com o objetivo de atrair atenção para o tema, apontando propriedades importantes para qualquer pessoa que visa a compreensão do assunto.

1.2 OBJETIVO GERAL

Entender as propriedades mecânicas do polietileno expandido, utilizando ensaios e normas técnicas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar inspeção visual da espuma.
- Estudar a instabilidade volumétrica apresentada após formação do EPE, utilizando análise métrica.
- Determinar a fluência da espuma pelo ensaio de *Creep*.
- Determinar a resiliência do material.

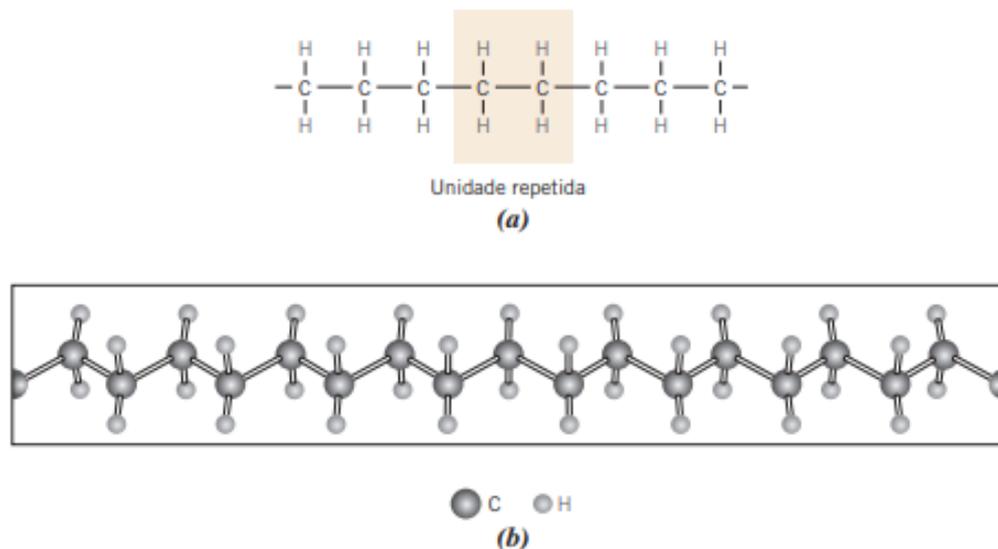
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 POLÍMEROS

Os polímeros podem ser encontrados na natureza ou sintetizados em laboratórios, sendo classificados em orgânicos e inorgânicos. O couro e a seda, são exemplos de polímeros orgânicos, enquanto os plásticos são polímeros inorgânicos. Atualmente, muitos dos plásticos que utilizamos foram desenvolvidos principalmente após a segunda guerra, que revolucionou o campo de materiais (CALLISTER, 2016).

A palavra polímero se origina do grego, **poli** significa muitos e **mero** iguais. Os polímeros são moléculas formadas a partir de unidades de repetição, unidas por ligações primárias fortes, normalmente de caráter covalente (CANEVAROLO, 2002). A Figura 1 ilustra uma cadeia polimérica, deixando evidente a unidade de repetição.

Figura 1 – Cadeia polimérica, a) representação do mero inserido na cadeia e b) ilustração em perspectiva.



Fonte: CALLISTER, 2016.

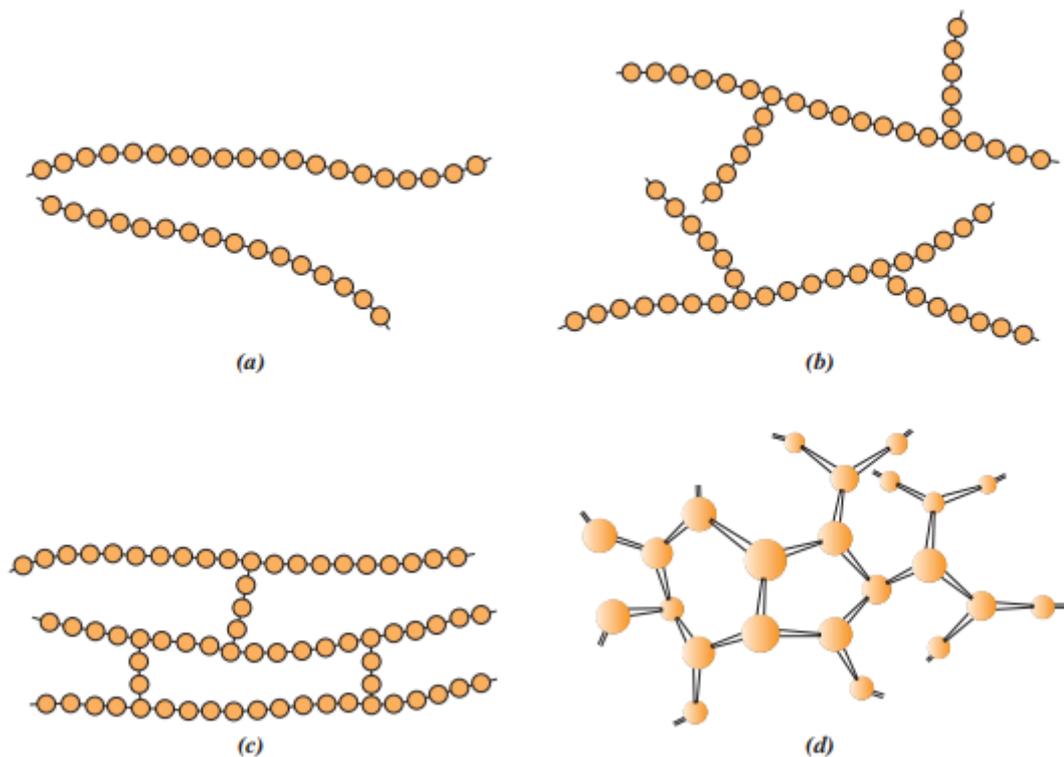
O processo de formação das cadeias poliméricas é chamado de polimerização. Existem dois principais tipos de polimerização por adição e por condensação. Evidenciando a polimerização por adição onde várias reações químicas diferentes podem ser usadas para

synthetizar materiais poliméricos (CHANDA; ROY, 2006). Esse processo consiste na quebra de ligações duplas dos monômeros, induzido a ligação entre eles, se tornando meros de cadeias menores que vão se ligando até a criação de cadeias complexas.

O grau de polimerização é o número com que as unidades da cadeia se repetem, isso determina o comprimento da cadeia e a sua massa molecular. Por fim a massa molecular de um polímero afeta sua densidade e suas propriedades mecânicas (AKCELRUD, 2007).

De acordo com Callister (2016), as características físicas de um polímero não dependem apenas da sua massa molecular, mas também do seu formato e da sua estrutura. As cadeias poliméricas podem assumir diversas estruturas como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Estruturas poliméricas: a) linear, b) ramificado, c) de ligações cruzadas e d) de rede.



Fonte: CALLISTER, 2016.

A forma de uma cadeia polimérica determina se o material se trata de um termofixo ou um termoplástico, o que influencia diretamente na aplicação do material. Sebastião (2010) afirma que os termofixos são majoritariamente de cadeias cruzadas e rede, sendo assim, esse tipo de arranjo amarra uma cadeia às outras impedindo seu livre deslizamento. Isso caracteriza um material de difícil reprocessamento, visto que para reorganizar as cadeias é preciso quebrar as ligações que as amarram, sem desintegrar as demais ligações. Após receber energia na forma de calor esses materiais sofrem uma degradação irreversível.

