

**Caracterização das propriedades mecânicas de um compósito com
matriz de epóxi reforçado com partículas de silicone**

Larissa Bruno Torres

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professor Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade

Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Professor Doutor Felipe do Carmo Amorim

Bragança

2024



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão



Caracterização das propriedades mecânicas de um compósito com matriz de epóxi reforçado com partículas de silicone

Larissa Bruno Torres

Dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professor Doutor Carlos Alberto Rodrigues Andrade

Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Professor Doutor Felipe do Carmo Amorim

Bragança

2024

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de várias pessoas a quem gostaria de expressar minha sincera gratidão.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, que sempre me encorajaram em todas as aventuras que me propus a viver. O amor e o suporte incondicional de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus orientadores do IPB, João Ribeiro e Carlos Andrade, que com paciência, sabedoria e orientação constante, me guiaram durante todo o processo de pesquisa e redação deste trabalho. Sou profundamente grata pela dedicação e pelos conhecimentos compartilhados.

À engenheira Luiza, responsável pelo laboratório onde realizei os ensaios mecânicos, meu sincero agradecimento pelo suporte técnico e pela disponibilidade em me ajudar sempre que necessário. Sua orientação foi crucial para a realização desta etapa do meu trabalho.

Ao Felipe Amorim, meu orientador do CEFET/RJ, minha gratidão por todo o suporte e orientação desde o início desta jornada acadêmica.

Aos meus amigos Geovanni, que estive comigo desde o ensino médio e Luiz, desde o início da faculdade. Os anos de amizade e o apoio de vocês foram essenciais para que eu superasse os desafios desta jornada.

Aos amigos que fiz em Bragança, em especial a Maria Eduarda, Gustavo, Gabriel, Lucas e Felipe, que se tornaram uma verdadeira família para mim, especialmente estando tão longe de casa. A amizade, o carinho e o apoio de vocês tornaram esta experiência enriquecedora e inesquecível.

Às minhas colegas de apartamento Giovanna, Sofia e Gabriela, que tornaram o dia a dia mais leve e agradável. A convivência com vocês foi um suporte emocional inestimável.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

Dedicatória

Dedico esta dissertação a minha mãe, Andréa Dias Bruno Torres, que me viu iniciar essa conquista, mas não me verá terminá-la.

Resumo

Nos últimos anos, a busca por materiais que combinem alta resistência e boa flexibilidade tem impulsionado o estudo de compósitos poliméricos reforçados com materiais elastoméricos. A adequação das propriedades mecânicas desses compósitos a diversas aplicações tem resultado em sua ampla utilização na atualidade.

Nesta dissertação, foram fabricados e caracterizados compósitos com matriz bioepóxi reforçado por partículas de polissiloxano, uma borracha de silicone. A produção foi realizada em três lotes, com frações volumétricas de 1%, 5% e 10% de partículas. Adicionalmente, foram caracterizadas as propriedades mecânicas da borracha de silicone pura e da resina epóxi pura, com fins comparativos.

O objetivo principal deste estudo é comparar as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados, especificamente a tensão máxima, as deformações máximas e o módulo de elasticidade, com as da matriz epóxi pura.

Por fim, as propriedades obtidas foram analisadas minuciosamente para compreender melhor o comportamento mecânico dos compósitos produzidos, sendo apresentadas propostas para futuros trabalhos de pesquisa.

Os compósitos reforçados com partículas de silicone na fração volumétrica de 1% apresentaram as melhores propriedades mecânicas, apresentando reduções mínimas na resistência mecânica e na deformação máxima, além de uma diminuição substancial no módulo de elasticidade. Os testes de tração e de flexão realizados nos compósitos indicaram uma redução significativa no módulo de elasticidade em comparação com a resina pura, observada para todas as frações volumétricas investigadas.

Palavras-chave: bioepóxi, polissiloxano, compósitos, propriedades mecânicas.

Abstract

In recent years, the quest for materials that combine high strength and good flexibility has driven the study of polymer composites reinforced with elastomeric materials. The suitability of the mechanical properties of these composites for various applications has led to their widespread use today.

In this dissertation, bio-based epoxy matrix composites reinforced with silicone rubber particles, a polysiloxane, were fabricated and characterized. The production was carried out in three batches with volumetric fractions of 1%, 5%, and 10% of particles. Additionally, the mechanical properties of the silicone rubber and neat epoxy resin were characterized for comparative purposes.

The main objective of this study is to compare the mechanical properties of the fabricated composites, specifically the maximum stress, maximum strain, and modulus of elasticity, with those of the pure epoxy matrix.

Finally, the obtained properties were meticulously analyzed to better understand the mechanical behavior of the produced composites, and proposals for future research were presented.

The composites reinforced with silicone particles at a 1% volume fraction exhibited the best mechanical properties, showing minimal reductions in mechanical strength and maximum deformation, as well as a substantial decrease in the modulus of elasticity. The tensile and flexural tests conducted on the composites indicated a significant reduction in the modulus of elasticity compared to pure resin, observed across all volume fractions investigated.

Keywords: bio-based epoxy, polysiloxane, composites, mechanical properties.

Índice

Agradecimentos	iii
Dedicatória.....	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice	vii
Lista de abreviações.....	x
Lista de símbolos	xi
Lista de tabelas	xii
Lista de figuras	xiv
1 Introdução.....	17
1.1 Considerações iniciais	17
1.2 Motivação e objetivos	20
1.3 Estrutura	21
2 Revisão bibliográfica.....	22
2.1 Polímeros.....	22
2.1.1 Termoplásticos	25
2.1.2 Termofixos	25
2.1.3 Elastômeros	26
2.2 Compósitos.....	26
2.2.1 Matriz	30
2.2.1.1 Matriz metálica.....	30
2.2.1.2 Matriz cerâmica.....	32
2.2.1.3 Matriz polimérica	33

2.2.2	Reforço	34
2.2.2.1	Compósitos reforçados com partículas.....	34
2.2.2.2	Compósitos reforçados com fibras	35
2.2.3	Compósitos estruturais	38
2.2.3.1	Compósitos laminares	38
2.2.3.2	Compósitos sanduíche.....	38
2.2.4	Nanocompósitos	40
2.3	Resinas epóxi.....	40
2.4	Borracha de silicone	44
2.5	Ensaio mecânicos.....	48
2.5.1	Ensaio de tração.....	48
2.5.2	Ensaio de flexão	52
3	Materiais e métodos.....	54
3.1	Materiais	54
3.1.1	Corpos de prova de silicone	54
3.1.2	Corpos de prova de epóxi.....	55
3.1.3	Corpos de prova do compósito fabricado.....	57
3.2	Preparação dos corpos de prova	58
3.2.1	Corpos de prova de silicone	58
3.2.2	Corpos de prova de epóxi.....	60
3.2.3	Corpos de prova do compósito fabricado.....	62
3.3	Ensaio mecânicos.....	64
3.3.1	Ensaio de tração	66
3.3.1.1	Ensaio de tração dos corpos de prova de silicone	66
3.3.1.2	Ensaio de tração dos corpos de prova de epóxi.....	67
3.3.1.3	Ensaio de tração dos corpos de prova do compósito fabricado.....	68

3.3.2	Ensaio de flexão.....	68
3.3.2.1	Ensaio de flexão dos corpos de prova de epóxi.....	68
3.3.2.2	Ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito fabricado	70
4	Resultados e discussões.....	71
4.1	Caracterização das propriedades mecânicas do silicone	71
4.1.1	Determinação da resistência à tração e deformação máxima.....	71
4.1.2	Determinação do módulo de elasticidade.....	77
4.2	Caracterização das propriedades mecânicas da resina epóxi	79
4.2.1	Determinação da resistência à tração e deformação máxima.....	79
4.2.2	Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de tração	82
4.2.3	Determinação da resistência à flexão e deformação máxima.....	82
4.2.4	Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de flexão.....	86
4.3	Caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos fabricados	86
4.3.1	Determinação da resistência à tração e deformação máxima.....	87
4.3.2	Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de tração	94
4.3.3	Determinação da resistência à flexão e deformação máxima.....	95
4.3.4	Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de flexão.....	102
4.3.5	Discussões sobre as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados	103
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	106
5.1	Conclusões.....	106
5.2	Trabalhos futuros.....	107
6	Referências bibliográficas	108

Lista de abreviações

ATBN	<i>Amine-Terminated Butadiene</i>
BPA	<i>Bisphenol A</i>
CAS	<i>Calcium Aluminosilicate</i>
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced polymer</i>
CMCs	<i>Ceramic matrix composites</i>
CTBN	<i>Carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile</i>
DGEBA	<i>Diglycidyl ether of bisphenol A</i>
ECH	<i>Epichlorohydrin</i>
EP	<i>Epoxy resin</i>
HTBN	<i>Hydroxyl terminated butyl nitrile</i>
HTV	<i>High temperature vulcanizing</i>
LAS	<i>Lithium Aluminosilicate</i>
LCMs	<i>Long chain molecules</i>
LSR	<i>Liquid silicone rubber</i>
MMCs	<i>Metal matrix composites</i>
NFRC	<i>Natural fiber reinforced composite</i>
PE	<i>Polyethylene</i>
PEEK	<i>Polyetheretherketone</i>
PEI	<i>polyetherimide</i>
PMCs	<i>Polymer matrix composites</i>
PPS	<i>Polyphenylene sulfide</i>
RTV	<i>Room temperature vulcanizing</i>

Lista de símbolos

F	Força (N)
A	Área (m ²)
σ	Tensão de engenharia (MPa)
ε	Deformação de engenharia
l	Comprimento (mm)
E	Módulo de elasticidade/Young (GPa)
b	Largura da seção transversal retangular (mm)
d	Espessura da seção transversal retangular (mm)
L	Distância entre os apoios no ensaio de flexão (mm)
D	Deflexão máxima do centro da viga (mm)

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz metálica e materiais monolíticos [8].....	31
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz cerâmica e materiais monolíticos [8].....	32
Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz polimérica e materiais monolíticos [8].....	33
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas de fibras usadas em compósitos de matriz polimérica e materiais monolíticos [8].....	36
Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de uma resina epóxi em temperatura ambiente [8].....	41
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do silicone Silopren LSR 2740 TP3783 [42].....	54
Tabela 3.2 - Densidade e o teor de carbono da resina bioepóxi tipo SR GreenPoxy 56 e endurecedor SD Surf Clear [45].....	55
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas da resina epóxi curada [45].....	55
Tabela 3.4 - Dimensões das partículas de silicone.....	57
Tabela 3.5 - Viscosidades dos componentes do LSR 2740.....	59
Tabela 4.1 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de LSR para ensaio de tração.....	71
Tabela 4.2 - Tensões máximas de tração das amostras de LSR.....	73
Tabela 4.3 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras de LSR..	76
Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade (E) para o ensaio de tração das amostras de LSR	78
Tabela 4.5 – Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de EP para ensaio de tração.....	79
Tabela 4.6 - Tensões máximas de tração das amostras de EP.....	79
Tabela 4.7 – Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras de EP....	80
Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade para o ensaio de tração das amostras de EP.....	82
Tabela 4.9 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de EP para ensaio de flexão.....	83
Tabela 4.10 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de EP.....	83

Tabela 4.11 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras de EP..	84
Tabela 4.12 - Módulo de elasticidade (E) para o ensaio de flexão das amostras de EP.	86
Tabela 4.13 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova dos compósitos para ensaio de tração.....	87
Tabela 4.14 - Tensões máximas de tração das amostras C1%	88
Tabela 4.15 - Tensões máximas de tração das amostras C5%	88
Tabela 4.16 - Tensões máximas de tração das amostras C10%	88
Tabela 4.17 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C1%	90
Tabela 4.18 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C5%	91
Tabela 4.19 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C10% ..	91
Tabela 4.20 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C1%	94
Tabela 4.21 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C5%	94
Tabela 4.22 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C10%	94
Tabela 4.23 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de compósitos para ensaio de flexão	95
Tabela 4.24 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C1%	96
Tabela 4.25 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C5%	96
Tabela 4.26 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C10%	96
Tabela 4.27 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C1%	98
Tabela 4.28 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C5%	99
Tabela 4.29 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C10% ..	99
Tabela 4.30 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C1%	102
Tabela 4.31 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C5%	103
Tabela 4.32 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C10%	103
Tabela 4.33 - Propriedades mecânicas através dos ensaios de tração	104
Tabela 4.34 - Propriedades mecânicas através dos ensaios de flexão	105

Lista de figuras

Figura 2.1 - Classificação dos polímeros. Adaptado de [3]	24
Figura 2.2 - Composição estrutural do Boeing 787 Dreamliner. Adaptado de [24]	28
Figura 2.3 - Classificação de compósitos de acordo com o reforço. Adaptado de [26].	34
Figura 2.4 – Painel sanduíche com estrutura de favo de mel	39
Figura 2.5 - Estrutura química de uma borracha de silicone [39]	46
Figura 2.6 - Estrutura química de alguns elastômeros orgânicos comuns. Adaptado de [39]	46
Figura 2.7 - Esquema representativo do ensaio de tração. Adaptado de [2]	49
Figura 2.8 - Diagrama esquemático para obtenção do módulo de elasticidade. Adaptado de [2].....	51
Figura 2.9 - Comportamento de tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e elastômeros (curva C) [2]	52
Figura 2.10 - Esquema representativo do ensaio de flexão de 3 pontos [2]	52
Figura 3.1 - Dimensões dos corpos de prova de silicone	55
Figura 3.2 - Moldes para fabricação de corpos de prova de a) tração e b) flexão.....	56
Figura 3.3 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração para resina epóxi...	56
Figura 3.4 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão para resina epóxi ..	57
Figura 3.5 - Partículas de silicone	57
Figura 3.6 - Pesagem da parte A (a) e parte B (b) do silicone.....	58
Figura 3.7 - Forno de secagem utilizado para cura dos corpos de prova	59
Figura 3.8 - Etapas do processo de fabricação dos corpos de prova: a) mistura; b) camada de cera de abelha como desmoldante; c) preenchimento do molde com o silicone; d) corpos de prova após cura e desmoldagem	60
Figura 3.9 - Corpo de prova de resina epóxi curada com presença de bolhas de ar.....	61
Figura 3.10 - Corpos de prova em molde de metal: (a) completamente curado; (b) e (b) cura não realizada	62
Figura 3.11 - Procedimento para mistura do compósito de epóxi reforçado com partículas de silicone	63

Figura 3.12 - Etapas de mistura do compósito: a) solução de epóxi puro: b) adição das partículas de silicone; c) aspecto da solução após mistura entre a resina epóxi e as partículas de silicone e adição do endurecedor	63
Figura 3.13 - Corpos de prova do compósito de resina epóxi com adição de 1%, 5% e 10% de partículas de silicone para ensaio de (a) tração e (b) flexão.....	64
Figura 3.14 - Máquina de ensaio universal.....	65
Figura 3.15 - Máquina de ensaio universal configurada para (a) tração e (b) flexão.....	65
Figura 3.16 - Sequência do ensaio de tração: a) posicionamento do corpo de prova na máquina; b) alongamento do corpo de prova; c) momento de ruptura.....	66
Figura 3.17 - Ensaio de tração no corpo de prova de resina epóxi: (a) posicionamento do corpo de prova nas garras e (b) momento de ruptura do material	67
Figura 3.18 - Compósitos de (a) 1%; (b) 5% e (c) 10% posicionados para ensaio de tração	68
Figura 3.19 - Flexão do corpo de prova durante o ensaio	69
Figura 4.1 - Gráfico tensão x deformação para as amostras LSR1	72
Figura 4.2 - Gráfico tensão x deformação para as amostras LSR2	72
Figura 4.3 - Tensões máximas das amostras LSR1 em comparação com o informado pelo fabricante	74
Figura 4.4 - Tensões máximas das amostras LSR2 em comparação com o informado pelo fabricante	74
Figura 4.5 - Gráfico tensão x deformação comparativo entre as amostras LSR1 e LSR2	75
Figura 4.6 - Inclinação da reta no gráfico tensão x deformação.....	77
Figura 4.7 - Tensões máximas de tração das amostras EP em comparação com o informado pelo fabricante.....	80
Figura 4.8 - Gráfico tensão x deformação para o ensaio de tração	81
Figura 4.9 – Tensões máximas de flexão das amostras EP em comparação com o informado pelo fabricante.....	84
Figura 4.10 - Gráfico tensão x deformação das amostras EP para o ensaio de flexão ...	85
Figura 4.11 – Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C1% e EP .	89
Figura 4.12 - Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C5% e EP..	89
Figura 4.13 - Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C10% e EP	90

Figura 4.14 - Gráfico tensão x deformação das amostras C1% para o ensaio de tração	92
Figura 4.15 - Gráfico tensão x deformação das amostras C5% para o ensaio de tração	92
Figura 4.16 - Gráfico tensão x deformação das amostras C10% para o ensaio de tração	93
Figura 4.17 - Gráfico tensão x deformação comparativo entre as amostras C1%, C5%, C10% e EP.....	93
Figura 4.18 - Comparativo entre as tensões máximas de flexão das amostras C1% e EP	97
Figura 4.19 - Comparativo entre tensões máximas de flexão das amostras C5% e EP..	97
Figura 4.20 - Comparativo entre tensões máximas de flexão das amostras C10% e EP	98
Figura 4.21 - Gráfico tensão x deformação das amostras C1% para o ensaio de flexão	100
Figura 4.22 - Gráfico tensão x deformação das amostras C5% para o ensaio de flexão	100
Figura 4.23 - Gráfico tensão x deformação das amostras C10% para o ensaio de flexão	101
Figura 4.24 - Gráfico tensão x deformação de flexão comparativo entre as amostras C1%, C5%, C10% e EP.....	102

1 Introdução

O objetivo deste primeiro capítulo é apresentar os materiais base que serão estudados neste trabalho, fornecendo características da resina epóxi e de elastômeros, em especial a borracha de silicone, as propriedades e aplicações de ambos. Além disso, também será apresentada a motivação para a realização do trabalho e os objetivos propostos a serem alcançados.

