

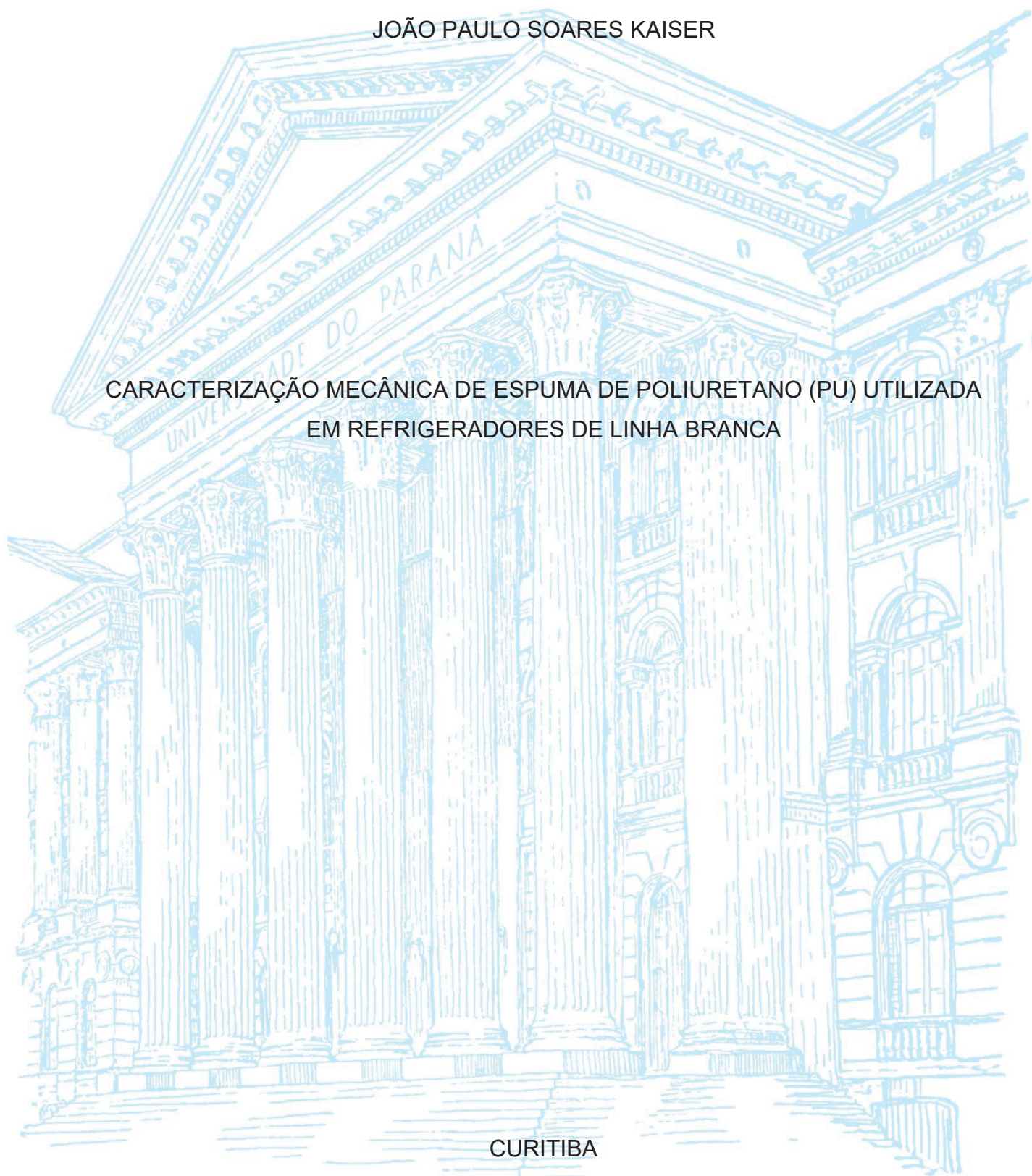
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PAULO SOARES KAISER

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ESPUMA DE POLIURETANO (PU) UTILIZADA
EM REFRIGERADORES DE LINHA BRANCA

CURITIBA

2023



JOÃO PAULO SOARES KAISER

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ESPUMA DE POLIURETANO (PU) UTILIZADA
EM REFRIGERADORES DE LINHA BRANCA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Harrison Lourenço Corrêa
Coorientador: Prof. Dr. João Morais da Silva Neto

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Kaiser, João Paulo Soares

Caracterização mecânica de espuma de poliuretano (PU) utilizada em refrigeradores de linha branca. / João Paulo Soares Kaiser. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Harrison Lourenço Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. João Morais da Silva Neto

1. Poliuretanos. 2. Microestrutura. 3. Refrigeradores. I. Corrêa, Harrison Lourenço. II. Silva Neto, João Morais da. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
MANUFATURA - 40001016171P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOÃO PAULO SOARES KAISER** intitulada: **Caracterização mecânica de espuma de poliuretano (PU) utilizada em refrigeradores de linha branca.**, sob orientação do Prof. Dr. HARRISON LOURENÇO CORRÊA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 12 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica
03/10/2023 14:54:40.0
HARRISON LOURENÇO CORRÊA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
20/10/2023 16:35:11.0
ANA SOFIA CLÍMACO MONTEIRO DE OLIVEIRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
23/10/2023 15:39:23.0
HERALDO NÉLIO CAMBRAIA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
17/10/2023 14:44:08.0
JOÃO MORAIS DA SILVA NETO
Coordenador(a) (DEPARTAMENTO DE ENG. MECÂNICA UFPR)

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dr. Harrison Lourenço Corrêa e ao professor coorientador Dr. João Morais da Silva Neto, pela orientação, apoio e confiança durante todas as etapas do programa.

À minha esposa, meus pais, minha irmã e meus amigos que me apoiaram em todos os momentos da elaboração desse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho, que me proporcionaram discussões frutuosas e suporte na execução dos testes.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR e à professora Dr. Ana Maria Furtado de Sousa do Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (IQ/UERJ) pela execução da análise via MEV das amostras.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo investigar as propriedades mecânicas da espuma de poliuretano utilizadas em gabinetes de refrigeradores da linha branca. Os resultados obtidos neste estudo têm o potencial de impulsionar avanços na utilização da espuma de poliuretano, especialmente na refrigeração, ao fornecer dados abrangentes sobre seu comportamento mecânico sob diferentes condições de carga. Para isso, foram coletadas amostras de duas regiões do gabinete, a saber, topo e base. As amostras também foram coletadas em duas direções, perpendicular e paralela ao crescimento da espuma. As amostras foram submetidas a medições de densidade, análises de microestrutura por meio de microscopia eletrônica de varredura, testes de estabilidade dimensional e os testes de tração, compressão e flexão para obter dados abrangentes sobre o comportamento mecânico da espuma sob diferentes condições de carga. Os resultados revelaram que as amostras coletadas do topo do gabinete apresentaram desempenho superior em comparação com as obtidas da base. A espuma demonstrou comportamento isotrópico sob compressão, enquanto exibiu comportamento anisotrópico sob tração e flexão. Quando alinhada paralelamente ao crescimento da espuma, a espuma apresentou um ligeiro aumento na tensão máxima nos testes de tração e flexão. No entanto, o teste de compressão mostrou resistência comparável em ambas as direções. Essas descobertas contribuem para uma melhor compreensão e utilização da espuma de PU em diversos setores industriais, especialmente na refrigeração. Os dados obtidos neste estudo podem apoiar a otimização de projetos e facilitar o desenvolvimento de soluções mais eficientes e economicamente viáveis.

Palavras-chave: espuma de poliuretano; propriedades mecânicas; gabinetes de refrigeradores; densidade; microestrutura; estabilidade dimensional; tração; compressão; flexão.

ABSTRACT

This study aims to investigate the mechanical properties of polyurethane foam used in white goods refrigerator cabinets. The results obtained in this study have the potential to drive advancements in the use of polyurethane foam, particularly in refrigeration, by providing comprehensive data on its mechanical behavior under different loading conditions. For this purpose, samples were collected from two regions of the cabinet, namely the top and base. The samples were also collected in two directions, perpendicular and parallel to the foam growth. The samples underwent density measurements, microstructure analysis using scanning electron microscopy, dimensional stability tests, and tensile, compression, and flexural tests to obtain comprehensive data on the mechanical behavior of the foam under different loading conditions. The results revealed that samples collected from the top of the cabinet exhibited superior performance compared to those obtained from the base. The foam demonstrated isotropic behavior under compression, while it exhibited anisotropic behavior under tension and flexure. When aligned parallel to the foam growth, the foam showed a slight increase in maximum stress in the tensile and flexural tests. However, the compression test showed comparable strength in both directions. These findings contribute to a better understanding and utilization of PU foam in various industrial sectors, especially in refrigeration. The data obtained in this study can support design optimization and facilitate the development of more efficient and economically viable solutions.

Keywords: polyurethane foam; mechanical properties; refrigerator cabinets; density; microstructure; dimensional stability; tensile; compression; flexure.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DISTRIBUIÇÃO DO MERCADO DE POLIURETANOS	15
FIGURA 2 – REAÇÃO DE POLIURETANO	18
FIGURA 3 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ESPUMA DE PU	19
FIGURA 4 – ESTÁGIOS DO PROCESSO DE ESPUMAÇÃO	20
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DA CURVA DE COMPRESSÃO	23
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO SOB COMPRESSÃO DAS ESPUMAS DE POLIURETANO.....	24
FIGURA 7 – REPRODUÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS ESPUMAS DE PU SOB COMPRESSÃO. DEFORMAÇÃO: (A) 4%, (B) 25%, (C) 50% E (D) 75%.....	25
FIGURA 8 – EXEMPLO DE AMOSTRA SOB TESTE DE COMPRESSÃO	26
FIGURA 9 – EXEMPLO DE CURVAS OBTIDAS SOB TESTE DE COMPRESSÃO	26
FIGURA 10 – EXEMPLO DE AMOSTRA PARA TESTE DE TRAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE CHAPA DE ALUMÍNIO.	27
FIGURA 11 – EXEMPLO DE EQUIPAMENTO E DE AMOSTRA PARA TESTE DE TRAÇÃO	28
FIGURA 12 – EXEMPLO DE TESTE DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS E CURVAS OBTIDAS	29
FIGURA 13 – CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO PARA ESPUMA ANISOTRÓPICA SOB COMPRESSÃO: (A) PARALELO E (B) PERPENDICULAR.....	30
FIGURA 14 – TENSÃO DE PLATÔ E ENERGIA ABSORVIDA SEGUNDO A DIREÇÃO DE APLICAÇÃO DA CARGA.....	31
FIGURA 15 – ESPESSURA RELATIVA DE MATERIAIS COMPARADOS A ESPUMA DE PU	32
FIGURA 16 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA E CONTRIBUIÇÃO DAS FASES DA ESPUMA RÍGIDA DE PU EM FUNÇÃO DA DENSIDADE.....	33
FIGURA 17 – ENVELHECIMENTO EM ESPUMAS DE POLIURETANO	34
FIGURA 18 – VISÃO GERAL DOS FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DAS ESPUMAS RÍGIDAS DE PU.....	35
FIGURA 19 – EXEMPLO DE GABINETE DE REFRIGERADOR COM A ESPUMA DE PU EVIDENCIADA.....	36

FIGURA 20 – EXEMPLO DE MÁQUINA E MOLDE DE ESPUMAÇÃO PARA REFRIGERADORES	37
FIGURA 21 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO DE ESPUMA DE PU ...	38
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM GABINETE COM CAVIDADE PARA BAIXO.....	39
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM GABINETE COM CAVIDADE PARA CIMA.....	39
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM UMA PORTA DE REFRIGERADOR	40
FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE GABINETE DUAS PORTAS COM A INDICAÇÃO DA REGIÃO DE COLETA DAS AMOSTRAS ...	42
FIGURA 26 – ÁRVORE DE AMOSTRAGEM PARA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DA ESPUMA DE PU	43
FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	45
FIGURA 28 – PROJETO DO DISPOSITIVO.....	46
FIGURA 29 – DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO: (A) PROJETO 3D, (B) PROTÓTIPO EM IMPRESSÃO 3D, (C) DISPOSITIVO FINAL USINADO EM ABS.....	47
FIGURA 30 – DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA: (A) NORMA ASTM, (B) DIMENSIONAL UTILIZADO.....	47
FIGURA 31 – CORPO DE PROVA DO TESTE DE TRAÇÃO.....	48
FIGURA 32 – ÁRVORE DE AMOSTRAGEM PARA TESTE DE TRAÇÃO	48
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DA CURVA DO TESTE DE COMPRESSÃO	50
FIGURA 34 – TESTE DE FLEXÃO EM 3 PONTOS.....	52
FIGURA 35 – CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS	54
FIGURA 36 – TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO EPÓXI E SUBSTRATO RÍGIDO: (A) PROJETO E (B) CONFIGURAÇÃO DO TESTE.....	55
FIGURA 37 – FALHA DO TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO EPÓXI.....	56
FIGURA 38 – FALHA NO TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO RESINA E ENDURECEDOR.....	57
FIGURA 39 – PRIMEIRO PROJETO E PROTÓTIPO DO TESTE DE TRAÇÃO SEM ADESIVO	58
FIGURA 40 – MEV DA MICROESTRUTURA DA ESPUMA DE PU	60

FIGURA 41 – TAMANHO MÉDIO DAS CÉLULAS.....	61
FIGURA 42 – PROPORÇÃO MÉDIA DAS CÉLULAS.....	62
FIGURA 43 – ESPESSURA MÉDIA DAS CÉLULAS	62
FIGURA 44 – DENSIDADE E MASSA DAS AMOSTRAS.....	64
FIGURA 45 – DADOS E GRÁFICO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS	65
FIGURA 46 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS	66
FIGURA 47 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB TRAÇÃO: MÉDIA, TOPO E BASE.....	67
FIGURA 48 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB COMPRESSÃO: MÉDIA, TOPO E BASE	68
FIGURA 49 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB FLEXÃO: MÉDIA, TOPO E BASE.....	69
FIGURA 50 – ANÁLISE DOS DADOS DE TRAÇÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO	70
FIGURA 51 – ANÁLISE DOS DADOS DE COMPRESSÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO	73
FIGURA 52 – ANÁLISE DOS DADOS DE FLEXÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO	75
FIGURA 53 – GRÁFICO PARETO DOS EFEITOS DOS FATORES ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO.....	76
FIGURA 54 – TENSÃO MÁXIMA: TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO.....	78
FIGURA 55 – GRAU DE ANISOTROPIA: TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO. ..	79
FIGURA 56 – TOPO E BASE: DENSIDADE E ESTABILIDADE DIMENSIONAL	80
FIGURA 57 – TOPO E BASE: TENSÃO MÁXIMA EM TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO	80
FIGURA 58 – AMOSTRAS DE PU (BASE E TOPO)	81
FIGURA 59 – EXEMPLO EM CFD DO ENCLAUSURAMENTO DE AR NO PROCESSO DE ESPUMAÇÃO.....	82
FIGURA 60 – PROCESSO DE FORMAÇÃO DE ESPUMA EM UM REFRIGERADOR	83

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DE ESPUMAS POLIMÉRICAS	14
QUADRO 2 – TIPOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO	22
QUADRO 3 – RAZÕES DAS AMOSTRAS TESTADAS VIA TRAÇÃO	58

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FORMULAÇÃO GERAL PARA PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE PU...	20
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DA ESPUMA DE PU	61
TABELA 3 – DENSIDADE APARENTE	63
TABELA 4 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE TRAÇÃO.....	66
TABELA 5 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE COMPRESSÃO	67
TABELA 6 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE FLEXÃO.....	68
TABELA 7 – COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS REFRIGERADORES.....	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	ANÁLISE QUÍMICA DO POLIURETANO E SUAS PROPRIEDADES	18
2.1.1	O poliuretano	18
2.1.2	As espumas de poliuretano (PU).....	18
2.1.2.1	Isocianato	21
2.1.2.2	Poliol.....	21
2.1.2.3	Agente de expansão.....	21
2.1.2.4	Tipos de espumas de poliuretano.....	22
2.1.3	Propriedades das espumas de PU	22
2.1.3.1	Espuma de PU sob compressão	22
2.1.3.2	Espuma de PU sob tração.....	26
2.1.3.3	Espuma de PU sob flexão	28
2.1.3.4	Anisotropia.....	29
2.1.3.5	Propriedades térmicas.....	31
2.2	APLICAÇÃO DO POLIURETANO EM REFRIGERADORES	35
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
3.1	COLETA DE AMOSTRAS	41
3.2	ANÁLISES DAS AMOSTRAS.....	42
3.2.1	Análise da microestrutura da espuma de PU	42
3.2.2	Densidade aparente	43
3.2.3	Teste de estabilidade dimensional.....	44
3.2.4	Teste de tração.....	45
3.2.5	Teste de compressão	49
3.2.6	Teste de flexão em 3 pontos	51
3.2.7	Configuração das amostras com base nos testes de tração, compressão e flexão.....	53
4	DESENVOLVIMENTO DA EXPERIMENTAÇÃO.....	55

4.1	ESTABILIDADE DIMENSIONAL	55
4.2	TESTE DE TRAÇÃO	55
4.3	TESTE DE COMPRESSÃO E FLEXÃO	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	60
5.1.1	Características microestruturais da espuma de PU	60
5.1.2	Densidade aparente	63
5.1.3	Estabilidade dimensional	65
5.1.4	Teste de tração	66
5.1.5	Teste de compressão	67
5.1.6	Teste de flexão	68
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
5.2.1	Análise do comportamento em tração	70
5.2.2	Análise do comportamento em compressão	71
5.2.3	Análise do comportamento em flexão	74
5.2.4	Efeitos dos fatores da espuma de PU – Localização e Alinhamento	76
5.2.5	Fator alinhamento – Análise entre normal e paralelo	77
5.2.6	Fator localização – Análise entre base e topo	79
5.2.7	Comparação das propriedades obtidas com os outros materiais que compõem um refrigerador	84
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	85
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

Os poliuretanos (PU) são um grupo de materiais poliméricos que possuem umas das mais variadas aplicações. Podem ser encontrados em colchões, rodinhas de skate/patins, tintas e revestimentos, isolamentos, brinquedos dentre outros (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2021).

Em 1937, no início da Segunda Guerra Mundial, o Dr. Otto Bayer e seus colaboradores, com o intuito de encontrar um substituto para a borracha, descobriram a reação de polimerização de adição de diisocianatos. Com esta descoberta, a utilização do poliuretano, só nos Estados Unidos, movimentava 4 bilhões de libras em 1994, quase 6 bilhões de dólares na época (LEE; RAMESH, 2004). Em 2020 este valor passou de 50 bilhões de dólares e projeta-se que ultrapasse 80 bilhões em 2028 (FORTUNE BUSINESS INSIGHTS, 2021).

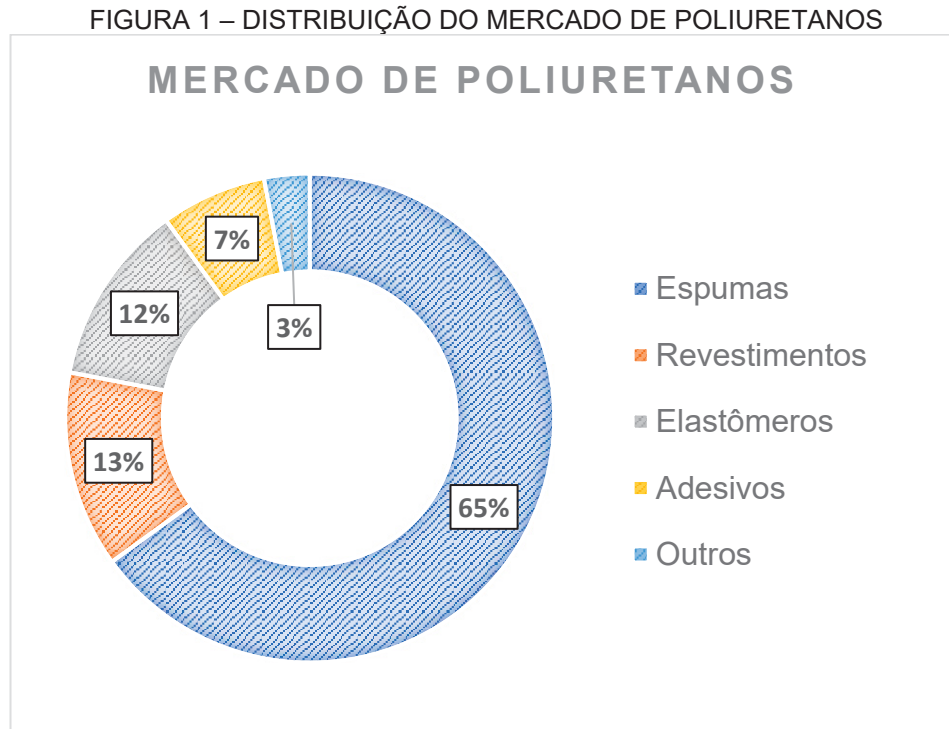
As espumas de PU, possuem vasta aplicação industrial visto que dispõem de propriedades como baixa densidade, fácil processamento, baixa condutividade térmica, absorção de som, resistência mecânica específica elevada e adesividade (KIM *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2017). Esta importância industrial teve uma elevada expansão no início do século XX, quando se teve o avanço contínuo das tecnologias dos plásticos que permitiu operações mais sofisticadas. Uma breve sequência dos desenvolvimentos de espumas é apresentada no QUADRO 1.

QUADRO 1 – HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DE ESPUMAS POLIMÉRICAS

Ano	Espuma	Inventor/Autor
1931	Espuma de Poliestireno	Munters and Tandberg
1937	Espuma de Poliuretano	Bayer
1941	Espuma de Polietileno	Johnson
1966	Espuma de Poliisocianurato	Ashida and Yagi
1967	Espuma de ABS	Woollard
1967	Espuma de PVC	Assigned to ICI
1968	Espuma de X-PE	Asaaka <i>et al</i>
1971	Espuma de PET	Dijkstra <i>et al</i>
1972	Espuma de Polipropileno	Parrish

FONTE: Adaptado de Lee; Ramesh (2004).

Os poliuretanos podem ser divididos em 5 grupos, nomeadamente espumas, revestimentos, elastômeros, adesivos e outras aplicações (PEYRTON; AVÉROUS, 2021). A distribuição percentual aproximada de cada grupo é ilustrada na FIGURA 1.



FONTE: O autor com base em Peyrton; Avérous (2021).

Neste contexto, o trabalho se aprofunda no conhecimento sobre as espumas de PU utilizadas como isolante térmico em refrigeradores de linha branca. Será descrita a importância e relevância da caracterização mecânica dessas espumas, visando compreender suas propriedades e sua aplicação específica em refrigeradores.

Será apresentado uma revisão de literatura com um panorama geral sobre o poliuretano e a espuma de PU, abordando as propriedades conhecidas por meio de estudos de diversos autores, bem como sua aplicação em refrigeradores. Em seguida, serão discutidos os métodos de teste disponíveis e os ajustes necessários para a realização desses testes no contexto das espumas de PU para refrigeradores.

Posteriormente, serão apresentados os resultados obtidos por meio dos testes realizados, e uma análise detalhada será feita com base nesses resultados. Dessa forma, este trabalho contribuirá para um melhor entendimento das propriedades mecânicas das espumas de PU utilizadas em refrigeradores de linha branca, fornecendo informações relevantes para futuros desenvolvimentos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A espuma de poliuretano é amplamente utilizada na indústria de refrigeradores comerciais de linha branca devido à sua propriedade como isolante térmico. No entanto, com os avanços contínuos no desenvolvimento de produtos para refrigeradores de linha branca, a espuma de poliuretano tem adquirido funções adicionais além de seu papel como isolante térmico, passando a desempenhar também uma função estrutural.

A necessidade de solucionar problemas de engenharia e constantemente reduzir custos demanda uma compreensão mais aprofundada das propriedades mecânicas das espumas de poliuretano, de modo a identificar com maior precisão os limites mecânicos da espuma utilizada. Portanto, a caracterização mecânica dessas espumas é essencial para otimizar seu desempenho, reduzir custos e solucionar desafios de engenharia relacionados aos refrigeradores.

Com um conhecimento aprofundado das propriedades mecânicas das espumas, será possível realizar análises de otimização de projeto e identificar oportunidades de melhoria na estrutura dos refrigeradores, resultando em produtos de maior resistência mecânica e com menor custo através da redução de massa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral obter um conhecimento aprofundado das propriedades mecânicas da espuma de poliuretano utilizada em refrigeradores comerciais de linha branca, visando melhor compreensão do comportamento do material.

1.2.2 Objetivos específicos

A presente proposta tem como objetivos específicos

- Através da revisão bibliográfica sobre o poliuretano, as espumas de poliuretano e sua aplicação na indústria de refrigeradores, compreender o estado atual do conhecimento nessa área.

- Definir a espuma de poliuretano em análise, por meio da medição da densidade e da análise da microestrutura.
- Avaliar a estabilidade dimensional da espuma de poliuretano, investigando as variações dimensionais de corpos de prova ao longo do tempo e em diferentes condições de temperatura.
- Compreender o comportamento mecânico da espuma de poliuretano sob diferentes situações de carga através da realização de ensaio mecânicos, como tração, compressão e flexão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

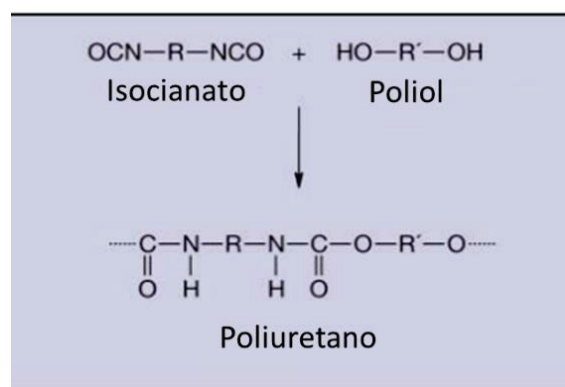
O objetivo deste capítulo é realizar uma revisão bibliográfica abrangente sobre o poliuretano de modo a estabelecer uma base para a caracterização das propriedades mecânicas da espuma de PU. Inicialmente, será abordado sobre o PU, juntamente com as espumas e as propriedades disponíveis na literatura. Em seguida, será abordada a aplicação das espumas de PU em refrigeradores.

2.1 ANÁLISE QUÍMICA DO POLIURETANO E SUAS PROPRIEDADES

2.1.1 O poliuretano

A obtenção de PU se dá, em suma, pela reação do poliol com o isocianato. O poliol é um composto orgânico que contém múltiplos grupos hidroxila, e o isocianato é uma molécula composta por nitrogênio, carbono e oxigênio. A FIGURA 2 mostra as estruturas químicas envolvidas na reação de polimerização. Visto que se tem uma grande variedade de isocianatos e polióis que podem ser utilizados para produzir os poliuretanos, uma ampla variedade de materiais e propriedades podem ser obtidas com estes (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2021).

FIGURA 2 – REAÇÃO DE POLIURETANO



FONTE: Adaptado de KAPPS (2004).

2.1.2 As espumas de poliuretano (PU)

Em suma, as espumas de PU são produzidas usando poliol, isocianato e um agente de expansão. O agente de expansão geralmente é adicionado ao poliol junto

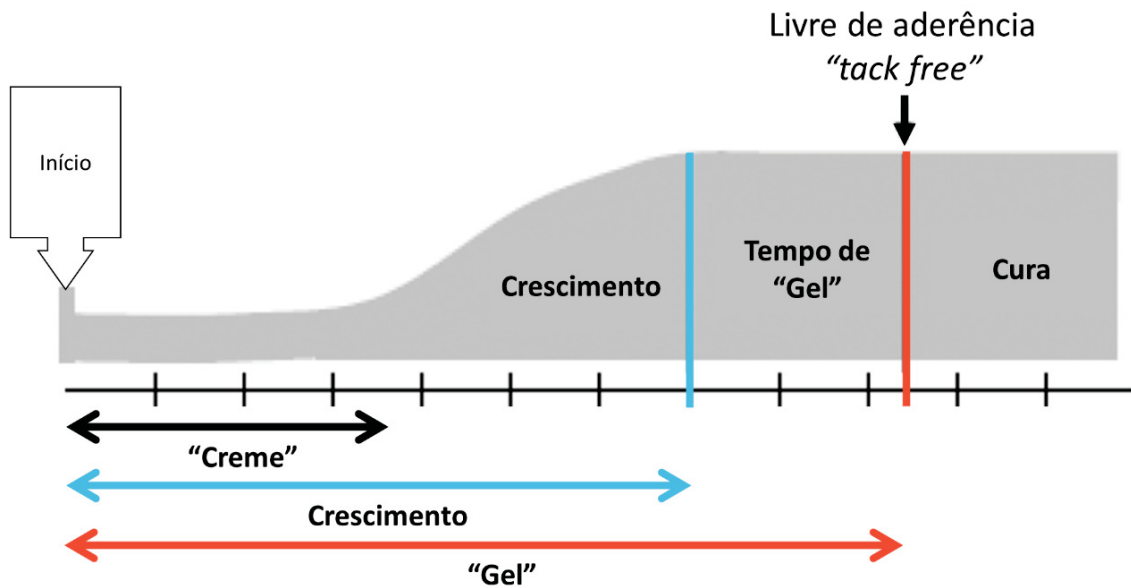
com outros componentes (Parte A). A reação de poliadição ocorre quando o polioli e o isocianato (Parte B) são misturados. Como esta reação de poliadição gera calor, parte dele é utilizado para evaporar líquidos voláteis como os agentes de expansão, obtendo, assim, a espuma (KAPPS, 2004). Este processo é exemplificado na FIGURA 3.