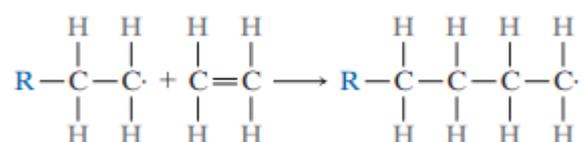
Já os termoplásticos são conhecidos pela facilidade de se moldar após aquecido até certa temperatura, ao fornecer energia na forma de calor as forças de ligação secundárias diminuem, possibilitando o movimento relativo de cadeias adjacentes, propiciando a deformação. Geralmente os termoplásticos são constituídos em estruturas polimérica do tipo linear e ramificadas (CALLISTER, 2016).

Essa característica descrita acima é o que possibilita o reprocessamento e a reciclagem desses polímeros, fator fundamental que justifica o seu valor comercial e a sua importância na busca por sustentabilidade.

2.2 POLIETILENO (PE)

Na polimerização do polietileno são utilizados hidrocarbonetos de etileno (C_2H_4), que é um gás nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Contudo, essa molécula só se transformará em um material polimérico sólido quando iniciada uma reação em cadeia através de um ativo denominado de catalisador, representado na Figura 3, pela letra "R". Essa reação como dito anteriormente se trata de uma polimerização por adição como descrito por Chanda e Roy (2006). O catalisador tem por finalidade deixar a molécula instável, a ponto de fazer ligações covalentes entre átomos de carbono (C-C), interligando outras moléculas de etileno, formando assim uma macromolécula (CALLISTER, 2016).

Figura 3 – Estrutura polimérica do polietileno.



Fonte: CALLISTER, 2016.

O polímero de etileno, foi desenvolvido há mais de cem anos. Atualmente é mais comumente utilizado em produtos, como sacos plásticos, brinquedos, artigos farmacêuticos, revestimentos de cabos, plástico bolha, utensílios domésticos, entre outros. São encontrados vários tipos de polietileno, mas se destacam o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno de alta densidade (PEAD) (MANOEL et al., 2015).

O polietileno de baixa densidade apresenta uma estrutura polimérica do tipo ramificada. Já a polietileno de alta densidade apresenta uma estrutura mais compacta sendo geralmente mais linear. O PEBD e PEAD são classificados, de acordo com a norma ASTM1248.

De acordo com Zhang et al. (2013), as principais propriedades que diferenciam os polímeros, são a massa molar, a densidade, o grau de ramificação de cadeias curtas e

cadeias longas. Para efeitos de comparação, o Quadro 1 mostra a diferença de algumas propriedades físico-químicas entre eles.

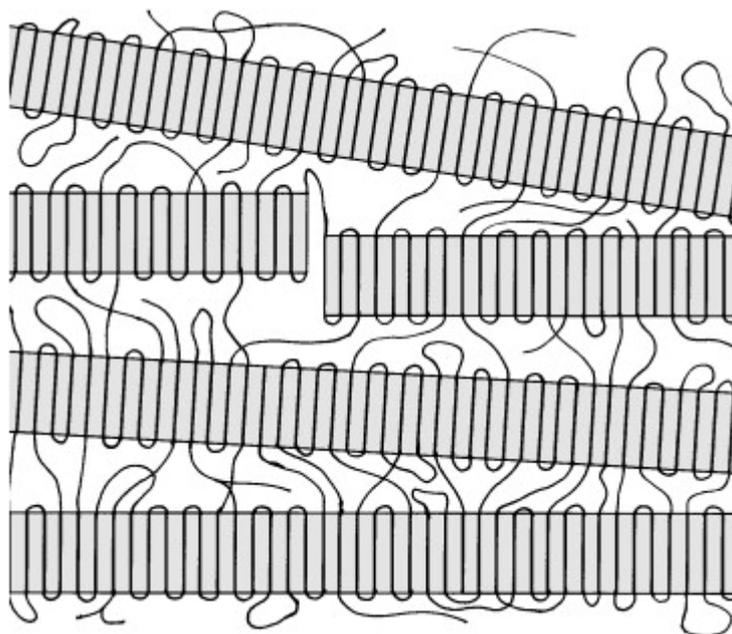
Quadro 1 - Principais diferenças estruturais e físico-químicas entre PEAD e PEBD.

		PEAD	PEBD
Tipo de cadeia		linear	ramificada
Ramificações	Longa (por molécula)	~ zero	<1
	Curta (por 1000 átomos de C)	C2	20
		C4	10
Densidade (g/cm ³)		0,95 ~ 0,96	0,92 ~ 0,93
Temperatura de fusão (°C)		135	110
Porcentagem de cristalinidade (%)		90	60
Resistência a tração (Mpa)		20 - 38	4 - 16
Elongação na ruptura (%)		200 - 500	100 - 200

Fonte: Adaptado de ASTM 1248, 2012.

As ramificações afetam diretamente a cristalinidade do material, perturbando as cadeias poliméricas. Regiões cristalinas são áreas que possuem um alto grau de ordem entre as cadeias, e as ramificações causam a redução dessas áreas gerando menor grau de cristalinidade no PE (MCKEEN, 2010), conforme representado pela Figura 4, onde os retângulos sombreados representam as cadeias ordenadas.

Figura 4 – Simplificação da influência das ramificações na cristalinidade do PE.



Fonte: MCKEEN, 2010.

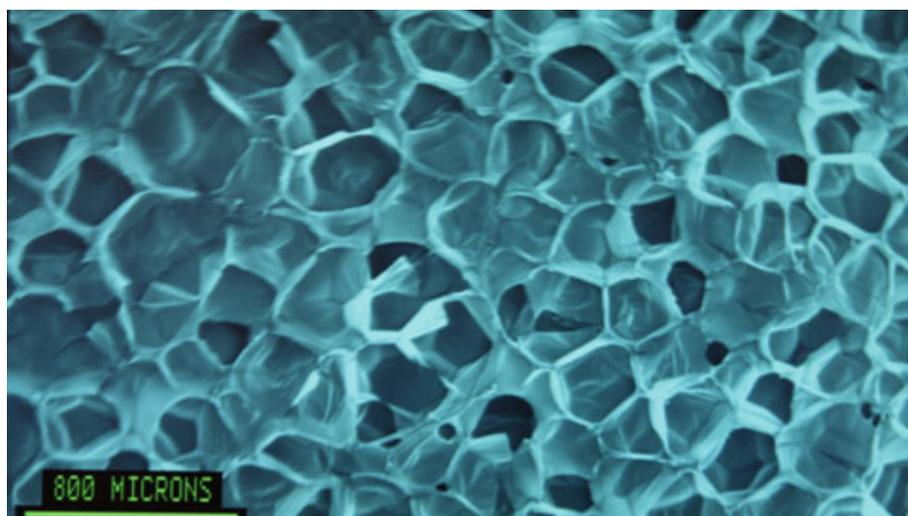
2.3 POLIETILENO EXPANDIDO (EPE)

Caracteriza-se como polietileno expandido, a espuma de polimérica de polietileno, material de aparência porosa e de fácil deformação. Suas aplicações principalmente no setor de embalagens, se justificam devido a capacidade de absorver energia em forma de deformação.

2.3.1 MICROESTRUTURA

A espuma de polietileno é formada por células devido a ação do agente expensor quando ocorre a queda repentina de pressão ao sair da extrusora. A Figura 5 mostra a estrutura de algumas dessas células através de um microscópio eletrônico.

Figura 5 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura.