1.1 Considerações iniciais

Polímeros são fundamentais para a produção de diversos bens industriais, impulsionando seu crescimento acelerado, influenciado não apenas por fatores sociais, mas também pela necessidade de substituir materiais tradicionais, como metais. A ciência dos polímeros abrange uma disciplina que envolve plásticos, fibras naturais e sintéticas, borrachas, revestimentos, adesivos, selantes, entre outros [1]. As avançadas ferramentas de pesquisa científica permitiram a identificação das estruturas moleculares desse conjunto de materiais, resultando no desenvolvimento de diversos polímeros sintéticos. Na maioria dos polímeros, as moléculas assumem a forma de cadeias longas e flexíveis. Estas cadeias são compostas por unidades estruturais denominadas 'meros', que são repetidas em sequência ao longo da estrutura molecular. O termo 'mero' tem origem na palavra grega *meros*, significando parte; assim, o termo 'polímero' foi adotado para descrever materiais formados por muitas partes repetidas [1], [2], [3].

Os compósitos poliméricos têm sido extensivamente empregados em diversas indústrias devido às suas propriedades notáveis, tais como, alta resistência específica, elevado módulo específico, tenacidade e resistência à corrosão [4]. A vantagem distintiva dos compósitos com matriz polimérica, quando comparados com os metais, reside no processo de fabricação que possibilita a produção de peças de geometria complexa, caracterizadas por menor densidade [5], [6]. Outro benefício dos compósitos poliméricos é a capacidade flexível de combinar as vantagens de diversos materiais. Dessa forma, o desenvolvimento de compósitos poliméricos com propriedades especiais emergiu como uma fronteira de pesquisa e têm atraído crescente interesse tanto da comunidade acadêmica quanto da indústria [6], [7], [8].

Entre as matrizes empregadas em compósitos, as resinas epóxi (EP) são extensivamente utilizadas devido às suas notáveis propriedades mecânicas, elevada resistência à corrosão, estabilidade química, entre outros atributos [4], [9], [10], [11]. Essas resinas desempenham papéis fundamentais em diversas aplicações industriais, incluindo revestimentos, adesivos, selantes, materiais isolantes, encapsulamento de elementos de circuitos eletrônicos e matrizes para compósitos [11], [12]. Contudo, devido à sua estrutura altamente reticulada, as resinas epóxi apresentam deficiências no que diz respeito às propriedades mecânicas, sendo frágeis e exibindo baixa tenacidade, o que limita suas aplicações em certos contextos. Portanto, aprimorar tais características é essencial em grande parte das aplicações [4], [9]. As resinas epóxi são comumente modificadas por uma das três abordagens: adição de partículas duras, incorporação de materiais elastoméricos ou inclusão de termoplásticos [13].

O propósito ao tentar fortalecer polímeros frágeis é incrementar sua tenacidade sem comprometer de forma significativa outras propriedades essenciais, como módulo e temperatura de distorção térmica [14]. Em particular, a inclusão de borracha como uma segunda fase pode resultar em melhorias significativas na resistência e tenacidade do material [9], [15]. Materiais elastoméricos exibem a capacidade de serem deformados até grandes extensões e, posteriormente, retornarem à sua forma original [2]. Modificadores menos rígidos em comparação com a matriz polimérica podem desempenhar o papel de eficazes agentes endurecedores em matrizes que possuam alguma ductilidade. A inclusão de borracha pode promover a formação de microvazios, o que é subsequentemente acompanhado pela ativação de processos de cedência devido à redução da tensão de cedência local, ou seja, a resistência plástica do material [13].

A borracha de silicone, também conhecida como polissiloxano, representa um dos polímeros elastoméricos mais prevalentes. Esta substância incorpora átomos de silício, carbono, hidrogênio e oxigênio, sendo o grupo funcional siloxano (Si–O–Si) uma presença estrutural essencial na composição da borracha. Diversas variantes de borracha de silicone, tais como polidimetilsiloxano, polivinilacetato, polivinilacetato-co-metil metacrilato, polivinilmetil, polidimetil-vinilmetil, polimetil-vinil-fenol, e outros elastômeros, são amplamente empregados no setor comercial [16].

As propriedades versáteis deste material, incluindo flexibilidade, permeabilidade, elasticidade, biocompatibilidade, resistência à corrosão, facilidade de fabricação e moldagem, efeito de auto-plastificação, translucidez, inodoro, insípido, entre outras, enriquecem consideravelmente as aplicações da borracha de silicone. Esta substância encontra utilização em diversos setores, como revestimentos, lubrificantes, indústria automotiva, construção, farmacêutica, isoladores elétricos para eletrônicos, setor aeroespacial, retardadores de chama e instrumentos óticos [16].

A maioria das resinas epóxi empregadas como matrizes em compósitos poliméricos é derivada do bisfenol A (BPA) e epicloridrina (ECH). O BPA é predominantemente produzido a partir de fenol e benzeno, ambos derivados do petróleo [10]. O BPA é reconhecido como um desregulador reprodutivo e endócrino, associado a danos ambientais, toxicidade e é um contribuinte para a redução de recursos não renováveis [17]. Embora essas resinas ofereçam diversas vantagens, as limitações dos recursos petroquímicos, as questões ambientais e as preocupações econômicas impõem restrições ao uso das resinas epóxi [18]. A concepção e produção sustentável de polímeros é uma necessidade inegável para promover o desenvolvimento humano sustentável [19]. Em virtude disso, diversos esforços têm sido direcionados por distintos grupos de pesquisa e fabricantes para desenvolver resinas epóxi com base biológica destinadas a aplicações em compósitos e nanocompósitos [18].

Múltiplos recursos renováveis têm sido incorporados na formulação de resinas epóxi sustentáveis [19]. Fontes naturais notáveis incluem óleos vegetais, sacarídeos, polifenóis, resinas naturais e lignina, todos os quais podem servir como precursores na produção de resinas epóxi de origem biológica [18]. Devido à sua oferta abundante, maior biocompatibilidade e neutralidade de carbono, a biomassa emerge como uma alternativa ecologicamente correta aos recursos petroquímicos [19]. Além disso, a crescente demanda por produtos e materiais sustentáveis reflete a pressão dos consumidores finais, fabricantes e governos em direção a maior sustentabilidade e circularidade, alinhando-se com metas climáticas que visam atingir emissões líquidas zero de gases de efeito estufa até 2050. O desenvolvimento de materiais compósitos de alto desempenho a partir de fontes biológicas está contribuindo significativamente para a busca da sustentabilidade [17].

1.2 Motivação e objetivos

As resinas epóxi (EP) e seus produtos curados são amplamente utilizados devido às suas excelentes propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, alta resistência à corrosão e força de adesão, estabilidade química, baixa retração de cura, flexibilidades versáteis de formulação e boa capacidade de processamento. Todavia, devido à sua rede reticulada, apresentam alta probabilidade de trincas e baixa resistência.

Já a borracha de silicone (LSR) possui características desejadas como biocompatibilidade, estabilidade térmica, alta flexibilidade e transparência, sendo crucial para determinadas aplicações. No entanto, este silicone, isolado, não possui propriedades mecânicas muito robustas, e há o potencial de aumentar sua aplicabilidade significativamente ao combiná-lo com outros materiais.

O objetivo do presente trabalho é fabricar um compósito de resina epóxi de origem ecológica modificado com partículas de borracha de silicone. Para a fabricação deste compósito epóxi/silicone, seu processamento exige 4 etapas principais, a saber:

1. Mistura dos componentes A e B do silicone, cura e posterior transformação em partículas;
2. Mistura manual das partículas de silicone com a resina sem o agente de cura;
3. Adição de agente de cura e nova mistura manual;
4. Despejo em moldes e degaseificação.

O objetivo geral deste trabalho é a fabricação e caracterização mecânica do compósito epóxi/silicone e está subdividido nos seguintes objetivos específicos:

1. Fabricação de corpos de prova de silicone puro;
2. Fabricação de corpos de prova de resina epóxi pura;
3. Fabricação de corpos de prova do compósito epóxi/silicone;
4. Caracterização mecânica dos corpos de prova puros e do compósito fabricado.

1.3 Estrutura

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro capítulo, foram apresentados os materiais base que serão estudados neste trabalho. Nesta etapa, são fornecidas as características da resina epóxi e de elastômeros, em especial a borracha, as propriedades e aplicações de ambos. Nessa fase, também é apresentada a motivação para a realização do trabalho e os objetivos propostos a serem alcançados.

O segundo capítulo abrange uma revisão geral sobre o atual cenário em relação à polímeros, compósitos, resinas epóxi e elastômeros, além dos conceitos dos ensaios mecânicos de tração e flexão que serão utilizados. O foco da revisão é apresentar as principais características e propriedades dos materiais utilizados no presente trabalho e evidenciar a potencial melhoria em tais propriedades com a fabricação de um compósito, unindo as propriedades mecânicas de dois materiais.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos para a fabricação e caracterização mecânica da borracha de silicone, da resina epóxi e do compósito de epóxi reforçado com partículas de silicone.

No quarto capítulo foram realizados testes experimentais de tração e flexão nos materiais isolados e no compósito fabricado com diferentes frações volumétricas. Os ensaios foram conduzidos pela máquina de ensaio universal da marca Shimadzu, modelo Autograph AGS-X 10kN, *software trapezium X* versão 1.5.1. Os resultados foram analisados e discutidos, mostrando as propriedades aprimoradas e as possíveis aplicações deste compósito.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões gerais relativas às etapas do trabalho e são descritas algumas propostas para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta o estudo de alguns conceitos teóricos importantes para a compreensão correta da pesquisa desenvolvida ao longo do trabalho. Primeiramente, uma descrição aprofundada sobre o conceito de polímeros e compósitos será apresentada, seguida pela caracterização das propriedades e aplicabilidade de resinas epóxi e silicones, evidenciando seu potencial quando unidos para concepção e fabricação de um compósito polimérico. Também são apresentados os conceitos dos ensaios de tração e flexão, ensaios mecânicos que serão utilizados nesse estudo para analisar as propriedades mecânicas dos materiais utilizados.

2.1 Polímeros

Os polímeros, são uma categoria de materiais extremamente variada, desempenham um papel significativo em nossa vida cotidiana. Recentemente, sua importância tem se destacado ainda mais devido às suas diversas aplicações em diferentes campos da ciência, tecnologia e indústria. A demanda por polímeros de alta resistência e seus compósitos leves está em constante crescimento, impulsionada por suas notáveis propriedades mecânicas, facilidade de processamento a baixas temperaturas, desempenho superior, custo acessível e estabilidade ambiental [20].

Os polímeros tiveram seu crescimento rápido na produção motivado não apenas por fatores sociais, mas também pela necessidade de substituir materiais tradicionais, como metais. A ciência dos polímeros é uma disciplina abrangente que aborda uma variedade de materiais, incluindo plásticos, fibras naturais e sintéticas, borrachas, revestimentos, adesivos, selantes, entre outros [1].

Os polímeros existem de forma natural desde o início da vida, e aqueles como DNA, RNA, proteínas e polissacarídeos desempenham funções vitais na vida vegetal e animal. Desde tempos remotos, a humanidade tem explorado polímeros de ocorrência natural como materiais para uma ampla gama de necessidades, incluindo vestuário, decoração, abrigo, ferramentas, armas, materiais de escrita, entre outros. Polímeros naturais, derivados de plantas e animais, abrangem materiais como madeira, borracha natural,

algodão, lã, couro e seda. Contudo, as raízes da indústria de polímeros são, geralmente, situadas no século XIX, quando significativas descobertas foram realizadas na modificação de certos polímeros naturais [2], [3].

As avançadas ferramentas de pesquisa científica possibilitaram a determinação das estruturas moleculares desse conjunto de materiais e o desenvolvimento de diversos polímeros, os quais são sintetizados a partir de pequenas moléculas orgânicas. A maioria dos polímeros, sólidos ou líquidos, são baseados em carbono; no entanto, eles podem ser inorgânicos (por exemplo, silicões baseados em uma rede Si-O) [21]. Muitos dos nossos plásticos, borrachas e materiais de fibra úteis são polímeros sintéticos. Esses polímeros sintéticos podem ser fabricados de maneira economicamente vantajosa, e suas propriedades podem ser ajustadas para superar aquelas presentes em suas contrapartes naturais. Em algumas aplicações, os plásticos substituíram com êxito peças de metal e madeira, oferecendo propriedades satisfatórias e custos de produção reduzidos [2]. Polímeros são, frequentemente, usados em compósitos, tanto como reforço quanto como matriz [21].

O desenvolvimento da indústria de polímeros teve início no século XIX, destacando-se por avanços significativos, como a vulcanização da borracha natural por Hancock e Goodyear. Importantes marcos na transição para polímeros sintéticos foram a descoberta da nitrocelulose em 1846 e as resinas fenol-formaldeído de baquelite em 1910. A visão inovadora de Hermann Staudinger, que propôs os polímeros como macromoléculas, revolucionou a compreensão da estrutura desses materiais. A produção comercial de diversos polímeros sintéticos, como poliestireno e polimetilmetacrilato, experimentou um aumento significativo a partir da década de 1930. A ciência dos polímeros, agora em um estágio avançado, continua a evoluir, com foco especial em polímeros especializados destinados a aplicações biomédicas, ópticas e eletrônicas no século XXI [3].

Em termos rigorosos, um polímero é uma substância composta por moléculas que possuem sequências longas de um ou mais tipos de átomos ou grupos de átomos ligados entre si por meio de ligações primárias, geralmente covalentes. Embora as palavras polímero e macromolécula sejam usadas de forma intercambiável, esta última define estritamente as moléculas das quais a primeira é composta [3]. Essas moléculas longas são compostas de entidades estruturais chamadas unidades “mero”, que são repetidas sucessivamente ao longo da cadeia. O termo “mero” tem origem na palavra grega *meros*, que

significa parte; o termo polímero foi cunhado para designar muitos meros [2]. Por exemplo, no polímero polietileno, a unidade “mero” é o etileno (C_2H_2) [22]. A palavra “polímero” foi usada pela primeira vez pelo químico sueco-alemão Jöns Jacob Berzelius em 1833. Berzelius utilizou o termo para descrever compostos químicos formados pela repetição de unidades moleculares menores, chamadas monômeros, que se refere a uma molécula estável a partir da qual um polímero é sintetizado, processo chamado polimerização [1], [2],[21].

Os polímeros podem ser líquidos ou sólidos à temperatura ambiente. Em geral, os polímeros líquidos à temperatura ambiente têm menos unidades “mero” por molécula e os polímeros sólidos têm um número maior de unidades “mero”. Os polímeros podem ser naturais ou sintéticos. O látex é um polímero natural da seringueira que é usado para fazer borracha, e a madeira é feita dos dois polímeros lignina e celulose. O polietileno (PE) é o polímero sintético mais amplamente utilizado e foi um dos primeiros a ser sintetizado [22].

A classificação mais comum de polímeros envolve inicialmente a divisão em três categorias: termoplásticos, elastômeros e termofixos (também conhecidos por termoendurecíveis), conforme Figura 2.1. Termoplásticos podem ser cristalinos ou amorfos.

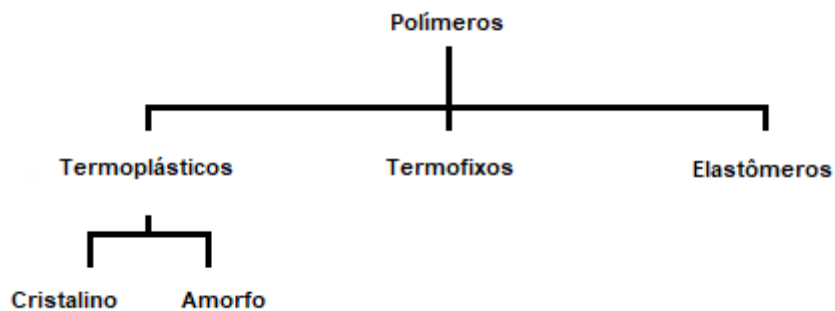


Figura 2.1 - Classificação dos polímeros. Adaptado de [3]

Essa abordagem classificatória é fundamentada na estrutura molecular subjacente dos polímeros [3]. Algumas literaturas separam somente em dois grupos e incluem os elastômeros como um tipo de termofixo.

2.1.1 Termoplásticos

Polímeros termoplásticos consistem em cadeias longas formadas pela conexão de monômeros; geralmente exibem uma natureza dúctil [21]. Quando aquecidos, os polímeros termoplásticos se tornam maleáveis e deformáveis, uma característica típica das moléculas poliméricas lineares (incluindo aquelas com ramificações, mas sem reticulação). Esse fenômeno ocorre porque as vibrações térmicas das moléculas em altas temperaturas são capazes de romper as ligações de van der Waals ao longo das moléculas, permitindo que as moléculas das cadeias longas deslizem umas sobre as outras quando uma força é aplicada. Uma vez que as ligações de van der Waals são quebradas, as moléculas das cadeias longas permanecem deformadas em relação umas às outras. Por esse motivo, esses materiais são facilmente recicláveis [22].