FONTE: Adaptado de Peyrton; Avérous (2021).

Os estágios da formação da espuma, passo 4 ao passo 6 da FIGURA 3, podem ser expandidos e são exemplificados na FIGURA 4. A primeira etapa, denominada “creme”, ocorre logo no início quando a mistura começa a se transformar em espuma, geralmente caracterizada pela mudança na cor da mistura. Na sequência, ocorre o tempo de “gel” na qual a espuma desenvolve resistência suficiente para ser dimensionalmente estável. Então, após a linha livre de aderência (*tack free*), a superfície da espuma deixa de ser pegajosa ao toque avançando para o tempo de cura onde a reação se dá por completo (ERA POLYMERS, 2022).

FIGURA 4 – ESTÁGIOS DO PROCESSO DE ESPUMAÇÃO



FONTE: Adaptado de Ahn; Lee (2015).

Em geral, as proporções dos componentes para produção de espumas de PU seguem as informações conforme a TABELA 1, utilizando a unidade de partes por massa de polioliol (*pbw*) como referência.

TABELA 1 – FORMULAÇÃO GERAL PARA PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE PU

Componente da espuma	Isocianato	Polioliol	Agente de expansão	Surfactante	Catalisador	Aditivos
Quantidade (<i>pbw</i> ^a)	100-300 ^b	100	3-30 ^c	1-3	1-3	1-10

^a Partes por massa de polioliol (*pbw* – *part by weight of polioliol*).

^b Quantidade dependendo da razão NCO/OH.

^c Dependente da massa molar.

FONTE: Adaptado de Peyrton; Avérous (2021).

Os aditivos, catalisadores e surfactantes são componentes adicionados para o controle do processo de produção das espumas. Para os três principais componentes das espumas de poliuretano uma breve explicação é feita abaixo:

2.1.2.1 Isocianato

Os Isocianatos podem ser divididos em 4 grupos: aromáticos, alifáticos, cicloalifáticos ou policíclicos. Para a produção de espumas de poliuretano, o grupo dos isocianatos aromáticos se destacam devido à alta reatividade e ao baixo custo abrangendo assim mais de 95% da produção. Um dos principais parâmetros de análise quanto aos isocianatos é a viscosidade, que reflete na fluidez (propriedade importante da espuma). Maiores valores de viscosidade são importantes quando o objetivo é resistência mecânica e tempo de cura, estruturas sanduíches com grandes espessuras por exemplo (LEE; RAMESH, 2004).

2.1.2.2 Polioli

Das espumas produzidas atualmente, 90% são com polióis do tipo poliéter e a maior parte do restante são do tipo poliéster. A composição do polioli é selecionada em função da aplicação da espuma e em função do seu processamento em diferentes plantas de produção. Uma grande variedade de componentes de polióis são utilizados de modo a melhorar os parâmetros de processo e de performance como fluidez, desmoldagem, adesão, por exemplo. A adição de componentes no polioli deve ser sempre balanceada pois pode deteriorar outras propriedades como a resistência da espuma, aumentar o tempo de desmolde e afetar a flamabilidade (LEE; RAMESH, 2004).

2.1.2.3 Agente de expansão

Além do isocianato e do polioli, outro componente fundamental para a produção de espumas de poliuretano é o agente de expansão, que se trata de uma substância capaz de produzir a estrutura celular requisitada com o foco na propriedade isolante necessária. Um dos agentes mais utilizados é o ciclopentano, as maiores vantagens da utilização deste são o baixo custo, a disponibilidade no mercado, livre de halogêneos e potencial zero de degradação da camada de ozônio, porém tem se o quesito segurança como um ponto negativo pois o mesmo é altamente inflamável, necessitando assim cuidados com a utilização e a implementação de sistemas de segurança para a utilização deste no processo de espumação (LEE; RAMESH, 2004).

2.1.2.4 Tipos de espumas de poliuretano

Como mostrado na FIGURA 1, dentre os poliuretanos, as espumas são as mais utilizadas. As espumas de PU são divididas em dois grupos: Flexíveis com células abertas e rígidas com células fechadas (PEYRTON; AVÉROUS, 2021). Quimicamente, ambas as espumas são semelhantes, o que as diferencia é o tipo e o grau de polimerização para obtenção de diferentes produtos e propriedades. O QUADRO 2 resume algumas das diferenças (LEE; RAMESH, 2004).

QUADRO 2 – TIPOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO

	Espuma de PU flexível	Espuma de PU rígida
Fórmula	Poliol + Isocianato Longos polióis com menos –OH	Poliol + Isocianato Curtos Polióis com mais –OH
Densidade (kg/m ³)	5-200	15-800
Propriedades	Absorção Macio	Isolação Rígido
Mercado	Móveis	Construção e eletrodomésticos

FONTE: Adaptado de Lee; Ramesh (2004).

Dentre os dois grupos, as espumas rígidas de PU são as utilizadas para isolamento nos refrigeradores. Portanto, será o enfoque deste trabalho. Além do uso em eletrodomésticos, estas são também aplicadas em construções, transportes e tubulações (PEYRTON; AVÉROUS, 2021).

2.1.3 Propriedades das espumas de PU

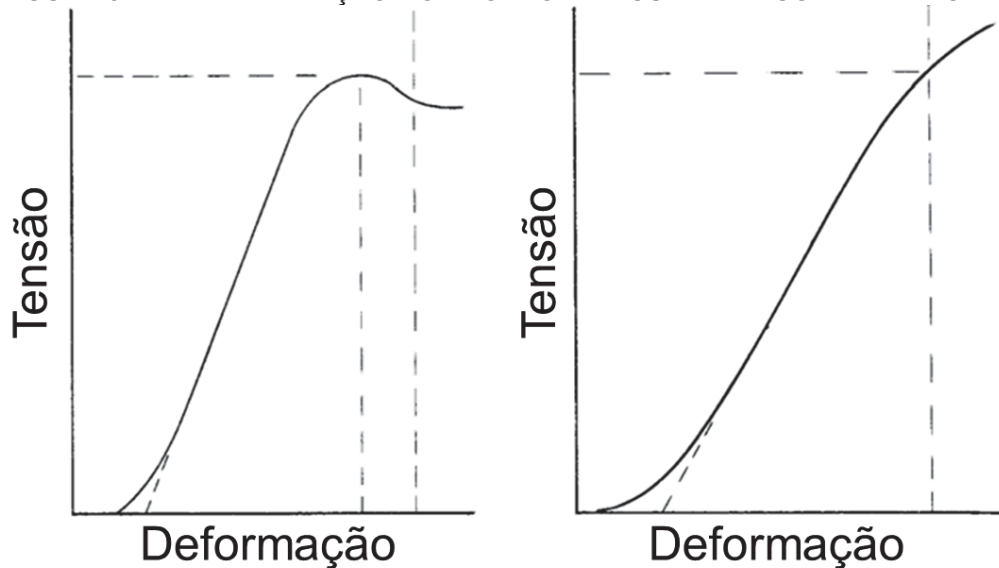
2.1.3.1 Espuma de PU sob compressão

Usualmente, as espumas são analisadas mecanicamente através de ensaios de compressão. Esta resistência à compressão depende da densidade do material,

da homogeneidade e também do tamanho da célula, destacando assim o grupo das espumas de PU rígidas com os melhores valores para esta resistência (PEYRTON; AVÉROUS, 2021).

O comportamento ou resposta mecânica das espumas de PU, sob compressão pode apresentar dois tipos de comportamentos, a norma ASTM D1621 (2016) exemplifica ambos na FIGURA 5.

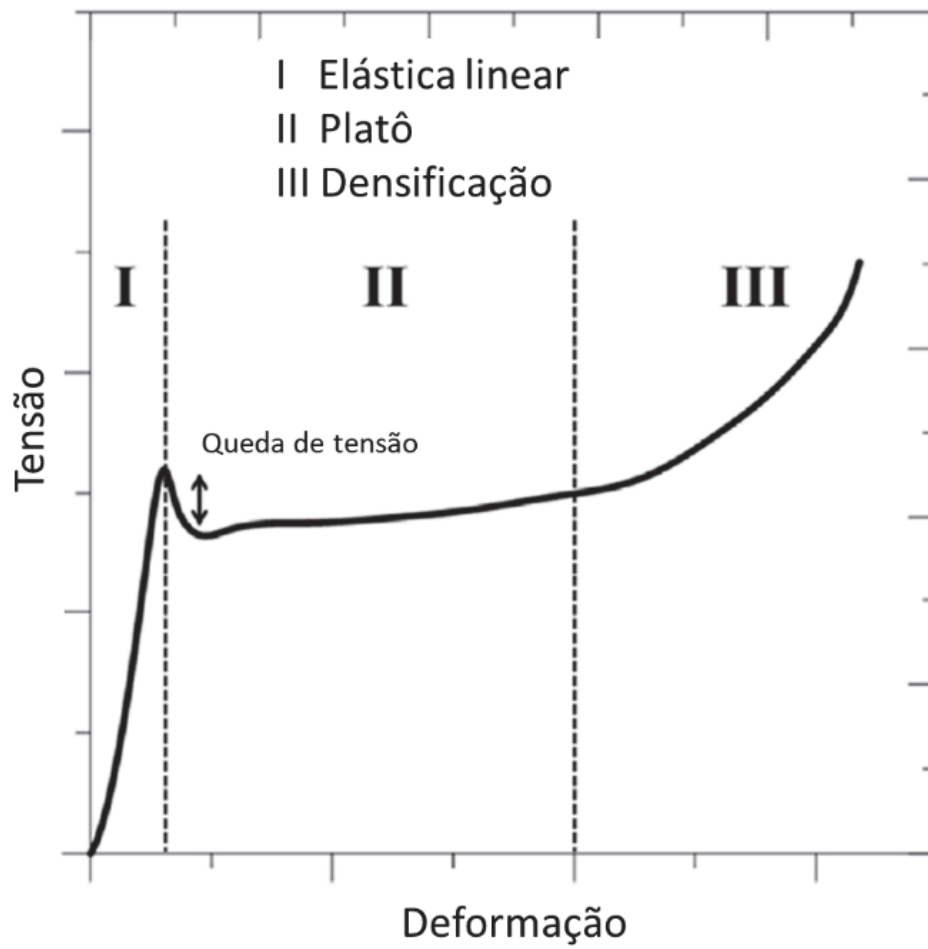
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DA CURVA DE COMPRESSÃO



FONTE: Adaptado de ASTM D1621 (2016).

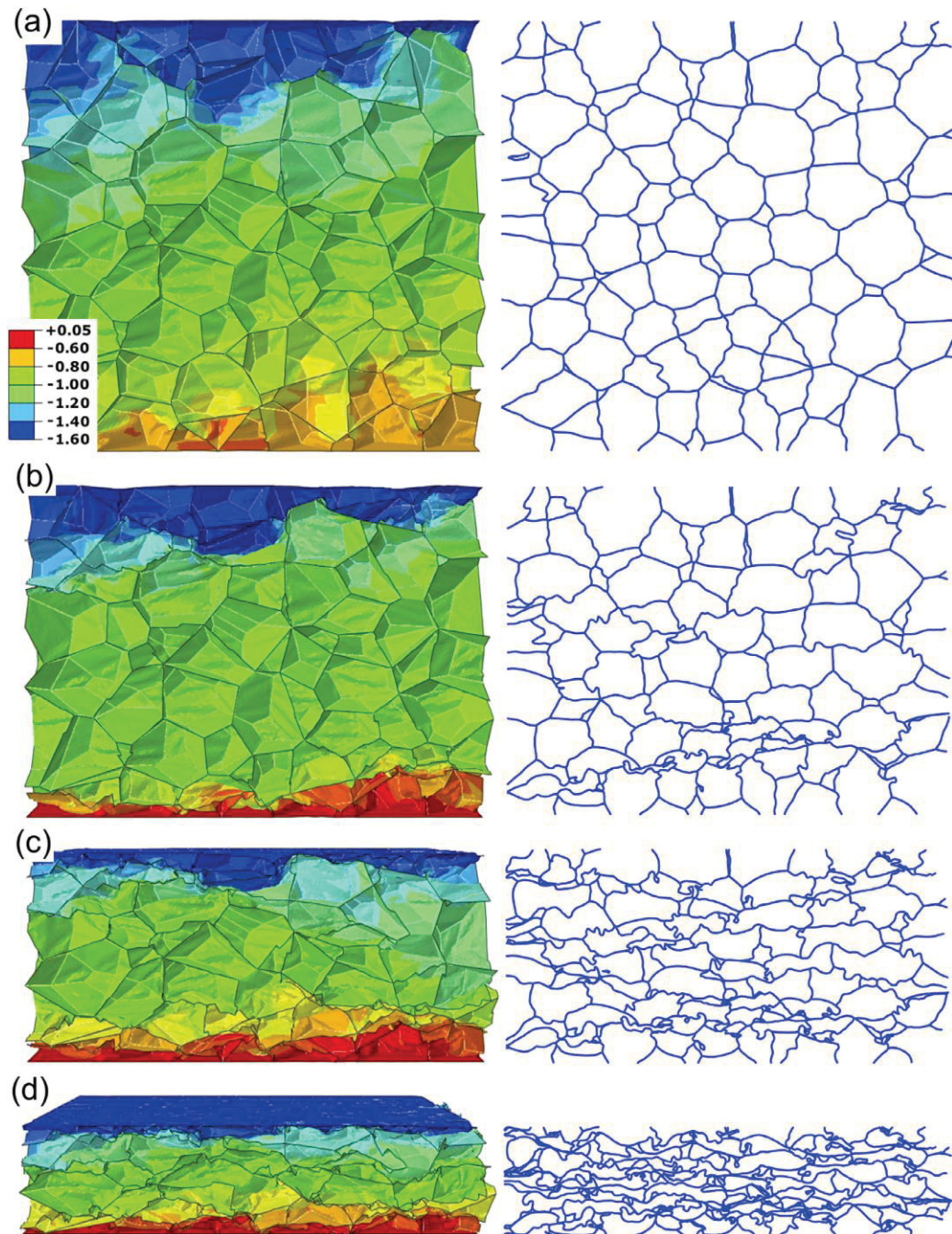
O primeiro comportamento apresentado, pode ser dividido em 3 regiões (Elástica linear, platô com queda de tensão e densificação) exemplificadas na FIGURA 6. A primeira região, linear elástica, ocorre devido à flexão e alongamento das estruturas celulares e da compressão dos gases. Na etapa seguinte, platô com queda de tensão, ocorre a deformação plástica e rompimento destas estruturas celulares, gerando a queda de tensão. Por fim, densificação, as células depois de colapsadas são compactadas umas sob as outras. Esta sequência é exemplificada na FIGURA 7 (KIM *et al.*, 2017; LEE *et al.*, 2017).

FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO SOB COMPRESSÃO DAS ESPUMAS DE POLIURETANO



FONTE: Adaptado de LEE *et al.* (2017).

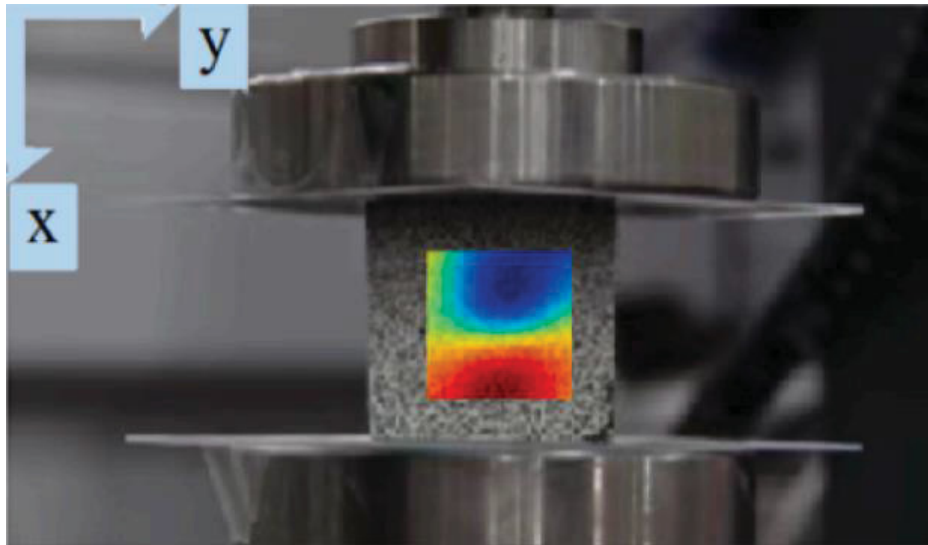
FIGURA 7 – REPRODUÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS ESPUMAS DE PU SOB COMPRESSÃO. DEFORMAÇÃO: (A) 4%, (B) 25%, (C) 50% E (D) 75%



FONTE: Marvi-Mashhadi, Lopes e LLorca (2020).

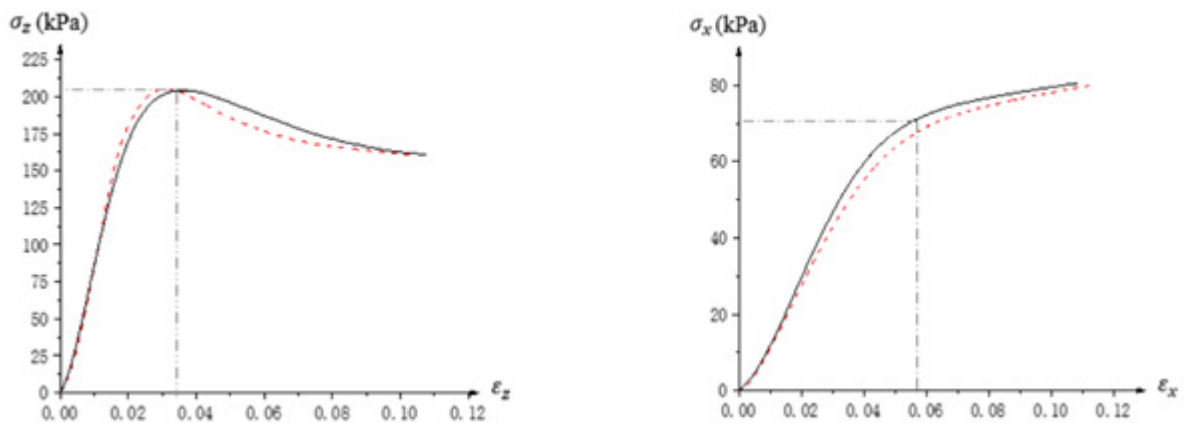
Segundo Xu *et al.* (2022), foi conduzido um experimento de compressão em espuma de poliuretano com uma densidade de $41,7 \text{ kg/m}^3$. O estudo apresentou a análise do comportamento paralelo e normal ao crescimento da espuma. Além disso, o autor demonstrou a conformidade com os dois padrões de comportamento estabelecidos pela norma ASTM D1621 (2016). A FIGURA 9 exibe as curvas correspondentes aos dois comportamentos observados.

FIGURA 8 – EXEMPLO DE AMOSTRA SOB TESTE DE COMPRESSÃO



FONTE: Xu *et al.* (2022).

FIGURA 9 – EXEMPLO DE CURVAS OBTIDAS SOB TESTE DE COMPRESSÃO



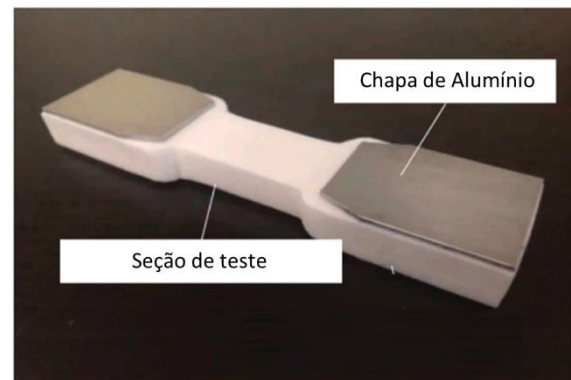
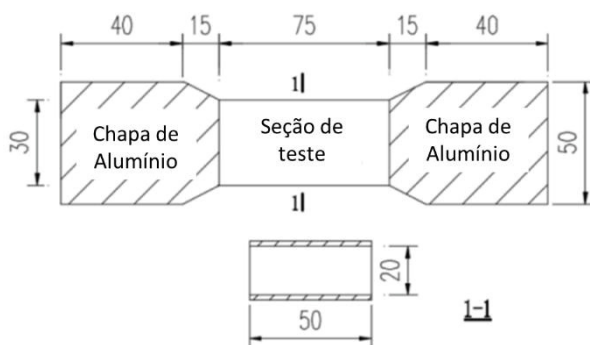
FONTE: Xu *et al.* (2022).

2.1.3.2 Espuma de PU sob tração

A análise da espuma de PU sob tração é um tema abordado em um número limitado de estudos disponíveis. Entre os artigos consultados, constata-se que o procedimento de teste recomendado pela ASTM D1623 (2017) não é seguido. A justificativa para essa não conformidade não é apresentada. No entanto, no capítulo 3.2.4, é fornecida a justificativa deste trabalho não seguir completamente conforme a norma. A seguir, são apresentados alguns exemplos de diferentes tipos de teste de tração realizados.

Em um estudo conduzido por Xu *et al.* (2022), os autores investigaram as propriedades de tensão de uma espuma de poliuretano com uma densidade de $41,7 \text{ kg/m}^3$. Os pesquisadores utilizaram amostras em formato de gravata com dimensões conforme ilustrado na FIGURA 10. Para garantir a fixação segura das amostras de PU, foram utilizadas duas chapas de alumínio juntamente com o dispositivo de fixação padrão para tração.

FIGURA 10 – EXEMPLO DE AMOSTRA PARA TESTE DE TRAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE CHAPA DE ALUMÍNIO.

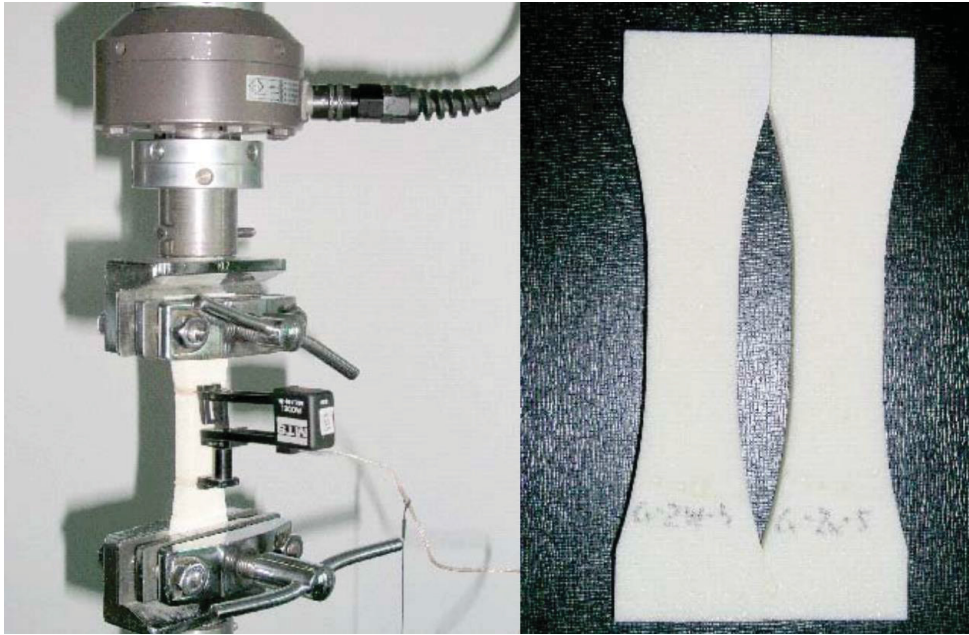


FONTE: Adaptado de Xu *et al.* (2022).

Um exemplo adicional apresentado por Caliri Junior (2010) consiste na realização do teste de tração em uma espuma de PVC com densidade de 60 kg/m^3 . Nesse contexto, o autor segue as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D1623 (2017), embora tenha adotado geometrias distintas para o corpo de prova. Além disso, o autor emprega um substrato rígido que é unido à espuma de PVC por meio de um adesivo comercialmente conhecido como Araldite, o qual é composto por uma resina e um endurecedor. Essa configuração permite a fixação do substrato à garra utilizada no teste de tração.

O terceiro exemplo, de Witkiewicz e Zieliński (2006), teve como objetivo investigar o comportamento da espuma de PU com densidade de 62 kg/m^3 sob tração. Nessa abordagem, as amostras de PU foram recortadas em um formato de gravata e, posteriormente, fixadas diretamente nas garras da máquina de teste de tração. A FIGURA 11 apresenta essa configuração experimental.

FIGURA 11 – EXEMPLO DE EQUIPAMENTO E DE AMOSTRA PARA TESTE DE TRAÇÃO



FONTE: Witkiewicz; Zieliński (2006).

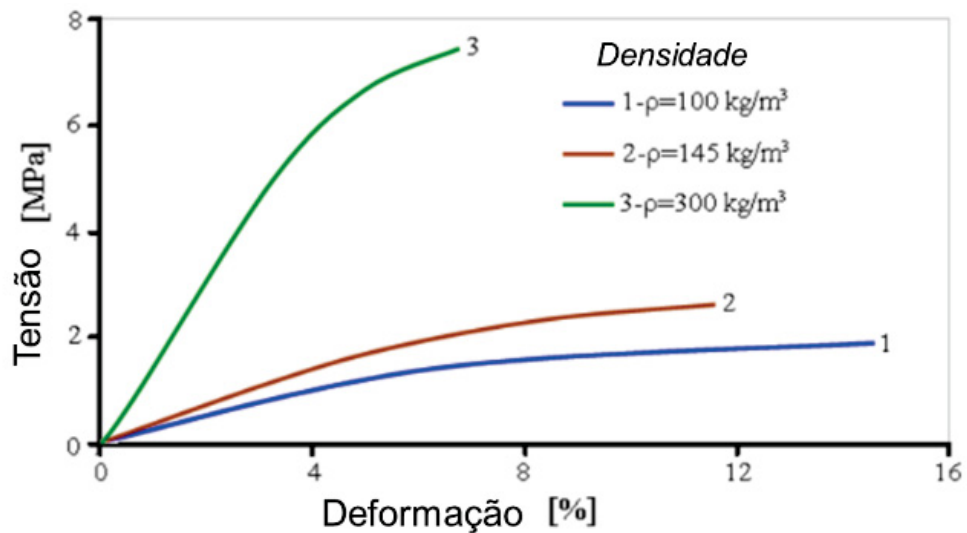
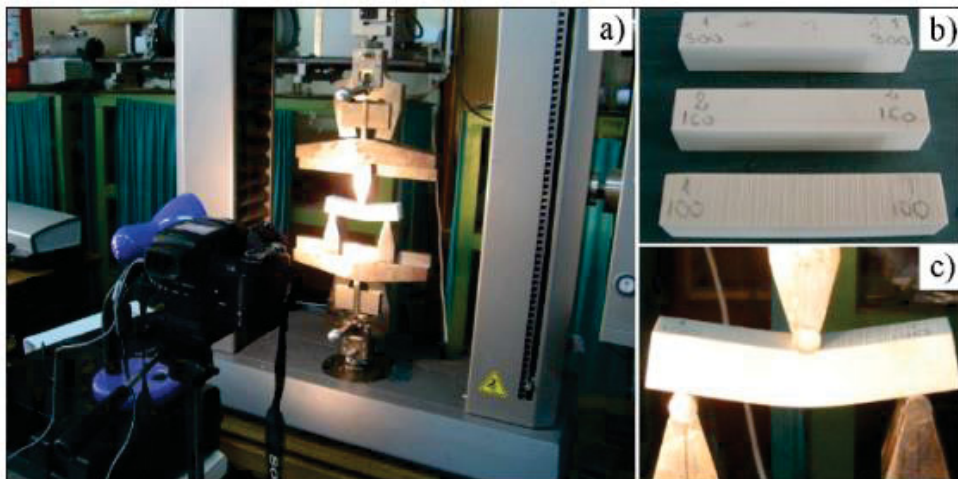
No entanto, devido à inconstância dos parâmetros de avaliação, tanto em relação à geometria das amostras quanto aos métodos de teste empregados, torna-se inviável efetuar uma comparação precisa e confiável entre os resultados.