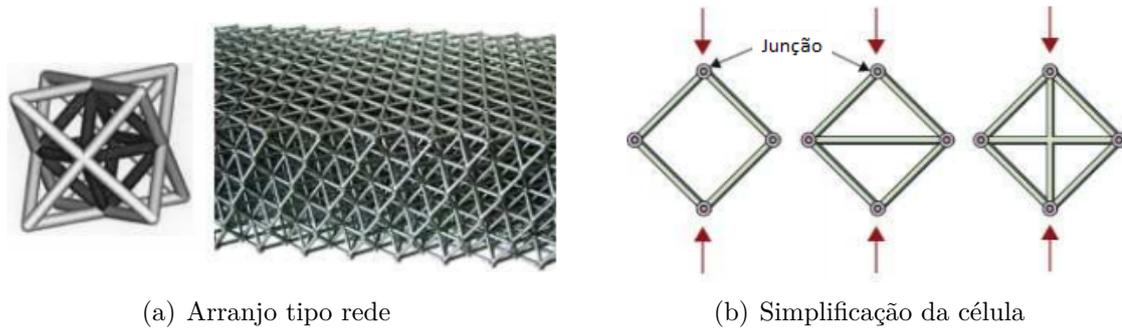


Fonte: PETEL *et al*, 2012.

Essas micro estruturas são responsáveis por algumas das propriedades do polietileno expandido. A célula possui ausência de material polimérico no contorno das células, isso dificulta a condução entre as moléculas, seja em forma de calor, onda sonora ou até mesmo a distribuição de esforços em sua estrutura.

Outra propriedade obtida por esse arranjo é a capacidade de absorver energia mecânica por meio de deformação. O material ao ser submetido a esforços de compressão, transmite esses esforços em uma configuração tipo rede, que muito lembra uma treliça espacial não uniforme. As células compartilham junções que podem ser mais ou menos complexas, os esforços são transmitidos por essas junção. Uma simplificação do arranjo das células pode ser visualizado na Figura 6, a e b.

Figura 6 – Configuração das células do polietileno expandido.



Fonte: Adaptado de ASHBLY, 2011.

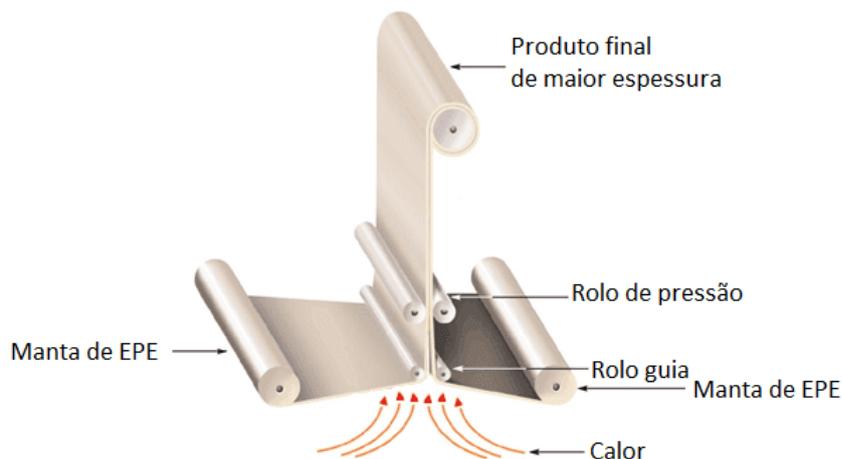
2.3.2 MACROESTRUTURA

Geralmente, o processo de formação da espuma por extrusão resulta no formato do tipo laminar ou perfil, dependendo do tipo da matriz de extrusão. Além disso, devido à formação de células, mencionadas na seção 2.3, a espuma cria uma característica anisotrópica, causando variações das propriedades mecânicas dependendo da orientação da célula.

O processo mais comum para obtenção de geometrias complexas, é caracterizado pela solda de mantas de espessuras mais finas, até se atingir espessuras maiores e posteriormente essas mantas (laminas) são recortadas e transformadas em objetos.

Esse processo de solda entre laminas, é chamado informalmente de colaminação, isso porque o processo se assemelha com a laminação, embora possua variações como o *input* de dois materiais e um gerador de calor para causar uma fundição superficial na área de contato entre as mantas, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Colaminação de mantas de EPE.



Fonte: Adaptado de ASHTER, 2014.

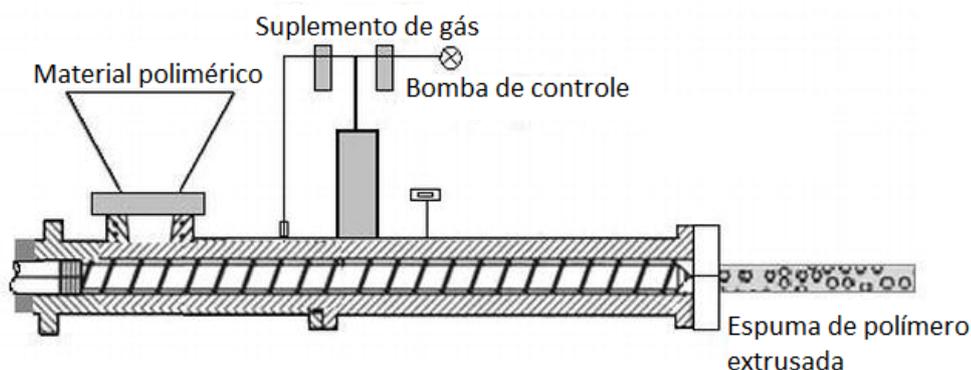
Esse aquecimento superficial é o fator que garante a soldabilidade entre materiais de EPE. Porém, ao aquecer o material tende à aglutinar, ocupando os espaços vazios das células, o que gera maior densidade localizada, formando objeto de densidade não homogênea e alterando as propriedades mecânicas do produto final de EPE.

2.4 FORMAÇÃO E PRODUÇÃO

Para confecção da espuma de polietileno expandido, é necessário a utilização de máquinas extrusoras. Nessa máquina é realizada a mistura do polímero de etileno com os aditivos necessários. Cada aditivo é responsável por agregar uma ou mais propriedades ao produto final. Dentre os aditivos pode-se citar o antichamas para diminuir a inflamabilidade, o pigmento para adição de cor, o agente antiestático para eliminação de cargas elétricas deixando o material mais condutivo, o talco e a cera que ajudam na estabilização do processo de extrusão.

Após a adição do polietileno na extrusora, com as devidas proporções de aditivos, a extrusora aquece esses materiais ao longo de uma rosca, conforme Figura 8, quando a mistura se encontra de forma homogênea, em alta pressão e no estado líquido, é inserido gás butano também em alta pressão. A espuma é gerada devido ao gás atuando como agente expensor quando ocorre a queda repentina de pressão ao sair da extrusora. A etapa final desse processo é o resfriamento, calibração e corte da espuma extrusada.

Figura 8 – Processo de extrusão do polietileno expandido.



Fonte: Adaptado de ALTAN, 2018.

Quando o polietileno expandido sai da máquina, devido ao seu processo de expansão utilizando gás, o material acaba retendo parte desse agente expensor, isso resulta em um alto índice de inflamabilidade, o que gera riscos ao ser manuseado. Por conta disso, o material precisa ficar em repouso durante um determinado tempo para que ocorra a difusão do gás na atmosfera.

O valor comercial da espuma de EPE e a sua aplicação dependem diretamente das suas propriedades, que por sinal são diferentes do polietileno utilizado como matéria prima. A Tabela 1 demonstra a comparação das propriedades mecânicas entre a espuma de polietileno e sua matéria prima.

Tabela 1 – Comparação das propriedades entre matéria prima (PE) e produto final (EPE).