Termoplásticos podem ser classificados como amorfos ou cristalinos. Os termoplásticos amorfos apresentam uma estrutura molecular desordenada, o que lhes confere maior flexibilidade e facilidade de processamento, enquanto os termoplásticos cristalinos possuem uma estrutura molecular organizada, proporcionando maior rigidez e resistência, mas com um processo de fusão mais definido e menos flexibilidade durante o processamento [21].

2.1.2 Termofixos

Os polímeros termofixos, também chamados de termoendurecíveis, são o oposto dos termoplásticos. Eles se tornam rígidos ao serem aquecidos. Polímeros termofixos são compostos por moléculas de cadeia longa (LCMs), lineares ou ramificadas, fortemente interligadas umas às outras para formar estruturas de rede tridimensionais. Termofixos, geralmente, são mais fortes, mas mais quebradiços do que termoplásticos, não derretem ao serem aquecidos, mas começam a decompor-se. Uma maneira de formar ligações covalentes tridimensionais com polímeros é fazer a reticulação das LCMs. Termofixos não podem ser facilmente reprocessados após a reação de reticulação ter ocorrido e, portanto, a reciclagem é difícil. Um exemplo de um polímero reticulado é a borracha. Os produtos termofixos podem ser removidos do molde na temperatura de fabricação. Em contraste, os termoplásticos devem ser resfriados no molde para evitar distorções [21], [22].

2.1.3 Elastômeros

Elastômeros podem ser classificados como termoplásticos ou termofixos levemente reticulados. Os elastômeros termoplásticos constituem um grupo especial de polímeros, combinando a facilidade de processamento dos termoplásticos com o comportamento elástico dos elastômeros [21]. Eles são polímeros emborrachados reticulados, ou seja, redes emborrachadas, que podem ser esticadas facilmente a altas extensões, por exemplo, de 3 a 10 vezes suas dimensões originais, e que retornam rapidamente às suas dimensões originais quando a carga aplicada é libertada. Essa propriedade, extremamente importante e útil, é resultado de sua estrutura molecular, na qual a rede possui uma baixa densidade de reticulação. Durante a deformação, as cadeias de polímero emborrachado se esticam, mas são impedidas de fluir permanentemente pelos pontos de reticulação. Impulsionadas pela entropia, elas retornam às suas posições originais ao remover a carga aplicada. A palavra "borracha", frequentemente utilizada em vez de elastômero, deve ser preferencialmente reservada para descrever polímeros emborrachados que não são reticulados [3].

Inicialmente, os polímeros eram predominantemente considerados uma disciplina da química; contudo, atualmente, eles estão estreitamente entrelaçados com a engenharia, representando elementos como plásticos, fibras e elastômeros. Essa integração abrange desde a fase de *design* até os processos de fabricação e testes de produtos. As últimas décadas evidenciaram uma demanda crescente e notável na indústria de polímeros, caracterizada pelo rápido desenvolvimento e introdução de produtos aprimorados. Nesse cenário de expansão desta categoria de materiais de engenharia ao longo do último século, os plásticos emergiram como líderes, seguidos por fibras e elastômeros [1].

2.2 Compósitos

Os egípcios exemplificam o uso inicial de compósitos ao empregar tijolos feitos de argila reforçada com palha. Os componentes individuais, argila e palha, não teriam a capacidade de desempenhar a função isoladamente, mas alcançavam tal propósito quando combinados. A literatura apresenta numerosos exemplos históricos de compósitos, entre eles a utilização de paredes de lama reforçada com hastes de bambu em habitações, a

técnica de madeira laminada colada pelos chineses por volta de 1500 a.C. e o emprego de metais laminados na forja de espadas por volta de 1800 d.C. No século XX, os compósitos modernos surgiram na década de 1930, quando resinas eram reforçadas com fibras de vidro. Embarcações e aeronaves foram construídas a partir desses compósitos de vidro, popularmente conhecidos como fibra de vidro. Desde a década de 1970, a aplicação de compósitos tem crescido consideravelmente, impulsionada pelo desenvolvimento de novas fibras como carbono, boro e aramidas, além de novos sistemas compostos com matrizes feitas de metais e cerâmicas [8].

Um material compósito pode ser caracterizado como a união de dois ou mais materiais, resultando em um conjunto final que exhibe propriedades superiores às características individuais de cada material constituinte. Esses materiais compósitos são, frequentemente, referidos como arranjos de reforço ou preenchimentos, incorporados em uma matriz. A função da matriz é garantir a coesão e a orientação da carga. De maneira geral, os materiais compósitos consistem em uma ou mais fases descontínuas distribuídas dentro de uma fase contínua. A fase contínua é denominada matriz, enquanto a fase descontínua é chamada de reforço ou material de reforço [5], [6], [8]. Materiais de origem biológica são, geralmente, compósitos. A madeira contém fibras de celulose rodeadas por lignina e hemicelulose, todos os quais são polímeros. O osso é composto da proteína fibrosa colágeno em uma matriz cerâmica [21], [23].

Os materiais compósitos têm sido extensivamente empregados em diversas indústrias devido às suas notáveis características, como elevada resistência específica, elevado módulo específico, tenacidade e resistência à corrosão [4]. O principal mérito dos compósitos poliméricos reside na flexível combinação das vantagens de diferentes materiais. Dessa forma, a concepção e desenvolvimento de compósitos poliméricos com propriedades especiais emergiram como uma fronteira de pesquisa, ganhando crescente atenção tanto do meio acadêmico quanto da indústria [6], [7].

Os compósitos são categorizados com base na configuração do reforço (partículas, flocos e fibras) ou no tipo de matriz (polímero, metal, cerâmica e carbono). Compósitos de partículas englobam partículas em matrizes como ligas e cerâmicas, sendo, geralmente, isotrópicos. Eles apresentam benefícios como aprimoramento da resistência e aumento da temperatura de operação. Compósitos de flocos consistem em reforços planos, como

vidro e alumínio, proporcionando elevado módulo flexural fora do plano e custo reduzido. Compósitos de fibras envolvem matrizes reforçadas por fibras, como carbono e aramidas. Nanocompósitos, em escala nanométrica, exibem propriedades distintas, sendo úteis em aplicações como melhorias no módulo elástico e resistência ao impacto em embalagens militares [8].

Os compósitos com matriz polimérica oferecem uma vantagem distinta em relação aos metais devido ao processo de fabricação, que possibilita a produção de peças com formas complexas. Além disso, esses compósitos apresentam menor densidade, resultando em menor consumo de combustível, especialmente relevante para setores como aviação e automóveis. Isso se traduz em maior velocidade em competições esportivas, maior alcance para mísseis e maior capacidade de carga no transporte [5]. A título de ilustração, no mercado altamente competitivo da aviação, os custos relacionados ao combustível representam 25% dos custos operacionais totais de uma companhia aérea comercial [8].

Um grande exemplo da aplicação de compósitos na aviação é o Boeing 787 Dreamliner. O Boeing 787 Dreamliner é composto por 80% de volume de material compósito. Em termos de peso, o conteúdo do material é de 50% compósito, 20% alumínio, 15% titânio, 10% aço e 5% outros, conforme Figura 2.2.

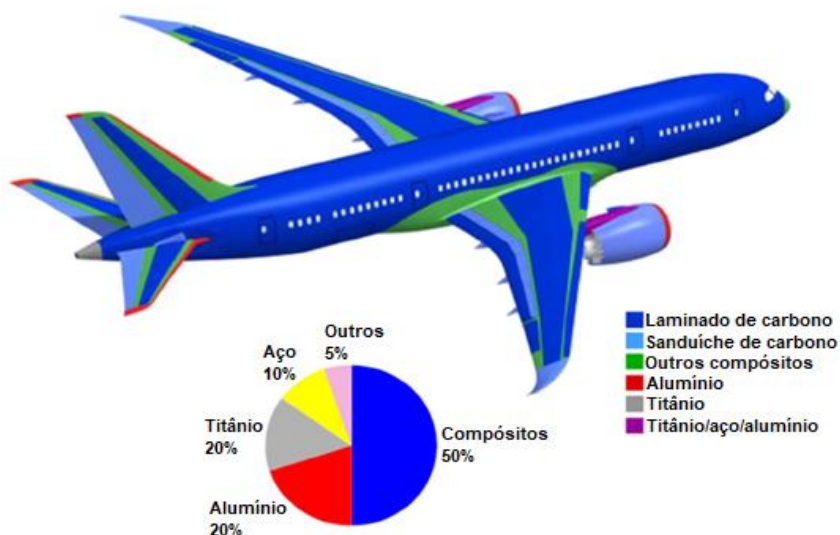


Figura 2.2 - Composição estrutural do Boeing 787 Dreamliner. Adaptado de [24]

Este avião, o primeiro grande avião comercial do mundo a usar materiais compósitos como material primário em sua estrutura, é o avião de passageiros mais eficiente em termos de consumo de combustível da Boeing. Cada aeronave Boeing 787 contém aproximadamente 32.000 kg de compósitos CFRP, feitos com 23 toneladas de fibra de carbono. Os compósitos são usados na fuselagem, asas, cauda, portas e interior [25]. Em contraste, o Boeing 777 é composto por 11% de compósitos e 70% de ligas de alumínio. As estruturas compostas mais comuns são os laminados contínuos de fibra de carbono e epóxi, a maioria dos quais são usados na fuselagem [26].

Outro exemplo do uso de materiais compósitos de epóxi reforçados com fibras de carbono é a construção do chassi monocoque dos carros de corrida de Fórmula 1 que teve início em 1981 pela equipe de corrida McLaren. Monocoque significa casco único. Em um carro de corrida, tudo está ligado ao chassi monocoque. Aproximadamente 80% em volume de um carro de corrida de Fórmula 1 moderno é composto por materiais compósitos de epóxi reforçados com fibras de carbono [22].

Na abordagem estrutural, como no projeto de um componente estrutural utilizando compósitos, há uma integração simultânea entre o projeto de material e o projeto estrutural, que inclui considerações sobre a geometria. Uma vantagem notável, em comparação com os metais, especialmente o aço, é a capacidade de projetar concomitantemente as propriedades do material compósito juntamente com os aspectos estruturais. O projetista tem controle sobre a variação contínua das propriedades do compósito, como rigidez, expansão térmica, entre outros, em uma ampla gama de valores [6].

Esses materiais compósitos desempenham um papel significativo em diversos setores, abrangendo embalagens, automotivo, estruturas leves, engenharia civil, aviação, esportes, biomedicina, componentes termomecânicos e aeroespacial [5]. Por exemplo, na indústria aeroespacial, eles são empregados em obras estruturais de aeronaves comerciais e sistemas de satélites; no setor marítimo, são utilizados na fabricação de peças para barcos, caiaques e canoas; na área biomédica, encontram aplicação em inserções médicas, plataformas e dispositivos de ressonância magnética e raios-x, além de serem empregados nos interiores e exteriores de carrocerias automotivas, entre outras aplicações [27].

Os compósitos podem ser classificados com base na geometria do reforço (partículas, fibras e estruturais) ou no tipo de matriz (metal, cerâmica e polímero).

2.2.1 Matriz

A fase da matriz nos compostos fibrosos pode ser constituída por um metal, um polímero ou uma cerâmica. Em geral, metais e polímeros são preferidos como materiais de matriz devido à sua ductilidade, enquanto nos compósitos de matriz cerâmica, o componente de reforço é adicionado para aumentar a tenacidade à fratura [26].

Nos compósitos reforçados por fibras, a fase da matriz desempenha diversas funções. Primeiramente, ela une as fibras e age como meio para transmitir e distribuir a tensão externa aplicada nas fibras, sendo que apenas uma pequena proporção da carga aplicada é suportada pela fase da matriz. Além disso, o material da matriz deve ser dúctil e o módulo de elasticidade da fibra deve ser significativamente maior do que o da matriz. A segunda função da matriz é proteger as fibras individuais contra danos superficiais, resultantes de abrasão mecânica ou reações químicas com o ambiente. Por último, a matriz separa as fibras e, devido à sua relativa maciez e plasticidade, impede a propagação de rachaduras frágeis de uma fibra para outra, atuando como uma barreira para a propagação de rachaduras. Mesmo que algumas fibras individuais falhem, a fratura total do compósito só ocorrerá quando muitas fibras adjacentes falharem, formando um aglomerado de tamanho crítico [26].

2.2.1.1 Matriz metálica

Como indica o nome, nos compósitos de matriz metálica (MMCs), a matriz é um metal dúctil. Estes materiais podem ser empregados em temperaturas de serviço superiores às de seus equivalentes de metal base. Além disso, o reforço pode aprimorar várias propriedades, como rigidez específica, resistência específica, resistência à abrasão, resistência à fluência, condutividade térmica e estabilidade dimensional. Algumas das vantagens desses materiais sobre os compósitos de matriz polimérica (PMCs) incluem temperaturas de operação mais elevadas, não inflamabilidade e maior resistência à degradação causada por fluidos orgânicos. Contudo, devido ao seu custo mais elevado em comparação com PMCs, o uso de MMCs é algo limitado. As superligas, assim como ligas de alumínio, magnésio, titânio e cobre, são utilizadas como materiais de matriz. O reforço

pode se apresentar na forma de partículas, fibras contínuas e descontínuas ou *whiskers*¹, com concentrações normalmente variando entre 10 e 60% em volume [26]. Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz metálica podem ser observadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz metálica e materiais monolíticos [8]

Propriedade	SiC/ alumínio	Grafite/ alumínio	Aço	Alumínio
Gravidade específica ²	2,6	2,2	7,8	2,6
Módulo de Young (GPa)	117,2	124,1	206,8	68,95
Resistência máxima à tração (MPa)	1206	448,2	648,1	234,4
Coefficiente de expansão térmica (µm/m/°C)	12,4	18	11,7	23

Os compósitos de matriz metálica podem encontrar aplicações significativas em componentes para motores de foguetes ou aeronaves. Superligas reforçadas com fibras metálicas (como tungstênio) ou fibras cerâmicas (como o carbetto de silício, SiC, ou nitreto de boro, B₄N) mantêm sua resistência em temperaturas elevadas, o que possibilita uma operação mais eficiente dos motores a jato. De maneira similar, titânio e aluminetos de titânio reforçados com fibras de SiC são considerados para pás e discos de turbina [21].

Uma aplicação particularmente única para compósitos de matriz metálica está no fio supercondutor necessário para reatores de fusão. O composto intermetálico niobato de estanho (Nb₃Sn) apresenta boas propriedades supercondutoras, porém é bastante frágil. Para produzir o fio de Nb₃Sn, fio de nióbio puro é envolto por cobre, enquanto ambos os metais são formados em um compósito de fio. O fio compósito de nióbio-cobre é então revestido com estanho. O estanho difunde-se através do cobre e reage com o nióbio para produzir o composto intermetálico. Sistemas de nióbio-titânio também são empregados [21].

¹ *whiskers* são fibras cerâmicas com elevado grau de perfeição cristalina.

² a gravidade específica de um material é a relação entre sua densidade e a densidade da água.

2.2.1.2 Matriz cerâmica

Materiais cerâmicos são inerentemente resilientes à oxidação e à deterioração em altas temperaturas, mas possuem uma tendência à fratura frágil. A tenacidade à fratura dos materiais cerâmicos foi significativamente melhorada pelo desenvolvimento de uma nova geração de compósitos de matriz cerâmica (CMCs), consistindo em partículas, fibras ou *whiskers* de um material cerâmico que foram incorporados em uma matriz de outro material cerâmico. Essa melhoria nas propriedades de fratura resulta essencialmente das interações entre rachaduras em avanço e partículas dispersas. A iniciação de trincas normalmente ocorre com a fase da matriz, enquanto a propagação da trinca é impedida ou dificultada pelas partículas, fibras ou *whiskers*. Várias técnicas são usadas para retardar a propagação de trincas [21], [26].