2.1.3.3 Espuma de PU sob flexão

No contexto do comportamento sob flexão, a maioria dos artigos científicos aborda estudos envolvendo estruturas sanduíche (tipo de estrutura composta por duas camadas externas rígidas separadas por um núcleo leve e de baixa densidade), havendo uma escassez de pesquisas que abordem especificamente a análise do comportamento da espuma de PU em sua forma pura. Adicionalmente, é importante ressaltar que, nesse caso específico, devido à facilidade de aplicação do teste, as geometrias e procedimentos adotados são semelhantes tanto na norma ASTM D790 (2003) quanto nos estudos encontrados.

Um exemplo de estudo relacionado à medição da resistência à flexão por meio do método de três pontos é apresentado por Voiconi *et al.* (2013). Neste estudo, o teste foi conduzido em amostras de espuma de PU com três diferentes densidades: 100, 145 e 300 kg/m³. A FIGURA 12 ilustra a configuração do teste e a curva de tensão e deformação obtida a partir dos experimentos realizados.

FIGURA 12 – EXEMPLO DE TESTE DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS E CURVAS OBTIDAS



FONTE: Adaptado de Voiconi *et al.* (2013).

2.1.3.4 Anisotropia

Um material é considerado isotrópico quando suas propriedades físicas são as mesmas em todas as direções, enquanto um material anisotrópico possui propriedades distintas em cada direção (Callister; Rethwisch, 2014).

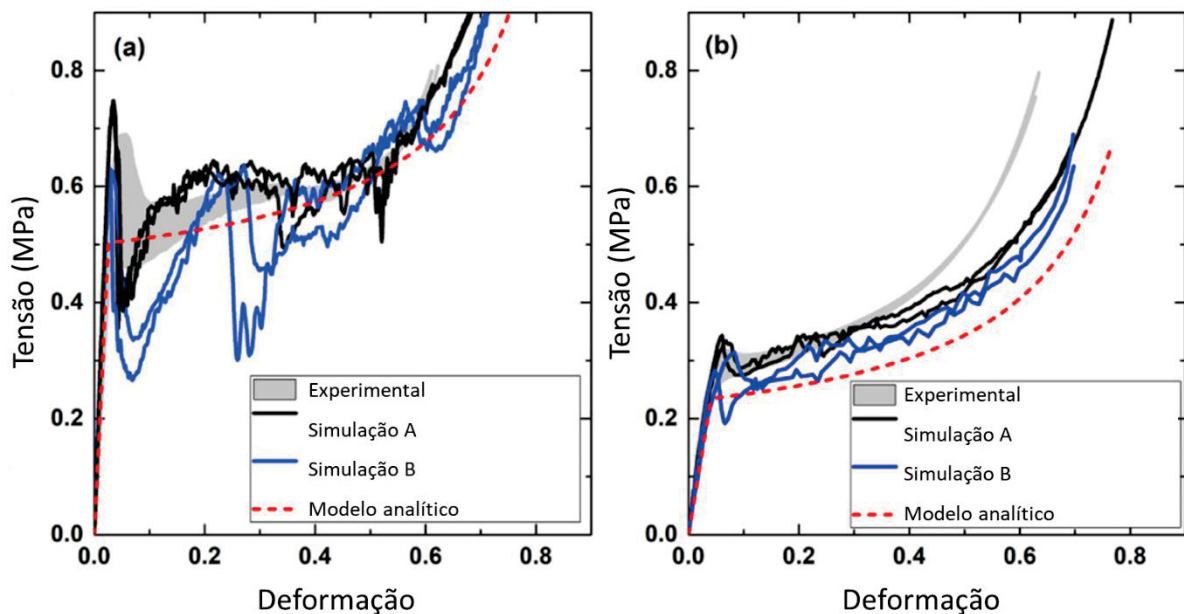
No entanto, não foi encontrado um valor específico de diferença entre propriedades que seja universalmente aceito para determinar se um material é isotrópico ou anisotrópico. As normas ASTM D1621 (2016), ASTM D1623 (2017) e ASTM D790 (2003) sugerem que, em caso de suspeita de anisotropia, testes devem ser realizados para identificar essa característica.

Será utilizado o termo grau de anisotropia para descrever a variação entre as direções analisadas, sendo apresentado como a razão entre as propriedades

mensuradas em cada direção. Variando de 0 a 1, onde 1 as propriedades do material são as mesmas em qualquer direção.

As espumas de poliuretano podem apresentar comportamento isotrópico ou anisotrópico, em Marvi-Mashhadi, Lopes e LLorca (2020) é feito a análise em ambos os casos. Para a espuma anisotrópica, o comportamento sob compressão nas direções paralelo ao maior eixo da célula e perpendicular ao maior eixo é evidenciado na FIGURA 13. Nesta ainda é possível verificar que o nível de tensão reduz aproximadamente pela metade quando medida da direção paralela ao maior eixo para a direção perpendicular ao maior eixo.

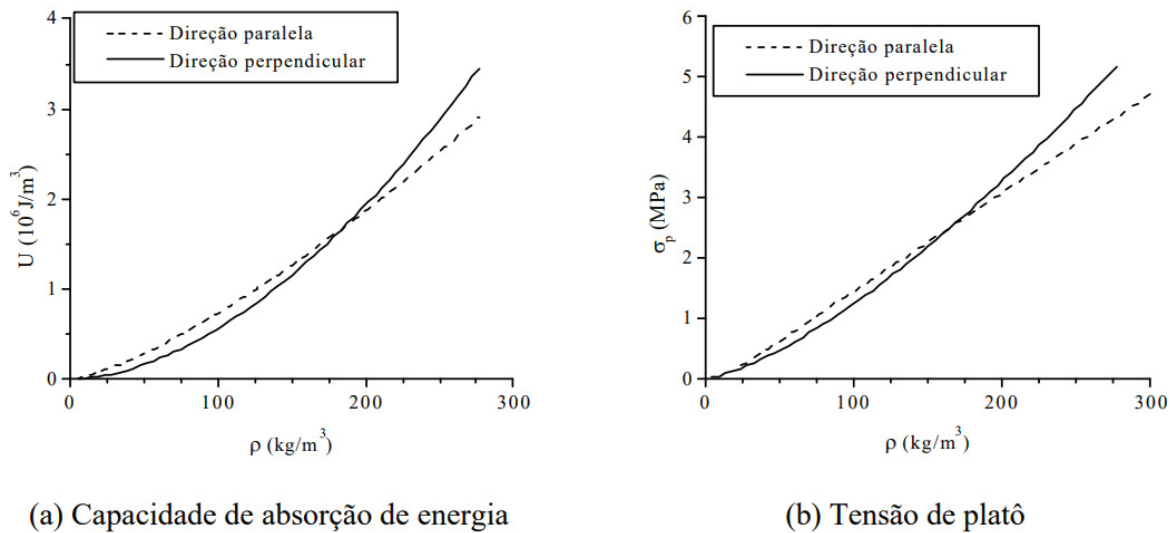
FIGURA 13 – CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO PARA ESPUMA ANISOTRÓPICA SOB COMPRESSÃO: (A) PARALELO E (B) PERPENDICULAR.



FONTE: Adaptado de Marvi-Mashhadi, Lopes e LLorca (2020).

Em Mourão e Neto (2002) é analisado este grau de anisotropia em função da densidade da espuma sob compressão, o qual foi observado que para espumas abaixo de aproximadamente 200 kg/m^3 a tensão de platô e a energia absorvida são maiores na direção paralela ao crescimento da espuma. Para espumas de PU com densidade maior que 200 kg/m^3 ocorre a inversão e os maiores valores estão na direção perpendicular ao crescimento da espuma, conforme demonstrado na FIGURA 14.

FIGURA 14 – TENSÃO DE PLATÔ E ENERGIA ABSORVIDA SEGUNDO A DIREÇÃO DE APLICAÇÃO DA CARGA



(a) Capacidade de absorção de energia

(b) Tensão de platô

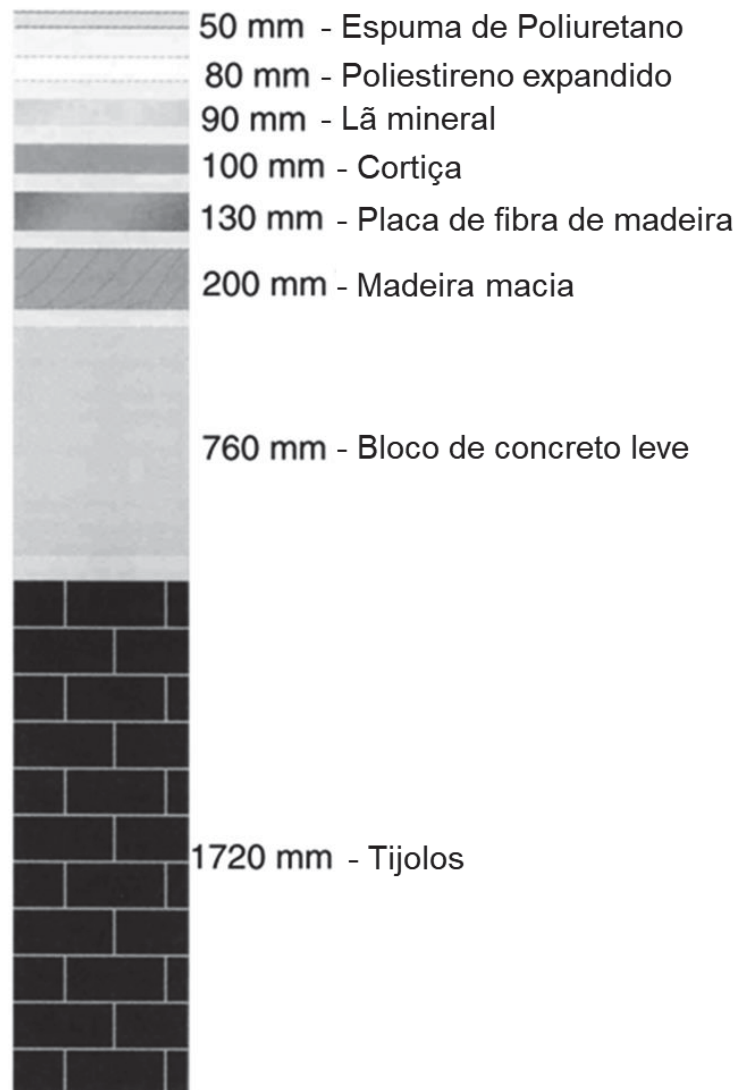
FONTE: Mourão e Neto (2002).

2.1.3.5 Propriedades térmicas

A predominância de análises e estudos relacionados às espumas de PU está direcionada principalmente para suas propriedades térmicas, devido à sua aplicação como material isolante. Embora o objetivo deste trabalho seja realizar uma análise mecânica das espumas de PU, é essencial compreender suas propriedades térmicas e como certas características da espuma afetam tais propriedades.

A motivação da escolha das espumas de PU como isolantes em refrigeradores é exemplificada na FIGURA 15, na qual é apresentada a espessura equivalente de outros materiais necessária para alcançar a mesma eficiência térmica da espuma de PU. Tomando extremos como exemplo, a fim de obter o isolamento térmico equivalente a 50mm de espuma de PU, seria necessário uma camada de tijolos cerâmicos com espessura de 1720mm.

FIGURA 15 – ESPESSURA RELATIVA DE MATERIAIS COMPARADOS A ESPUMA DE PU



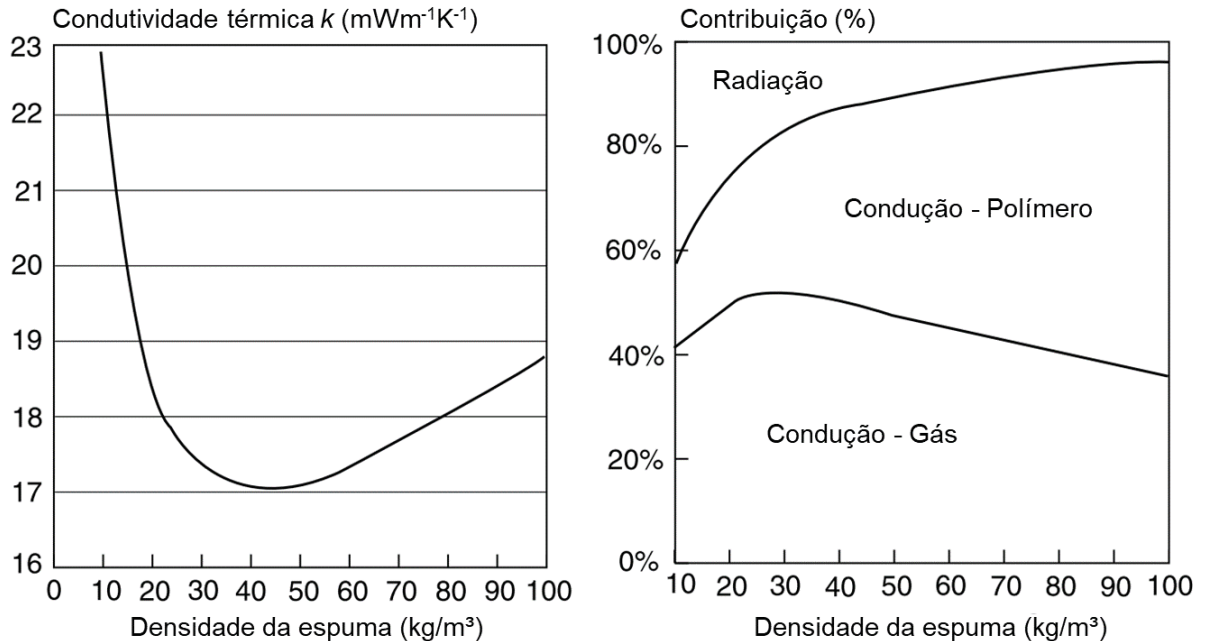
FONTE: Adaptado de Lee; Ramesh (2004).

Quando se analisam as propriedades térmicas das espumas de poliuretano, algumas características devem ser levadas em consideração. A primeira, a morfologia da célula como o tamanho da célula e a densidade. A outra, as propriedades do material como a condutividade do material e do gás contido nas células.

Ao analisar a condutividade térmica (k) das espumas rígidas de PU em função da densidade, tem-se o comportamento evidenciado na FIGURA 16, junto com as contribuições de cada fase. Entre 30-50 kg/m³, tem-se os menores valores de k , ou seja, o material com melhor comportamento isolante. Isso é explicado pelo bom balanceamento das quantidades de gás e matriz polimérica. Após 50 kg/m³, verifica-se que quanto maior a densidade da espuma de PU, maior a condutividade da

espuma, pois se tem uma maior quantidade de material sólido para conduzir o calor (LEE; RAMESH, 2004).

FIGURA 16 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA E CONTRIBUIÇÃO DAS FASES DA ESPUMA RÍGIDA DE PU EM FUNÇÃO DA DENSIDADE

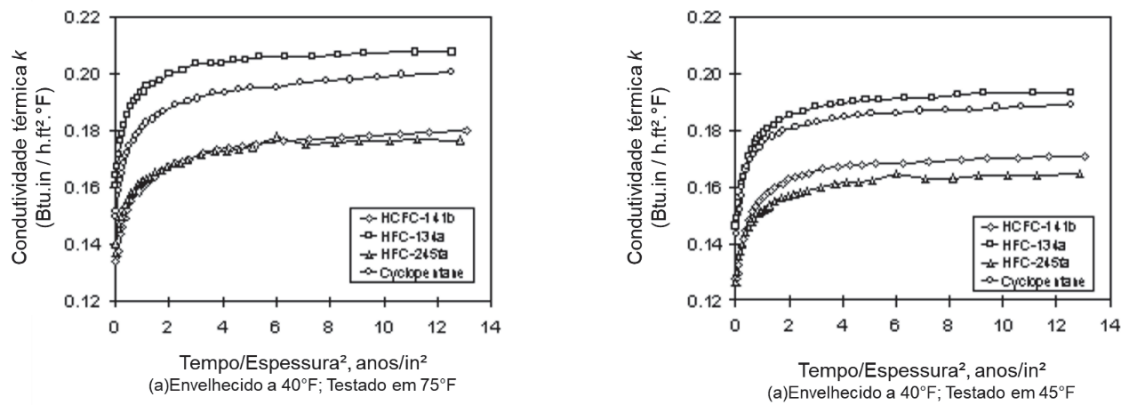


FONTE: Adaptado de Lee; Ramesh (2004).

Um dos principais fatores a ser considerado quando se analisa a condutividade térmica é o agente de expansão. Quanto menor a condutividade deste na fase gasosa, menor será a condutividade térmica geral da espuma de PU. O tamanho médio da célula também afeta a condutividade térmica. Estudos mostram que aumento no diâmetro médio entre 250 e 600 μm pode gerar um aumento de quase 50% na condutividade térmica (PEYRTON; AVÉROUS, 2021).

As espumas de PU possuem valores elevados de porosidade (95-97%), ou seja, gás retido em suas células (LEE; RAMESH, 2004). Esse gás retido tem a função de obstruir o fluxo de calor. Logo, quanto maior for a quantidade de gás, maior será a performance como isolante. Portanto, a performance da espuma de PU está fortemente atrelada ao agente de expansão e ao tamanho das células (LEE *et al.*, 2017). Importante ressaltar que as espumas de PU estão sujeitas ao fenômeno do envelhecimento, causando assim uma redução de suas propriedades térmicas como isolante. Na FIGURA 17 é exemplificada essa redução em painéis de isolamento de PU (LEE; RAMESH, 2004).

FIGURA 17 – ENVELHECIMENTO EM ESPUMAS DE POLIURETANO

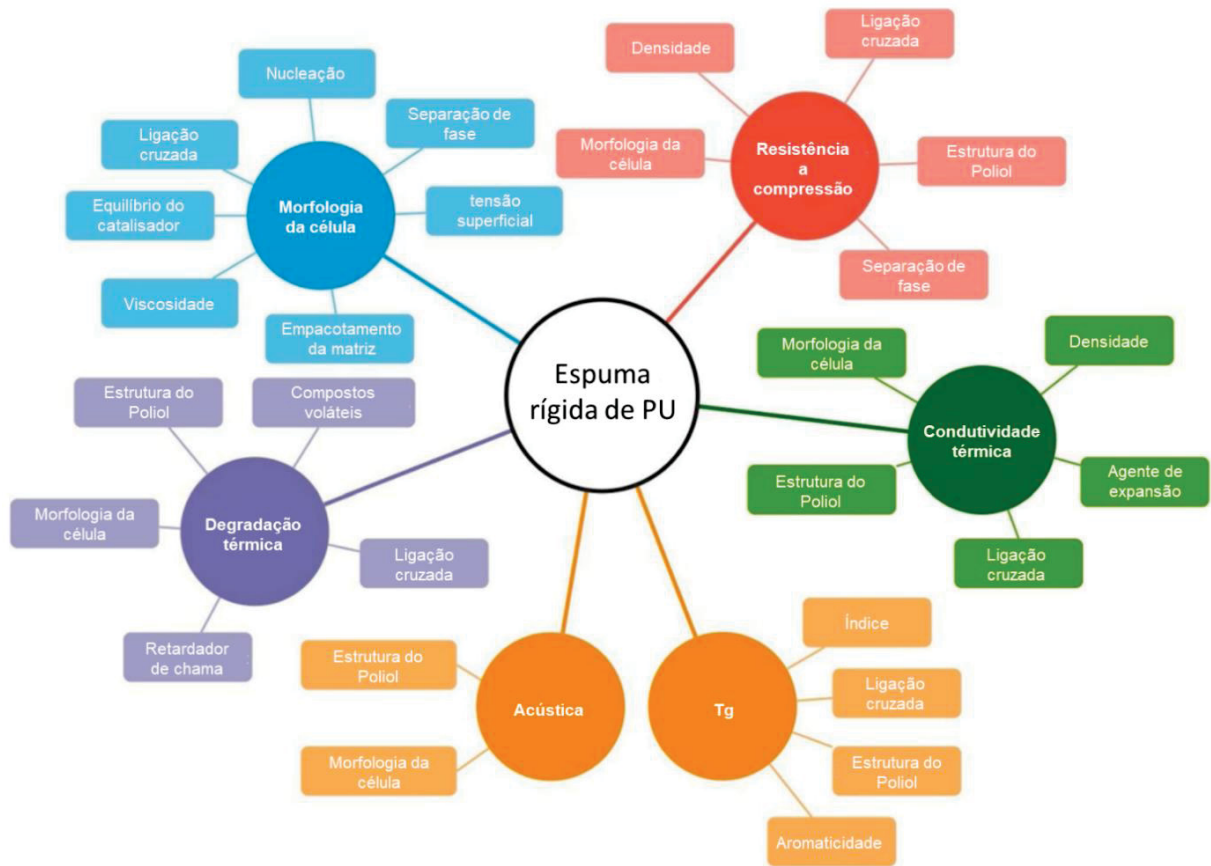


FONTE: Adaptado de YARBROUGH (2002).

Além do maior enfoque de aplicação das espumas rígidas de PU como isolante térmico, elas também podem ser utilizadas devido às suas propriedades acústicas. Estudos mostram que as espumas com células fechadas atuam como grandes absorvedores de som (PEYRTON; AVÉROUS, 2021).

Foram abordados alguns pontos que influenciam as propriedades das espumas rígidas de PU. Porém, inúmeros são os fatores que afetam as propriedades destas espumas. A FIGURA 18 traz uma visão geral destes fatores e em quais propriedades eles atuam.

FIGURA 18 – VISÃO GERAL DOS FATORES QUE AFETAM AS PROPRIEDADES DAS ESPUMAS RÍGIDAS DE PU



FONTE: Adaptado de Peyrton; Avérous (2021).

2.2 APLICAÇÃO DO POLIURETANO EM REFRIGERADORES

Os gabinetes de refrigeradores são constituídos basicamente de uma parte externa de chapa fina metálica pintada e um forro interno de plástico termoformado geralmente de poliestireno de alto impacto (PSAI) ou copolímero de acrilonitrila, butadieno e estireno (ABS). Entre esses dois materiais é injetado, logo após a mistura, o polioli e o isocianato para formação do PU. A FIGURA 19 ilustra estes componentes (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2021).

FIGURA 19 – EXEMPLO DE GABINETE DE REFRIGERADOR COM A ESPUMA DE PU EVIDENCIADA



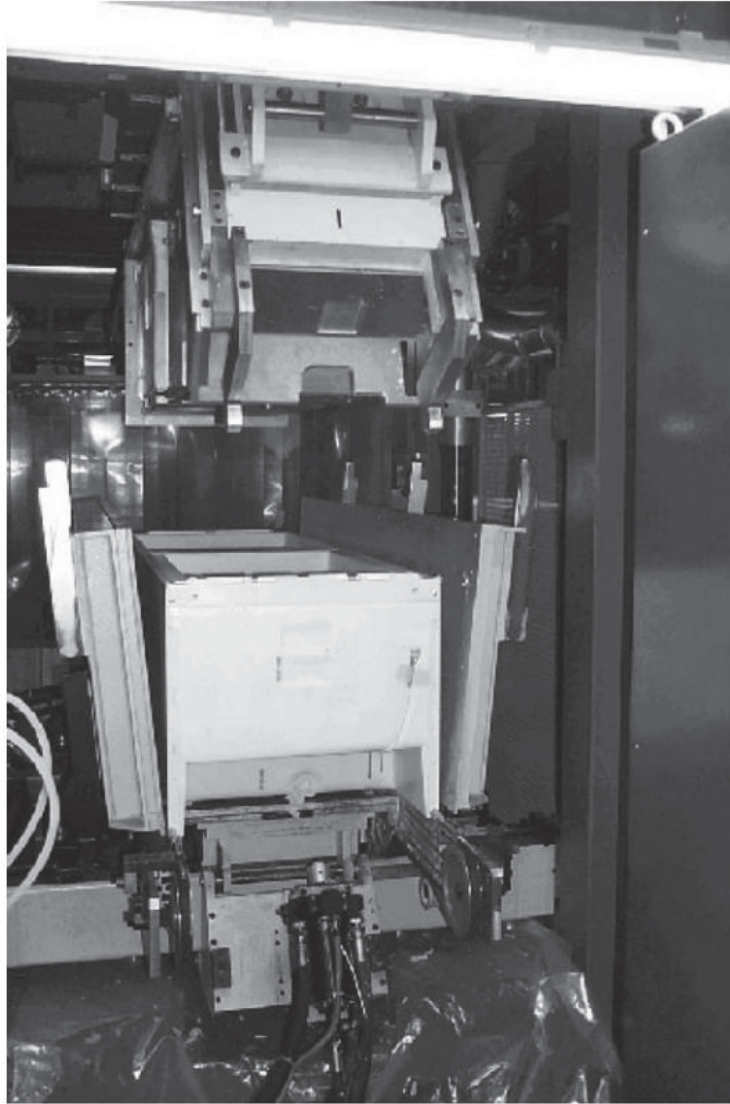
FONTE: Krauss Maffei (2022).

Uma revisão com a perspectiva da aplicação em refrigeradores, evidencia-se uma alta eficiência no isolamento térmico que proporciona utilizar espessuras menores, conforme ficou exemplificado na FIGURA 15. E, como consequência, maiores volumes internos dos produtos são possíveis. Tem-se, também, uma resistência mecânica que permite utilizar menos plásticos e aços nos componentes que constituem os produtos, além da sua propriedade adesiva que auxilia na união da parte interna plástica com a externa metálica (LEE; RAMESH, 2004). Outra característica importante é a possibilidade de preencher os gabinetes mesmo com geometrias complexas, o que pode ser notado na FIGURA 19.

Segundo LEE et al. (2017) é esperado que as espumas rígidas de PU utilizadas em refrigeradores apresentem porosidade mínima de 95%, baixa densidade (30 a 40 kg/m³) e alta resistência a compressão (150-200kPa) (LEE et al., 2017).

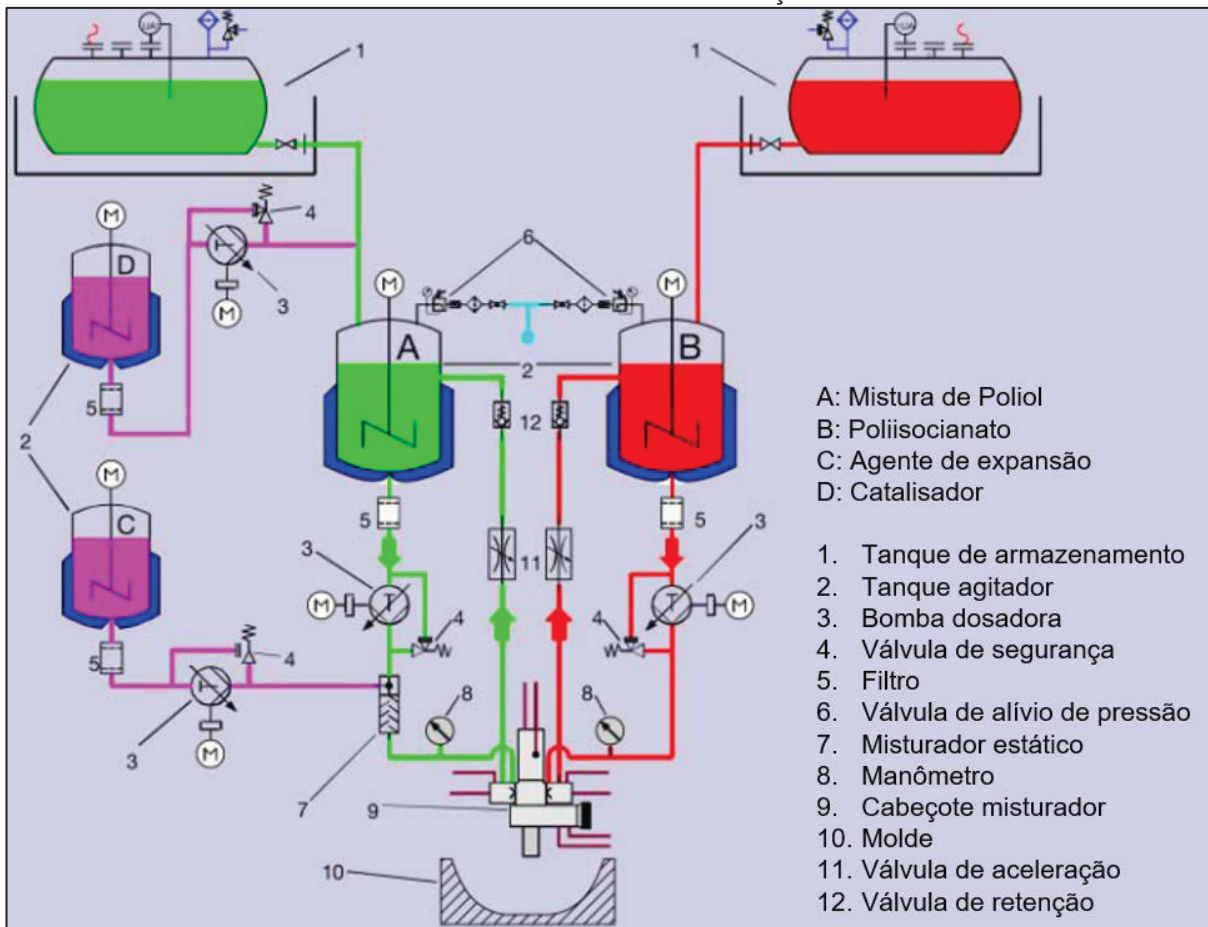
Na indústria de eletrodomésticos, para a produção de refrigeradores, utilizam-se máquinas de espumação de alta pressão e moldes, os quais possuem a cópia da geometria de cada refrigerador (interna e externa), de modo a suportar pressões exercidas durante o processo de injeção de PU sob o produto (LEE; RAMESH, 2004). A FIGURA 20 exhibe um gabinete após a espumação na qual é possível visualizar o molde e a máquina de injeção. Na FIGURA 21 é exemplificado o sistema de injeção utilizado na indústria de refrigeradores, mostrando os tanques e dispositivos até o cabeçote de injeção (KAPPS, 2004).