	Densidade (kg/m ³)	Modulo de Young (GPa)	Resistência a flexão (MPa)	Condutividade térmica (W/m.K)
PE	950	0,94	33	0,195
EPE	150	0,024	0,63	0,04

Fonte: Adaptado de ASHBY, 2011. ASHBY2

2.5 INTERESSES PARA A INDÚSTRIA

- **Flutuadores:** Devido a capacidade da espuma de polietileno expandido de flutuar na água, ela pode ser empregada em diversos objetos. A matéria prima que é utilizada permite que o material não seja tóxico, sendo utilizado em brinquedos para piscina, coletes salva vidas e também no setor naval, podendo ser empregado na confecção de *boom* de contenção de petróleo *offshore*, representado na Figura 9.

Figura 9 – *Boom* - Barreiras de contenção de petróleo *offshore*.



Fonte: ELASTEC, 2021.

- **Proteção contra impactos:** O EPE consegue se deformar com facilidade, podendo absorver energia na forma de impacto. Essa característica possibilita a utilização do material para embalagens e transporte de produtos frágeis, como por exemplo: *notebooks*, monitores, frascos de vidro, entre outros, conforme mostrado na Figura 10.

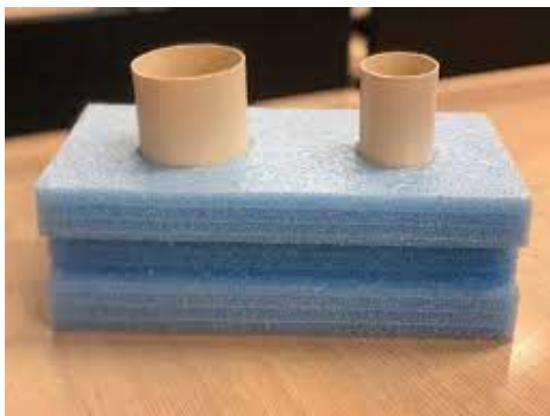
Figura 10 – Calço protetor de EPE ESD.



Fonte: UNIPOLI, 2020.

- **Construção civil:** No setor da construção civil, a espuma de polietileno é empregada como um molde temporário para concretar lajes de edifícios, Figura 11. Após a hidratação do cimento, é possível remover o molde ou parte dele, de modo a ficar o seu negativo. Esse espaço que antes era ocupado por espuma é substituído por encanamentos e tubulações. Além dos moldes para passagem de tubulações, também é possível encontrar polietileno expandido nos pisos dos edifícios. Utilizando uma manta de EPE é possível a diminuição da passagem de ruídos entre os pisos e lajes de prédios, conforme Figura 12.

Figura 11 – Molde de EPE para lajes.



Fonte: UNIPOLI, 2020.

Figura 12 – Manta acústica de EPE.



Fonte: Adaptado de AUBICON, 2019.

- **Isolamento térmico:** Em alguns equipamentos como ar-condicionado e geladeiras, é possível encontrar revestimentos de tubos feitos de espuma de polietileno, conforme Figura 13, devido a sua capacidade de dificultar a troca térmica do calor por convecção e condução dos tubos refrigerados com o meio externo.

Figura 13 – EPE para isolamento térmico.



Fonte: ARMACELL, 2021.

2.6 PROPRIEDADES E ENSAIOS

As propriedades físicas são características específicas de uma matéria. Essas características podem ser observadas quando a matéria é submetida a ação mecânica. Monitorar e observar essas propriedades tem por finalidade levantar dados e conhecer o comportamento do material.

De acordo com Norton (2013), os melhores dados de propriedades são aqueles adquiridos por meio de ensaios destrutivos ou não destrutivos. Contudo, os testes não reproduzem com precisão a aplicação real do material, mesmo com amostras semelhantes. Esse tipo de dados servem para suporte e referência para aplicações práticas.

Os testes são padronizados sobre condições específicas, se baseando em regulamentos e normas feitas por organizações conceituadas como por exemplo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Norton (2013) assevera que na ausência de testes específicos o engenheiro deve-se adaptar de acordo com a situação.

3 METODOLOGIA

3.1 DENSIDADE

Para caracterização do material utilizado foi realizado um estudo simples de densidade. Embora o material recém processado apresente variações de seu volume, após um período ele tende a se estabilizar. Embora, utilizando o seu estado inicial, foram definidos corpos de provas com dimensões de 100 mm de comprimento, 100 mm de largura e 5 mm de espessura. Em seguida, foi medida sua massa e calculado sua densidade pela Equação 1. O instrumento utilizado para medição de massa foi uma balança de precisão da marca Inpelanyu, modelo N0981, com resolução de 0,01 g e faixa de medição de 0-200 g.

$$D = \frac{Massa}{Volume} = \frac{[kg]}{[m^3]} \quad (1)$$

3.2 INSPEÇÃO VISUAL

Os dois tipos de análise visual utilizados foram o exame visual direto e o exame visual com o auxílio de equipamento. Para o modelo visual direto, foram realizados os seguintes procedimentos: na presença de uma boa iluminação o corpo de prova foi posicionado em superfície plana e clara. Onde verificou-se os aspectos nas quatro faces de um bloco de EPE com dimensões de 50 mm de altura, 100 mm de comprimento e largura.

Após a análise visual direta, foi realizado o exame visual por equipamento, utilizando um microscópio eletrônico da marca *High Cloud*, modelo S4, com taxa de ampliação de 1500-3000 vezes. Com o bloco de espuma de polietileno já apoiado sobre a mesa, foi realizado a configuração e regulagem do equipamento, sendo posteriormente realizado o exame na face que apresenta a estrutura da célula.

3.3 ANÁLISE MÉTRICA

Conforme dito na seção 3.1, o volume do polietileno expandido varia durante o tempo até a sua estabilização, esse período pode durar dias. Portanto foi feita uma análise estatística com espumas de quatro densidades diferente, sendo três corpos de prova para cada densidade e as medições eram feitas três vezes em cada corpo de prova. O objetivo dessas medições é a determinação e comparação da taxa de variação da dimensão, levando

em consideração a variável da densidade inicial. Sendo assim, foram utilizados doze corpos de prova com quatro densidades diferentes.

Por mais habilidoso que seja o operador, os erros de medição ainda estarão presente, são indesejáveis porem inevitável. Existem dois principais tipos de erros, aleatório e sistemático. Os erros do tipo aleatório é a parte imprevisível do erro, já o sistemático é a parcela previsível (ALBERTAZZI; SOUSA, 2018). Quando medições repetitivas são efetuadas a variação de resultados é definido como erro aleatório, já quando o operador mede de maneira errada é definida como erro sistemático. As medições foram realizadas de maneira aleatória, procurando evitar erros do tipo sistemático.