Uma técnica é o aumento de tenacidade por transformação, que envolve a dispersão de pequenas partículas de zircônia parcialmente estabilizada na matriz do material, gerando tensões de compressão que fecham as trincas e impedem seu crescimento. Outra abordagem é o uso de *whiskers* cerâmicos, como carbetos de silício (SiC) ou nitreto de silício (Si₃N₄), que podem desviar, formar pontes, absorver energia ou redistribuir tensões para inibir a propagação de trincas. Além disso, o aumento do teor de fibras melhora a resistência e a tenacidade à fratura, enquanto os compósitos de matriz cerâmica podem ser fabricados por diversas técnicas, como prensagem a quente e sinterização em fase líquida. Esses materiais têm aplicações em insertos de ferramentas de corte, proporcionando maior vida útil em comparação com materiais convencionais [26]. Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz cerâmica podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz cerâmica e materiais monolíticos [8]

Propriedade	SiC/LAS	SiC/CAS	Aço	Alumínio
Gravidade específica	2,1	2,5	7,8	2,6
Módulo de Young (GPa)	89,6	121	207	68,95
Resistência máxima à tração (MPa)	496,4	400	648	234,4
Coefficiente de expansão térmica (µm/m/°C)	3,6	4,5	11,7	23

2.2.1.3 Matriz polimérica

Os compósitos de matriz polimérica (PMCs) consistem em uma resina polimérica como matriz. Esses materiais são utilizados na maior diversidade de aplicações de compósitos, bem como em maiores quantidades, devido às suas propriedades em temperatura ambiente, facilidade de fabricação e custo. A matriz frequentemente determina a temperatura máxima de serviço, pois normalmente amolece, derrete ou degrada a uma temperatura muito mais baixa do que o reforço. As resinas poliméricas mais amplamente utilizadas e menos caras são os poliésteres e os ésteres vinílicos. Esses materiais de matriz são usados principalmente para compósitos reforçados com fibra de vidro. Muitas formulações de resina fornece uma ampla gama de propriedades para esses polímeros. Os epóxis são mais caros e, além de aplicações comerciais, também são amplamente utilizados em PMCs para aplicações aeroespaciais; eles têm melhores propriedades mecânicas e resistência à umidade do que os poliésteres e resinas vinílicas. Para aplicações em alta temperatura, são usadas resinas de poliamida. Por fim, as resinas termoplásticas de alta temperatura oferecem o potencial de serem usadas em futuras aplicações aeroespaciais; tais materiais incluem polieteretercetona (PEEK), polifenileno sulfeto (PPS) e polieterimida (PEI) [26]. Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz polimérica em comparação com materiais monolíticos podem ser observadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Propriedades mecânicas de alguns compósitos de matriz polimérica e materiais monolíticos [8]

Propriedade	Grafite/ epóxi	Vidro/ epóxi	Aço	Alumínio
Gravidade específica	1,6	1,8	7,8	2,6
Módulo de Young (GPa)	181	38,6	206,8	68,95
Resistência máxima à tração (MPa)	150	1062	648,1	275,8
Coefficiente de expansão térmica ($\mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$)	0,02	8,6	11,7	23,0

2.2.2 Reforço

De acordo com a forma ou natureza da fase dispersa, os compósitos são classificados em compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais, conforme Figura 2.3.

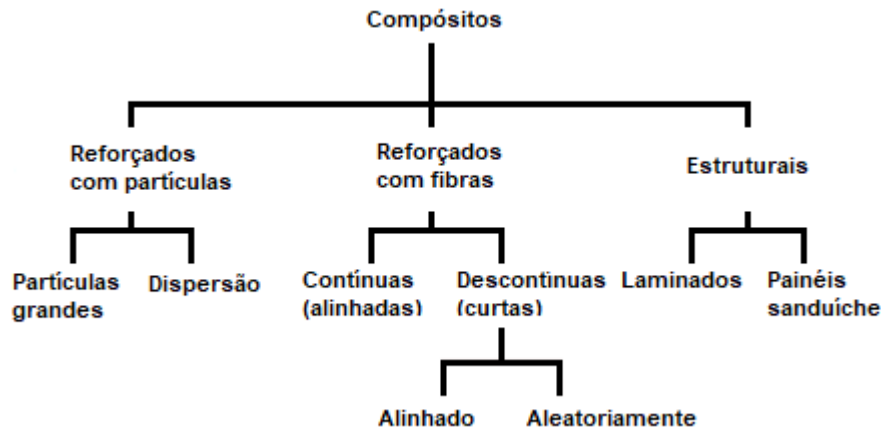


Figura 2.3 - Classificação de compósitos de acordo com o reforço. Adaptado de [26]

2.2.2.1 Compósitos reforçados com partículas

Compósitos reforçados por partículas podem ser categorizados em dois grupos: aqueles reforçados por grandes partículas e aqueles reforçados por dispersão. O termo "grande" indica que as interações entre partícula e matriz não podem ser tratadas em nível atômico ou molecular. Em muitos desses compósitos, a fase das partículas é mais dura e rígida do que a matriz. Essas partículas de reforço tendem a restringir o movimento da matriz próxima a cada partícula, transferindo parte do estresse aplicado para as partículas, que suportam uma fração da carga. A eficácia do reforço ou melhoria do comportamento mecânico depende da existência de uma forte ligação na interface entre matriz e partícula [26].

Nos compósitos reforçados por dispersão, as partículas são geralmente muito menores, com diâmetros entre 0,01 e 0,1 μm (10 e 100 nm). As interações partícula-matriz que resultam em fortalecimento ocorrem no nível atômico ou molecular. Enquanto a matriz suporta a maior parte da carga aplicada, as pequenas partículas dispersas dificultam o movimento das discordâncias, restringindo a deformação plástica e, assim, melhorando a resistência à tração, ao escoamento e a dureza [26].

As partículas podem exercer diversos efeitos sobre um material de matriz, dependendo das características dos dois constituintes. Quando partículas dúcteis são adicionadas a uma matriz frágil, a tenacidade é aumentada, pois as trincas encontram dificuldades para se propagar através das partículas. Um exemplo disso é o poliestireno modificado com borracha. Por outro lado, quando partículas de um material duro e rígido são adicionadas a uma matriz dúctil, isso resulta em um aumento da resistência e da rigidez. É comum que partículas duras reduzam a tenacidade à fratura de uma matriz dúctil, o que limita a utilidade de alguns compósitos dessa natureza. Contudo, ainda assim, o compósito pode ser benéfico se apresentar outras propriedades desejáveis que compensem as desvantagens da redução da tenacidade, como alta dureza e resistência ao desgaste. Se as partículas duras em uma matriz dúctil forem pequenas e em quantidade limitada, a diminuição na tenacidade será modesta. Em uma matriz metálica, pode-se obter um efeito de fortalecimento desejável semelhante ao endurecimento por precipitação ao sintetizar o metal na forma de pó com partículas cerâmicas, o que promove o endurecimento por dispersão. A fração volumétrica de partículas geralmente não ultrapassa os 15%, podendo ser tão pequena quanto 1% [23].

Muitos polímeros de engenharia contendo cargas e extensores são exemplos de compósitos particulados. Por exemplo, o negro de carbono em borracha vulcanizada é um exemplo clássico, melhorando várias propriedades da borracha, como resistência, rigidez, dureza e resistência ao desgaste. Além disso, nanopartículas de sílica são adicionadas aos pneus de borracha para melhorar sua rigidez [21].

2.2.2.2 Compósitos reforçados com fibras

Fibras robustas e rígidas, derivadas de materiais cerâmicos como vidro, grafite (carbono), boro e carbetto de silício (SiC), podem ser desafiadoras de utilizar como materiais estruturais em sua forma bruta. No entanto, ao incorporá-las em uma matriz de material dúctil, como um polímero ou um metal, o compósito resultante pode adquirir resistência, rigidez e tenacidade. Nesse arranjo, a matriz transfere a força para as fibras, que suportam a maior parte da carga aplicada. Além disso, a matriz proporciona proteção à superfície da fibra e minimiza a difusão de substâncias como oxigênio ou umidade, que podem comprometer as propriedades mecânicas das fibras. A adesão adequada entre as

fibras e a matriz é crucial, permitindo que a matriz transfira o esforço de uma fibra para outra no caso de uma quebra ou término devido ao seu comprimento limitado [21], [23].

A resistência do compósito pode permanecer alta tanto em temperatura ambiente quanto em temperaturas elevadas, e uma variedade de materiais de reforço pode ser empregada. A palha tem sido usada para fortalecer tijolos de barro por séculos. Barras de aço são introduzidas em estruturas de concreto. Fibras de vidro em uma matriz polimérica produzem fibra de vidro para aplicações de transporte e aeroespaciais. Além disso, fibras feitas de boro, carbono, polímeros e cerâmicas fornecem reforço excepcional em compósitos avançados com matrizes de polímeros, metais, cerâmicas e até mesmo compostos intermetálicos [21].

As propriedades mecânicas dos materiais compósitos reforçados por fibras são influenciadas por diversos fatores, como a transmissão de carga das fibras para a matriz, que é determinada pela ligação entre elas; o comprimento crítico das fibras, que é essencial para fortalecer o material; e a orientação das fibras, que pode ser alinhada ou aleatória, afetando as características do compósito. Existem diferentes tipos de compósitos, dependendo da orientação e comprimento das fibras, e cada tipo apresenta características específicas de resistência e comportamento mecânico [26]. A Tabela 2.4 apresenta algumas propriedades mecânicas de fibras usadas em compósitos de matriz polimérica em comparação com materiais monolíticos.

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas de fibras usadas em compósitos de matriz polimérica e materiais monolíticos [8]

Propriedade	Grafite	Aramida	Vidro	Aço	Alumínio
Gravidade específica	1,8	1,4	2,5	7,8	2,6
Módulo de Young (GPa)	230	124	85	206,8	68,95
Resistência máxima à tração (MPa)	2067	1379	1550	648,1	275,8
Coefficiente de expansão térmica ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)	-1,3	-5	5	11,7	23

Fibras curtas, orientadas aleatoriamente, resultam em um compósito que possui propriedades semelhantes em todas as direções. Fibras longas podem ser tecidas em um tecido ou transformadas em um tapete de fios entrelaçados. Compósitos de alto desempenho muitas vezes são feitos usando fibras longas, retas e contínuas. Fibras contínuas todas orientadas em uma única direção fornecem máxima resistência e rigidez paralelas às fibras. Como esse material é fraco se estressado na direção transversal, várias camadas finas com diferentes orientações de fibra geralmente são empilhadas em um laminado. Para compósitos fibrosos com matriz polimérica, são obtidas resistências comparáveis aos metais estruturais [23].

Devido a crescente procura por novas características dos materiais compósitos, como renovabilidade, baixo impacto ambiental e custo, há um aumento significativo na pesquisa e inovação em materiais compósitos reforçados com fibras naturais (NFRC) [28]. As fibras naturais podem melhorar as propriedades dos compósitos, melhorando sua interface com matrizes poliméricas, influenciando as arquiteturas das fibras e os métodos de processamento [29]. Os compósitos reforçados com fibras naturais mostram-se promissores na tecnologia verde devido a sua durabilidade, baixo custo, baixo peso, alta resistência específica, não abrasividade, boas propriedades mecânicas, além de respeito ao meio ambiente e biodegradabilidade [30], [31], mas também apresentam desvantagens como maior taxa de absorção de água e menor resistência ao fogo [32]. Por esse motivo, os tratamentos químicos em fibras naturais podem melhorar a adesão, a resistência e as propriedades mecânicas em compósitos reforçados com fibras naturais, superando as desvantagens da baixa compatibilidade e da alta absorção de umidade [33].

Os plásticos reforçados com fibras naturais podem atingir propriedades mecânicas comparáveis às fibras de reforço tradicionais, com potencial para aplicações biodegradáveis e ecológicas [34]. Biocompósitos feitos de fibras naturais e biopolímeros apresentam avanços promissores na tecnologia verde, mas suas propriedades e características variam muito com base no tipo de fibra, condições ambientais, métodos de processamento e métodos de modificação [35].

Fibras naturais como sisal, juta, curauá, rami e banana, são comumente utilizadas em compósitos devido às suas características únicas. O sisal destaca-se pela sua alta resistência à tração e rigidez, enquanto a juta é valorizada pela sua biodegradabilidade e

resistência à tração. A fibra de curauá possui alto teor de celulose, conferindo-lhe alta resistência à tração e módulo de Young. Já o rami é reconhecido por sua resistência à tração e rigidez. A fibra de banana, por sua vez, possui boas propriedades mecânicas e é biodegradável. Essas fibras são frequentemente combinadas em compósitos híbridos para melhorar as propriedades mecânicas, sustentabilidade e desempenho geral do material [28].

2.2.3 Compósitos estruturais

Um compósito estrutural é uma estrutura laminada composta por múltiplas camadas e geralmente de baixa densidade, empregada em aplicações que requerem integridade estrutural. Esses compósitos são conhecidos por sua alta resistência à tração, compressão e torção, bem como pela rigidez. As propriedades desses materiais dependem não apenas das características dos materiais constituintes, mas também do *design* geométrico dos elementos estruturais. Os compósitos laminares e os painéis sanduíche representam dois exemplos comuns de compósitos estruturais [26].

2.2.3.1 Compósitos laminares

Um laminado é um material composto formado pela combinação de múltiplas camadas. Essas camadas podem variar em orientação das fibras ou em materiais constituintes. Um exemplo comum de laminado é o compensado. Folhas de compósito unidirecionais são frequentemente laminadas [23]. Muitos desses compósitos são projetados para oferecer melhor resistência à corrosão, mantendo custo baixo, alta resistência e leveza. Além disso, outras características importantes incluem resistência superior ao desgaste ou abrasão, melhorias na aparência e características de expansão térmica incomuns [21].

2.2.3.2 Compósitos sanduíche

Em situações em que é necessária rigidez à flexão juntamente com peso leve, pode-se utilizar camadas de um material forte e rígido em ambos os lados de um núcleo leve. Nem o material do núcleo nem o material de revestimento individualmente são

fortes ou rígidos, mas a combinação deles proporciona ambas as propriedades. Um exemplo conhecido é o papelão ondulado, onde um núcleo de papel ondulado é colado entre camadas de papel plano e espesso em ambos os lados. Outro exemplo é a estrutura de favo de mel, amplamente utilizada em aplicações aeronáuticas. Esta estrutura é composta por um favo de mel feito colando-se tiras finas de alumínio em locais selecionados e depois expandindo-o para criar um painel celular de densidade muito baixa. Quando chapas de alumínio são aderidas em ambos os lados do favo de mel, cria-se um compósito sanduíche excepcionalmente rígido, forte e leve. Os favos de mel podem ter uma variedade de formas, como hexagonais, quadradas, retangulares e sinuosas, e podem ser feitos de materiais como alumínio, fibra de vidro, papel, polímeros de aramida, entre outros. O núcleo das células do favo de mel pode ser preenchido com espuma ou fibra de vidro para proporcionar excelente absorção de som e vibração [21], [23]. A representação de um painel sanduíche com estrutura de favo de mel em formato hexagonal pode ser vista na Figura 2.4.

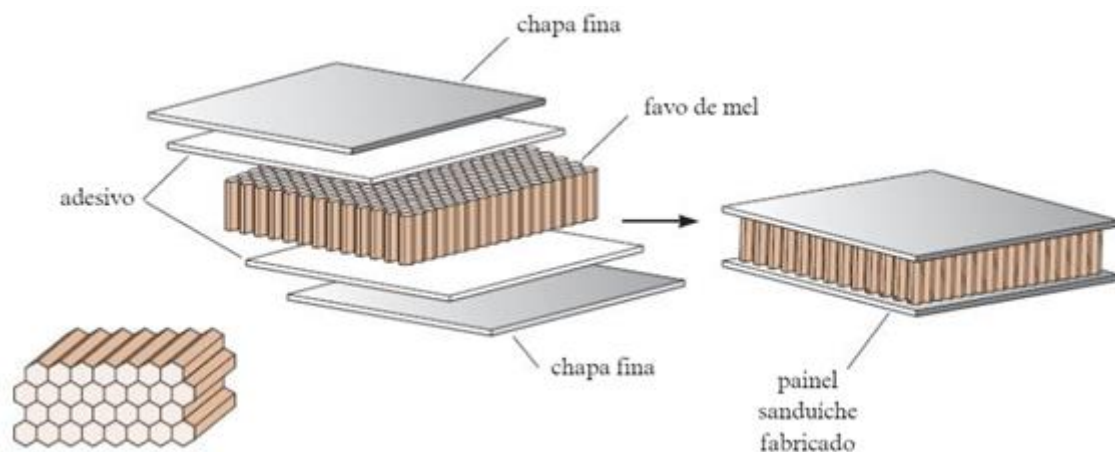


Figura 2.4 – Painel sanduíche com estrutura de favo de mel

Os painéis sanduíche são considerados compósitos economicamente eficazes, pois os materiais utilizados no núcleo são geralmente mais acessíveis do que os materiais usados nas faces. Normalmente, os materiais do núcleo se enquadram em três categorias principais: espumas poliméricas rígidas, madeira e colmeias [26].

2.2.4 Nanocompósitos

Os nanocompósitos representam uma classe de materiais que incorporam nanopartículas em um material de matriz, resultando em propriedades superiores em comparação com os materiais convencionais. Essas nanopartículas, devido ao seu tamanho extremamente pequeno, conferem ao compósito uma série de características mecânicas, elétricas, magnéticas, óticas, térmicas, biológicas e de transporte excepcionais. A alteração das propriedades físicas e químicas das nanopartículas devido ao seu tamanho é um fenômeno intrigante e fundamental para o desempenho desses materiais [26].

Embora existam várias formas de nanopartículas, os nanocompósitos mais comuns são compostos por polímeros, com uma ampla variedade de nanopartículas utilizadas para reforçar esses polímeros. Exemplos incluem nanotubos de carbono, nanofilamentos de silicato e nanocristais de óxidos inorgânicos. Esses nanocompósitos encontram aplicações em uma variedade de áreas, como revestimentos de barreira de gás, armazenamento de energia, revestimentos de barreira de chamas, restaurações dentárias, aumento de resistência mecânica e dissipação eletrostática. O potencial comercial desses materiais é extenso e continua a expandir-se, com previsão de futuras inovações em diversos setores industriais [26].