FIGURA 20 – EXEMPLO DE MÁQUINA E MOLDE DE ESPUMAÇÃO PARA REFRIGERADORES



FONTE: Lee; Ramesh (2004).

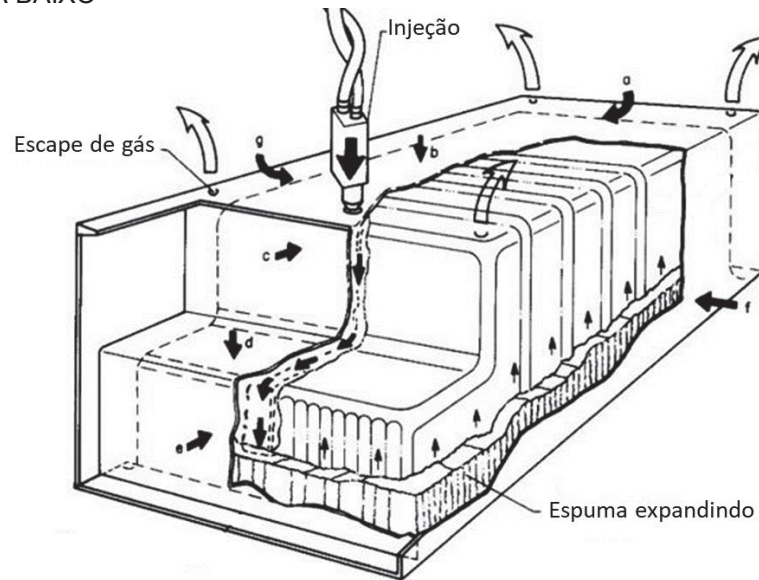
FIGURA 21 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA DE INJEÇÃO DE ESPUMA DE PU



FONTE: Adaptado de KAPPS (2004).

Existem várias configurações possíveis para a injeção de espuma em gabinetes e portas. Essas configurações podem variar em termos de localização da injeção (posicionamento do cabeçote de injeção), número de pontos de injeção, posição do gabinete ou porta, entre outras configurações. A escolha da configuração pode depender de vários fatores, como investimento, capacidade de produção e a configuração desejada para o refrigerador a ser fabricado. Na FIGURA 22, é apresentada uma representação esquemática de um gabinete com um ponto de injeção na região inferior e com o gabinete posicionado com as cavidades voltadas para baixo.

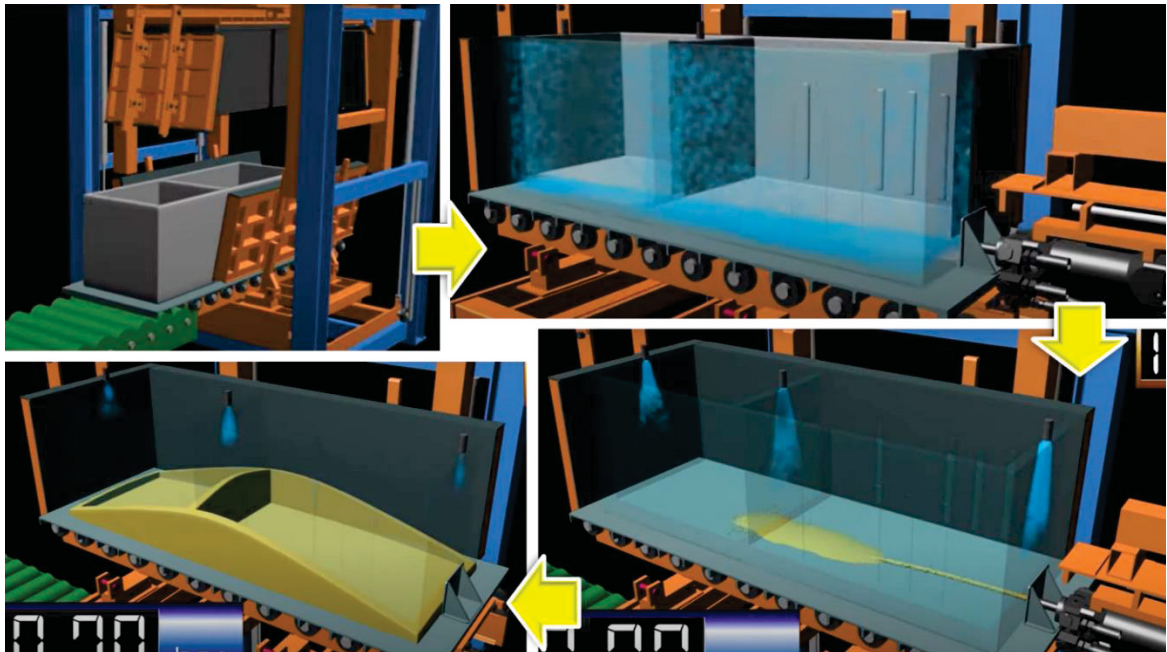
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM GABINETE COM CAVIDADE PARA BAIXO



FONTE: Adaptado de IMEN POLYMER CHEMICAL CO. (2022).

Na FIGURA 23, é apresentada uma configuração de injeção de espuma em um gabinete com um ponto de injeção. Nessa configuração, a injeção é alinhada ao comprimento do gabinete e as cavidades do gabinete estão direcionadas para cima. A figura mostra o processo de injeção desde a entrada do gabinete até a formação da espuma.

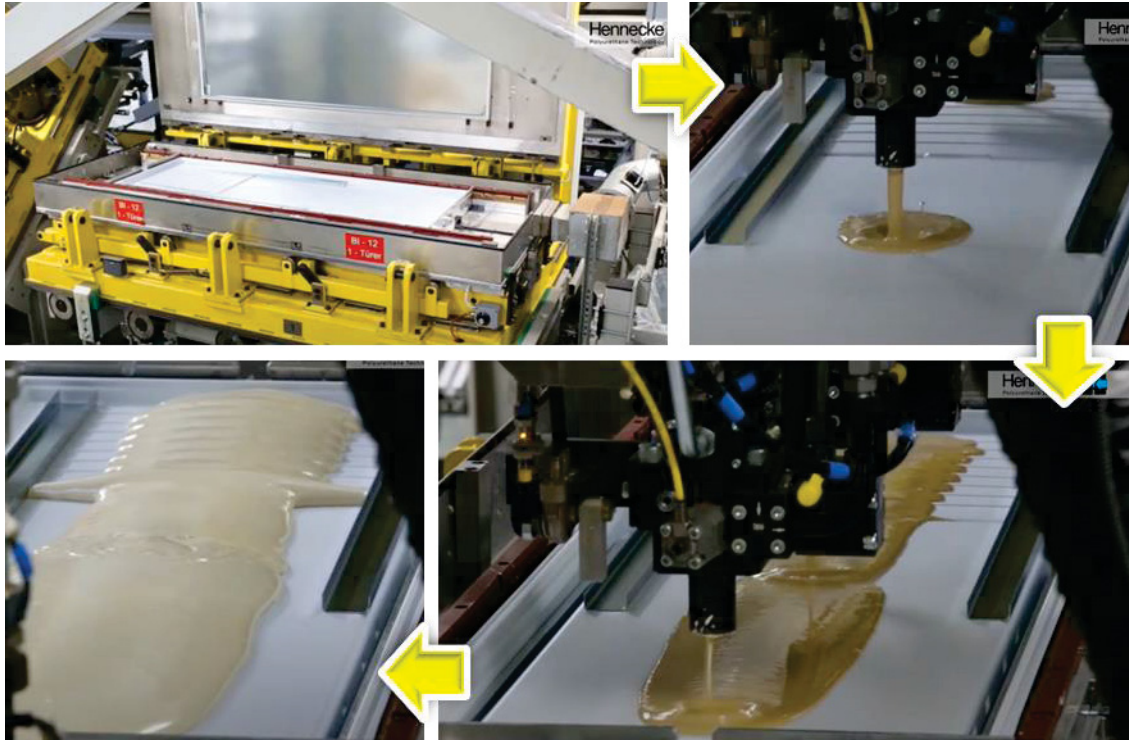
FIGURA 23 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM GABINETE COM CAVIDADE PARA CIMA



FONTE: Adaptado de CANNON SPA (2012).

Na FIGURA 24, é apresentada uma configuração de aplicação de espuma de PU em portas de refrigeradores. Nessa configuração, não há um ponto de injeção como nos exemplos anteriores de gabinetes. Em vez disso, a espuma é despejada sobre a parte plástica da porta e, em seguida, o molde é fechado.

FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA INJEÇÃO DE PU EM UMA PORTA DE REFRIGERADOR



FONTE: Adaptado de HENNECKE GROUP (2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para caracterização da espuma de PU será feita a coleta de amostras de acordo com as características do produto, do processo e das normas. E, então, submeter as amostras à sequência de testes indicados ao decorrer do capítulo com o intuito de atingir os objetivos propostos.

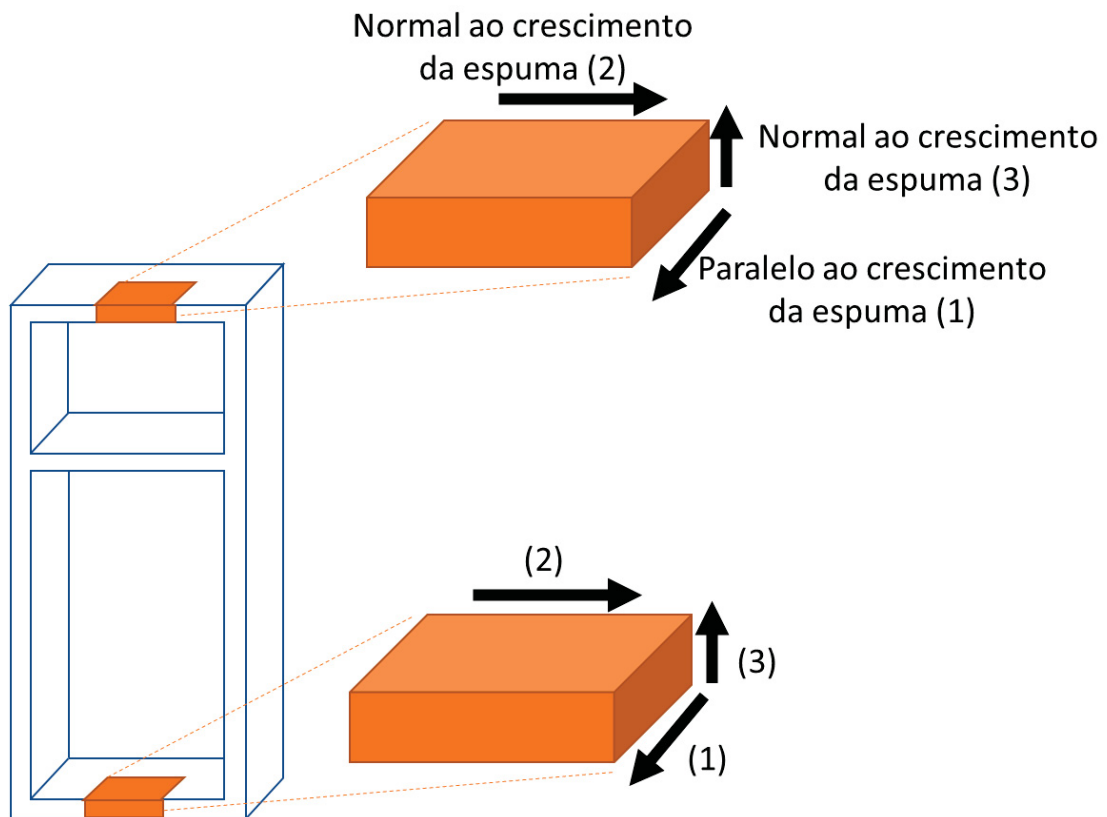
3.1 COLETA DE AMOSTRAS

Foram obtidas amostras de espuma de PU de gabinetes espumados para realizar os testes. Para levar em consideração a não homogeneidade da espuma de PU dentro dos gabinetes, foram coletadas amostras de diferentes regiões. Especificamente, foram coletadas amostras das regiões do topo e da base do gabinete, seguindo as dimensões especificadas para fins de teste.

O gabinete selecionado apresenta uma configuração conforme ilustrado na FIGURA 23, com um ponto de injeção localizado na região inferior, alinhado ao comprimento do refrigerador, e cavidades voltadas para cima. Nesse caso, o modelo em questão possui o compartimento do congelador localizado na região superior, o que resulta em uma maior espessura disponível para preenchimento nessa área, enquanto a base apresenta a menor espessura disponível para preenchimento. Como resultado dessa diferença, é esperado que haja uma disparidade no comportamento de preenchimento da espuma entre as extremidades do gabinete, ou seja, entre o topo e a base.

Além disso, levando em consideração a esperada anisotropia, todas as amostras foram rotuladas de acordo com a direção de crescimento da espuma. As amostras estão ilustradas na FIGURA 25.

FIGURA 25 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE GABINETE DUAS PORTAS COM A INDICAÇÃO DA REGIÃO DE COLETA DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2023).

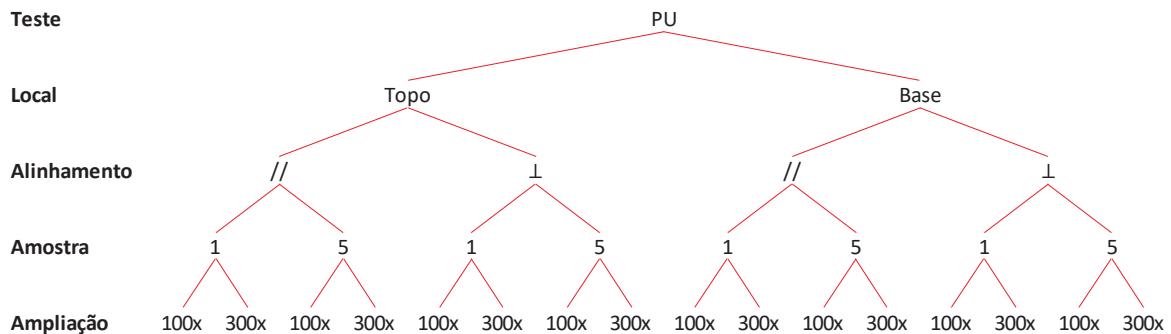
3.2 ANÁLISES DAS AMOSTRAS

3.2.1 Análise da microestrutura da espuma de PU

Com o intuito de verificar a microestrutura das células da espuma de PU, amostras foram submetidas à análise por microscopia semelhante ao realizado por Marvi-Mashhadi, Lopes e LLorca (2020). Foram analisadas características como o tamanho médio da célula, proporção média da célula e espessura média das paredes da célula. O procedimento foi realizado no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA3 LMU - HV 10kV WD12mm. As medições foram realizadas através do programa *imageJ* (RASBAND, 1997-2018).

A estratégia amostral seguiu conforme FIGURA 26, para cada amostra, 2 ampliações foram realizadas (100x e 300x). A seleção das ampliações foi feita com base na configuração mais adequada para realizar as medições propostas.

FIGURA 26 – ÁRVORE DE AMOSTRAGEM PARA ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DA ESPUMA DE PU



FONTE: O autor (2023).

Para a ampliação de 100x, duas características foram analisadas (tamanho da célula e proporção), 20 células de cada amostra foram medidas.

A proporção foi calculada através de duas medições de cada célula (horizontal e vertical), sendo utilizado a seguinte fórmula:

$$\text{Proporção} = \frac{\text{Dimensão Maior}}{\text{Dimensão Menor}} \quad (1)$$

Com a ampliação de 300x foi realizado a análise da espessura das paredes da célula, onde de cada amostra foi mensurado 10 paredes.

3.2.2 Densidade aparente

A densidade aparente das amostras de espuma de PU foi medida conforme a norma ASTM D3575 – W (2020). O processo de medição consiste em realizar a medição das massas das amostras separando-as de acordo com a região coletada (Topo e Base) e, posteriormente, submetê-las a imersão em líquido (água) medindo novamente a massa do líquido deslocado. Com os valores mensurados, o cálculo da densidade aparente seguiu conforme abaixo:

$$D = \frac{m_s}{m_l} \cdot d_l \quad (2)$$

Onde:

D = Densidade, kg/m³

m_s = Massa da amostra, kg

m_l = Massa do líquido deslocado, kg

d_l = Densidade do líquido, kg/m³

Para uma maior confiabilidade, 5 amostras para medição foram coletadas, determinando, então, a densidade média e o desvio padrão. O desvio padrão foi calculado conforme abaixo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Onde:

S = Desvio padrão amostral

x_i = Valor de uma medição

\bar{x} = Média das medições

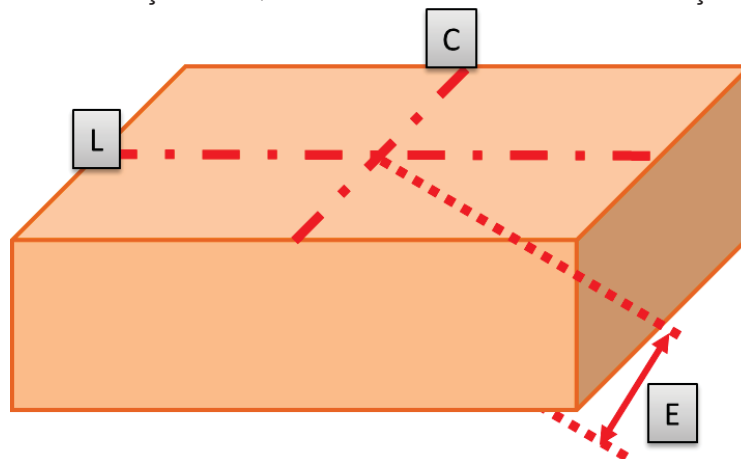
n = Número de medições

3.2.3 Teste de estabilidade dimensional

O teste de estabilidade térmica foi executado com base na norma ASTM D3575 – S (2020), porém ao invés de aquecer as amostras, elas foram resfriadas, a justificativa para este ajuste é apresentada no capítulo 4.1. As amostras possuíam o dimensional de 100 mm x 100 mm x 25 mm.

O procedimento consistiu em realizar a medição do comprimento, largura e espessura nos locais identificados da amostra, conforme FIGURA 27. Então, as amostras foram colocadas em um freezer a temperatura de $-20 \pm 5^\circ\text{C}$ por 24 ± 1 horas. Posteriormente, permaneceram 2 horas em temperatura ambiente laboratorial e então realizado novamente as medições de comprimento, largura e espessura.

FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS LOCAIS DE MEDIÇÃO DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2023).

O cálculo da variação de cada dimensão foi realizado conforme a equação abaixo:

$$\%Variação_Dimensional = \frac{D_f - D_0}{D_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Onde:

D_0 = Dimensão inicial, mm;

D_f = Dimensão final, mm.

Foram utilizados valores negativos para representar a redução das dimensões e positivos para crescimento das dimensões. Para uma maior confiabilidade, 5 amostras de cada região (topo e base) foram coletadas, determinando assim a estabilidade dimensional média de cada dimensão e o seu desvio padrão.

3.2.4 Teste de tração

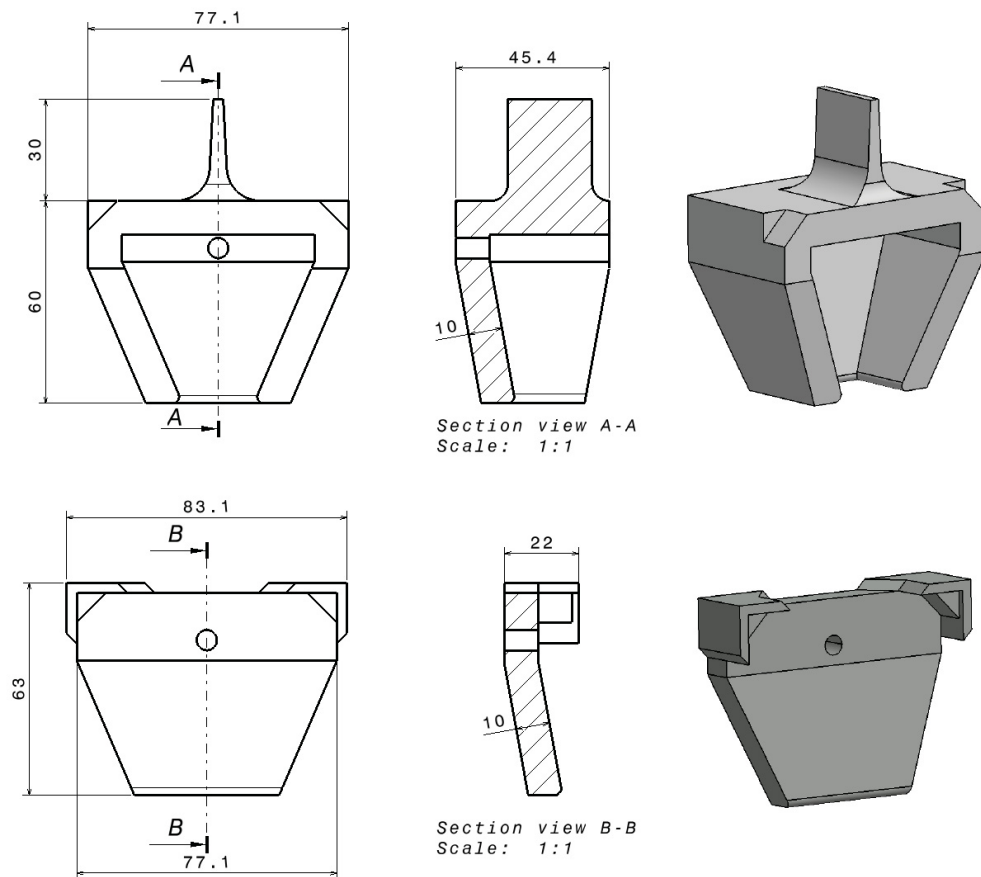
Os testes de tração em espumas de PU foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D1623 (2017) entretanto com algumas alterações, sendo elas:

- 1- Devido às regiões dos produtos não satisfazerem as dimensões das amostras indicadas na norma, o corpo de prova padrão foi alterado conforme figura abaixo, mantendo a proporção de área apoiada pela

secção de ruptura identificada no corpo de prova da norma (A análise completa desta proporção é feita em 4.2 Teste de tração).

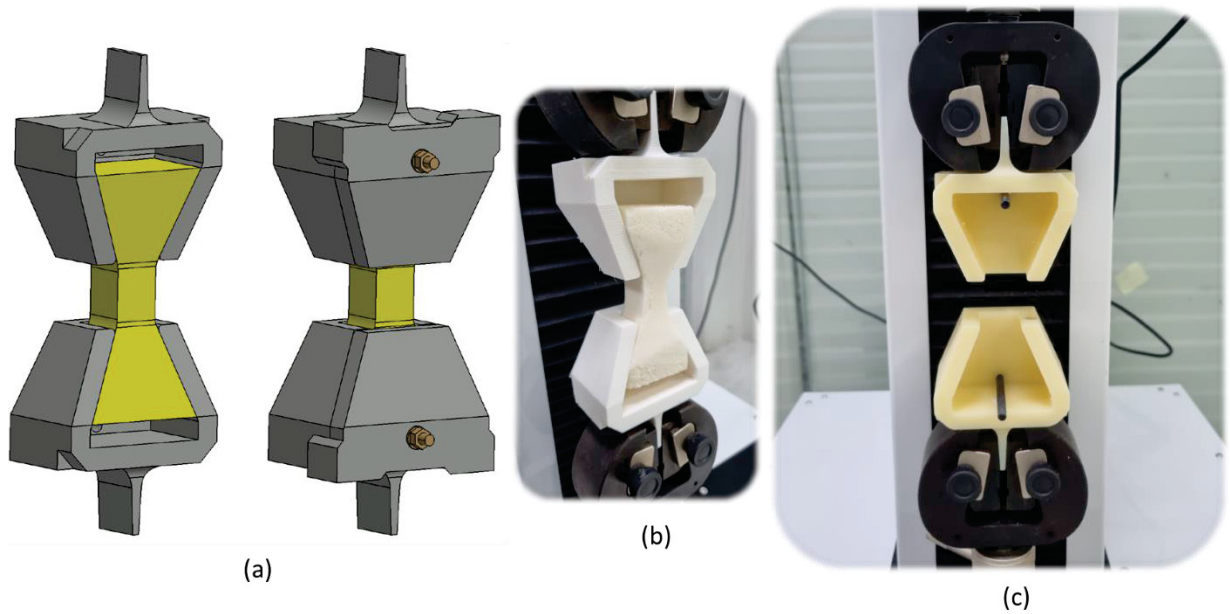
- 2- Devido as dimensões das amostras, não foi possível a aplicação do dispositivo indicado na norma. Portanto, foi projetado um novo dispositivo para fixação das amostras na máquina universal de ensaio.

FIGURA 28 – PROJETO DO DISPOSITIVO



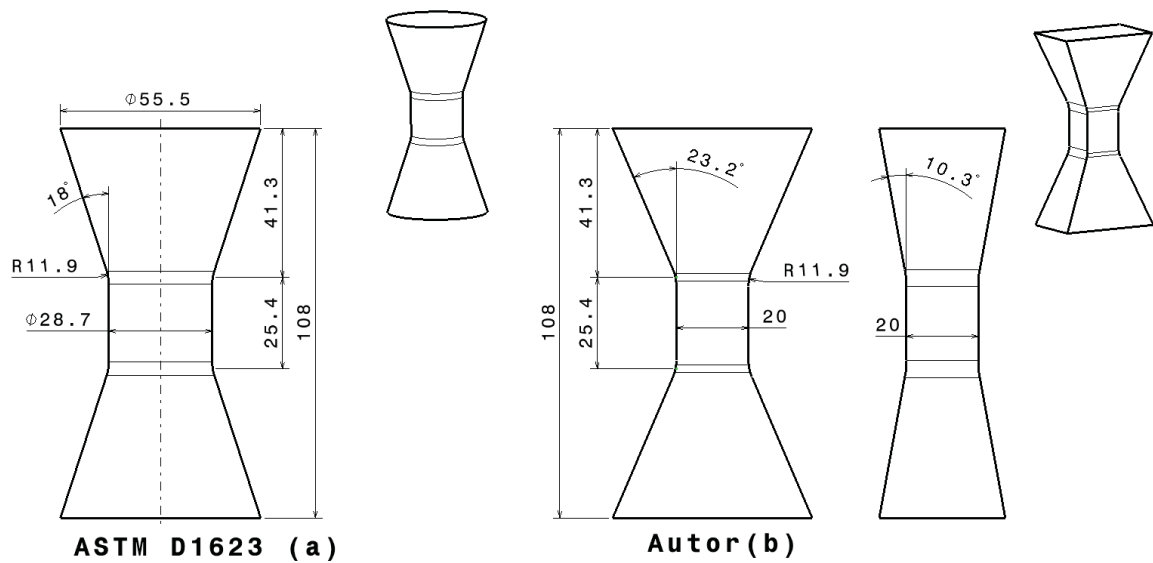
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 29 – DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO: (A) PROJETO 3D, (B) PROTÓTIPO EM IMPRESSÃO 3D, (C) DISPOSITIVO FINAL USINADO EM ABS



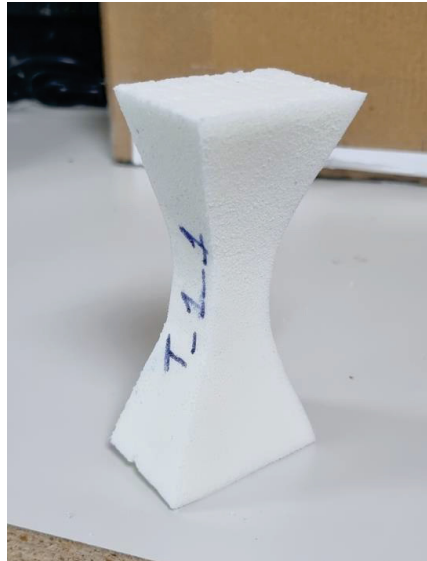
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 30 – DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA: (A) NORMA ASTM, (B) DIMENSIONAL UTILIZADO



FONTE: O autor (2023).