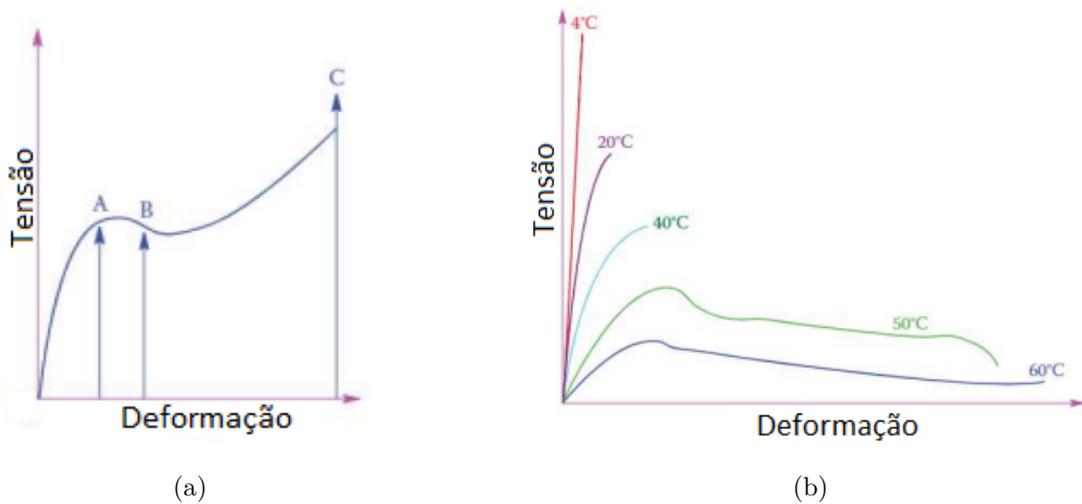
Sabendo disso, três medições foram obtidas para extração da média aritmética, sendo a média utilizada para determinação da dimensão, diminuindo assim os erros por parte do operador. Contudo, ainda foram utilizados três corpos de provas de mesma densidade, para maior confiabilidade dos dados por meio da reprodutibilidade.

O instrumento utilizado para análise métrica foi um paquímetro digital da marca Tongfeng, modelo TFLH0125, com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0-150 mm.

3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Para determinação de alguns tipos de propriedades mecânicas são utilizados gráficos de tensão por deformação. De acordo com Carraher (2017), os polímeros seguem quase o mesmo comportamento quando submetidos a esforços. A Figura 14-a mostra a curva padrão de tensão por deformação, enquanto a Figura 14-b representa o comportamento do material pela curva, onde o mesmo pode variar de acordo com a temperatura no instante do ensaio.

Figura 14 – Curvas Tensão-Deformação, a Figura (a) é demonstrado Curva Tensão-Deformação padrão, os pontos "A" representa o limite de escoamento, o ponto "B" representa o início da deformação plástica e por fim o ponto "C" representa a ruptura do material. Já a Figura (b) é demonstrado a variação da curva em relação a temperatura de 4°C, 20°C, 40°C, 50°C e 60°C.



Fonte: Adaptado de CARRAHER, 2017.

O ensaio de compressão foi realizado em uma máquina simples da marca Hebert Lambert, modelo S159/18, conforme mostrado na Figura 15. O processo de medição tensão-deformação é aferido nesse equipamento de maneira pontual, sendo de difícil constatação das características como limite de resistência, limite de escoamento, zona plástica e elástica.

Figura 15 – Máquina de tração e compressão, marca Hebert Lambert.



Fonte: Próprio autor, 2021.

De maneira a contornar essa situação, foi utilizado o método de pesquisa exploratória para encontrar o gráfico específico tensão-deformação do polietileno expandido. Através da pesquisa foi identificado o ponto de transição da zona elástica para plástica. Sendo assim, ao aferir a medição na máquina de compressão é possível determinar quanto de carga é necessário para se obter o resultado naquele ponto.

O teste foi realizado utilizando corpos de prova de densidade de 28 e 123 kg/m^3 com 50 mm de altura, 100 mm de comprimento e largura. O corpo de prova foi posicionado nos pratos de maneira que ficassem levemente pressionado, logo em seguida, era submetido a um carregamento crescente e verificado na régua ao lado do prato a deformação exercida. Enquanto isso, a célula de carga posicionada na ponta da haste do prato, registrava a carga aplicada.

3.5 ENSAIO DE *CREEP*

A espuma de polietileno sofre do fenômeno denominado de fluência, pode ser definida como a deformação lenta e contínua de um material sob carga constante (YANNI, 2009). Para se medir esse efeito foi utilizado o ensaio de *creep*, baseando-se na norma ASTM D3575-93 (2000).

Para Carraher (2017), a fluência é a curva formada pela complacência, que pode ser descrita pela Equação 2. Esse comportamento se assemelha ao fluxo viscoso e estão diretamente relacionadas, assim como a deformação está linearmente relacionada com a complacência e inversamente relacionada à tensão.

$$Complacência = \frac{Tensão}{Deformação} \quad (2)$$

O procedimento do ensaio foi a separação do corpo de prova idêntico aos demais ensaios, em formatos de prismas com densidades de 28 e 128 kg/m^3 . Após sua identificação, os mesmos foram posicionados em uma estrutura que evita o desalinhamento do carregamento, com o sentido de solda perpendicular ao vetor de carregamento.

Em seguida, foram utilizados cargas de 69 e 241,3 N em razão da densidade, e aplicado sobre os corpos de prova. Foram obtidas medições periódicas, através do mostrador posicionado ao lado do corpo de prova. A primeira medição foi obtida sem o carregamento para comparação, a segunda foi realizada 60 segundos após o carregamento.

3.6 ENSAIO DE RESILIÊNCIA

Para realização do ensaio de resiliência, foi utilizado a norma ABNT NBR 8619 (2015). Essa norma determina a realização do ensaio na espuma de poliuretano, porém, considerando que ainda não existe uma norma específica para ensaios na espuma de polietileno, é possível afirmar que a mesma norma atende ao estudo devido as similaridades entre as espumas e também por serem concorrentes comerciais.

O ensaio consiste na queda de uma esfera de aço sobre um corpo de prova de espuma. Quando a esfera atinge a espuma, parte da energia do impacto é convertida em deformação e posteriormente uma força oposta empurra a esfera para cima, fazendo com que a mesma retorne a uma altitude menor que a de lançamento. A diferença entre a altitude lançada e a de retorno é proporcional a energia dissipada. Foram registrados filmagens com a ajuda de um equipamento para apuração dos resultados.

O corpo de prova possuía dimensões de 50 mm de altura, 100 mm de comprimento e largura. Foram realizados três testes com espumas de duas densidades diferentes, 28 e 123 kg/m^3 . Também não foram levados em consideração os valores de ensaios nos quais a esfera tocava nas paredes do tubo, tanto na queda como no ressalto.

3.7 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÕES UTILIZADOS

Abaixo é mostrado o Quadro 2 com os instrumentos utilizados para desenvolvimento do trabalho.

Quadro 2 - Instrumentos de medição utilizados.

Equipamento	Marca	Modelo
Balança de precisão	Inpelanyu	N0981
Paquímetro	Tongfeng	TFLH0125
Microscópio eletrônico	High Cloud	S4
Máquina de compressão	Hebert Lambert	S159/18
Equipamento para ensaio de <i>creep</i>	(Desenvolvido)	N/A
Equipamento para ensaio de resiliência	(Desenvolvido)	N/A

Fonte: Próprio Autor, 2021.