2.3 Resinas epóxi

Entre as matrizes empregadas em compósitos, as resinas epóxi (EP) e seus produtos curados são extensivamente utilizados devido às suas destacadas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, bem como alta resistência à corrosão, força de adesão, estabilidade química, baixa retração de cura, flexibilidade versátil de formulação e eficiente capacidade de processamento [4], [9], [10], [11]. Essas resinas encontram aplicação em diversas indústrias, como revestimentos, adesivos, selantes, materiais de isolamento, encapsulamento de elementos de circuitos eletrônicos e matrizes para compostos [11], [12]. Propriedades mecânicas da resina epóxi típica em temperatura ambiente podem ser observadas na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Propriedades mecânicas de uma resina epóxi em temperatura ambiente [8]

Propriedade	Valor
Gravidade específica	1,28
Módulo de Young (GPa)	3,792
Resistência máxima à tração (MPa)	82,74

As resinas epóxi, sendo polímeros termofixos, tornam-se permanentemente rígidas mediante a aplicação de calor, não sofrendo amolecimento com aquecimento subsequente. Durante o tratamento térmico inicial, ocorre a formação de ligações cruzadas covalentes entre cadeias moleculares adjacentes, ancorando-as para resistir a movimentos vibracionais e rotacionais em altas temperaturas. Essas ligações cruzadas só se rompem com aquecimento excessivo, resultando na degradação do polímero [2].

Entretanto, devido à sua estrutura altamente reticulada, as resinas epóxi apresentam deficiências nas propriedades mecânicas, apresentando comportamento frágil e baixa tenacidade, o que limita suas aplicações. Portanto, melhorar tais características torna-se crucial em muitos contextos [4], [9]. Uma abordagem comum para endurecer as resinas epóxi envolve a adição de uma segunda fase, seja por meio de partículas duras, como contas de vidro e zircônia metaestável, materiais elastoméricos ou termoplásticos [13], [36]. Particularmente, a inclusão de borracha como segunda fase mostrou-se uma maneira eficaz de aprimorar resistência e tenacidade [9], [15].

Cerca de 90% da produção do monômero epóxi/pré-polímero é baseada em bisfenol A (BPA) e epicloridrina (ECH), sendo seguido pelos monômeros epóxis/pré-polímeros derivados de BPA (DGEBA) em diferentes faixas de peso molecular. A produção do BPA é predominantemente obtida a partir de fenol e benzeno, ambos derivados do petróleo, através do processo do cumeno, representando aproximadamente 20% da demanda global de benzeno. É essencial ressaltar que tanto o fenol quanto o BPA são compostos petroquímicos. A questão da renovabilidade surge como um ponto de extrema importância, alinhada aos 12 princípios fundamentais da química verde [10].

Existem diversas perspectivas em relação ao impacto ambiental da resina epóxi do tipo BPA, que é atualmente a resina epóxi mais reconhecida e utilizada [12]. O BPA

é reconhecido como um desregulador reprodutivo e endócrino, acarretando problemas ambientais, toxicidade e desafios associados à depleção de recursos não renováveis [17]. Algumas fontes sugerem que os principais riscos podem estar relacionados ao revestimento de recipientes de alimentos e bebidas, bem como ao revestimento de tubulações de água com resina epóxi. No entanto, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) não considera o BPA uma ameaça à saúde. Adicionalmente, há relatos indicando que o BPA possui uma meia-vida relativamente curta (entre 4,5 e 4,7 dias) no ambiente, devido à sua degradação por microrganismos [12].

De acordo com as investigações realizadas, até o momento, observa-se uma trajetória ascendente no uso de resinas epóxi nas indústrias. Pode-se afirmar que a primeira tentativa de sintetizar o polímero epóxi convencional (epóxi à base de bisfenol) foi conduzida por Pierre Castan, na Suíça, e Sylvan Greenlee, nos Estados Unidos, em 1936. Posteriormente, a produção comercial de epóxi teve início em 1947. O aprimoramento na qualidade da resina epóxi foi realizado entre 1955 e 1965. Adicionalmente, a produção da resina epóxi hiper branqueada foi empreendida por Emrick et al. em 1999. O processo de fabricação do polímero epóxi a partir de matérias-primas de base biológica foi documentado em 1925. A primeira resina epóxi à base de óleo vegetal foi registrada em 1951 [18].

Conforme reconhecido, uma das utilizações das resinas epóxi consiste em empregá-las como matriz em materiais compósitos, especialmente nanocompósitos. De uma maneira geral, as resinas epóxi demonstram compatibilidade com a maioria dos nanomateriais, tais como nanossílica, nanoargila, nanomateriais à base de carbono, entre outros. Embora essas resinas apresentem diversas vantagens, a limitação dos recursos petroquímicos, questões ambientais e preocupações econômicas impõem restrições à sua utilização. A adoção de métodos ecologicamente sustentáveis na elaboração de polímeros emerge como uma exigência inevitável para o progresso sustentável da humanidade. Com base nisso, diversos esforços têm sido empreendidos por distintos grupos de pesquisa e fabricantes para desenvolver resinas epóxi de origem biológica destinadas a aplicações em compósitos e nanocompósitos [18], [19].

Muitos recursos sustentáveis têm sido incorporados na formulação de resinas epóxi ambientalmente amigáveis. A biomassa, proveniente de setores como agricultura,

silvicultura e resíduos urbanos, destaca-se como um recurso natural essencial nesse contexto. Óleos vegetais, sacarídeos, polifenóis, resinas naturais e lignina são exemplos proeminentes de fontes naturais que podem ser utilizadas como precursores na fabricação de resinas bioepóxi. Dada a sua abundância, elevada biocompatibilidade e pegada de carbono neutra, a biomassa é considerada uma alternativa ecologicamente correta em relação aos recursos petroquímicos. Além disso, a diversidade da biomassa oferece uma gama ampla de estruturas e grupos químicos ativos, conferindo benefícios significativos para modificações químicas e aplicações subsequentes. A capacidade intrínseca de cada fonte natural em sintetizar resinas bioepóxi e seus nanocompósitos emerge como um dos fatores preponderantes, proporcionando uma perspectiva apropriada para o futuro dos nanocompósitos bioepóxi [18], [19].

No ano de 1900, aproximadamente 41% dos materiais utilizados nos Estados Unidos eram de origem renovável, contudo, em 1995, apenas 6% dos materiais consumidos eram provenientes de fontes renováveis. Como parte dos esforços para promover a sustentabilidade, a pesquisa intensificou-se no desenvolvimento de polímeros renováveis de base biológica e materiais derivados de fontes biológicas. Dentro desse contexto, três desafios principais exigem atenção cuidadosa: (1) o custo relativamente elevado de certas matérias-primas de biomassa e tecnologias relacionadas à biorrefinaria; (2) as propriedades mecânicas e térmicas, processabilidade, propriedades de barreira, durabilidade e outras características físicas frequentemente não competem de maneira eficaz com plásticos derivados de combustíveis fósseis; e (3) a carência de métricas quantitativas universalmente aceitas no que tange à sustentabilidade econômica [10].

Outro fato é que as indústrias estão sob pressão, pois as metas climáticas visam emissões líquidas zero de gases de efeito estufa até 2050. Assim, a demanda por produtos e materiais verdes está aumentando à medida que clientes finais, fabricantes e governos pressionam por maior sustentabilidade e circularidade. O desenvolvimento de materiais compósitos de alto desempenho a partir de recursos de base biológica está pavimentando o caminho para a sustentabilidade [17].

As resinas bioepóxi são de grande interesse quando correlacionadas com resinas epóxi sintéticas porque oferecem inúmeras vantagens, incluindo biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade, estabilidade térmica superior, ampla disponibilidade,

retardamento de chama e compostos de blocos de construção naturalmente derivados que são quimicamente reativos para a modificação de polímeros quando usados em aplicações de bioengenharia, biomédicas e farmacêuticas [37].

2.4 Borracha de silicone

Um elastômero é primariamente constituído por uma estrutura de cadeias poliméricas, com o polímero encontrando-se acima de sua temperatura de transição vítrea e em estado amorfo [38]. Esses polímeros se diferenciam dos demais por duas características distintas: alta elasticidade e resiliência. A elasticidade dos elastômeros resulta da habilidade de suas longas cadeias poliméricas de se reorganizarem quando submetidas a uma tensão, permitindo grandes deformações (entre 200% e 1000%) sem sofrer rupturas. Após a remoção da força deformante, a rede interconectada das cadeias retorna espontaneamente às dimensões originais, resultando em uma notável resiliência [39]. Embora esse comportamento tenha sido inicialmente observado na borracha natural, nos últimos anos, houve o desenvolvimento sintético de numerosos elastômeros, apresentando uma vasta gama de propriedades [2].

Modificadores menos rígidos do que a matriz polimérica podem desempenhar o papel de eficazes agentes endurecedores em matrizes que exibem certa ductilidade. Por exemplo, um modificador de borracha pode induzir a formação de microvazios, o que, por conseguinte, desencadeia a ativação de processos de cedência devido à diminuição da tensão de cedência local, ou seja, a resistência plástica do material. Nesse cenário, uma quantidade significativa de energia é dissipada dentro da zona plástica próxima à extremidade da trinca [13]. Conforme evidenciado pelos resultados presentes na literatura, a modificação das resinas de epóxi com borracha pode ser realizada por meio de dois métodos: 1) utilizando borracha na forma líquida; 2) dispersando partículas sólidas de borracha diretamente nos termofixos [12].

A modificação de resinas epóxi por meio de elastômeros líquidos reativos, como as borrachas de acrilonitrila butadieno terminadas em carboxila (CTBN) ou elastômeros reticulados, tem sido investigada como uma abordagem bem-sucedida para melhorar a resistência à fratura em resinas epóxi que são intrinsecamente frágeis. Em termos gerais,

a melhoria efetiva da resistência em resinas epóxi curadas com elastômero é alcançada quando as partículas de elastômero estão distribuídas de forma microscópica. No entanto, é importante observar que, em muitos sistemas epóxi modificados com elastômeros, o aprimoramento da resistência frequentemente resulta em uma redução significativa no módulo e na temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas epóxi curadas [40]. Vale ressaltar que o efeito de endurecimento não é determinado apenas pelas propriedades intrínsecas do material de enchimento, mas também pela dispersão desse material e pela resistência da interface. Se houver aglomeração do material de enchimento ou se a interação entre a fase de reforço e o substrato for fraca, isso pode afetar a transferência de carga e até criar pontos de concentração de tensão [9].

O objetivo ao tentar fortalecer polímeros frágeis é aumentar sua tenacidade sem uma redução significativa de outras propriedades essenciais, como módulo e temperatura de distorção térmica. Um dos métodos mais eficazes, conforme relatado em estudos, envolve a incorporação de borrachas apropriadas, como copolímeros líquidos com terminação amino (ATBN), carboxilados (CTBN) e hidroxilados (HTBN) de butadieno e acrilonitrila [14].

Além disso, foram conduzidos extensivos trabalhos relacionados ao efeito de cargas particuladas nas propriedades mecânicas de polímeros termoplásticos e termoendurecíveis. A literatura abordou parâmetros como a fração volumétrica da carga, o tamanho e a forma geométrica das partículas, o módulo e a resistência da carga, a adesão entre a resina e a carga, bem como a tenacidade da matriz. A alteração de alguns desses parâmetros resulta em uma melhoria na tenacidade do material preenchido, aumentando sua resistência e módulo. Vários estudos destacaram que a energia de fratura de epóxidos preenchidos atinge um valor máximo em um determinado teor de preenchimento específico [7], [14].

O polissiloxano, popularmente conhecido como borracha de silicone, representa um dos elastômeros mais prevalentes [16]. Este tipo de polímero é amplamente utilizado em objetos do dia a dia, incluindo produtos domésticos, moldes flexíveis para cozimento, selantes para banheiros, adesivos para a pele, cosméticos e materiais para cancelamento de ruído em sistemas de freios automotivos. Além disso, encontra aplicações em

tecnologias avançadas, como eletrônicos flexíveis, veículos para entrega de medicamentos, superfícies super-hidrofóbicas e implantes [38], [41].

Os polímeros de silicone se distinguem da maioria dos outros polímeros devido à sua estrutura polimérica, conforme Figura 2.5, composta por unidades alternadas de silício e oxigênio (–Si–O–), conhecido como grupo funcional siloxano, em contraste com a estrutura tradicional baseada em carbono, conforme exemplos na Figura 2.6 [38].

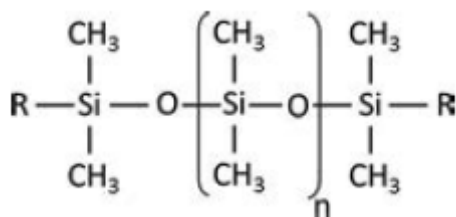


Figura 2.5 - Estrutura química de uma borracha de silicone [39]

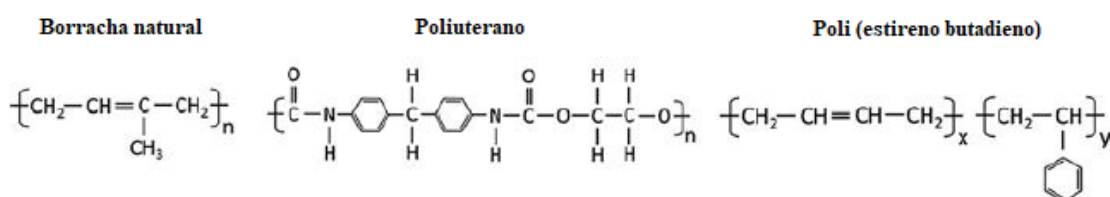


Figura 2.6 - Estrutura química de alguns elastômeros orgânicos comuns. Adaptado de [39]

A elevada energia de ligação das ligações Si-O (aproximadamente 433 kJ mol⁻¹) em comparação com as ligações C-C (aproximadamente 355 kJ mol⁻¹) confere maior resistência ao calor e estabilidade térmica a essa classe de polímeros. Além disso, características estruturais, como um comprimento de ligação maior (Si-O: 1,64 Å em comparação com C-C: 1,53 Å) e rotação relativamente livre ao redor da ligação Si-O-Si, resultam em alta flexibilidade da cadeia e valores de temperatura de transição vítrea, T_g, bem abaixo de zero (aproximadamente -125 °C). A presença de grupos laterais orgânicos proporciona baixa energia superficial às cadeias, conferindo alta hidrofobicidade. Mesmo após longos períodos de submersão, apresentam absorção muito baixa de água e

resistência a óleos em alta temperatura [39]. Sua natureza quimicamente inerte possibilita o uso em ambientes severos e variáveis. A temperatura operacional varia de cerca de -100 °C até aproximadamente 200-350 °C, dependendo da composição específica do elastômero [38]. Entretanto, a borracha de silicone exibe forças intermoleculares mais fracas entre as cadeias de polímeros, devido ao maior comprimento e à menor quantidade de grupos alquil na ligação Si-O em comparação com a ligação C-C. Isso resulta em menor resistência mecânica, o que limita suas aplicações práticas. Portanto, a busca por soluções que envolvem a combinação com outros materiais para fortalecer suas propriedades mecânicas tem recebido cada vez mais atenção [41].

Diversos tipos de borracha de silicone, como polidimetilsiloxano, polivinilacetato, polivinilacetato-co-metil metacrilato, polivinilmetil, polidimetil-vinilmetil, polimetil-vinil-fenol, e outros coelastômeros são empregados de maneira comercial. As propriedades versáteis desses elastômeros, incluindo flexibilidade, permeabilidade, elasticidade, biocompatibilidade, resistência à corrosão, facilidade de fabricação e moldagem, efeito de auto-plastificação, translucidez, ausência de odor e sabor, entre outras, enriquecem as aplicações da borracha de silicone em setores como revestimentos, lubrificantes, indústria automotiva, construção, farmacêutica, isoladores elétricos para eletrônicos, aeroespacial, retardadores de chama e instrumentos ópticos [16], [38], [41].

Com base nas temperaturas de cura, as fórmulas comerciais são classificadas como vulcanização à temperatura ambiente (RTV) e vulcanização em alta temperatura (HTV), ambas geralmente curadas por radicais. Um terceiro tipo de elastômero de silicone é denominado borracha de silicone líquida (LSR), sendo frequentemente curado em altas temperaturas, mas com uma distinção em relação ao HTV, pois é formulado para possuir uma viscosidade mais baixa. Geralmente, um kit comercial de elastômero consiste em duas pré-misturas de um sistema de cura por adição denominado 'A' e 'B', onde uma delas é comumente referida como agente reticulante e a outra como base ou polímero [38].

A borracha de silicone (LSR) usada neste estudo para a produção do compósito epóxi/silicone é comercialmente conhecida como Silopren LSR 2740 TP 3783, fornecida pela empresa Momentive. Este LSR de dois componentes, projetado para moldagem por injeção, demonstra aderência sem a necessidade de um primer em uma ampla gama de

substratos, incluindo metais e plásticos de engenharia, sem aderir ao molde. A resistência completa da ligação é normalmente atingida após um breve processo de cura (por exemplo, uma hora a 100 °C) ou por meio de um armazenamento mais prolongado em temperatura ambiente. Essas características fazem do Silopren LSR 2740 uma escolha promissora para a eficiente fabricação em larga escala de peças em processos integrados, como moldagem por injeção de múltiplos componentes ou moldagem com inserção. A borracha de silicone Silopren LSR 2740 é altamente recomendada para a fabricação de peças que demandam a combinação de plásticos de engenharia e materiais elastoméricos em processos de sobre-injeção, como elementos de vedação, membranas, componentes de amortecimento de vibrações, espátulas, entre outras aplicações rígidas-flexíveis [42].

Entre as vantagens e características proeminentes associadas ao uso do Silopren LSR 2740, incluem-se a capacidade de aderir a vários substratos sem a necessidade de um primer, dispensando tratamentos especiais no molde (a aderência final se desenvolve ao longo do tempo). Além disso, destaca-se sua estabilidade em temperaturas elevadas, flexibilidade e estabilidade em condições de baixas temperaturas, comportamento de envelhecimento favorável, resistência às intempéries, bem como propriedades dielétricas e mecânicas robustas [42].