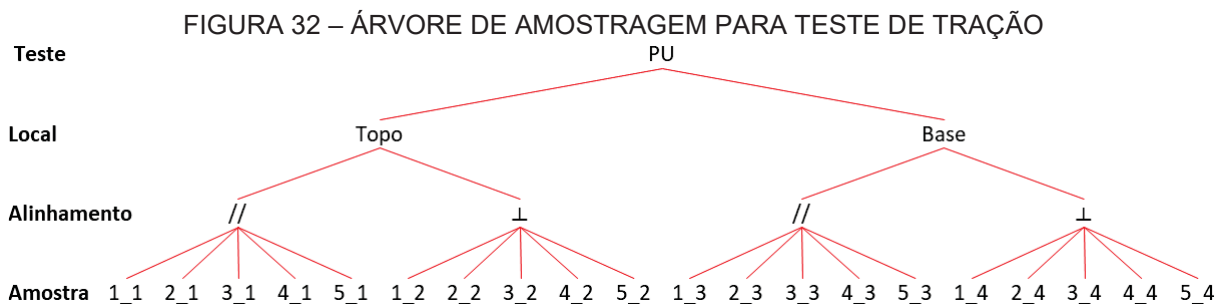
FIGURA 31 – CORPO DE PROVA DO TESTE DE TRAÇÃO



FONTE: O autor (2023).

O equipamento utilizado para o teste foi a máquina universal de ensaio Biopdi de coluna única com célula de carga de 1kN. A velocidade do teste foi de 1,3 mm/min.

As amostras foram identificadas em duas direções: normal e paralelo ao crescimento da espuma, conforme representado na FIGURA 25. Foram testadas 5 amostras de cada direção, árvore de amostragem indicada na FIGURA 32:



FONTE: O autor (2022).

O procedimento consistiu em:

1. Medir a seção transversal da amostra e calcular a área;
2. Zerar o indicador de carga;
3. Posicionar a amostra no dispositivo;
4. Executar o teste e registrar os dados.

Os cálculos de tensão e deformação sob tração foram realizados conforme equações abaixo:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

Onde:

σ = Tensão;

F = Força ou carga aplicada;

A_0 = Área da secção inicial da parte útil do corpo de prova;

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (6)$$

Onde:

ε = Deformação;

ΔL = Variação de comprimento inicial e final;

L = Comprimento final;

L_0 = Comprimento inicial;

O módulo de elasticidade (E) foi determinado através do ângulo da reta obtida por regressão linear dos dados de tensão e deformação.

3.2.5 Teste de compressão

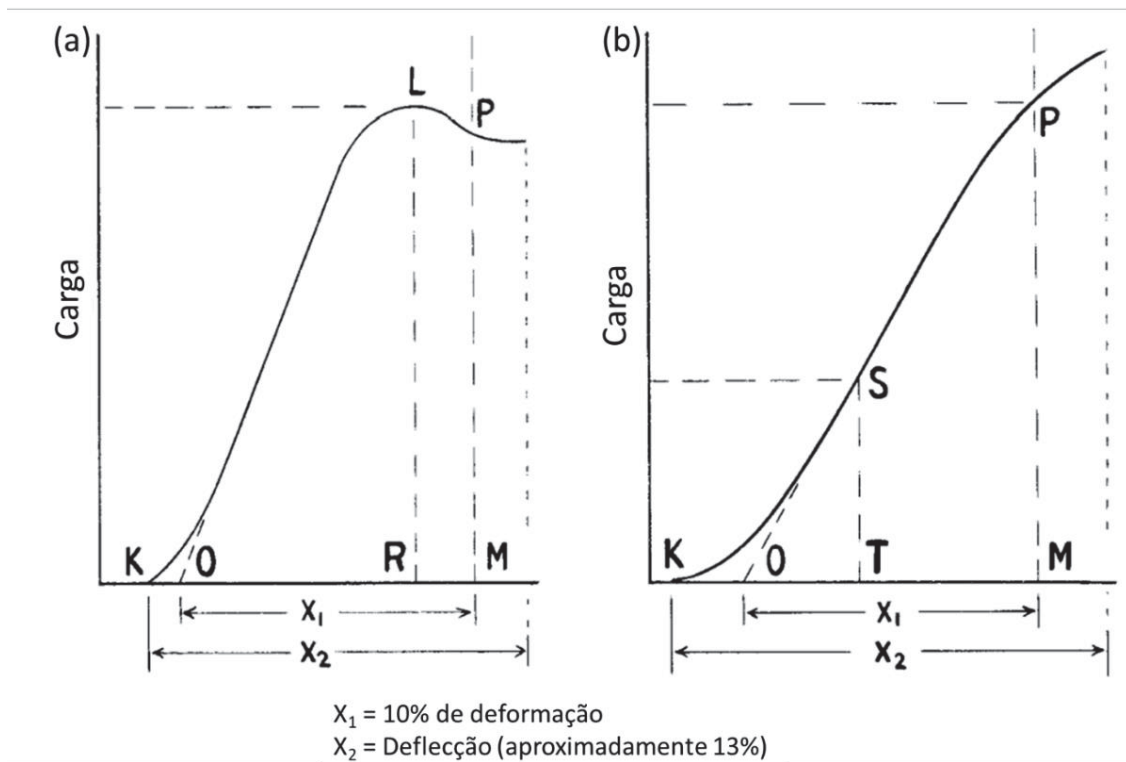
Para o teste de compressão das espumas de PU, o método de teste seguiu conforme a norma ASTM D1621 (2016). As dimensões da amostra utilizada foram de 50 x 50 x 50 mm. As amostras foram separadas e identificadas em duas direções: normal e paralelo ao crescimento da espuma. Serão testadas 5 amostras de cada direção.

O equipamento utilizado para o teste foi a máquina universal de ensaio Biopdi de coluna única com célula de carga de 1kN. Conforme Xu *et al.* (2022), a velocidade de execução do teste foi de 1mm/min. A árvore de amostragem do teste se repete conforme a do teste de tração indicada na FIGURA 32.

A norma ainda define que todos os pontos de medição devem partir do ponto “O” indicado na FIGURA 33. O ponto de escoamento compressivo é definido por “P”

caso o comportamento ocorra conforme a FIGURA 33 (b). Caso seja possível identificar o ponto “L” conforme a FIGURA 33 (a), este será o ponto de escoamento compressivo.

FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS DA CURVA DO TESTE DE COMPRESSÃO



FONTE: Adaptado de ASTM D1621 (2016).

A resistência à compressão é definida como a razão entre a carga aplicada (ponto “L” ou “P”) e a área inicial da seção da amostra:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (7)$$

Onde:

σ_c = Tensão de resistência a compressão;

F = Carga aplicada;

A_0 = Área da secção inicial do corpo de prova;

A deformação é determinada por:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (8)$$

Onde:

ε_c = Deformação;

ΔL = Variação de comprimento inicial e final;

L = Comprimento final (ponto “M” ou “R” da FIGURA 33);

L_0 = Comprimento inicial (ponto “O”);

Para o cálculo do módulo de elasticidade sob compressão foi definido um ponto de referência (como o ponto “S” da FIGURA 33 (b)) e então com os valores de tensão e deformação, foi calculado o módulo de elasticidade sob compressão em função da inclinação da reta OS da FIGURA 33 (b):

$$E_c = \frac{\sigma_{cS} - \sigma_{cO}}{\varepsilon_{cS} - \varepsilon_{cO}} \quad (9)$$

Onde:

E_c = Módulo de elasticidade sob compressão;

σ_{cS} = Tensão no ponto S;

σ_{cO} = Tensão no ponto O;

ε_{cS} = Deformação no ponto S;

ε_{cO} = Deformação no ponto O;

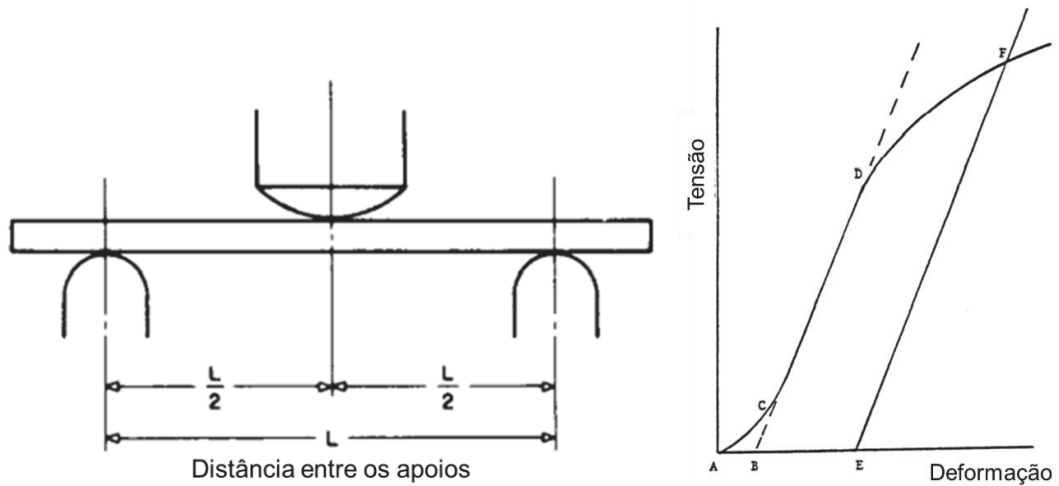
3.2.6 Teste de flexão em 3 pontos

O teste de flexão foi executado de acordo com o método indicado na norma ASTM D790 (2003). O dimensional da amostra utilizada foi de 25 x 25 mm com uma distância entre os apoios de 100 mm. As amostras foram separadas e identificadas em duas direções: normal e paralelo ao crescimento da espuma. Serão testadas 5 amostras de cada direção.

O equipamento utilizado para o teste foi a máquina universal de ensaio Biopdi de coluna única com célula de carga de 1kN. Seguindo conforme Voiconi *et al.* (2013),

a velocidade de execução do teste foi de 2 mm/min. A árvore de amostragem do teste se repete conforme a do teste de tração indicada na FIGURA 32.

FIGURA 34 – TESTE DE FLEXÃO EM 3 PONTOS



FONTE: (ASTM D790, 2003).

A norma ainda define que todos os pontos de medição devem partir do ponto “B” indicado na FIGURA 34.

O cálculo da tensão de flexão é definido por:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (10)$$

Onde:

σ_f = Tensão de flexão;

P = Carga aplicada na amostra;

L = Distância entre os apoios;

d = Largura da amostra;

b = Profundidade da amostra.

A deformação em flexão é dada por:

$$\varepsilon_f = \frac{6 \cdot D \cdot d}{L^2} \quad (11)$$

Onde:

ε_f = Deformação em flexão, MPa;
 D = Deslocamento;

Para o cálculo do módulo de elasticidade sob flexão foi selecionado a reta BD da FIGURA 34 e então com os valores de tensão e deformação dos extremos desta reta, foi calculado o módulo sendo:

$$E_f = \frac{\sigma_{f_D} - \sigma_{f_B}}{\varepsilon_{f_D} - \varepsilon_{f_B}} \quad (12)$$

Onde:

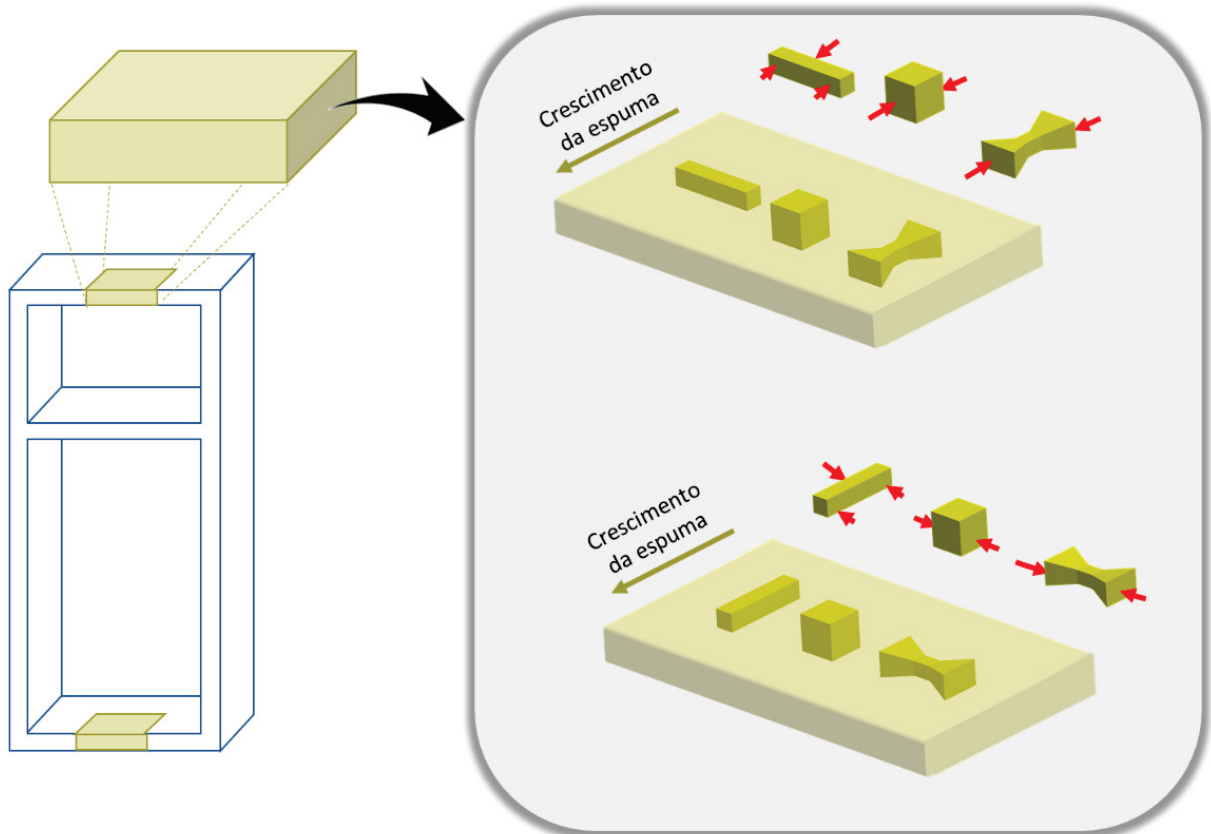
E_f = Módulo de elasticidade sob flexão;
 σ_{f_D} = Tensão no ponto D;
 σ_{f_B} = Tensão no ponto B;
 ε_{f_D} = Deformação no ponto D;
 ε_{f_B} = Deformação no ponto B;

3.2.7 Configuração das amostras com base nos testes de tração, compressão e flexão

Com base no indicado para cada teste, abaixo um guia visual. Com base nos dois locais, as amostras foram retiradas de modo a suprir o objetivo de medição devido ao alinhamento.

Na FIGURA 35, é possível identificar a orientação de como cada amostra foi retirada dos locais e, através das setas vermelhas, como foi aplicado a carga para cada teste.

FIGURA 35 – CONFIGURAÇÃO DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2023).

4 DESENVOLVIMENTO DA EXPERIMENTAÇÃO

4.1 ESTABILIDADE DIMENSIONAL

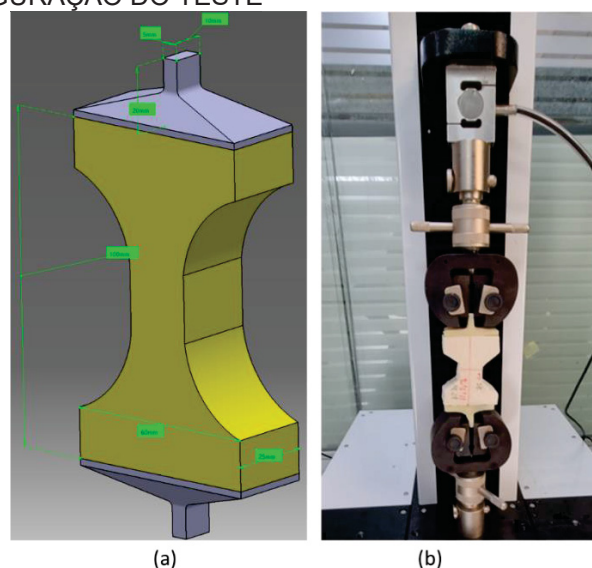
Sendo a proposta deste trabalho compreender o comportamento das espumas de PU utilizadas em refrigeradores domésticos, não é aplicado aquecer as mostras a 70 °C conforme indicado pela norma ASTM D3575 (2020). Logo, o procedimento de resfriar as amostras a -20 °C, de acordo com a temperatura que um refrigerador é submetido, se faz mais condizente com o objetivo.

4.2 TESTE DE TRAÇÃO

O procedimento para realizar o teste conforme a norma ASTM D1623 (2017) é difícil de ser seguido por necessitar de aparatos específicos, como o dispositivo de corte e os fixadores, que não são padrão de equipamentos e apresentam uma certa complexidade de fabricação. Além disso, no caso do presente trabalho, o dimensional da amostra indicado pela norma impossibilitou seguir com o especificado na norma.

A princípio, o trabalho seguiu o procedimento realizado por Caliri Junior (2010), que consistiu em anexar o corpo de prova de PU a um substrato rígido (feito de ABS) através de um adesivo epóxi (Tekbond Araldite). Em seguida, o substrato rígido foi acoplado à máquina de tração, conforme a FIGURA 36.

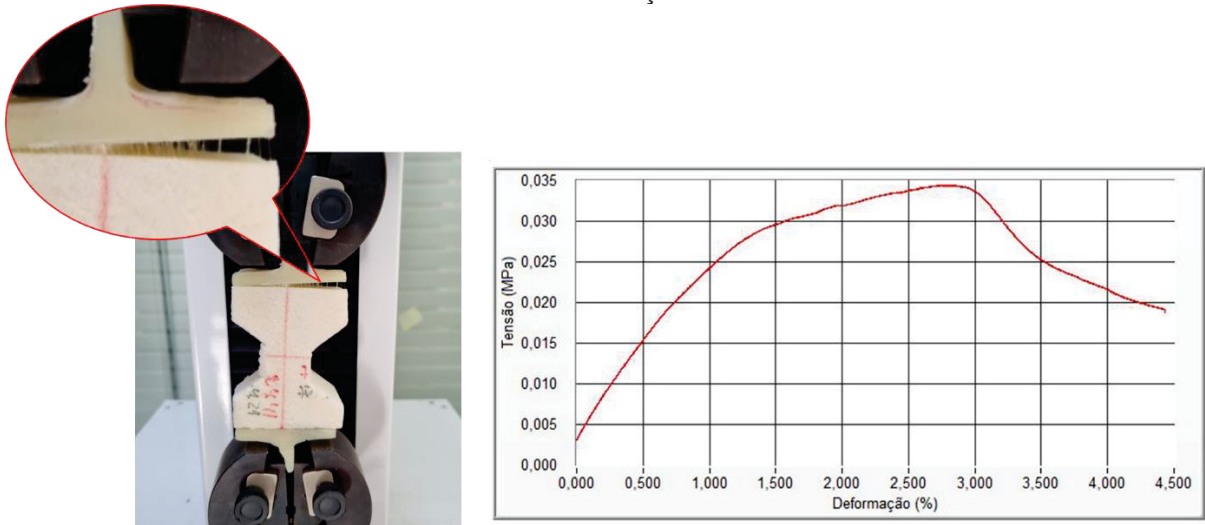
FIGURA 36 – TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO EPÓXI E SUBSTRATO RÍGIDO: (A) PROJETO E (B) CONFIGURAÇÃO DO TESTE



FONTE: O autor (2023).

Apesar de seguir as recomendações de tempo de cura do adesivo indicado pelo fabricante e a razão de 3 vezes a área colada pela seção de ruptura do corpo de prova, o teste falhou. Durante a execução do teste, foi observado que o adesivo se desprendia do substrato e do corpo de prova para forças de aproximadamente 20N. A curva tensão e deformação e uma imagem da falha estão evidenciadas na FIGURA 37.

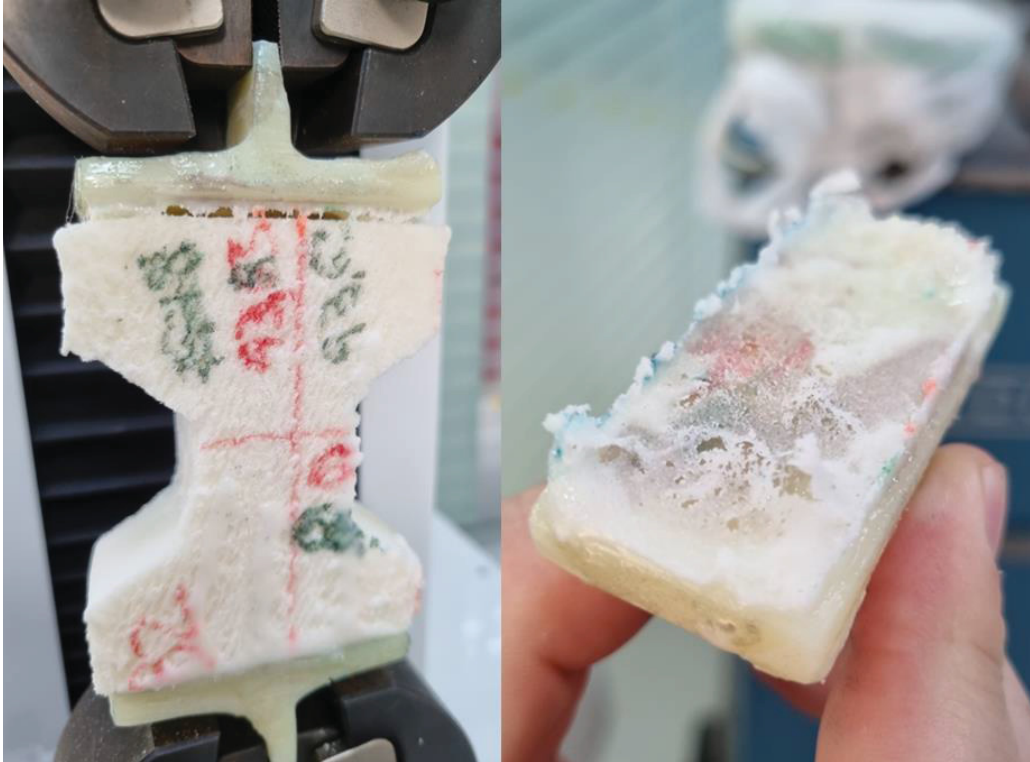
FIGURA 37 – FALHA DO TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO EPÓXI



FONTE: O autor (2023).

Depois de falhar o primeiro teste, uma nova tentativa foi feita utilizando outro adesivo. Neste caso, foi usado uma resina PC 26 e um endurecedor G 226, ambos da empresa Hard. No entanto, o teste também falhou. Foi observado que o adesivo se rompeu ao aderir ao substrato, e havia espuma de poliuretano presente, conforme a FIGURA 38.

FIGURA 38 – FALHA NO TESTE DE TRAÇÃO UTILIZANDO ADESIVO RESINA E ENDURECEDOR

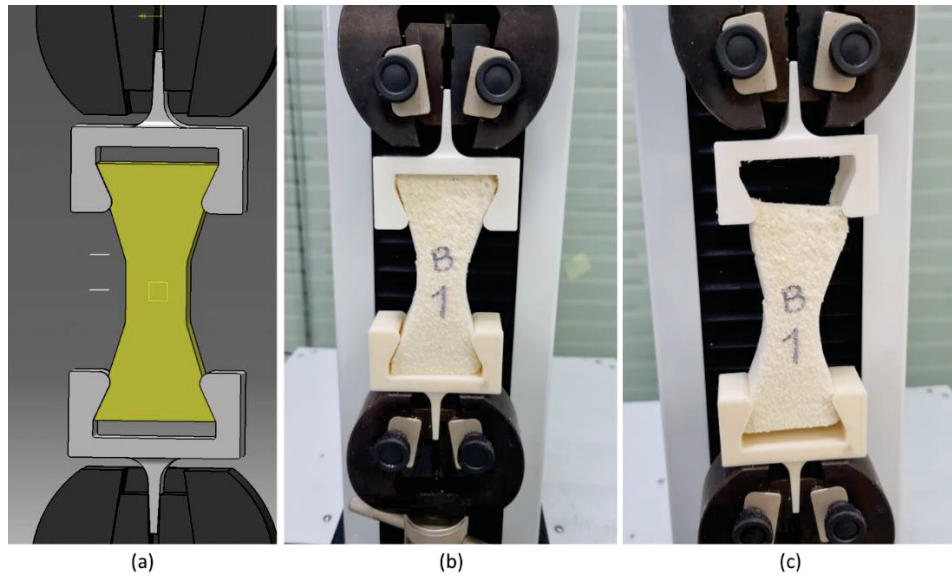


FONTE: O autor (2023).

Como as tentativas de prender o corpo de prova a um substrato através de um adesivo não estavam surtindo efeito, além de serem um processo moroso, foi feita uma análise do que seria possível realizar seguindo o conceito de teste apresentado pela norma ASTM D1623 (2017), ou seja, apenas o disposto retendo o corpo de prova.

O primeiro protótipo neste conceito é apresentado na FIGURA 39. Ele apresentou uma melhora significativa na execução do teste (tempo de preparo e deformação do corpo de prova). No entanto, não foi suficiente para reter o corpo de prova até sua ruptura.

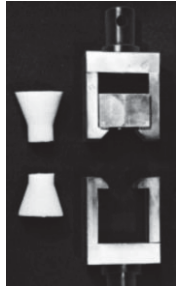
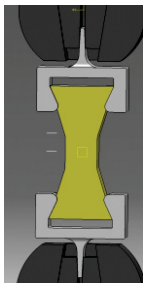





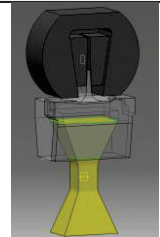
FIGURA 39 – PRIMEIRO PROJETO E PROTÓTIPO DO TESTE DE TRAÇÃO SEM ADESIVO



FONTE: O autor (2023).

Devido ao deslizamento observado no teste, foram elaborados alguns testes reduzindo a área da seção de ruptura do corpo de prova. Isso foi feito aumentando a razão da área apoiada no suporte pela área da seção de ruptura do corpo de prova.

QUADRO 3 – RAZÕES DAS AMOSTRAS TESTADAS VIA TRAÇÃO

				
	Norma ASTM	Suporte_1	Suporte_2	Suporte_3
Área apoiada (mm ²)	7060,8	841,3	437,5	437,5
Área da seção de ruptura (mm ²)	646,9	625,0	304,6	195,0
Razão	10,9	1,3	1,4	2,2
				
	Suporte_4	Suporte_5	Suporte_6	Suporte_7
Área apoiada (mm ²)	841,3	841,3	841,3	5268,2
Área da seção de ruptura (mm ²)	325,1	72,2	57,7	400,0
Razão	2,6	11,7	14,6	13,2

FONTE: O autor (2023).

Então, foi constatado que, utilizando a norma ASTM D1623 (2017) como referência, os protótipos estavam com a razão muito baixa, conforme indicado no QUADRO 3. Foi observado que para a realização do teste, a razão deveria ser igual ou maior que a razão da geometria proposta na norma, ou seja, suportes 5 e 6 do QUADRO 3.

No entanto, os suportes 5 e 6 possuíam uma área de seção de ruptura pequena (aproximadamente 8 mm x 8 mm). Para manter a razão acima do constatado em norma, o corpo de prova e suporte foram escalonados para uma seção de 20 mm x 20 mm.