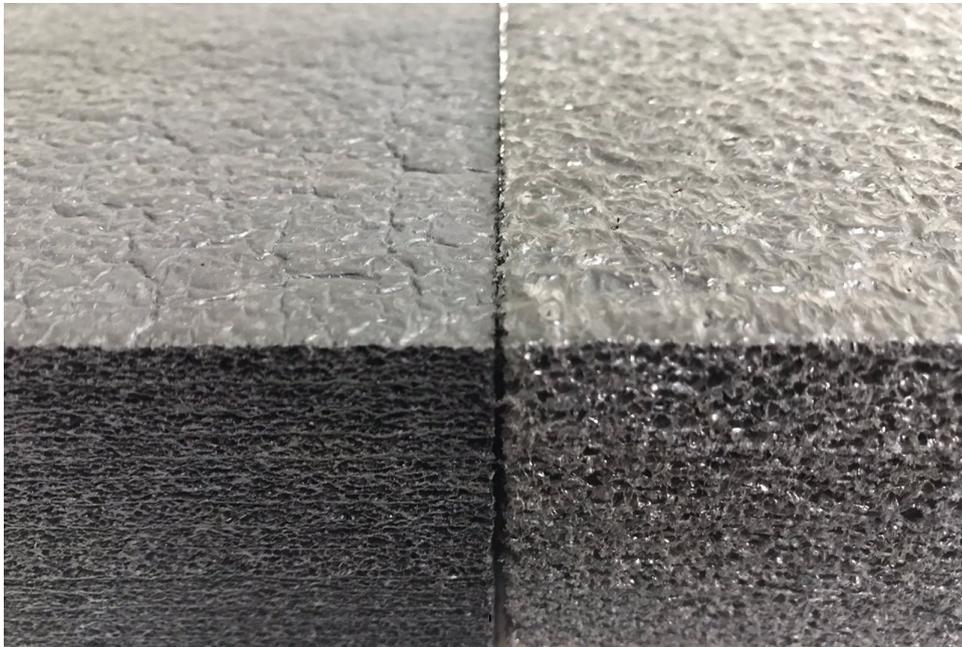
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse tópico é discutido sobre os resultados obtidos nos ensaios. Também são demonstrados as dificuldades e as hipóteses formuladas a partir dos resultados e dos conhecimentos obtidos através de pesquisas empíricas e pelo método exploratório.

4.1 ASPECTOS VISUAIS

Realizando o ensaio visual sem auxílio de equipamentos, ao observar o material é possível notar que possui faces mais lisas e outras mais porosas, isso se deve ao processo de formação do EPE, descrito na seção 2.4. As faces lisas são as camadas mais externas, possuindo contato com a matriz de extrusão e o resfriamento mais rápido, formando uma película sobre as células. Já as faces porosas são as faces internas da espuma, que são reveladas ao provocar um corte, sendo assim possível visualizar as células formadas pelo agente expensor. A Figura 16 mostra a aresta de interseção entre as duas faces.

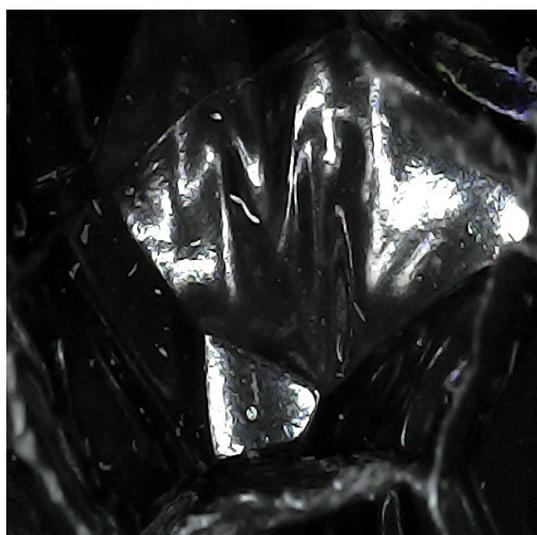
Figura 16 – Aspectos visuais dos corpos de prova de 123 e 28 kg/m^3 , respectivamente.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Ao fazer a inspeção visual com auxílio de um microscópio, é possível visualizar a estrutura celular, conforme mostrado na Figura 17-a e 17-b. Além disso, devido a diferença de coloração entre as espumas apresentada nas figuras é possível evidenciar as impurezas contidas, causadas principalmente pelo processo de reciclagem do material.

Figura 17 – Polietileno expandido com zoom de 2000x



(a) Célula do EPE preto



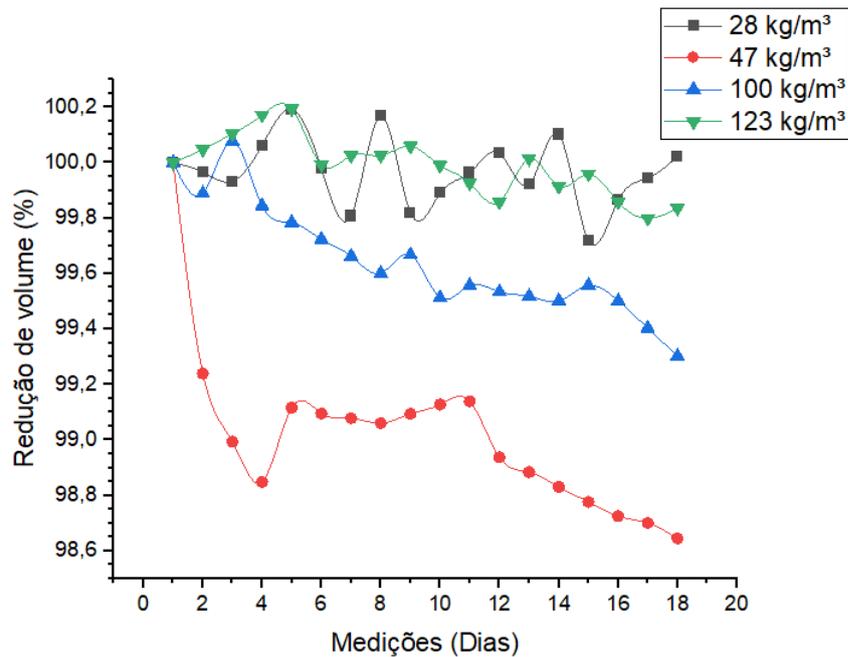
(b) Célula do EPE azul

Fonte: Próprio Autor, 2021.

4.2 INSTABILIDADE VOLUMÉTRICA

O objetivo da análise métrica foi determinar uma taxa de contração do material ao longo do tempo, os ensaios foram realizados sempre no mesmo horário ao longo de dezoito dias, não havendo simultaneidade entre as variações de densidade. Os resultados mostrados através do gráfico na Figura 18 foram discrepantes, para a determinação de uma formulação confiável se faz necessário novo estudo restringindo mais variáveis, como por exemplo: impurezas contidas nos materiais recicláveis, temperatura e fórmula de produção.

Figura 18 – Comparação dos resultados das análises métricas com variação da densidade.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

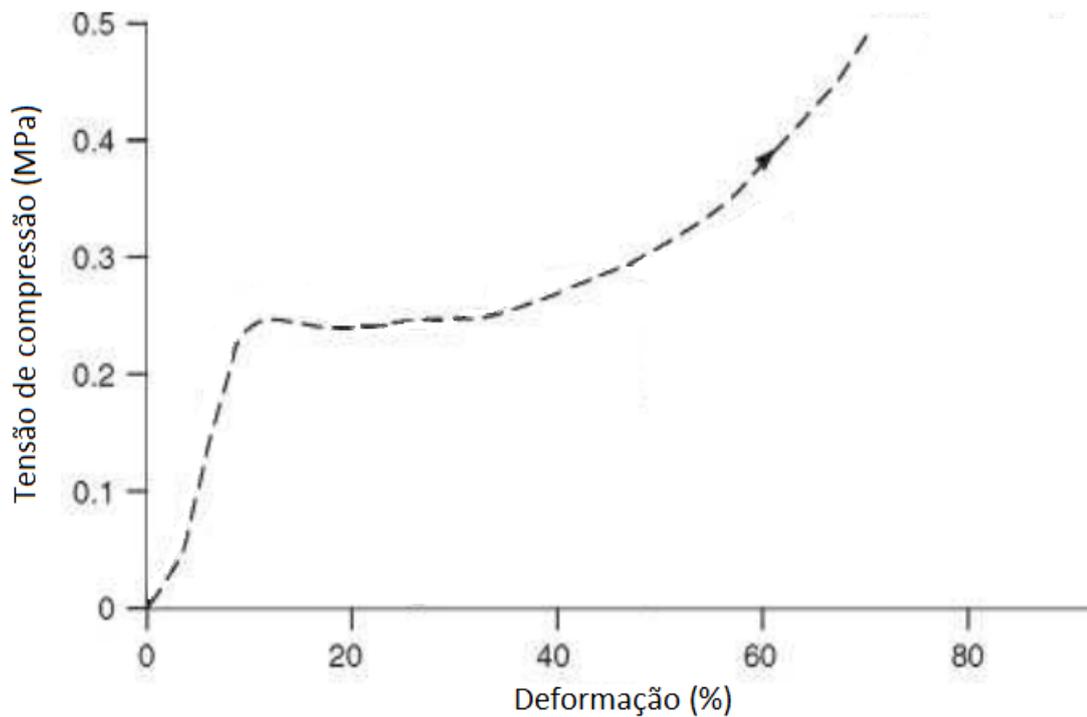
O gráfico não desconsidera os erros de medição descrito na seção 3.3, o que justifica as oscilações, embora os procedimentos utilizados tenham por objetivo amenizar suas influências nos resultados.