2.5 Ensaios mecânicos

O comportamento mecânico de um material reflete sua resposta ou deformação em relação a uma carga ou força aplicada. Propriedades mecânicas importantes de *design* são rigidez, resistência, dureza, ductilidade e tenacidade. As propriedades mecânicas dos materiais são determinadas realizando experimentos de laboratório cuidadosamente projetados que replicam o mais próximo possível as condições de serviço [2].

2.5.1 Ensaio de tração

No ensaio de tração, um corpo de prova é deformado com uma carga de tração gradualmente crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo longo de um corpo de prova. Normalmente, a seção transversal é circular, mas corpos de prova retangulares também são usados. A configuração do corpo de prova na geometria de *dog bone* foi

escolhida para que, durante o teste, a deformação seja confinada à região central estreita (que tem uma seção transversal uniforme ao longo de seu comprimento), além de reduzir a probabilidade de fratura nas extremidades do corpo de prova [2].

Durante o ensaio o corpo de prova é montado pelas extremidades nos suportes de retenção do aparato de teste, conforme Figura 2.7. A máquina de teste de tração é projetada para alongar o corpo de prova a uma taxa constante e para medir continuamente e simultaneamente a carga aplicada instantânea (com uma célula de carga) e alongamentos resultantes (usando um extensômetro). Um teste de tensão–deformação geralmente leva vários minutos para ser realizado e é destrutivo, ou seja, o corpo de prova é permanentemente deformado e geralmente fraturado [2].

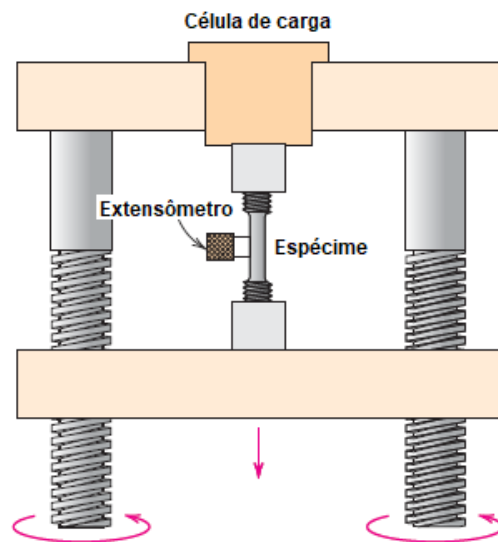


Figura 2.7 - Esquema representativo do ensaio de tração. Adaptado de [2]

A saída de tal teste de tração é registrada (geralmente em um computador) como carga ou força versus alongamento. Essas características força-alongamento dependem do tamanho do corpo de prova. Para minimizar esses fatores geométricos, força e deformação são normalizadas para os respectivos parâmetros de tensão de engenharia e deformação de engenharia. A tensão de engenharia σ é definida pela equação (1).

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

em que F é a força aplicada, com unidade em Newtons (N) e A_0 é a área da seção transversal antes de qualquer força ser aplicada, com unidade em mm^2 . As unidades de tensão são megapascals, MPa, onde $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$.

A deformação de engenharia ε é definida de acordo com a equação (2).

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

em que l_0 é o comprimento inicial e l é um comprimento durante o ensaio, com unidades em mm. A deformação é adimensional, o que a torna independente do sistema de unidades. A deformação também pode ser expressa como uma porcentagem, na qual o valor da deformação é multiplicado por 100 [2].

Plotando um gráfico de tensão de engenharia versus deformação de engenharia temos uma curva de engenharia para o material analisado. Para a maioria dos materiais submetidos a uma tensão de tração a níveis relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, demonstrado pela equação (3), conhecida como Lei de Hooke [2].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

onde a constante de proporcionalidade E é denominada como módulo de elasticidade ou módulo de Young, com unidade em gigapascals, GPa, onde $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ N/m}^2$. O processo de proporcionalidade ocorre na região de deformação elástica. O módulo de elasticidade é, basicamente, a inclinação da reta no gráfico da tensão versus deformação. Na Figura 2.8 é demonstrado um diagrama esquemático de como obtê-lo para um comportamento elástico não linear.

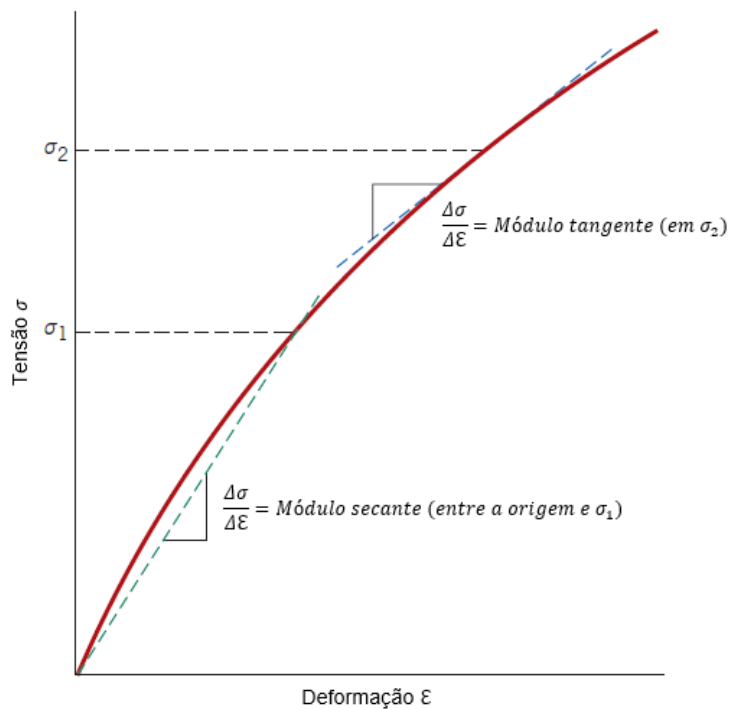


Figura 2.8 - Diagrama esquemático para obtenção do módulo de elasticidade. Adaptado de [2]

Três tipos tipicamente diferentes de comportamento tensão-deformação são encontrados para materiais poliméricos, conforme representado na Figura 2.9. A curva A ilustra o caráter tensão-deformação para um polímero frágil, como é o caso da resina epóxi, que fratura enquanto se deforma elasticamente. O comportamento para um material plástico, curva B, é semelhante ao de muitos materiais metálicos; a deformação inicial é elástica, seguida por escoamento e uma região de deformação plástica. Finalmente, a deformação exibida pela curva C é totalmente elástica; essa elasticidade é exibida por uma classe de polímeros denominada elastômeros, como é o caso do silicone em estudo.

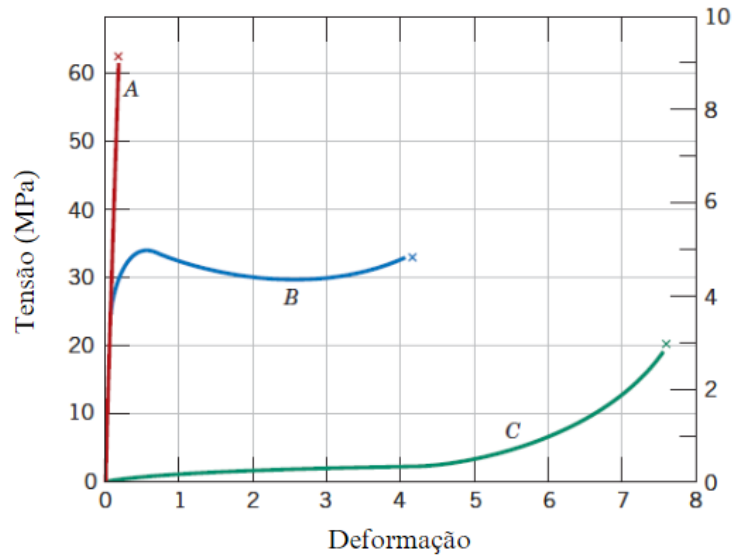


Figura 2.9 - Comportamento de tensão-deformação para polímeros frágeis (curva A), plásticos (curva B) e elastômeros (curva C) [2]

2.5.2 Ensaio de flexão

No ensaio de flexão, um corpo de prova em forma de haste com seção transversal circular ou retangular é dobrado até a fratura usando uma técnica de carga de três ou quatro pontos. O esquema de carga de três pontos é ilustrado na Figura 2.10, para seções transversais retangulares e circulares. No ponto de carga, a superfície superior do corpo de prova é colocada em estado de compressão, enquanto a superfície inferior está em tração. A tensão é calculada a partir da espessura do corpo de prova, do momento fletor e do momento de inércia da seção transversal. A máxima tensão de tração existe na superfície inferior do corpo de prova diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga [2], [43].

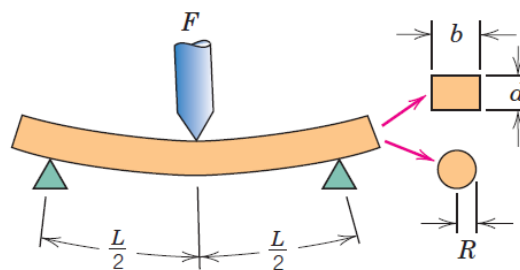


Figura 2.10 - Esquema representativo do ensaio de flexão de 3 pontos [2]

A tensão na fratura usando este ensaio de flexão é conhecida como resistência à flexão, módulo de ruptura, resistência à fratura ou resistência à flexão, um parâmetro mecânico importante para materiais frágeis, como cerâmicas e resinas. Para uma seção transversal retangular, como a usada nesse estudo, a resistência à flexão σ_f é dada pela equação (4).

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (4)$$

Onde F é a força aplicada, com unidade em Newtons (N), b e d são as dimensões da seção transversal retangular do corpo de prova e L é a distância entre os pontos de apoio, ambos com unidade em mm. A unidade de tensão são megapascals, MPa, onde $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$.

A deformação de engenharia de flexão ε_{fs} , que nesse caso é a mudança fracionária nominal no comprimento de um elemento da superfície externa do corpo de prova no meio do vão, onde ocorre a deformação máxima, é definida de acordo com a equação (5).

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (5)$$

onde D é a deflexão máxima do centro da viga, com unidade em mm.

O módulo de elasticidade, E , com unidade em MPa, é definido pela equação (6).

$$E = \frac{FL^3}{4bd^3D} \quad (6)$$

onde F é a força aplicada, com unidade em Newtons (N), L é a distância entre os pontos de apoio, b e d são as dimensões da seção transversal retangular do corpo de prova, e D é a deflexão máxima do centro da viga, todos com unidade em mm.

3 Materiais e métodos

O objetivo deste capítulo é apresentar todos os materiais e métodos utilizados para fabricação e caracterização mecânica dos corpos de prova de borracha de silicone e de resina epóxi, isolados, e do compósito de resina epóxi reforçado com partículas de silicone.

3.1 Materiais

3.1.1 Corpos de prova de silicone

A borracha de silicone (LSR) utilizada nesse estudo é a Silopren LSR 2740 TP 3783, fabricada pela empresa Momentive Performance Materials Inc. Esse silicone consiste em duas pré-misturas de um sistema de cura por adição denominado 'A' e 'B', na proporção de 1:1. A Tabela 3.1 lista as propriedades selecionadas da Silopren LSR 2740 TP3783, conforme ficha técnica do produto.

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do silicone Silopren LSR 2740 TP3783 [42]

Especificação	Silicone: Silopren LSR 2740
Densidade @ 20°C (g/ml)	1,12
Viscosidade @ 20°C (Pa.s)	10
Resistência à tração (N/mm ²)	9,3
Alongamento na ruptura (%)	700
Dureza (Shore A)	38

Os moldes utilizados foram fabricados em uma liga de alumínio 6082, anteriormente ao início deste trabalho. Os corpos de prova foram fabricados conforme norma ASTM D412 [44], corpo de prova tipo C, e suas dimensões podem ser vistas na Figura 3.1. Tanto o silicone como os moldes foram fornecidos pelo Instituto Politécnico de Bragança – Portugal.

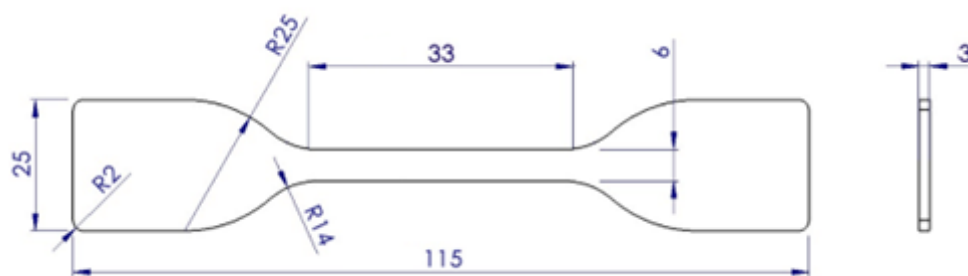


Figura 3.1 - Dimensões dos corpos de prova de silicone

3.1.2 Corpos de prova de epóxi

O presente estudo utilizou um polímero bioepóxi, especificamente a resina SR GreenPoxy 56 e o endurecedor SD Surf Clear, fabricados pela Sicomin Epoxy Systems, na França. A SR GreenPoxy 56 é uma resina que oferece um índice próximo a 56% de sua estrutura molecular proveniente de origem vegetal. A relação entre resina e endurecedor foi de 100:37. A Tabela 3.2 mostra a densidade e o teor de carbono da resina GreenPoxy 56 e do endurecedor SD Surf Clear. A Tabela 3.3 lista as propriedades mecânicas provenientes de ensaios de tração e flexão da resina curada no ciclo de polimerização de 24h a 23°C + 24h a 40°C.

Tabela 3.2 - Densidade e o teor de carbono da resina bioepóxi tipo SR GreenPoxy 56 e endurecedor SD Surf Clear [45]

Especificação	Bioepóxi: SR GreenPoxy 56	Endurecedor: SD Surf Clear
Densidade @ 20°C (g/ml)	1,198	0,958
% Teor de carbono de origem biológica	50-58	0

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas da resina epóxi curada [45]

Propriedade	Tração	Flexão
Módulo de elasticidade (MPa)	3300	3400
Resistência máxima (MPa)	49	114
Deformação máxima (%)	1,6	5,5

Para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova de resina epóxi, foram fabricados moldes de silicone pelo motivo de serem maleáveis. O silicone utilizado foi o PDMS Sylgard 184 da fabricante Dow. Esse elastômero foi escolhido devido, primeiramente, à sua disponibilidade na universidade e à sua facilidade de ser trabalhado, com baixa viscosidade em temperatura ambiente e sólido após processo de cura. Foram fabricados moldes para corpos de prova de tração e flexão, conforme Figura 3.2. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram fabricados conforme norma ASTM D638 [46], corpo de prova tipo I, e suas dimensões podem ser vistas na Figura 3.3. Os corpos de prova para o ensaio de flexão foram fabricados conforme norma ASTM D790 [43] e suas dimensões podem ser vistas na Figura 3.4. Ambos os materiais utilizados nessa etapa do trabalho foram fornecidos pelo Instituto Politécnico de Bragança – Portugal.

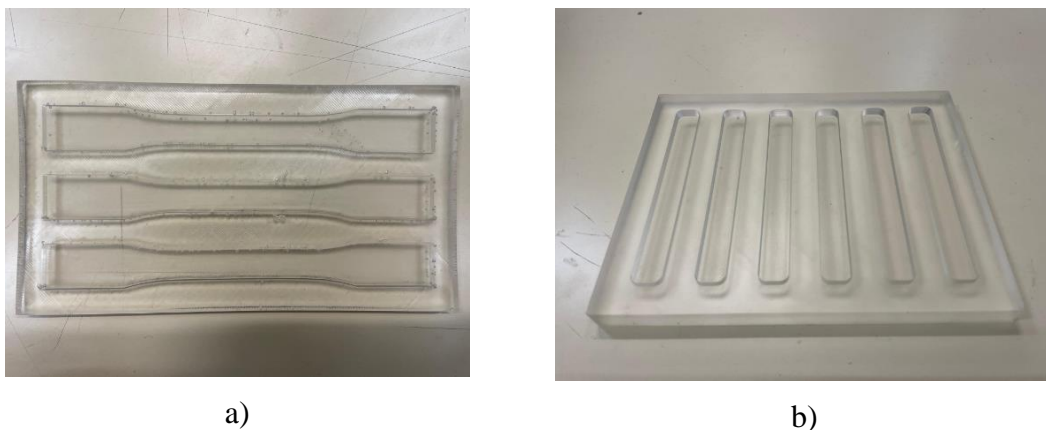


Figura 3.2 - Moldes para fabricação de corpos de prova de a) tração e b) flexão

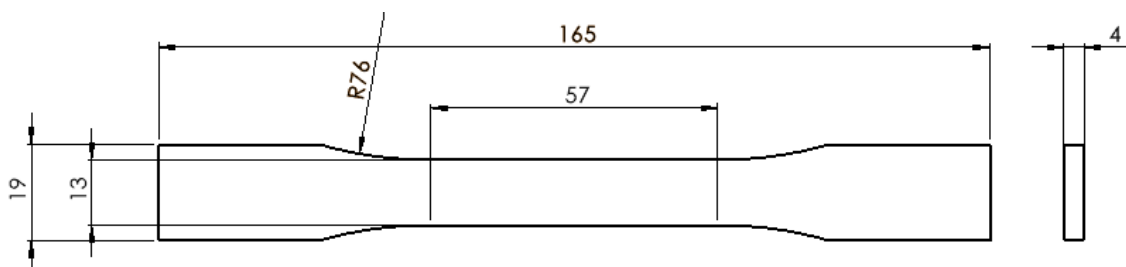


Figura 3.3 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração para resina epóxi

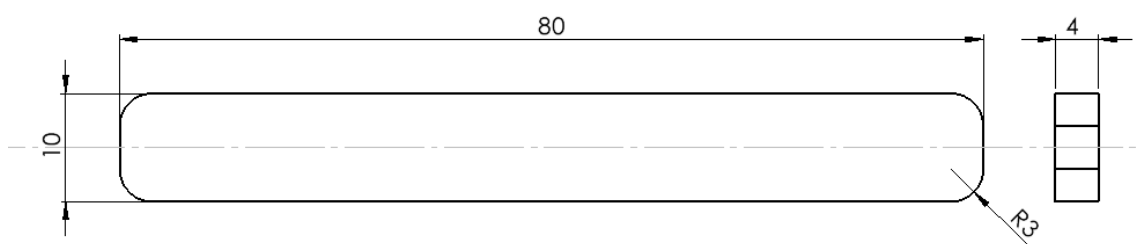


Figura 3.4 - Dimensões dos corpos de prova para ensaio de flexão para resina epóxi

3.1.3 Corpos de prova do compósito fabricado

Os materiais utilizados para a confecção do compósito foram a borracha de silicone e a resina bioepóxi, ambos utilizados e já descritos anteriormente. A resina bioepóxi foi usada como matriz e amostras de silicone foram transformadas em partículas com auxílio de um ralador doméstico, usadas como reforço particulado na matriz polimérica. O formato das partículas pode ser visto na Figura 3.5 e uma amostragem das dimensões pode ser vista na Tabela 3.4.