4.3 TESTE DE COMPRESSÃO E FLEXÃO

Para os testes de compressão e flexão, não foi constatado nenhuma divergência e/ou necessidade de ajuste para a execução dos mesmos. Ambos seguiram conforme norma e artigo base referenciado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

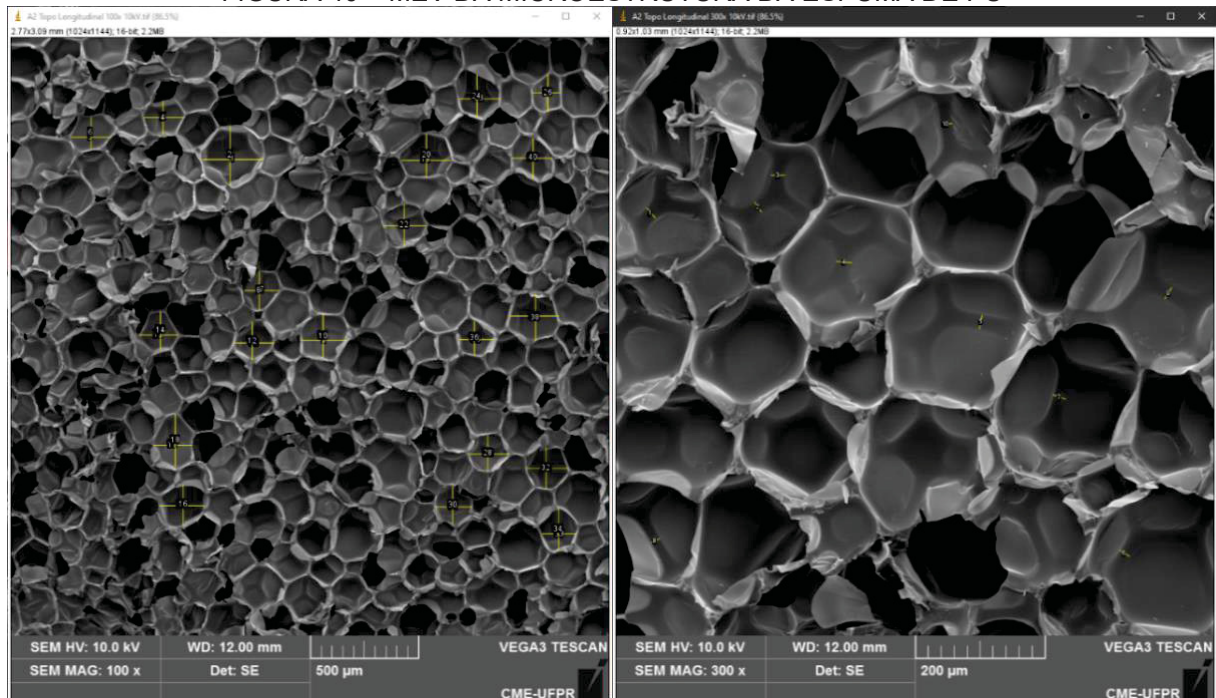
O capítulo está estruturado em duas seções distintas. A primeira seção tem como objetivo apresentar os resultados experimentais obtidos por meio dos testes realizados. Na segunda seção, é conduzida uma análise dos resultados, iniciando com uma avaliação individual de cada teste e, posteriormente, realizando uma análise abrangente que engloba todos os testes realizados, levando em consideração os dois fatores em estudo.

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1.1 Características microestruturais da espuma de PU

Abaixo as características microestruturais mensuradas das amostras de espuma de PU separadas por grupo amostral.

FIGURA 40 – MEV DA MICROESTRUTURA DA ESPUMA DE PU



FONTE: O autor (2023).

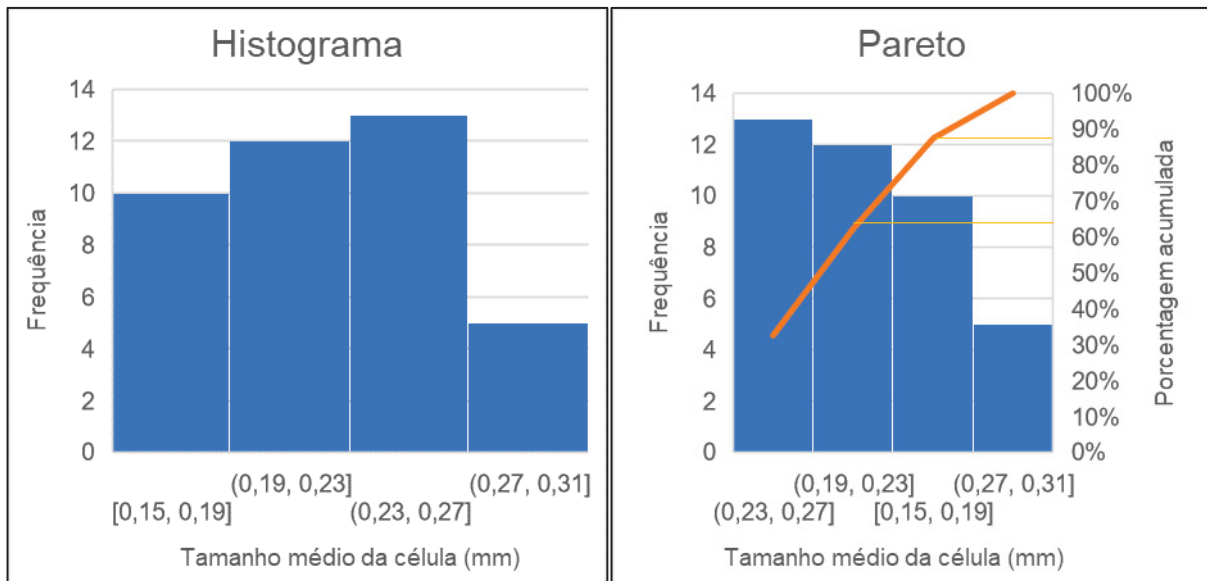
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS DA ESPUMA DE PU

	Tamanho médio (μm)		Proporção média		Espessura média das paredes (μm)	
	Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.
Topo //	198,295	33,304	1,13	0,107	19,420	2,612
Topo \perp	195,515	30,929	1,15	0,122	17,580	2,572
Base //	221,835	44,071	1,17	0,130	16,900	2,772
Base \perp	210,815	51,921	1,26	0,245	17,060	3,285
Total	206,615	42,193	1,177	0,168	17,740	2,978

FONTE: O autor (2023).

Com base na análise do histograma e do diagrama de Pareto apresentados na FIGURA 41 abaixo, é possível observar que mais de 60% das células medidas possuem dimensões compreendidas entre 186 e 266 μm , indicando um tamanho médio da célula nessa faixa de valores.

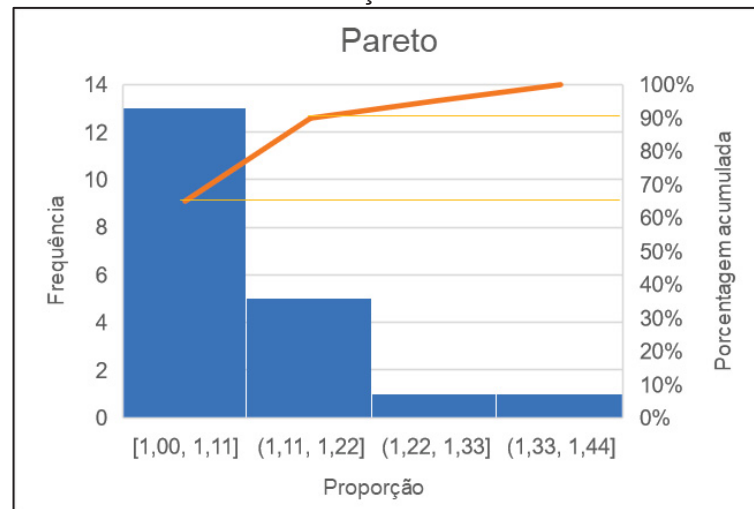
FIGURA 41 – TAMANHO MÉDIO DAS CÉLULAS



FONTE: O autor (2023).

De acordo com a análise realizada, constatou-se que aproximadamente 65% das células possuem uma proporção média entre 1,00 e 1,11, conforme ilustrado na FIGURA 42.

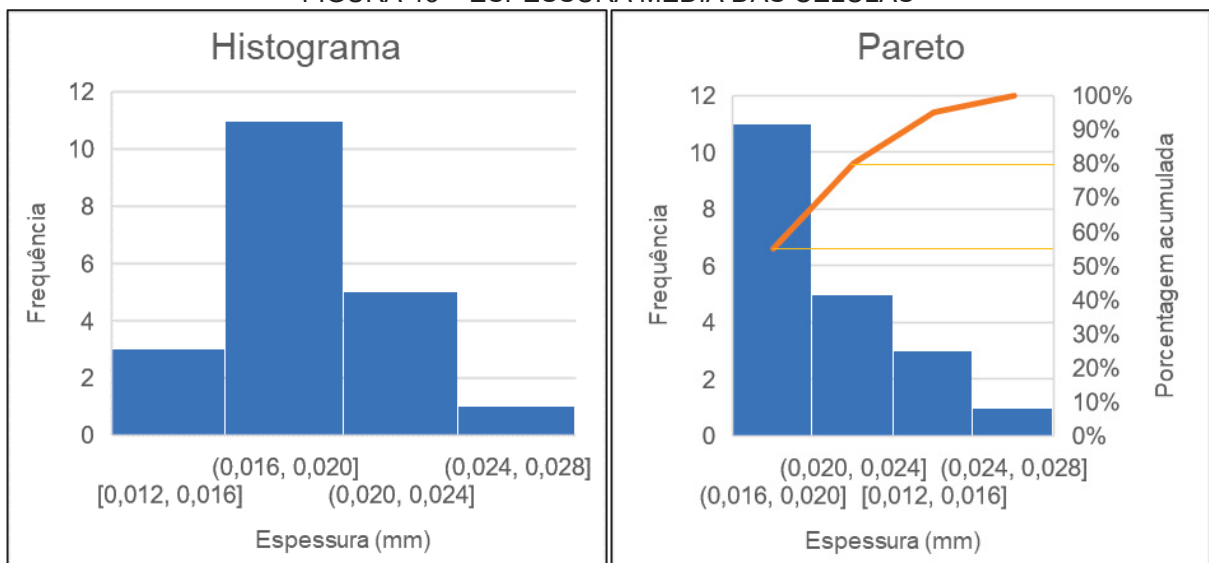
FIGURA 42 – PROPORÇÃO MÉDIA DAS CÉLULAS



FONTE: O autor (2023).

Além disso, verificou-se que mais de 75% das células apresentam uma espessura média variando entre 16 e 24 μm , como demonstrado na FIGURA 43.

FIGURA 43 – ESPESSURA MÉDIA DAS CÉLULAS



FONTE: O autor (2023).

A análise do tamanho da célula revelou que o valor obtido de 206,615 μm para uma densidade de 29,21 kg/m^3 está em consonância com os resultados encontrados por Linul e Marsavina (2017) em espumas de PU com densidades de 100, 145 e 300 kg/m^3 , que apresentaram tamanhos de célula de 120, 88 e 68 μm , respectivamente. Esses resultados indicam uma relação inversamente proporcional entre o tamanho da célula e a densidade do material.

5.1.2 Densidade aparente

Os resultados obtidos determinaram uma densidade média total (média da base e do topo) de 29,21 kg/m³ com um desvio padrão de 0,71 kg/m³. Os valores para todas as amostras e as médias do topo e base são apresentados na TABELA 3.

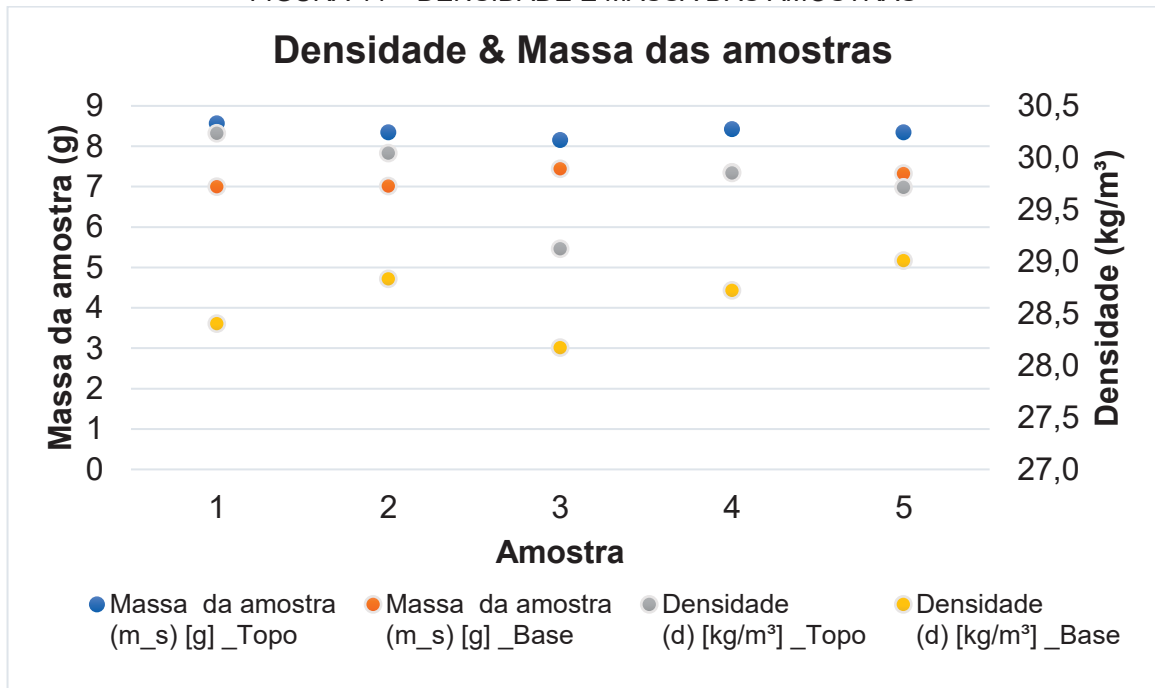
TABELA 3 – DENSIDADE APARENTE

	Amostra	Massa da amostra (m _s) [g]	Δ Massa líquido (m _l) [g]	Densidade (d) [kg/m ³]
Topo	1	8,57	282,70	30,24
	2	8,35	277,20	30,05
	3	8,16	279,46	29,13
	4	8,43	281,66	29,85
	5	8,35	280,29	29,72
			Média_Topo	29,80
			Desvio Padrão_Topo	0,42
Base	1	7,00	245,83	28,40
	2	7,02	242,83	28,84
	3	7,45	263,76	28,17
	4	7,36	255,57	28,73
	5	7,33	252,02	29,01
			Média_Base	28,63
			Desvio Padrão_Base	0,34
			Média_Total	29,21
			Desvio Padrão_Total	0,71
Densidade Líquido (d_l) [kg/m³]:			997,5	

FONTE: O autor (2023).

Foi constatado que as amostras coletadas do topo dos produtos apresentaram valores superiores de densidade aparente em comparação com as amostras da base, como evidenciado na FIGURA 44. Essa diferença de valores entre os grupos era esperada e desempenha um papel importante na análise do comportamento mecânico da espuma, conforme abordado no capítulo 5.2.6.

FIGURA 44 – DENSIDADE E MASSA DAS AMOSTRAS

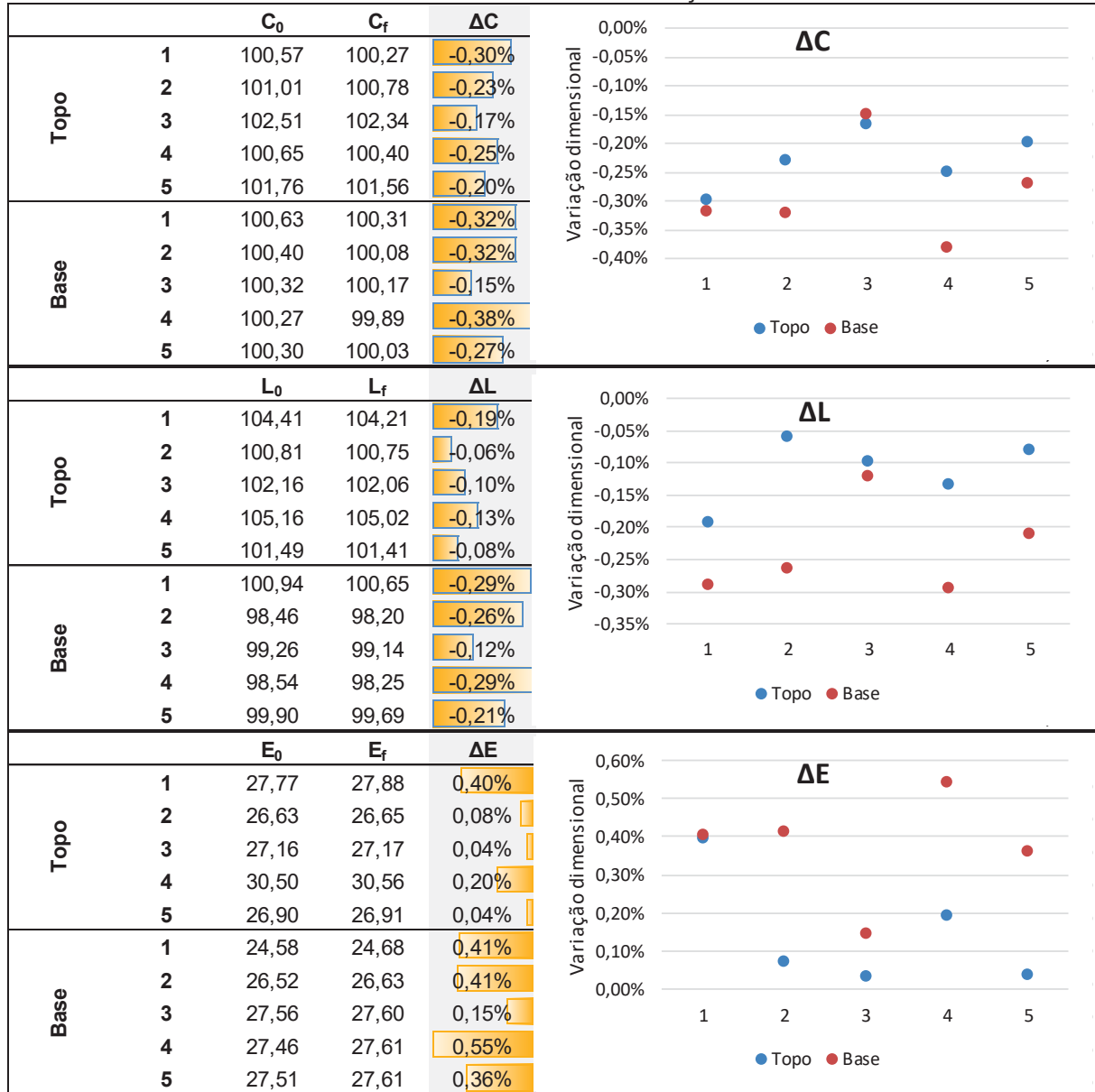


FONTE: O autor (2023).

5.1.3 Estabilidade dimensional

Os valores obtidos para variação dimensional são apresentados na FIGURA 45 abaixo:

FIGURA 45 – DADOS E GRÁFICO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS

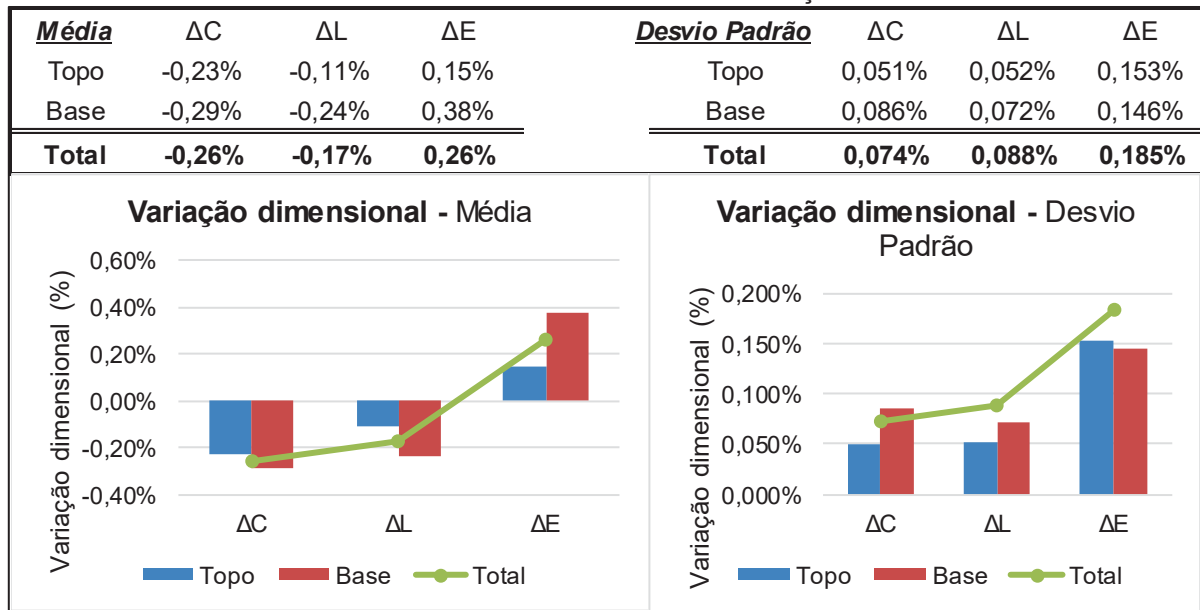


FONTE: O autor (2023).

Ao analisar a estabilidade dimensional das espumas de PU, foi observado que nas três dimensões analisadas, a base apresentou a maior variação dimensional. Importante ressaltar que todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento durante o teste, que consistiu em reduzir seu comprimento e largura, e aumentar sua

espessura, seguindo o padrão de comportamento observado nos testes anteriores realizados pela equipe do laboratório. Os dados foram agrupados e analisados através da média e desvio padrão, como ilustrado na FIGURA 46. A justificativa para a maior variação dimensional das amostras da base é apresentada juntamente com a análise da densidade e comportamento mecânico no capítulo 5.2.6.

FIGURA 46 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS



FONTE: O autor (2023).

5.1.4 Teste de tração

A tabela abaixo resume os dados obtidos nos testes de tração, apresentando os valores para a tensão máxima, a deformação máxima e o módulo de elasticidade calculado, em conjunto com o desvio padrão.

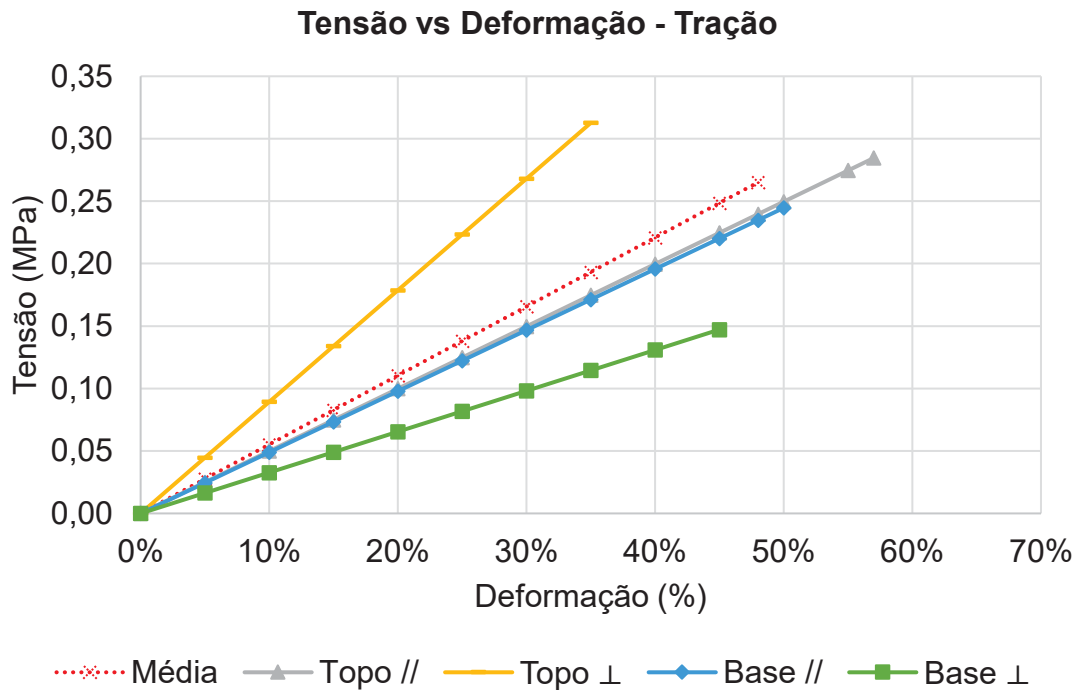
TABELA 4 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE TRAÇÃO

		Tensão Máx (MPa)		Deformação Max (%)		Mod Elasticidade (MPa)	
		<i>Média</i>	<i>Desv.Pad.</i>	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad.</i>	<i>Média</i>	<i>Desv.Pad.</i>
Topo	//	0,281	0,031	57,000%	5,099%	0,499	0,072
Topo	⊥	0,305	0,032	39,000%	11,358%	0,894	0,226
Base	//	0,233	0,035	51,200%	10,569%	0,489	0,136
Base	⊥	0,132	0,028	45,600%	17,242%	0,327	0,162
Total		0,238	0,074	48,200%	12,866%	0,552	0,259

FONTE: O autor (2023).

Com base nos módulos de elasticidade e na deformação máxima média, os comportamentos descritos anteriormente podem ser normalizados em cinco retas distintas (média e os quatro grupos analisados), representadas na FIGURA 47.

FIGURA 47 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB TRAÇÃO: MÉDIA, TOPO E BASE



FONTES: O autor (2023).

5.1.5 Teste de compressão

A tabela subsequente apresenta os resultados obtidos por meio dos testes de compressão, fornecendo informações sobre os valores da tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade calculado, acompanhado do respectivo desvio padrão.

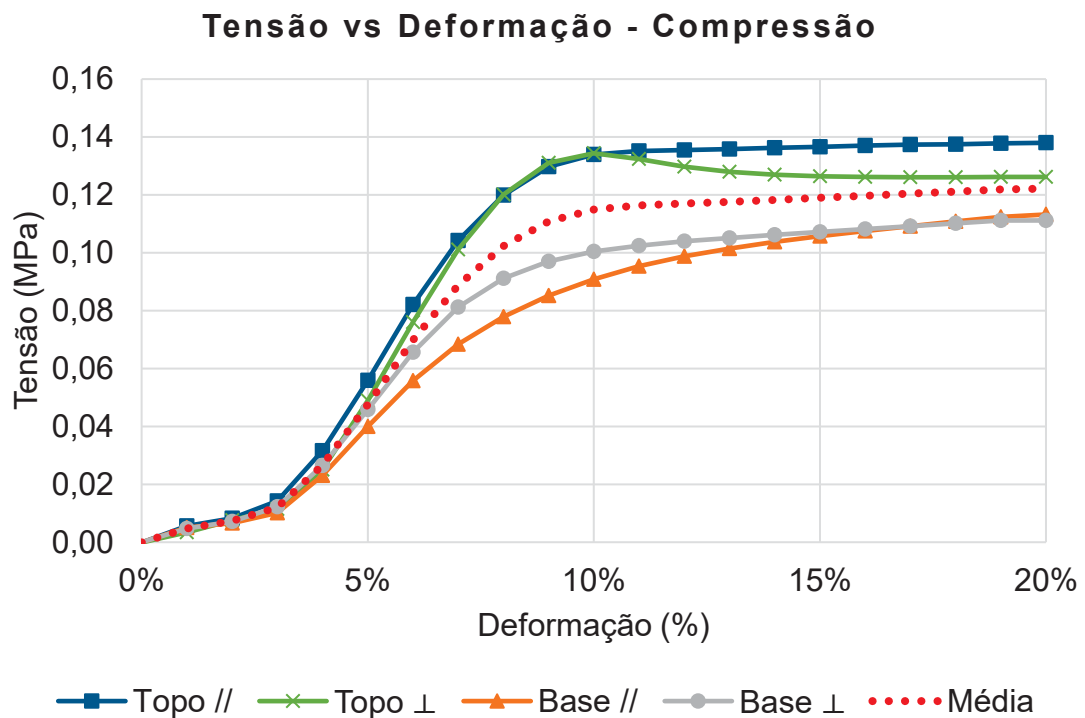
TABELA 5 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE COMPRESSÃO

	Tensão Máx (MPa)		Deformação Max (%)		Mod Elasticidade (MPa)	
	Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.
Topo //	0,138	0,006	8,118%	1,740%	2,425	0,414
Topo ⊥	0,136	0,002	6,917%	1,000%	2,598	0,297
Base //	0,100	0,006	10,000%	0,000%	1,740	0,207
Base ⊥	0,103	0,007	10,000%	0,000%	2,173	0,266
Total	0,120	0,019	8,759%	1,631%	2,234	0,434

FONTES: O autor (2023).

Na FIGURA 48 abaixo é representado as curvas médias de cada grupo, e uma curva média total.

FIGURA 48 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB COMPRESSÃO: MÉDIA, TOPO E BASE



FONTE: O autor (2023).

5.1.6 Teste de flexão

A tabela a seguir apresenta os resultados dos testes de flexão, fornecendo informações sobre os valores da tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade calculado, acompanhados por seus respectivos desvios-padrão.