4.3 DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA NO SENTIDO LONGITUDINAL DE COMPRESSÃO

Devido as limitações do equipamento para realizar o ensaio de compressão foram utilizados dados de terceiros para definir os parâmetros do material ensaiado.

O gráfico apresentado na Figura 19, mostra o diagrama tensão-deformação de acordo com Mills (2007), onde o limite de escoamento, que é definido por apresentar a transição entre a zona elástica e plástica, ocorre próximo dos 10% de deformação. A densidade do material utilizado pelo autor nesse ensaio está entre $65-70 \text{ kg/m}^3$

Figura 19 – Curva de tensão-deformação compressiva para espuma LDPE.



Fonte: Adaptado de Mills (2007)

Supondo que o escoamento entre o material do ensaio de Mills seja semelhante ao corpo de prova, foi realizado o teste para definir a carga necessária para obtenção da deformação desejada. Os resultados dos ensaios podem ser observados no Quadro 3, que demonstra que a diferença de densidade não impactou de maneira significativa.

Quadro 3 - Resultados do ensaio de compressão em espuma de polietileno com deformação de 10%.

Densidade	Descrição	Carregamento
28 kg/m ³	Amostra 1	25,1 kgf
	Amostra 2	28,9 kgf
	Amostra 3	23,9 kgf
123 kg/m ³	Amostra 1	25,3 kgf
	Amostra 2	26,7 kgf
	Amostra 3	23,6 kgf

Fonte: Próprio Autor, 2021.

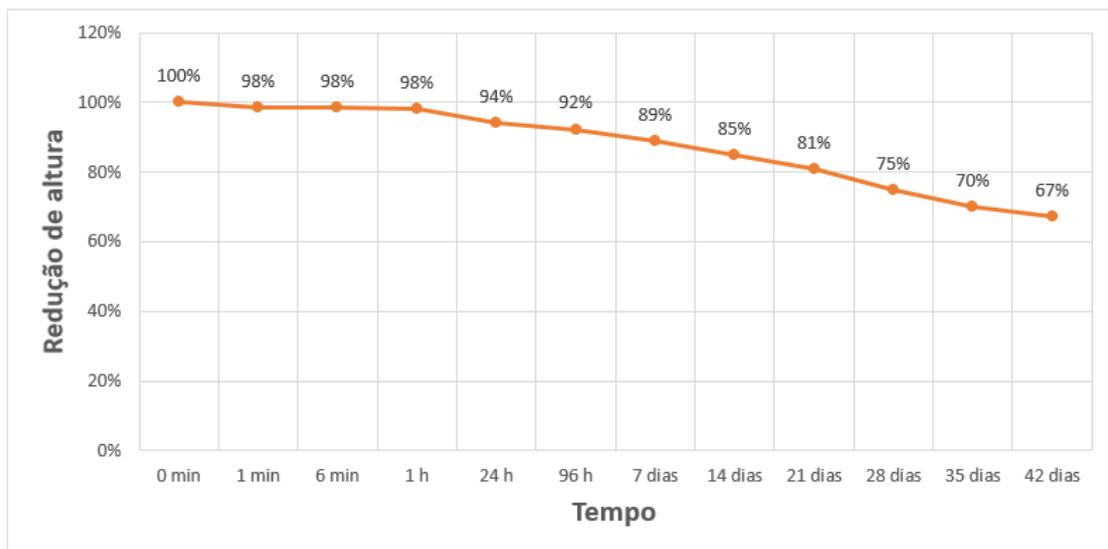
Seguindo a Equação 3, que calcula tensão (σ) aplicada na área (A), gerada pela força média resultante (\bar{F}), obtêm-se um resultado de 0,251 MPa que converge com o estudo analisado.

$$\sigma = \frac{\bar{F}}{A} = \frac{25,58 \cdot 9,81}{0,01} \approx 0,251 \text{ MPa} \quad (3)$$

4.4 DEFORMAÇÃO SOBRE CARREGAMENTO CONTÍNUO

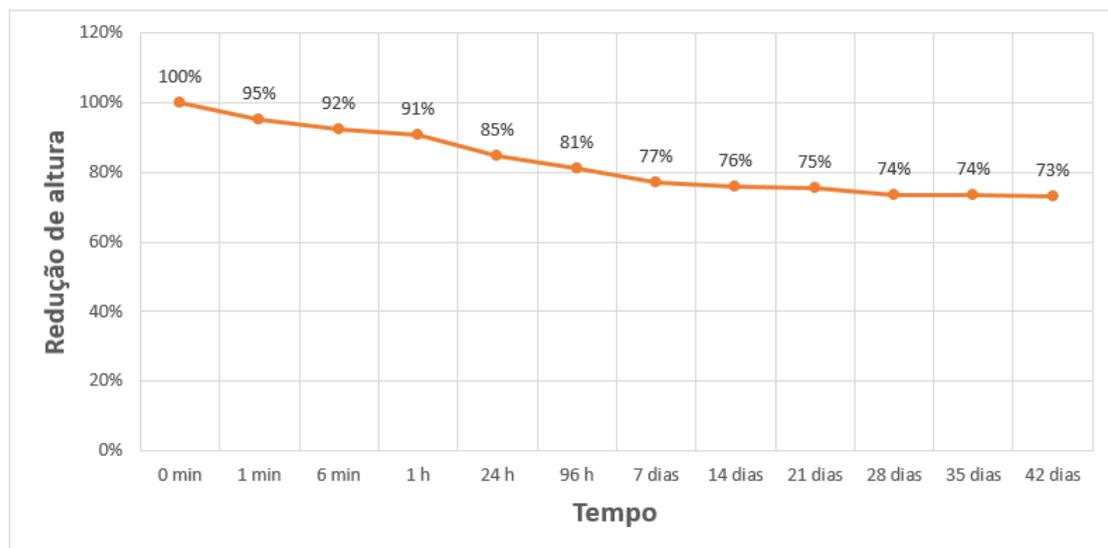
A fluência foi determinada pelo ensaio de *creep*, embora apresente os primeiros resultados já no primeiro minuto é um ensaio que leva dias para ser concluído. As leituras registradas foram feitas em maior frequência no início do teste e após o período de um dia foram registrados diariamente. Os resultados obtidos foram plotados nos gráficos das Figura 20 e 21.