Figura 3.5 - Partículas de silicone

Tabela 3.4 - Dimensões das partículas de silicone

Partícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diâmetro (mm)	1,52	1,93	1,86	1,58	1,64	1,75	1,82	2,1	1,87	2,26
Média (mm)	1,83									
Desvio padrão	0,23									

Para o fabrico dos corpos de prova, foram utilizados os mesmos moldes usados na etapa de caracterização da resina epóxi. Os moldes foram fabricados em silicone PDMS Sylgard 184 da fabricante Dow. Foram fabricados moldes para corpos de prova de tração e flexão. Os corpos de prova para o ensaio de tração foram fabricados conforme norma ASTM D638, corpo de prova tipo I. Os corpos de prova para o ensaio de flexão foram fabricados conforme norma ASTM D790. Ambos os materiais utilizados nessa etapa do trabalho foram fornecidos pelo Instituto Politécnico de Bragança – Portugal.

3.2 Preparação dos corpos de prova

3.2.1 Corpos de prova de silicone

Foi feita a mistura da parte ‘A’ com a parte ‘B’ do silicone na proporção de 1:1, conforme orientação do fabricante. As proporções das duas partes foram pesadas utilizando uma balança de precisão modelo HCB602H da marca Highland™. A Figura 3.6 ilustra a pesagem dos componentes ‘A’ e ‘B’. Esta balança de precisão foi utilizada para todas as etapas de passagem efetuadas no presente trabalho.

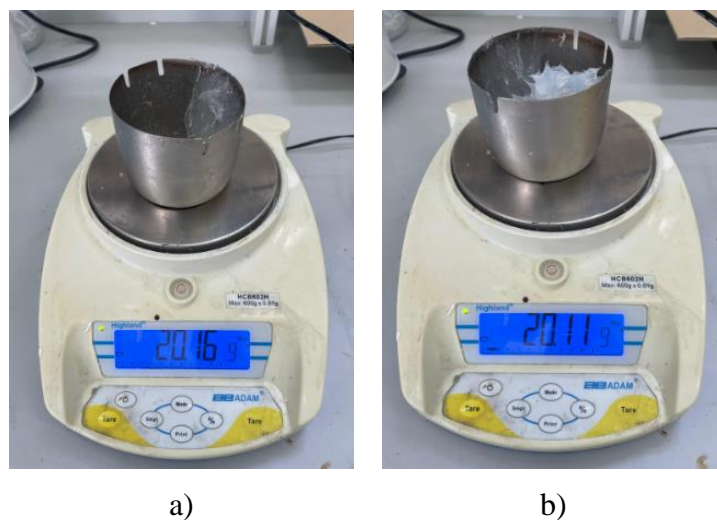


Figura 3.6 - Pesagem da parte A (a) e parte B (b) do silicone

Devido à alta viscosidade do material, a mistura entre os dois componentes foi de extrema dificuldade. A mistura foi feita inicialmente de forma manual e, posteriormente,

com o auxílio de um misturador rotativo em busca de uma mistura mais uniforme. O tempo de mistura foi de, aproximadamente, 3 minutos.

Devido a uma mistura pouco satisfatória na proporção 1:1, um segundo lote de amostras foi realizado na proporção 3:2. O componente 'A' foi usado em maior quantidade devido ao menor valor de viscosidade dinâmica. A Tabela 3.5 apresenta os valores de viscosidade dinâmica para as partes 'A' e 'B' do silicone, conforme dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 3.5 - Viscosidades dos componentes do LSR 2740

Propriedade	Parte A	Parte B
Viscosidade cinemática @ 20°C (Pa.s)	610	670

Foi utilizado cera de abelha como desmoldante, derretendo a cera e formando uma fina camada no molde para facilitar a desmoldagem do corpo de prova. O silicone foi depositado nos moldes com o auxílio de uma espátula. O método de moldagem aberta foi utilizado, preenchendo o molde completamente. Os moldes foram, então, colocados em um forno a 100°C, previamente aquecido por 20 minutos. O processo de cura foi de 1 hora. O forno de secagem utilizado foi o modelo FD53 da marca Binder e pode ser visto na Figura 3.7. Este forno foi utilizado para todos os processos de cura efetuados no presente trabalho.



Figura 3.7 - Forno de secagem utilizado para cura dos corpos de prova

Após finalização do tempo de cura, os corpos de prova são removidos do molde de forma manual. As etapas de mistura de ambas as partes de silicone, uso de cera de abelha como desmoldante, moldagem do silicone e, posterior, desmoldagem após cura do corpo de prova podem ser vistas na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Etapas do processo de fabricação dos corpos de prova: a) mistura; b) camada de cera de abelha como desmoldante; c) preenchimento do molde com o silicone; d) corpos de prova após cura e desmoldagem

Devido à alta viscosidade do material, a etapa de adição do molde em câmara de vácuo se mostrou insuficiente para o uso desse silicone especificamente. A desgaseificação não ocorre de forma eficaz e o corpo de prova após cura apresentou consideráveis bolhas de ar. Outros artifícios foram utilizados para facilitar a mistura entre os dois componentes do silicone, como aquecimento prévio dos componentes e, posterior, mistura. Essa tentativa também não foi eficaz.

3.2.2 Corpos de prova de epóxi

Foi feita a mistura da resina epóxi com o agente de cura na proporção, em peso, de 100:37, conforme orientação do fabricante. As proporções de resina e endurecedor foram pesadas utilizando uma balança de precisão.

A mistura foi feita de forma manual com auxílio de uma espátula por, aproximadamente, 3 minutos. Após mistura, a solução foi posta em câmara de vácuo até que se notasse ausência de bolhas de ar. O método utilizado foi o de vazamento da solução no molde, utilizando a técnica de moldagem aberta, preenchendo o molde completamente.

Não foi necessário o uso de desmoldante devido à natureza do material do molde e da resina e ambos não reagirem entre si.

O fabricante oferece a possibilidade de utilizar um de três ciclos de polimerização. O primeiro de 7 dias a 24°C, o segundo de 24h a 23°C + 24h a 40°C e o terceiro de 24h a 23 °C + 24h a 40 °C + 16h a 60°C. O ciclo escolhido foi o segundo devido ao menor tempo de cura e o forno foi previamente aquecido por 20 minutos.

Após término do processo de 48h de cura, os corpos de prova foram desmoldados de forma manual. Observou-se o surgimento de vazios no interior dos corpos de prova, mesmo estando isentos no início do processo de cura, conforme visto na Figura 3.9.



Figura 3.9 - Corpo de prova de resina epóxi curada com presença de bolhas de ar

Inicialmente, os moldes utilizados seriam de metal, mas após processo de cura das primeiras amostras realizadas notou-se que nem sempre a resina curava de forma eficiente num ciclo de 48h. A dificuldade de desmoldagem em molde metálico também era maior, causando quebra de alguns corpos de prova durante remoção. Por esse motivo, optou-se pela fabricação do molde de silicone. A cura ocorreu de forma eficiente em todas os lotes

de corpos de prova nos moldes de silicone, além de permitiram uma desmoldagem rápida e fácil. A Figura 3.10 exibe um molde de metal após ciclo de cura de 48h, com 3 corpos de prova, 1 completamente curado e 2 não curados.

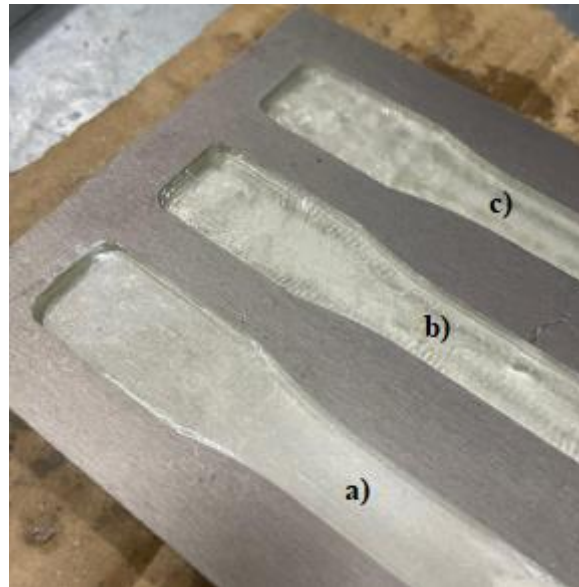


Figura 3.10 - Corpos de prova em molde de metal: (a) completamente curado; (b) e (c) cura não realizada

No entanto, um problema observado nos moldes de silicone fabricados foi a sua deterioração. Conforme o uso e sucessivas desmoldagens dos corpos de prova, partes do molde sofreram pequenos rasgos, resultando numa vida útil muito inferior à dos moldes metálicos. Uma solução seria a fabricação dos moldes com um silicone com maior resistência ao rasgo.

3.2.3 Corpos de prova do compósito fabricado

Foi feita a mistura, em um primeiro momento, entre a resina epóxi e as partículas de silicone. A solução de resina e partículas de silicone foi misturada de forma manual por, aproximadamente, 3 minutos. Em um segundo momento, o endurecedor foi adicionado à solução e feito nova mistura de forma manual por, aproximadamente, 3 minutos. As partículas de silicone foram adicionadas à resina em 3 diferentes frações volumétricas,

1%, 5% e 10%. A proporção entre resina epóxi e endurecedor foi de 100:37, conforme o processo de fabricação dos corpos de prova de resina pura. A ilustração das etapas de mistura para fabricação do compósito pode ser vista na Figura 3.11 e a imagem do aspecto da solução em cada etapa pode ser vista na Figura 3.12.

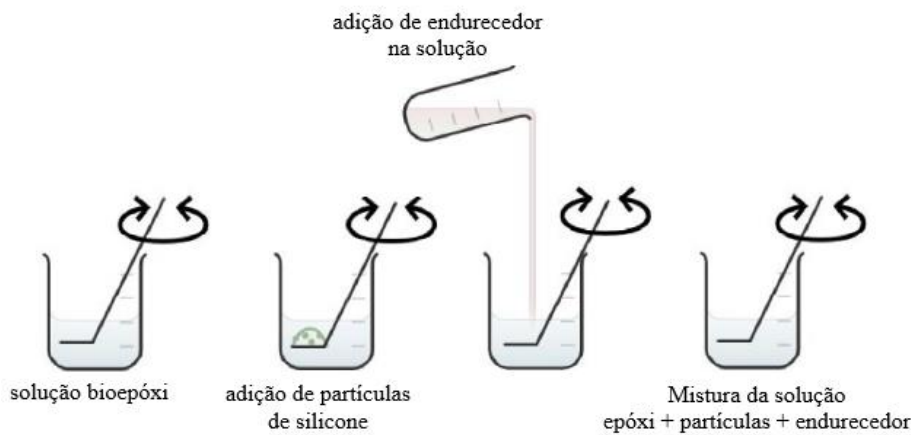


Figura 3.11 - Procedimento para mistura do compósito de epóxi reforçado com partículas de silicone

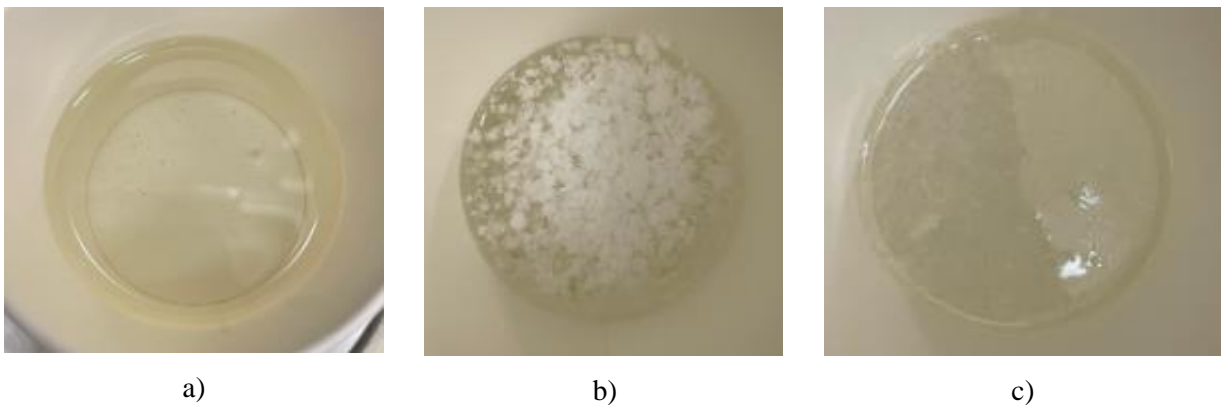


Figura 3.12 - Etapas de mistura do compósito: a) solução de epóxi puro: b) adição das partículas de silicone; c) aspecto da solução após mistura entre a resina epóxi e as partículas de silicone e adição do endurecedor

Após mistura, a solução foi posta em câmara de vácuo até que se notasse ausência ou diminuição de bolhas de ar. Devido à adição das partículas de silicone, a presença bolhas de ar se intensificaram conforme o aumento da fração volumétrica do compósito.

O método utilizado foi o de vazamento da solução no molde, utilizando a técnica de moldagem aberta, preenchendo o molde completamente. Não foi necessário o uso de desmoldante devido à natureza do material do molde e da resina e ambos não reagirem entre si.

Os processos de cura e desmoldagem foram realizados conforme os corpos de prova de resina pura. A Figura 3.13 ilustra os corpos de prova de tração e flexão dos compósitos com adição de 1%, 5% e 10% de partículas de silicone.

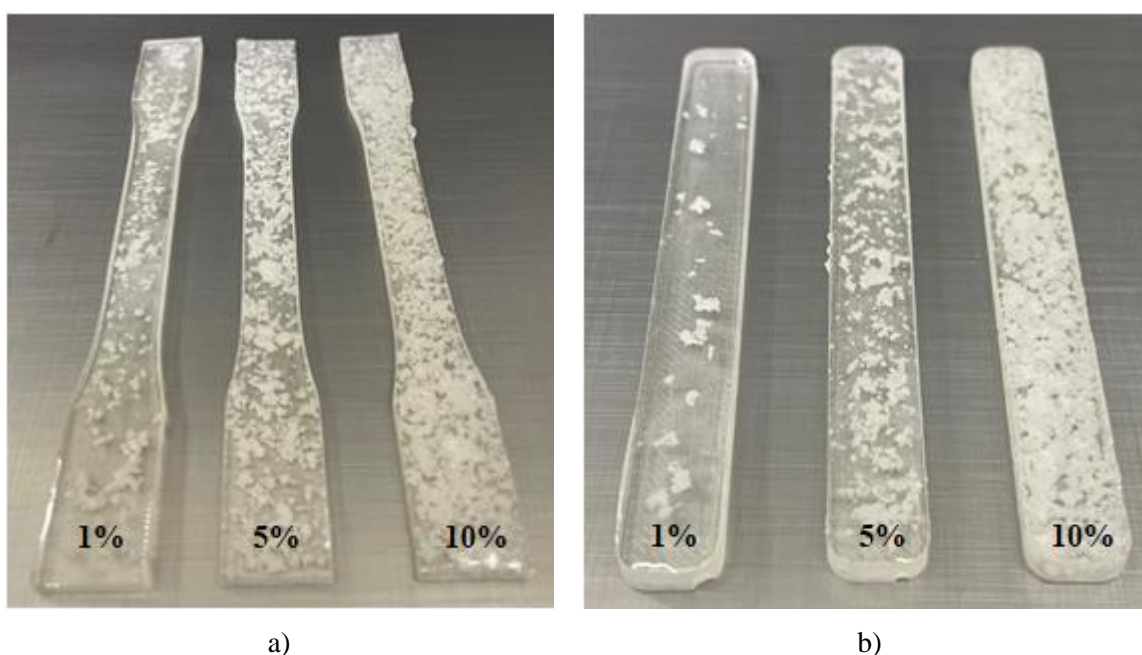


Figura 3.13 - Corpos de prova do compósito de resina epóxi com adição de 1%, 5% e 10% de partículas de silicone para ensaio de (a) tração e (b) flexão

3.3 Ensaios mecânicos

O equipamento utilizado para os ensaios de tração e flexão foi a máquina de ensaio universal da marca Shimadzu, modelo Autograph AGS-X 10kN, *software trapezium X* versão 1.5.1, como mostrado na Figura 3.15. Na Figura 3.15 podemos ver a máquina de ensaio universal configurada em (a) para o ensaio de tração e em (b) para o ensaio de flexão.