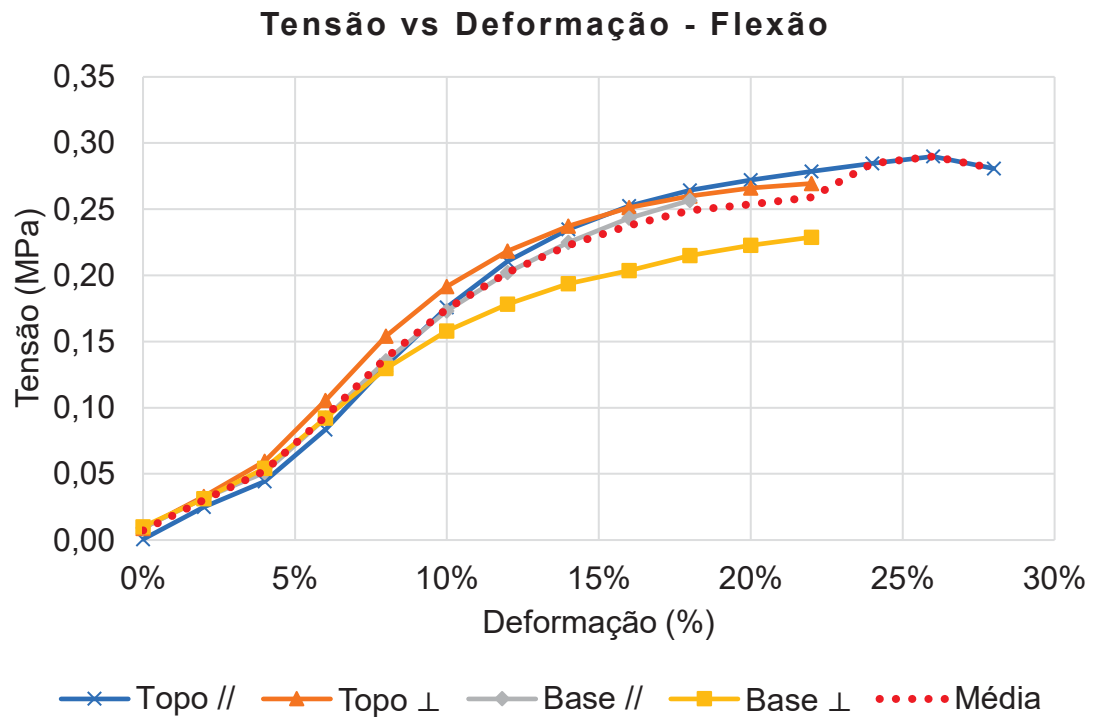
TABELA 6 – RESUMO DOS DADOS DO TESTE DE FLEXÃO

		Tensão Máx (MPa)		Deformação Max (%)		Mod Elasticidade (MPa)	
		Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.	Média	Desv.Pad.
Topo	//	0,298	0,058	27,393%	2,543%	2,359	0,466
Topo	⊥	0,273	0,047	22,520%	1,664%	2,368	0,278
Base	//	0,275	0,045	19,266%	2,665%	2,054	0,239
Base	⊥	0,230	0,067	21,346%	4,550%	1,972	0,721
Total		0,269	0,056	22,631%	4,145%	2,188	0,466

FONTE: O autor (2023).

Na FIGURA 49 abaixo é representado as curvas médias de cada grupo, e uma curva média total.

FIGURA 49 – TENSÃO E DEFORMAÇÃO DAS ESPUMAS DE PU SOB FLEXÃO: MÉDIA, TOPO E BASE



FONTE: O autor (2023).

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

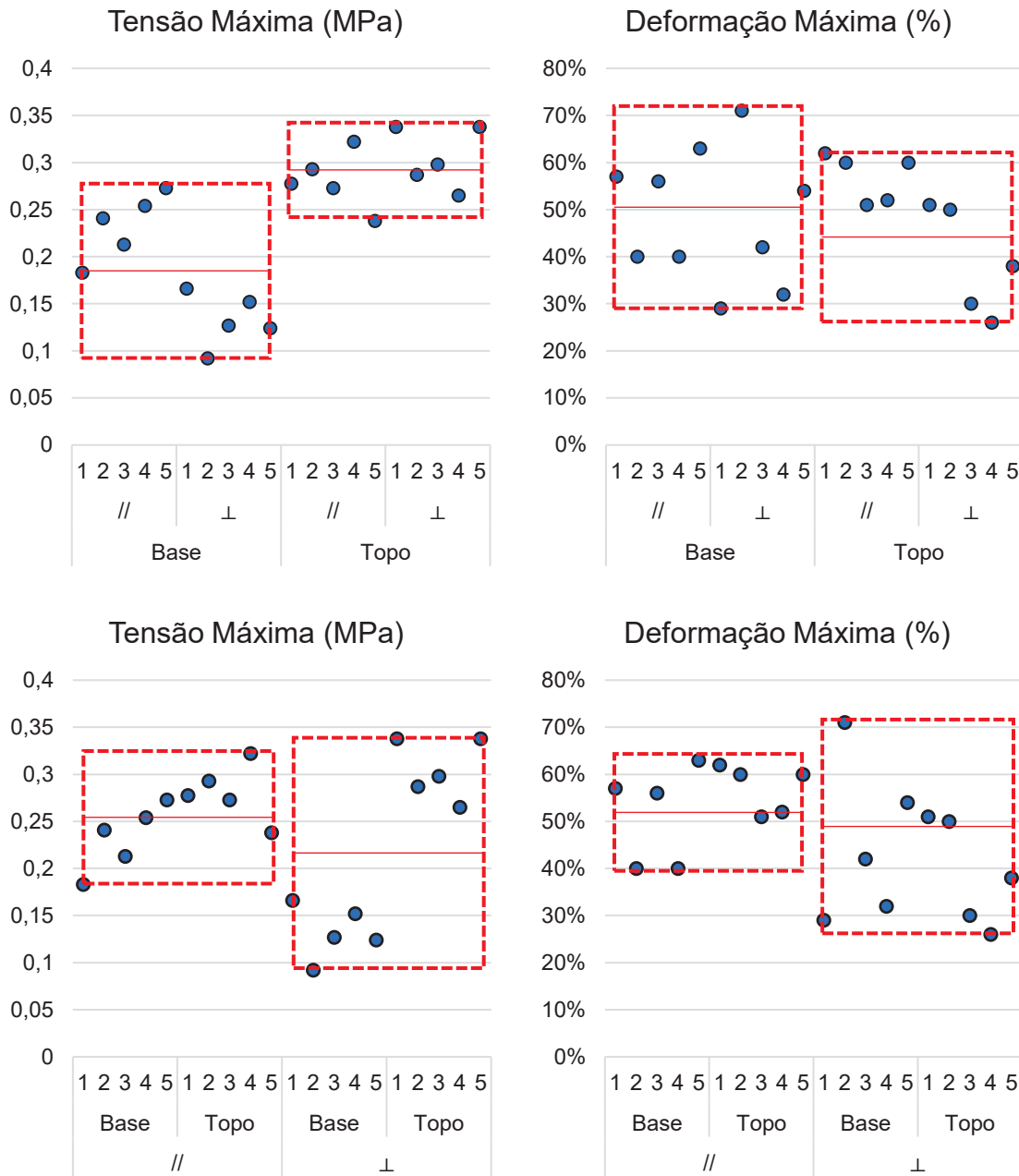
No presente capítulo, são apresentadas análises detalhadas dos resultados obtidos, considerando uma abordagem ampla e integrada entre testes e referências. As três primeiras seções abordam uma análise dos dados dos testes de tração, compressão e flexão, utilizando gráficos para visualizar de forma clara os valores obtidos, as médias e a dispersão de cada grupo. Em seguida, é realizada uma análise aprofundada dos dois fatores estudados, alinhamento e localização, seguida por uma comparação com os materiais que constituem um refrigerador.

5.2.1 Análise do comportamento em tração

Para o teste de tração, os valores de tensão máxima e deformação máxima são analisados a partir de duas perspectivas distintas. A primeira perspectiva consiste na comparação entre amostras coletadas na base e no topo. Observa-se que as amostras do topo apresentam valores superiores para a tensão máxima, além de uma menor dispersão.

A segunda perspectiva envolve a análise das amostras em relação à direção de crescimento da espuma, ou seja, se são perpendiculares ou paralelas a esse crescimento. Nesse caso, constata-se que as amostras perpendiculares ao crescimento da espuma exibem uma maior dispersão. Essas observações são ilustradas na FIGURA 50, que representa a análise dos dados de tração para alinhamento e localização.

FIGURA 50 – ANÁLISE DOS DADOS DE TRAÇÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO



FONTE: O autor (2023).

5.2.2 Análise do comportamento em compressão

A norma ASM D1621 (2016) aborda o comportamento de plásticos celulares rígidos em compressão, que pode ocorrer com ou sem queda de tensão. Ao analisar as curvas de compressão da espuma de PU (FIGURA 48), observamos a presença de ambos os comportamentos. Nas amostras do topo perpendicular ao crescimento

da espuma, identificamos um ponto máximo seguido de queda de tensão, enquanto o restante das curvas segue um comportamento sem queda de tensão.

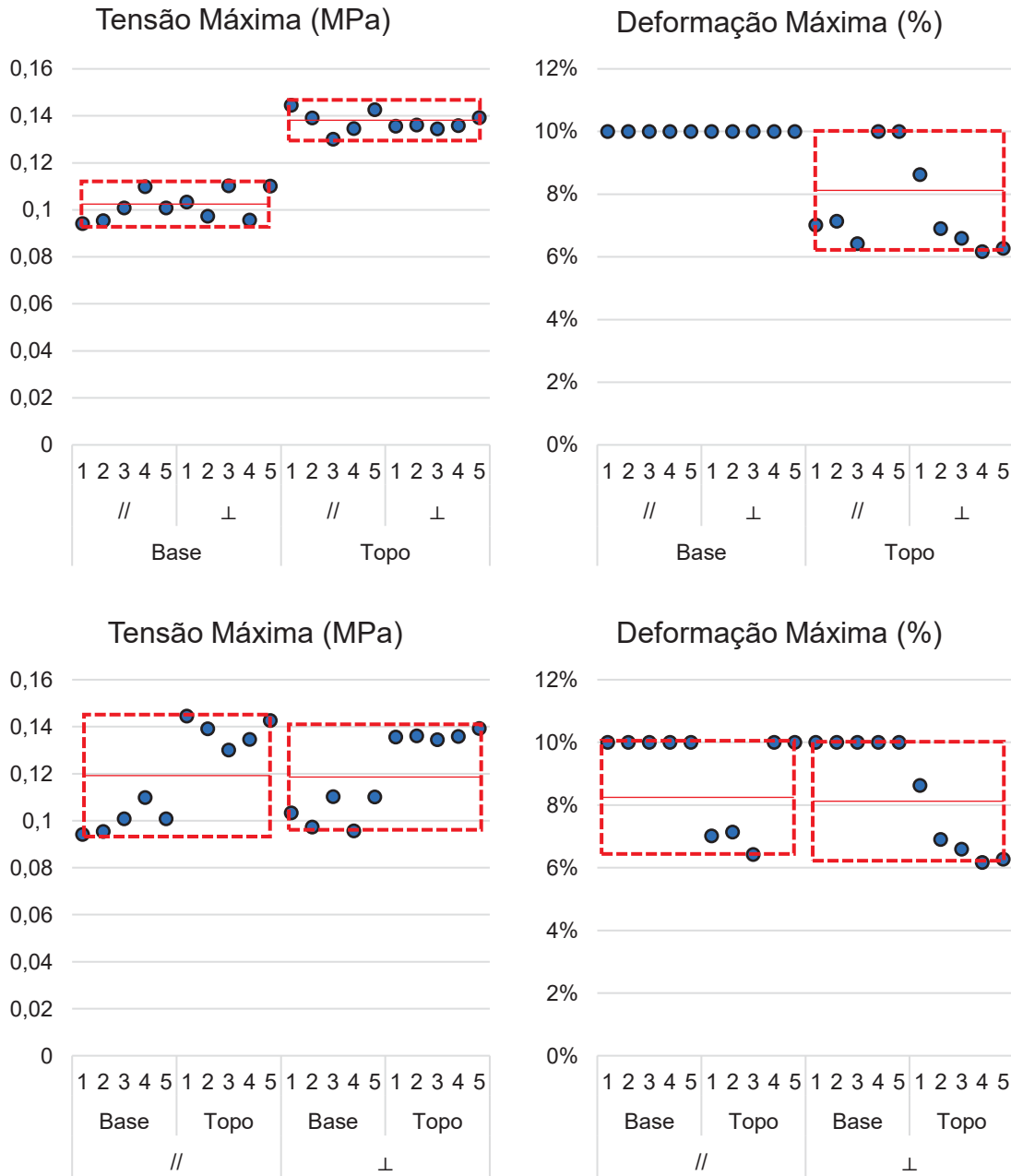
As espumas de PU submetidas à compressão apresentam um comportamento caracterizado por três regiões distintas, conforme discutido na seção 2.1.3. Essas regiões são identificadas como elástica linear, platô com queda de tensão e densificação. A queda de tensão observada nesse contexto é atribuída ao rompimento das estruturas celulares presentes na espuma. Notavelmente, nas amostras do topo perpendicular ao crescimento da espuma, é observado esta queda de tensão.

Em contraste, nos demais grupos de amostras, não é observada essa queda de tensão. Esse comportamento é especialmente evidente nas amostras da base, onde a presença de vazios é mais significativa, resultando em uma estrutura celular menos estável para manifestar o comportamento elástico mencionado anteriormente. Para uma compreensão mais aprofundada desse comportamento elástico e do rompimento das estruturas celulares, recomenda-se a realização de novos testes utilizando a técnica DIC (*digital image correlation*) para avaliar a formação e o avanço do rompimento da estrutura.

Utilizando a mesma metodologia empregada no teste de tração, a análise foi conduzida considerando duas perspectivas: alinhamento e localização. Na primeira perspectiva, observamos que as amostras do topo apresentaram maior resistência, corroborando os resultados anteriores. Em relação à deformação das amostras da base, é importante ressaltar que, de acordo com a norma ASTM D1621 (2016), a resistência à compressão deve ser indicada como a máxima tensão até 10% de deformação ou, na ausência de um pico de tensão, o próprio valor em 10% de deformação. Conforme ilustrado na FIGURA 51, a maioria das amostras localizadas no topo atingiu sua máxima resistência à compressão antes de atingir a deformação máxima de 10%. Por outro lado, nenhuma das amostras da base alcançou a tensão máxima antes de atingir os 10% de deformação.

Na segunda perspectiva, ao analisar o alinhamento do crescimento da espuma, não foi possível identificar um padrão de comportamento consistente entre as amostras. Os valores obtidos se mantiveram alinhados, sem evidências de um padrão claro.

FIGURA 51 – ANÁLISE DOS DADOS DE COMPRESSÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO



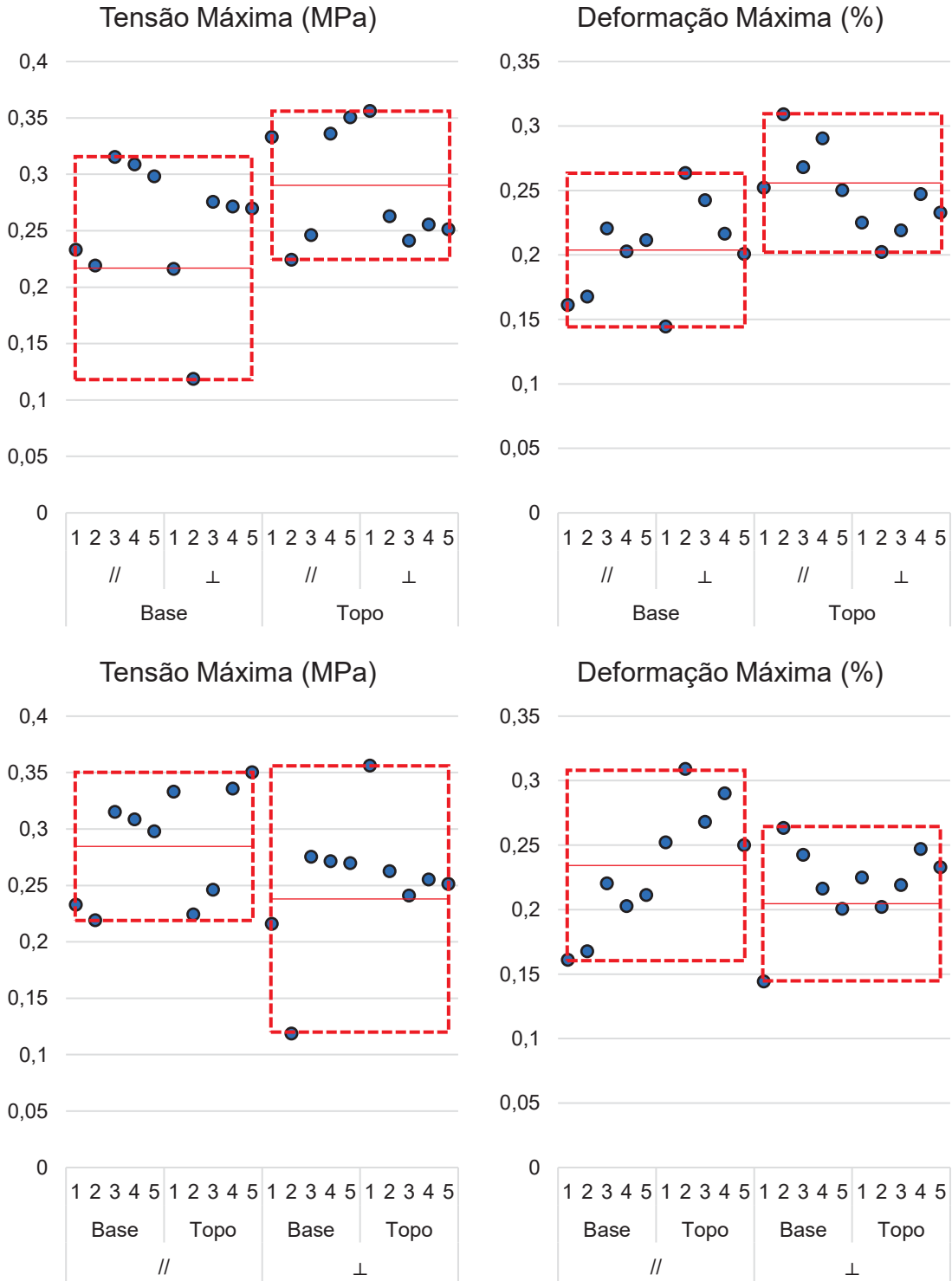
FONTE: O autor (2023).

5.2.3 Análise do comportamento em flexão

As amostras foram submetidas à análise considerando os fatores localização e alinhamento do crescimento da espuma, seguindo a mesma metodologia empregada nos testes anteriores. Ao examinar os valores obtidos, observou-se que as amostras localizadas no topo demonstraram uma maior tensão máxima em comparação com as amostras da base, justificado no capítulo 5.2.6. Além disso, constatou-se uma menor dispersão dos valores de tensão nas amostras do topo.

Ao realizar a análise do alinhamento do crescimento da espuma, constatou-se uma maior dispersão dos valores de tensão máxima nas amostras perpendiculares ao crescimento da espuma. Por outro lado, nas amostras alinhadas paralelamente ao crescimento da espuma, observou-se uma maior dispersão dos valores de deformação. Esses resultados estão ilustrados na FIGURA 52.

FIGURA 52 – ANÁLISE DOS DADOS DE FLEXÃO PARA ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO

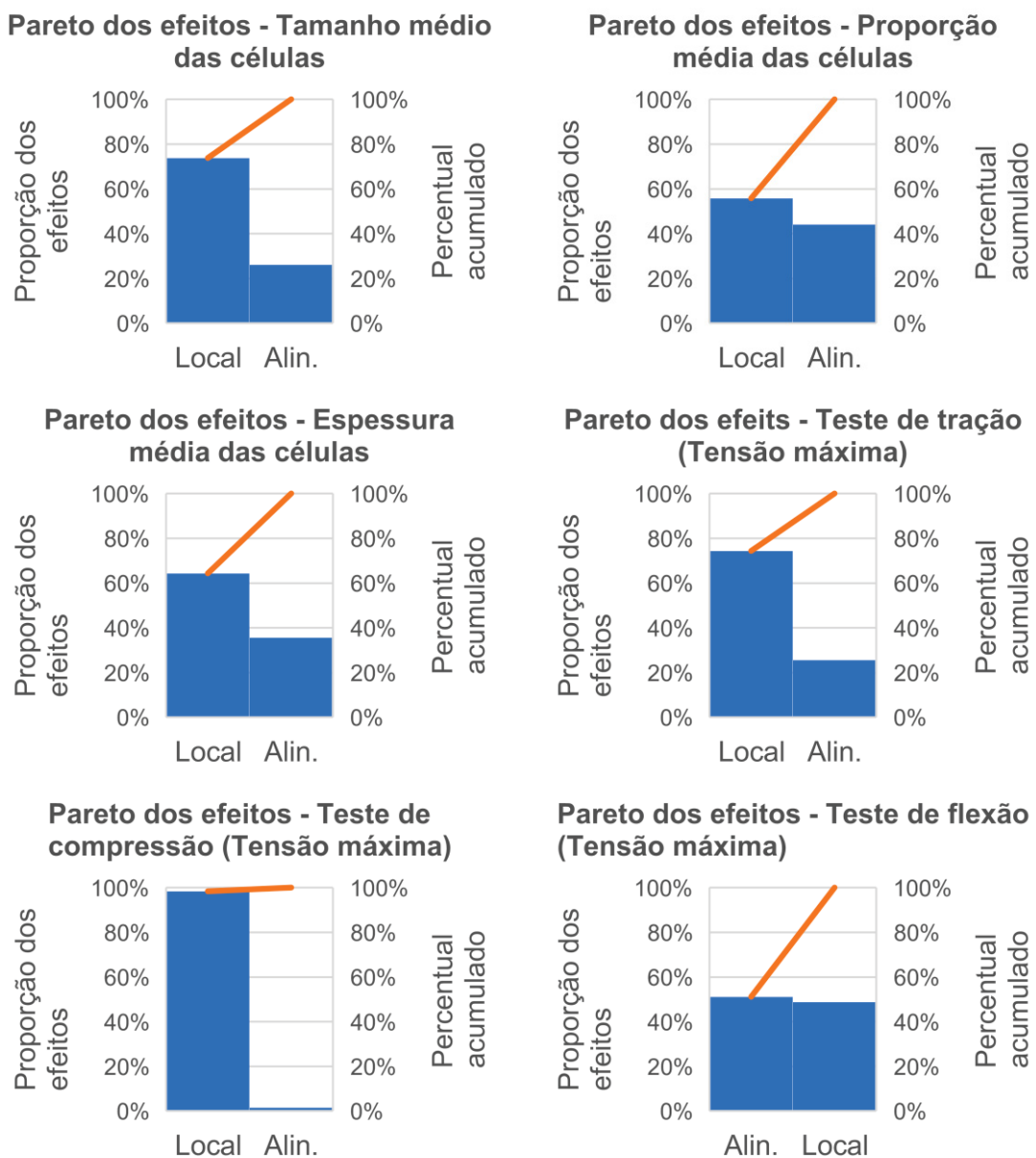


FONTE: O autor (2023).

5.2.4 Efeitos dos fatores da espuma de PU – Localização e Alinhamento

Após a apresentação dos gráficos Pareto na FIGURA 53, procede-se à análise dos efeitos dos fatores de localização e alinhamento nas características microestruturais, bem como nos testes de tração, compressão e flexão. Os gráficos de Pareto fornecem uma representação visual dos efeitos relativos de cada fator, permitindo uma avaliação mais precisa de sua influência nas propriedades estudadas.

FIGURA 53 – GRÁFICO PARETO DOS EFEITOS DOS FATORES ALINHAMENTO E LOCALIZAÇÃO



Fonte: O autor (2023).

Ao considerar os efeitos dos fatores local (base e topo) e alinhamento (normal e paralelo ao crescimento da espuma), pode-se identificar três grupos distintos de comportamentos, classificados em três níveis.

No primeiro grupo, que corresponde ao nível mais baixo, observa-se que a tensão de flexão e a proporção média das células resultam em baixos níveis de variação entre os fatores local e alinhamento, indicando que ambos têm peso semelhante.

No segundo grupo, que se enquadra no nível intermediário com maior influência do fator, podemos constatar que o tamanho médio das células, a espessura média das células e a tensão máxima em tração são principalmente afetados pelo fator local, apresentando aproximadamente 70% de variação em relação ao alinhamento.

No terceiro grupo, correspondente ao nível mais alto, encontramos o efeito máximo nos valores. Ao analisar a tensão máxima no teste de compressão, observamos que o fator local contribui com aproximadamente 98% do efeito nos valores obtidos.

Portanto, com base nos dados apresentados, conclui-se que apenas no teste de flexão e na proporção média das células é necessário realizar uma análise mais detalhada em relação aos fatores de localização e alinhamento. Para os demais resultados, as variações são principalmente influenciadas pela localização das amostras coletadas, justificado no capítulo 5.2.6.

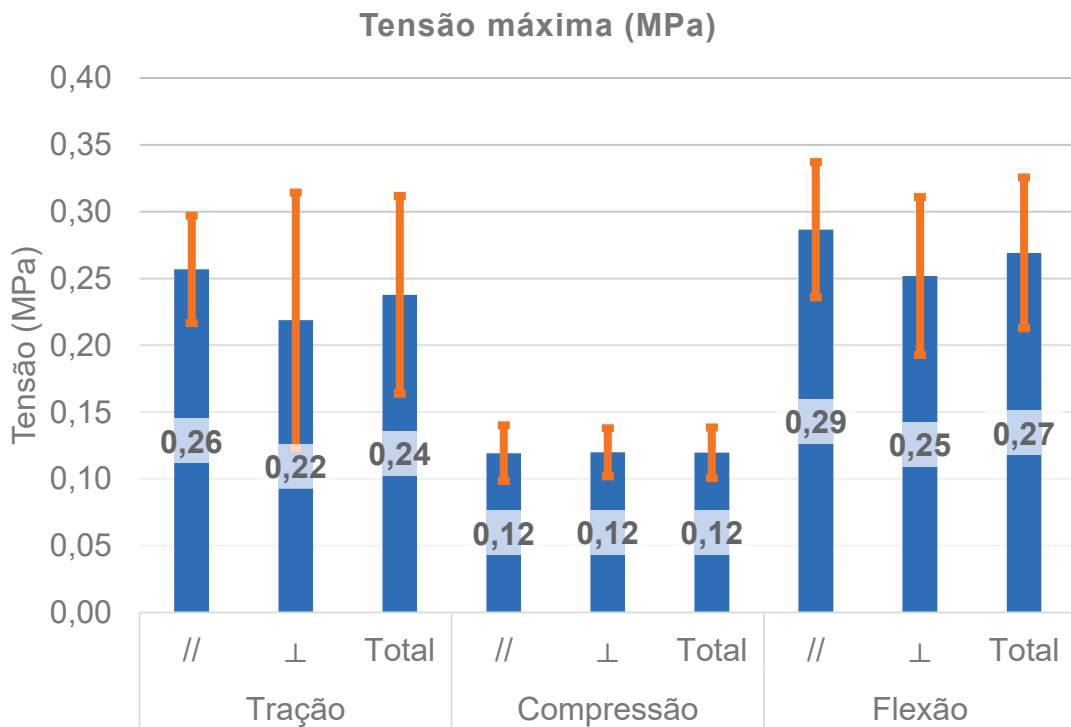
5.2.5 Fator alinhamento – Análise entre normal e paralelo

Referente ao fator alinhamento, embora as análises tenham demonstrado que a localização exerce o maior efeito nas propriedades mecânicas (exceto no teste de flexão), é importante analisar o fator alinhamento, ou seja, o grau de anisotropia das espumas nos três testes realizados.

Comparando com referenciais consultados a respeito da espuma de PU, Marvi-Mashhadi, Lopes e LLorca (2020) encontrou que o nível de tensão reduz aproximadamente pela metade entre o comportamento sob compressão paralelo para o normal ao crescimento da espuma. Mourão e Neto (2002) também indicam o alinhamento paralelo ao crescimento da espuma como o de maior resistência para densidade abaixo de 200 kg/m³, porém, em níveis menores.

Analisando os resultados obtidos, observou-se um aumento na tensão máxima quando o teste de tração e flexão foi realizado na direção paralela ao crescimento da espuma. No entanto, no teste de compressão, não houve diferença significativa na resistência entre as direções. Essa análise é apresentada na FIGURA 54.

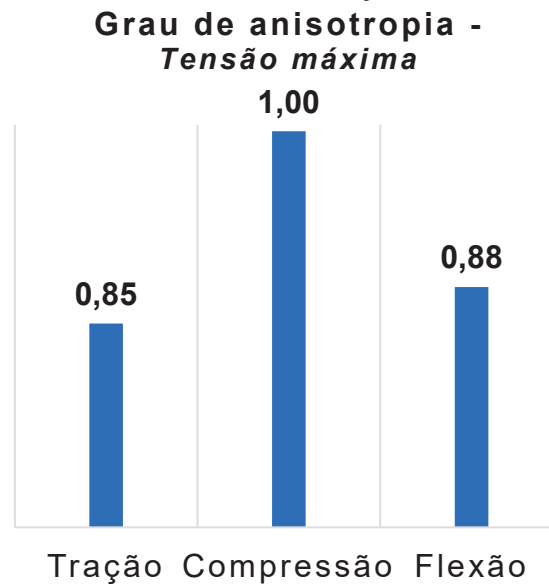
FIGURA 54 – TENSÃO MÁXIMA: TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO.