Figura 20 – Variação da altura obtida no ensaio de *creep* com EPE de 28 kg/m^3 .



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Figura 21 – Variação da altura obtida no ensaio de *creep* com EPE de 123 kg/m^3 .



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Analisando os resultados da variação de altura entre as amostras é possível determinar que ocorre é uma convergência mais rápida na espuma de maior densidade, visto que no final dos 42 dias a espuma de maior densidade ainda manteve 78% de sua altura, enquanto a espuma de menor densidade estava com 67%.

4.5 CAPACIDADE DE ABSORVER ENERGIA MECÂNICA EM REGIME ELÁSTICO

O ensaio realizado conforme descrito na seção 3.6 teve por objetivo determinar a resiliência do material, com a ajuda de um equipamento foi realizado filmagens para apuração dos resultados. A Figura 22 mostra o instante da obtenção do resultado durante a realização do ensaio.

Figura 22 – Teste para determinação da resiliência da espuma de polietileno.



Fonte: Próprio Autor, 2021.

Devido ao arranjo tipo rede, explicado na Seção 2.3.1, a espuma ao receber energia na forma de impacto dissipa essa energia ao deformar, por conta disso a densidade da espuma é um fator crucial para determinação da propriedade de resiliência. Quanto maior a densidade da espuma menor serão os tamanhos das células e mais difícil fica da espuma

se deformar. O ensaio comprova isso ao avaliar o resultado do corpo de prova de 28 kg/m^3 que registrou uma resiliência entre 45-50%, comparado com o corpo de prova com densidade de 123 kg/m^3 que apresentou um resultado bem inferior, aproximadamente 20%.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve seus objetivos alcançados, embora alguns resultados foram divergentes do previsto, sendo demonstrados as propriedades implícitas do material.

Ao comparar a espuma de polietileno com a matéria prima é possível perceber que as propriedades não se correlacionam diretamente devido a variações do processo. Também foi possível perceber que essas mesmas variações impactam diretamente na instabilidade volumétrica, onde somente tendo a densidade como variável, não foi possível determinar uma taxa contração, sendo necessário o aprimoramento dos testes. Também foi perceptível ao fazer os ensaios visuais a quantidade de impurezas presentes no produto final, devido principalmente a reciclagem do polímero.

Já no quesito de tensão deformação, foram validados os dados do estudo de Mills (2007), onde o ponto com 10% de deformação foi obtido aplicando uma tensão de 0,251 MPa.

Os ensaios de resiliência demonstraram que quase metade da energia do impacto é absorvida na forma plástica pelo EPE com densidade de 28 kg/m^3 e que quanto maior a densidade menos resiliente é a espuma.

Embora tenham ocorrido variações, com exceção da instabilidade volumétrica, os resultados dos ensaios se mostraram satisfatórios, a ponto de servir de base para mais pesquisas desse material pouco explorado em nosso país.

REFERÊNCIAS

- ABIPLAST. *Indústria Brasileira de Transformação e Reciclagem de Material Plástico - Perfil 2019*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 9.
- ABNT NBR 8619. Espuma flexível de poliuretano — determinação da resiliência. In: . segunda edição. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 26.
- AKCELRUD, L. *Fundamentos da ciência dos polímeros*. [S.l.]: Editora Manole Ltda, 2007. Citado na página 12.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. *Fundamentos de metrologia científica e industrial. 2ª Edição*. [S.l.]: Barueri, SP: Manole, 2018. Citado na página 23.
- ALTAN, M. Thermoplastic foams: Processing, manufacturing, and characterization. *Polymerization. London: IntechOpen*, p. 117–137, 2018. Nenhuma citação no texto.
- ARMACELL. *ARMACELL PRODUCT SELECTOR - Tube Insulation*. [s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.armacell.us/products/tubolit/>>. Nenhuma citação no texto.
- ASHBY, M. F. Chapter 11 - designing hybrid materials. In: ASHBY, M. F. (Ed.). *Materials Selection in Mechanical Design (Fourth Edition)*. Fourth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. p. 299–340. ISBN 978-1-85617-663-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781856176637000114>>. Nenhuma citação no texto.
- ASHTER, S. A. 4 - lamination. In: ASHTER, S. A. (Ed.). *Thermoforming of Single and Multilayer Laminates*. Oxford: William Andrew Publishing, 2014. p. 65–81. ISBN 978-1-4557-3172-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781455731725000049>>. Nenhuma citação no texto.
- ASTM 1248. – *American Society for Testing and Materials - Metodologia de ensaios*. [S.l.: s.n.], 2012. Nenhuma citação no texto.
- ASTM D3575-93. – *American Society for Testing and Materials - Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials made from Olefin Polymers, Annual Book of ASTM Standards*. [S.l.: s.n.], 2000. Citado na página 25.
- AUBICON. <https://www.aubicon.com.br/informacoes/manta-acustica-para-piso/manta-acustica-para-piso-2-2/>. 2019. Nenhuma citação no texto.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais - Uma introdução*. [S.l.]: LTC, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 11, 12 e 13.
- CANEVAROLO, J. S. V. Ciência dos polímeros. *Artiliber editora, São Paulo*, p. 110–115, 2002. Citado na página 11.
- CARRAHER, J. *Introduction to polymer chemistry*. [S.l.]: CRC press, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.

CHANDA, M.; ROY, S. K. *Plastics technology handbook*. [S.l.]: CRC press, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.

CRONIN, D.; OUELLET, S. Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties. *Polymer Testing*, Elsevier, v. 53, p. 40–50, 2016. Citado na página 9.

ELASTEC. <https://www.elastec.com/pt/produtos/barreiras-flutuantes/barreira-de-contenção-de-óleo/>. 2021. Nenhuma citação no texto.

KLEMPNER, K. F. D. *Handbook of polymeric foams and foam technology*. [S.l.]: Hanser Publishers, 1991. Citado na página 9.

MANOEL, G. F. et al. Caracterização físico-química e estudo reológico de asfaltos modificados pelos polímeros pead, pebd e pelbd e contribuição ao estudo do envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo. Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Citado na página 13.

MCKEEN, L. W. Chapter 9 - polyolefins and acrylics. In: MCKEEN, L. W. (Ed.). *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers (Second Edition)*. Second edition. Oxford: William Andrew Publishing, 2010, (Plastics Design Library). p. 229–243. ISBN 978-0-08-096450-8. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080964508000090>>. Citado na página 14.

MILLS, N. *Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide*. [S.l.]: Elsevier, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 34.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. [S.l.]: bookman editora, 2013. Citado na página 21.

PETEL, O. et al. The elastic–plastic behaviour of foam under shock loading. *Shock Waves*, v. 23, 11 2012. Nenhuma citação no texto.

SEBASTIÃO, V. C. J. Ciência dos polímeros. *Artiber editora, São Paulo*, 2010. Citado na página 12.

UNIPOLI. <https://www.unipoli.com.br>. 2020. Nenhuma citação no texto.

YANNI, V. Y. G. *Multi-scale investigation of tensile creep of ultra-high performance concrete for bridge applications*. [S.l.]: Georgia Institute of Technology, 2009. Citado na página 25.

ZHANG, H. et al. Effect of linear low density-polyethylene grafted with maleic anhydride (lldpe-g-mah) on properties of high density-polyethylene/styrene–butadiene–styrene (hdpe/sbs) modified asphalt. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 192–198, 2013. ISSN 0950-0618. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813003887>>. Citado na página 13.

ZHUKOV, A. Insulation systems with the expanded polyethylene application. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 51, n. 30, p. 803–807, 2018. Citado na página 9.