FONTE: O autor (2023).

Nesse contexto, com base no grau de anisotropia, ao agrupar as amostras do topo e da base e considerar apenas a segregação pelo alinhamento, pode-se afirmar que a espuma de poliuretano analisada neste trabalho apresenta características de um comportamento isotrópico sob compressão (grau de anisotropia igual a 1), e anisotrópico em tração e flexão (grau de anisotropia diferente de 1). O grau de anisotropia é apresentado na FIGURA 55 abaixo.

FIGURA 55 – GRAU DE ANISOTROPIA: TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO.

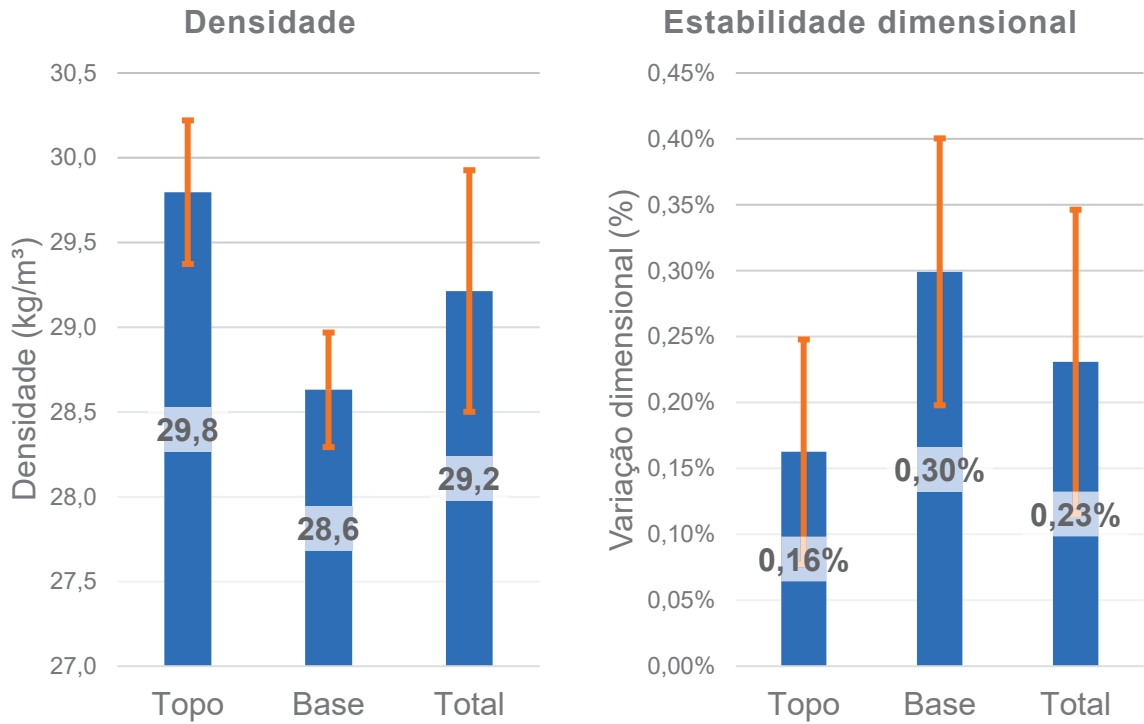


FONTE: O autor (2023).

5.2.6 Fator localização – Análise entre base e topo.

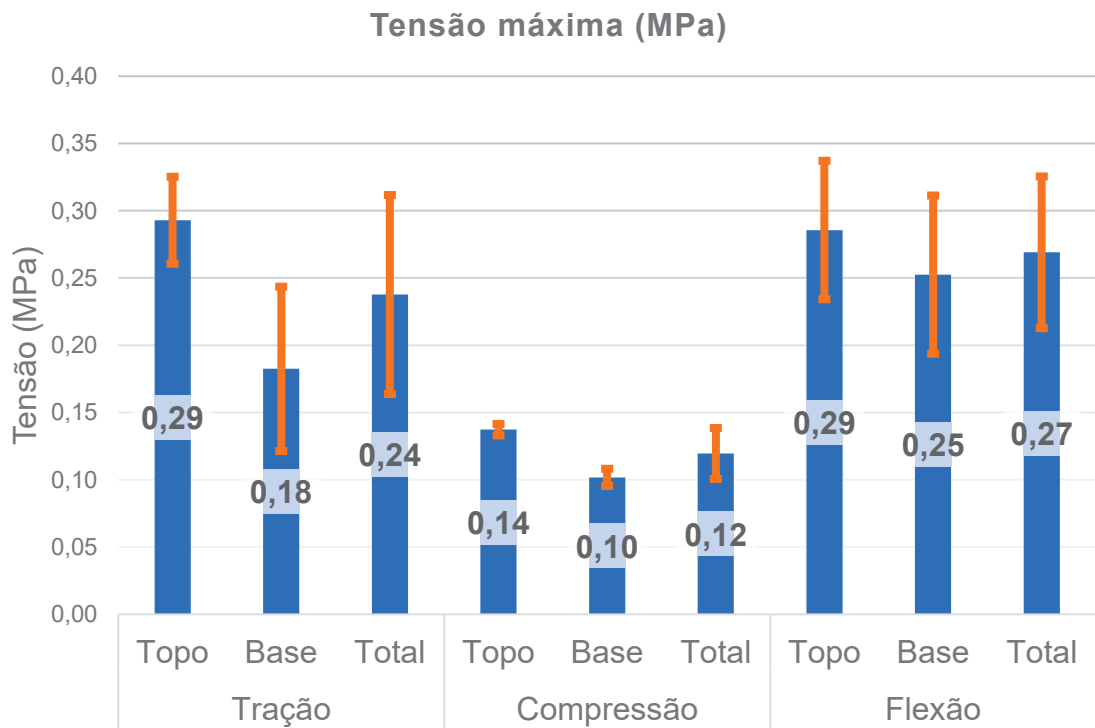
A análise dos resultados revelou que as amostras coletadas do topo do gabinete apresentaram um desempenho superior em comparação às amostras provenientes da base. A FIGURA 56 e FIGURA 57, apresentadas abaixo, ilustram essa diferença, evidenciando um comportamento mais favorável das amostras do topo em relação às da base. É importante ressaltar, no entanto, que essa superioridade é observada em diferentes níveis, dependendo da análise ou teste realizado. É necessário considerar que essas diferenças podem ser influenciadas pela dispersão dos resultados, o que requer uma investigação mais aprofundada para uma compreensão completa dessas discrepâncias. Por exemplo, no caso do teste de flexão, é necessário realizar uma análise mais detalhada para determinar se a diferença observada é estatisticamente significativa ou se pode ser atribuída à variabilidade dos resultados.

FIGURA 56 – TOPO E BASE: DENSIDADE E ESTABILIDADE DIMENSIONAL



FONTE: O autor (2023).

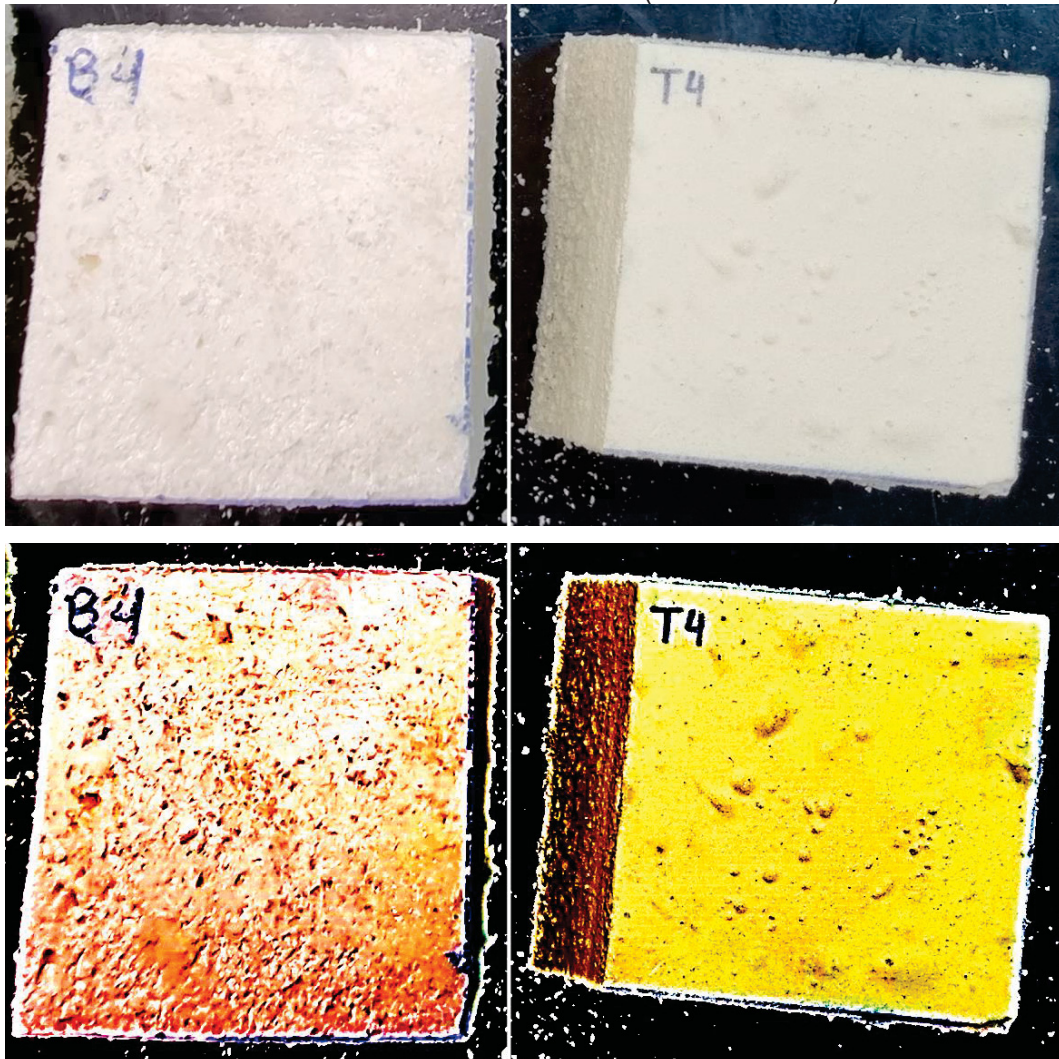
FIGURA 57 – TOPO E BASE: TENSÃO MÁXIMA EM TRAÇÃO, COMPRESSÃO E FLEXÃO



FONTE: O autor (2023).

O desempenho inferior das amostras provenientes da base pode ser atribuído à maior incidência de vazios, que foram identificados durante o processo de preparação das amostras. Essa constatação é ilustrada na FIGURA 58, que demonstra a presença desses vazios.

FIGURA 58 – AMOSTRAS DE PU (BASE E TOPO)



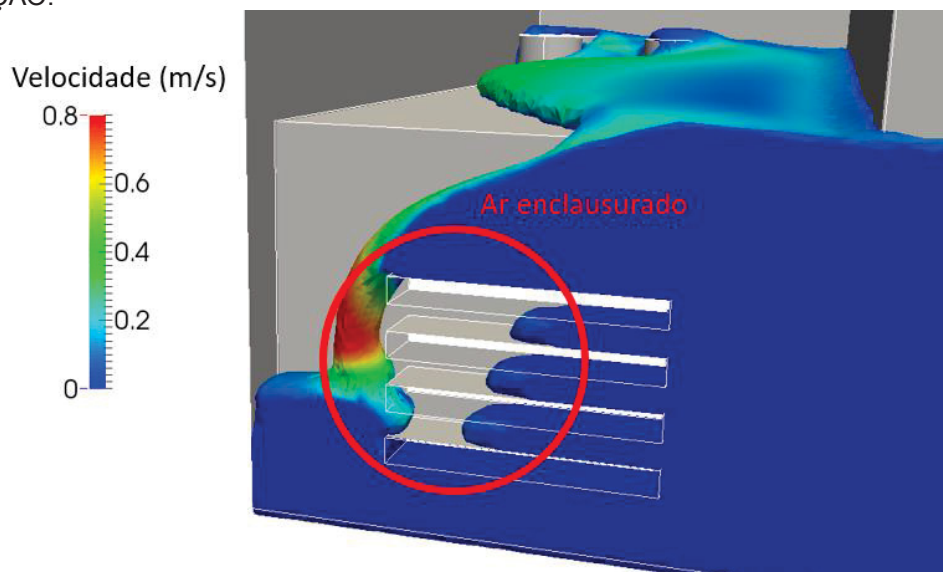
FONTE: O autor (2023).

Uma das possíveis explicações para a presença desses vazios é o enclausuramento de ar durante o processo de espumação. Esses vazios resultam da combinação de diversos fatores, como a sequência de preenchimento do gabinete durante a espumação (que varia de acordo com a espessura disponível para preenchimento e a configuração do gabinete do produto, como, por exemplo, *top freezer* ou *bottom freezer*) e a presença de geometrias que obstruem o fluxo do material e a formação da espuma. Nogrid (2023) simula o efeito da configuração e

presença de geometrias no processo de espumação através de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e a FIGURA 59 ilustra esse cenário de retenção de ar.

É importante destacar que a presença de geometrias que obstruem ou modificam o fluxo do material pode afetar a análise do fator de alinhamento. Em outras palavras, uma determinada geometria pode desviar o sentido de formação de paralelo para perpendicular, resultando em um viés incorreto. Portanto, é necessário avaliar o local de coleta das amostras dos gabinetes. No estudo em questão, o gabinete utilizado apresentava uma geometria conhecida como "luminária" no topo do produto. No entanto, para identificar e quantificar esse efeito, seria necessário realizar novos testes, coletando amostras próximas a essa geometria e avaliando o impacto desse novo fator.

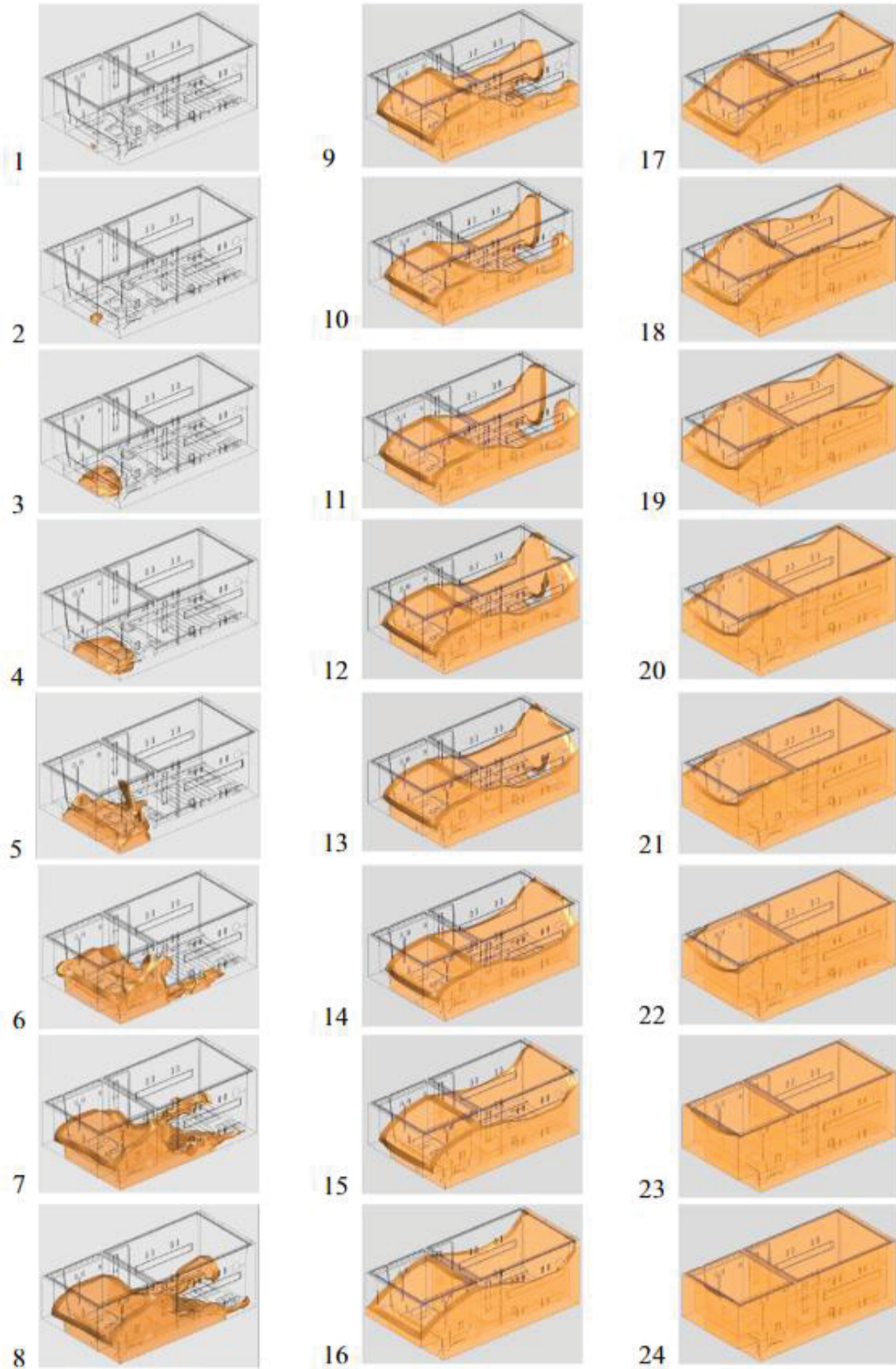
FIGURA 59 – EXEMPLO EM CFD DO ENCLAUSURAMENTO DE AR NO PROCESSO DE ESPUMAÇÃO.



FONTE: Adaptado de Nograd (2023).

Além disso, o posicionamento de áreas para o escape de gás e a quantidade de geometrias destinadas a esse escape também desempenham um papel significativo nesse processo. Para otimizar o processo e evitar esses problemas, estudos como o de Özdemir (2018) são realizados, nos quais são analisados o dimensionamento e a posição das áreas de liberação de gás em um gabinete *bottom freezer* utilizando CFD de modo a identificar a melhor distribuição para cada caso.

FIGURA 60 – PROCESSO DE FORMAÇÃO DE ESPUMA EM UM REFRIGERADOR



Fonte: Özdemir (2018).

5.2.7 Comparação das propriedades obtidas com os outros materiais que compõem um refrigerador

Abaixo é apresentado um comparativo entre a tensão máxima e módulo de elasticidade da espuma de PU com o poliestireno de alto impacto (forro interno do refrigerador) e aço (parte externa de chapa metálica). Em uma análise absoluta de propriedades, verifica-se que PU possui uma baixa resistência e módulo de elasticidade quando comparado ao PSAI e ao aço AISI 1010 (referencial). Porém, estudos futuros são necessários para mensurar seu efeito quando aplicado na estrutura do refrigerador.

TABELA 7 – COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS REFRIGERADORES

	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
<i>Espuma de PU - Tração</i>	0,2	0,6
<i>Espuma de PU - Compressão</i>	0,1	2,2
<i>Espuma de PU - Flexão</i>	0,3	2,2
<i>PSAI (Curbell Plastics, Inc., s.d.)</i>	24	2.137
<i>Aço AISI 1010 (MatWeb, LLC, s.d.)</i>	365	205.000

Fonte: O autor (2023).

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo investigou as propriedades mecânicas das espumas rígidas de PU utilizadas em refrigeradores de linha branca, com densidade de 29,21 kg/m³, células de tamanho médio 206,615 µm, espessura de parede de 17,740 µm e proporção de 1,177.

Quando submetidas a temperaturas de -20°C apresentam contração em comprimento e largura de -0,26% e -0,17%, respectivamente, e expansão de 0,26% em sua espessura.

Avaliou-se as propriedades mecânicas da espuma PU por meio de testes de tração, compressão e flexão. Os resultados obtidos revelaram que tanto a localização de coleta da amostra (topo ou base do gabinete) quanto o alinhamento do crescimento da espuma exercem influências notáveis no comportamento mecânico da mesma. Observou-se que os fatores de localização e alinhamento apresentaram efeitos significativos, sendo o fator de localização o de maior impacto.

Em relação ao fator de alinhamento, a espuma demonstrou comportamento isotrópico sob compressão, enquanto exibiu comportamento anisotrópico sob tração e flexão. Quando alinhada paralelamente à direção de crescimento, a espuma apresentou um ligeiro aumento na tensão máxima durante os testes de tração e flexão. No entanto, o teste de compressão produziu valores de resistência comparáveis em ambas as direções de alinhamento.

No que diz respeito ao fator de localização, as amostras obtidas do topo apresentaram desempenho superior quando comparadas às amostras coletadas da base do refrigerador. Essas distinções podem ser atribuídas à presença de vazios, que eram mais prevalentes nas amostras da base.

Além disso, a comparação das propriedades mecânicas entre a espuma de PU, PSAI e aço revelou que a espuma de PU apresentou menor resistência e módulo de elasticidade em relação aos outros materiais. No entanto, é importante ressaltar que este estudo oferece uma visão abrangente das propriedades mecânicas da espuma de PU, mas são necessárias mais pesquisas para explorar as implicações específicas do uso da espuma de PU no contexto estrutural de refrigeradores.

Os dados obtidos a partir desses testes possuem um valor considerável para a implementação da análise de elementos finitos, visando otimizar projetos, solucionar problemas estruturais e potencialmente reduzir custos, por exemplo, através da

redução de massa. Além disso, a metodologia proposta permite estabelecer um padrão de testes adequado à indústria de refrigeradores, possibilitando análises e comparações em estudos futuros. Isso permite atender às características dos produtos em análise, ao mesmo tempo em que mantém a consistência com os conceitos apresentados na literatura especializada.

Dessa forma, este estudo estabelece uma base para pesquisas futuras sobre a espuma de PU e suas aplicações na indústria de refrigeração. As descobertas deste estudo têm o potencial de contribuir para um *design* de produto aprimorado e a otimização de custos no contexto das aplicações da espuma de PU.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Expandir a metodologia empregada no estudo para abranger outras áreas do gabinete, como laterais, travessas e fundo, bem como para as portas dos produtos.

Estender a investigação para contemplar diferentes tipos de processos de injeção, além de explorar a utilização de outros polióis e isocianatos comumente empregados na indústria de refrigeradores.

Realizar um mapeamento das variáveis do processo e do ambiente, a fim de avaliar e quantificar os efeitos dessas variáveis nas propriedades das espumas utilizadas.

Verificar e quantificar o impacto das dimensões do produto e de sua configuração (como *top freezer*, *bottom freezer*, *side-by-side*, entre outros) nas propriedades estudadas.

Investigar o efeito da utilização de painéis de vácuo nas propriedades dos gabinetes dos refrigeradores.

Realizar estudos futuros para identificar e compreender o efeito da anisotropia no comportamento mecânico aplicado em refrigeradores.

Aplicar o material caracterizado em um modelo matemático para análise por meio de elementos finitos, a fim de obter uma compreensão mais aprofundada de seu comportamento diante de variações nos dados considerando tanto a isotropia quanto a anisotropia, bem como a localização da amostra.

REFERÊNCIAS

AHN, W.; LEE, J.-M. **Effects of MWCNT Nucleating Agent on the Formation Reaction of Rigid Polyurethane Foams**. *Elastomers and Composites*, p. 13-17, 06 jan. 2015.

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **Center for the Polyurethanes Industry (CPI) - American Chemistry Council**. Disponível em: <https://polyurethane.americanchemistry.com>. Acesso em: 10 mar. 2023.

ASTM D1621. **Standard Test Method for Compressive Properties Of Rigid Cellular Plastics**. ASTM International, 2016.

ASTM D1623. **Standard Test Method for Tensile and Tensile Adhesion Properties of Rigid Cellular Plastics**. ASTM International, 2017.

ASTM D3575. **Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials Made From Olefin Polymers**. ASTM International, 2020.

ASTM D790. **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. ASTM International, 2003.

CALIRI JUNIOR, M. F. **Modelos de material para espumas poliméricas aplicadas a estruturas aeronáuticas em material compósito sanduíche**. 2010. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science & Engineering**. Wiley, 2014.

CANNON SPA. **Cannon Plastic Technologies | How to produce Domestic Refrigerator, Cannon Vacuum-Assisted Injection**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CSEpLZfijHs>. Acesso em: 10 fev. 2023.

CURBELL PLASTICS, Inc. **High impact polystyrene**. Disponível em: <https://www.curbellplastics.com/materials/plastics/high-impact-polystyrene/>. Acesso em: 10 maio 2023.

ERA POLYMERS. **Foams – Glossary of Terms**. Disponível em: <https://www.erapol.com.au/technical/foam/foams-glossary-of-terms/>. Acesso em: 15 mar. 2023.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Polyurethane Market to Reach USD 81.74 Billion by 2028**. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/12/17/2354570/0/en/Polyurethane-Market-to-Rich-USD-81-74-Billion-by-2028-Global-Polyurethane-Industry-Size-Demand-Growth-Trends-Says-Fortune-Business-Insights.html>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HENNECKE GROUP. **KTT production of insulated door elements with different curing times.** Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ChWT36qQk0s&t=90s>. Acesso em: 25 fev. 2023.

IMEN POLYMER CHEMICAL CO. **Polyurethane foam in household refrigerators.** Disponível em: <https://imenpol.com/en/articles/polyurethane-foam-in-household-refrigerators>. Acesso em: 20 fev. 2023.

KAPPS, D. M. **The production of rigid polyurethane foam.** Insulation - Technical Information, p. 46, 29 jul. 2004.

KIM, T.-R. *et al.* **Modeling of elasto-viscoplastic behavior for polyurethane foam under various strain rates and temperatures.** Composite Structures, p. 686-695, 10 ago. 2017.

KRAUSS MAFFEI. **Insulation foaming for refrigerators.** Disponível em: <https://www.kraussmaffei.com/en/our-processes/insulation-foaming-for-refrigerators>. Acesso em: 20 jun. 2022.

LEE, J.-H. *et al.* **Unified constitutive model with consideration for effects of porosity and its application to polyurethane foam.** Composites Part B, p. 87-100, 22 nov. 2017.

LEE, S.; RAMESH, N. **Polymeric foams: mechanisms and materials.** Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2004.

LINUL, E.; MARSAVINA, L. **Experimental Determination of Mixed-Mode Fracture Toughness for Rigid Polyurethane Foams.** Fracture at all Scales, p. 221-237, 2017.

MARVI-MASHHADI, M.; LOPES, C.; LLORCA, J. **High fidelity simulation of the mechanical behavior of closed-cell polyurethane foams.** Journal of the Mechanics and Physics of Solids, v. 135, 1 fev. 2020.

MATWEB, LLC. **AISI 1010 Steel, cold drawn.** Disponível em: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=025d4a04c2c640c9b0eaaef28318d761&ckck=1>. Acesso em: 20 jun. 2022.

MOURÃO, R. P.; NETO, M. **Caracterização de espuma polimérica para uso em embalagens para transporte de rejeitos radioativos.** II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 12 ago. 2002.

NOGRID. **Simulation of three Refrigerator PUR Filling and Foaming Processes.** Disponível em: <https://www.nogrid.com/en/component/content/article/three-pur-foaming-refrigerator-filling-processes?catid=18&Itemid=230>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ÖZDEMİR, İ. P. **Effects of air vents on the flow of reacting polyurethane foam in a refrigerator cavity.** Adv Polym Technol, p. 2420-2428, 2018.

PEYRTON, J.; AVÉROUS, L. **Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams.** doi:<https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100608>, 10 mar. 2021.

RASBAND, W. **ImageJ.** Bethesda, Maryland, USA: U. S. National Institutes of Health, 1997-2018. Disponível em: <https://imagej.net/ij/index.html>. Acesso em: 20 jun. 2022.

VOICONI, T. *et al.* **Determination of Flexural Properties of Rigid PUR Foams Using Digital Image Correlation.** Solid State Phenomena, 2013.

WITKIEWICZ, W.; ZIELIŃSKI, A. **Properties of the polyurethane (PU) light foams.** Advances in Materials Science, v. 6, n. 2, 2006.

XU, G. *et al.* **A nonlinear constitutive model of rigid polyurethane foam considering direction-dependence and tension-compression asymmetry.** Construction and Building Materials, v. 339, 2022.

YARBROUGH, D. W. **Aging of Polyurethane Foam Insulation in Simulated Refrigerator Panels—Four-Year Results with Third-Generation Blowing Agents.** Journal of Cellular Plastics, maio 2002.