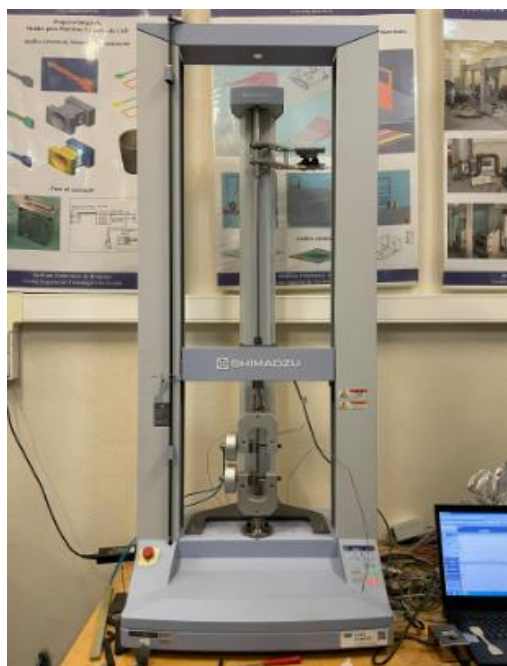
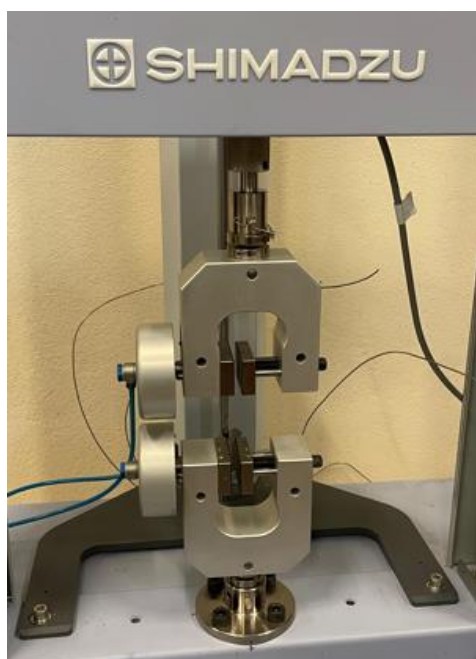


Figura 3.14 - Máquina de ensaio universal



(a)



(b)

Figura 3.15 - Máquina de ensaio universal configurada para (a) tração e (b) flexão.

3.3.1 Ensaios de tração

3.3.1.1 Ensaio de tração dos corpos de prova de silicone

A norma usada para o ensaio de tração nos corpos de prova de silicone foi a ASTM D412. A ASTM D412 estabelece os procedimentos para determinar várias propriedades mecânicas, como resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade, e outros parâmetros importantes. Essa norma especifica as condições de teste, incluindo a preparação das amostras, as dimensões das amostras, a velocidade de teste e os métodos de cálculo.

Foram realizados o ensaio de tração uniaxial em 5 amostras em uma máquina de ensaio universal. Para realizar os ensaios, um pré-teste foi configurado na máquina, com uma velocidade de 5 mm/min ajustada até atingir uma pré-carga de 1 N, e a partir desse ponto, o teste foi configurado para uma velocidade de 500 mm/min até que a amostra se rompesse. A sequência do ensaio pode ser observada na Figura 3.16.

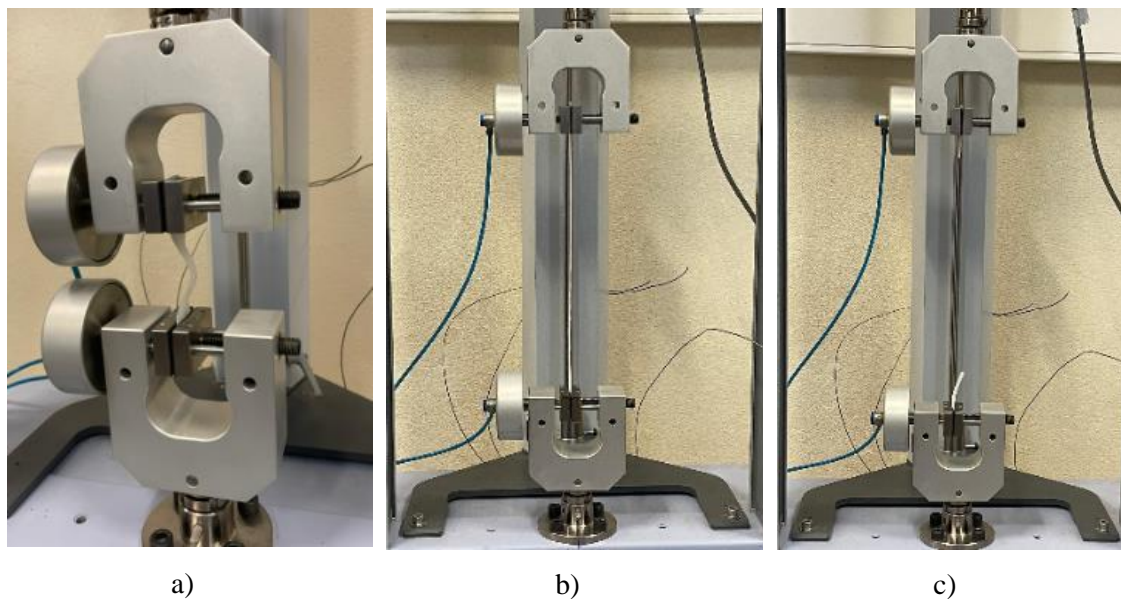


Figura 3.16 - Sequência do ensaio de tração: a) posicionamento do corpo de prova na máquina; b) alongamento do corpo de prova; c) momento de ruptura

3.3.1.2 Ensaio de tração dos corpos de prova de epóxi

A norma usada para o teste de tração nos corpos de prova de resina epóxi foi a ASTM D638. A ASTM D638 estabelece os procedimentos para determinar várias propriedades mecânicas, como resistência à tração, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade, e outros parâmetros importantes, para plásticos, no qual se enquadra a resina epóxi. Essa norma especifica as condições de teste, incluindo a preparação das amostras, as dimensões das amostras, a velocidade de teste e os métodos de cálculo.

Foram medidas a largura e espessura de cada amostra ensaiada para o cálculo da área da seção transversal. A distância entre as garras foi equivalente para todos os corpos de prova, 110 mm.

Foram realizados os ensaios de tração uniaxial em 5 amostras em uma máquina de ensaio universal. Para realizar os ensaios, a máquina foi configurada para uma velocidade de 5 mm/min até que a amostra se rompesse. A taxa de deformação é de 0,1 mm/mm/min. A sequência do ensaio pode ser observada na Figura 3.17.

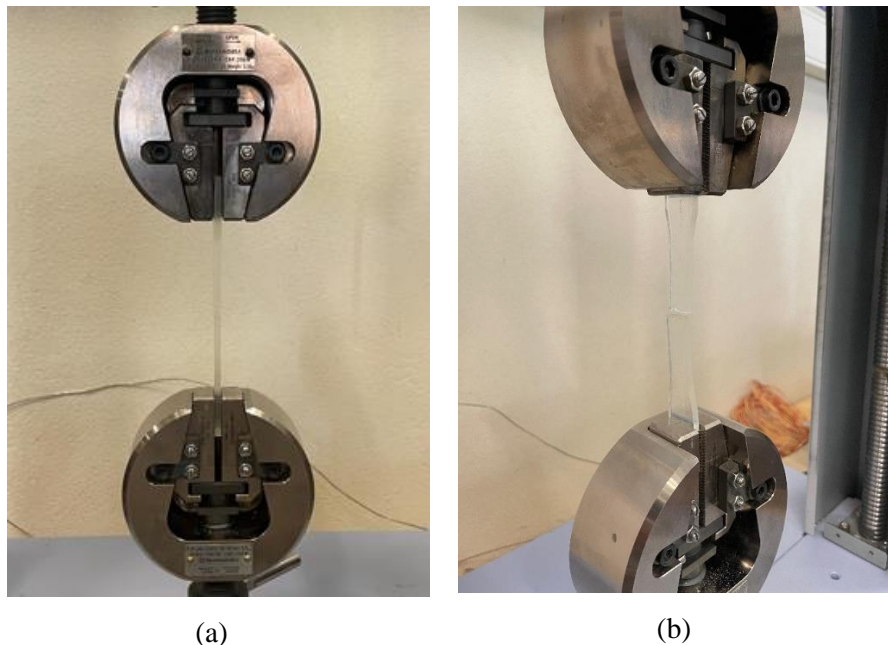


Figura 3.17 - Ensaio de tração no corpo de prova de resina epóxi: (a) posicionamento do corpo de prova nas garras e (b) momento de ruptura do material

3.3.1.3 Ensaio de tração dos corpos de prova do compósito fabricado

A norma usada para o teste de tração nos corpos de prova de resina epóxi foi a ASTM D638. Foram utilizados os mesmos parâmetros dos ensaios de tração nos corpos de prova de epóxi puro.

Foram realizados o ensaio de tração uniaxial em 5 amostras para cada fração volumétrica do compósito fabricado, 1%, 5% e 10%. Para realizar os ensaios, a máquina foi configurada para uma velocidade de 5 mm/min até que a amostra se rompesse. A taxa de deformação é de 0,1 mm/mm/min. Amostras com fração volumétrica de 1%, 5% e 10% durante realização do ensaio podem ser observadas na Figura 3.18.

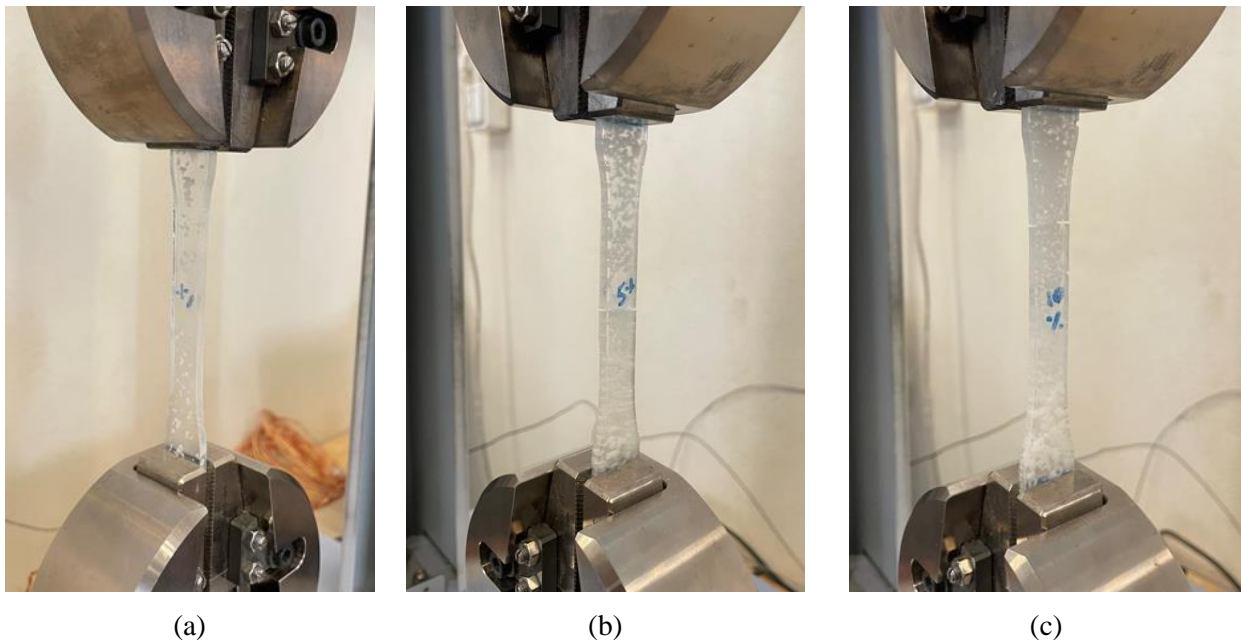


Figura 3.18 - Compósitos de (a) 1%; (b) 5% e (c) 10% posicionados para ensaio de tração

3.3.2 Ensaios de flexão

3.3.2.1 Ensaio de flexão dos corpos de prova de epóxi

As normas usadas para o ensaio de flexão nos corpos de prova de resina epóxi foram a ASTM D790 e a ISO 178 [47]. A ASTM D790 e ISO 178 descrevem um método de teste usado para determinar as propriedades de flexão de plásticos não reforçados e reforçados, incluindo compósitos de alto módulo, utilizando um sistema de carga de três

pontos para aplicar uma carga a uma viga simplesmente apoiada (corpo de prova). O método é, geralmente, aplicável tanto a materiais rígidos quanto semirrígidos, mas a resistência à flexão não pode ser determinada para aqueles materiais que não se rompem ou cedem na superfície externa do corpo de prova dentro do limite de deformação de 5%.

A norma ASTM D790 determina que a relação entre a distância dos apoios e a espessura deve ser igual a 16 ± 1 . Portanto, para o corpo de prova com 4 mm de espessura, a distância entre os pontos de apoio, L , é de 64 mm. O procedimento A, utilizado nesse ensaio, utiliza uma taxa de deformação de 0,01 mm/mm/min. O corpo de prova deve ser comprido o suficiente para permitir uma saliência em cada extremidade de pelo menos 10% do vão de suporte, mas em nenhum caso menos que 6,4 mm em cada extremidade. A saliência deve ser suficiente para evitar que o provete escorregue pelos suportes. Como o corpo de prova fabricado possui 80 mm de comprimento e a distância entre os apoios é de 64 mm, os vãos laterais são de 8 mm. Foi utilizada a norma ISO 178 para determinar a velocidade do ensaio de acordo com a espessura dos corpos de prova analisados.

Foram realizados os ensaios de flexão com 5 amostras. Para implementar os ensaios, a máquina foi configurada para uma velocidade de 2 mm/min até que a amostra se rompesse. A taxa de deformação é de 0,1 mm/mm/min. A Figura 3.19 mostra a flexão do corpo de prova de resina epóxi durante o ensaio.

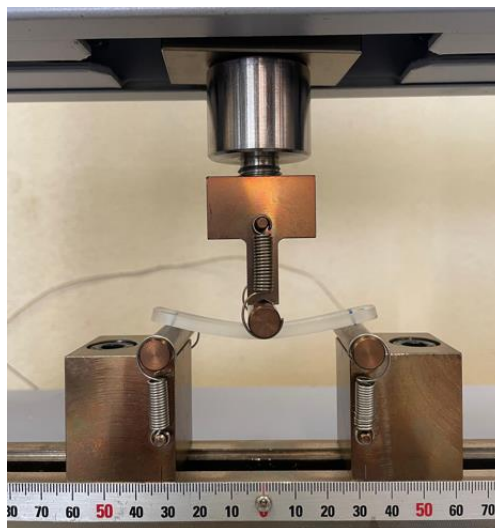


Figura 3.19 - Flexão do corpo de prova durante o ensaio

3.3.2.2 Ensaio de flexão dos corpos de prova do compósito fabricado

As normas usadas para o ensaio de flexão nos corpos de prova de resina epóxi foram a ASTM D790 e a ISO 178. Foram utilizados os mesmos parâmetros dos ensaios de flexão nos corpos de prova de epóxi puro.

Foram realizados o ensaio de flexão em 5 amostras para cada fração volumétrica, 1%, 5% e 10%, totalizando 15 corpos de prova ensaiados. Para realizar os ensaios, a máquina foi configurada para uma velocidade de 2 mm/min até que a amostra se rompesse. A taxa de deformação é de 0,1 mm/mm/min.

4 Resultados e discussões

O objetivo deste capítulo é caracterizar as propriedades mecânicas da borracha de silicone, da resina epóxi e do compósito de matriz de resina epóxi reforçado com partículas de borracha de silicone, através de ensaios mecânicos de tração e flexão.

4.1 Caracterização das propriedades mecânicas do silicone

4.1.1 Determinação da resistência à tração e deformação máxima

As amostras de proporção 1:1 foram denominadas LSR1 e as amostras de proporção 3:2 foram denominadas LSR2. A área da seção transversal de cada corpo de prova foi medida e esses dados podem ser vistos na Tabela 4.1. A área média foi de $17,98 \pm 0,58 \text{ mm}^2$.

Tabela 4.1 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de LSR para ensaio de tração

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)
LSR1.1	2,89	6,00	17,34
LSR1.2	2,95	6,00	17,70
LSR1.3	3,05	6,00	18,30
LSR1.4	2,97	6,00	17,82
LSR1.5	3,06	6,00	18,36
LSR2.1	2,93	6,00	17,58
LSR2.2	3,10	6,00	18,60
LSR2.3	3,15	6,00	18,90
LSR2.4	2,84	6,00	17,04
LSR2.5	3,02	6,00	18,12
Média	3,00	6,00	17,98
Desvio Padrão	0,10	0,00	0,58

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de tensão e deformação medidos durante o ensaio dos lotes de amostras LSR1 e LSR2, apresentam o aspecto típico representando nas Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

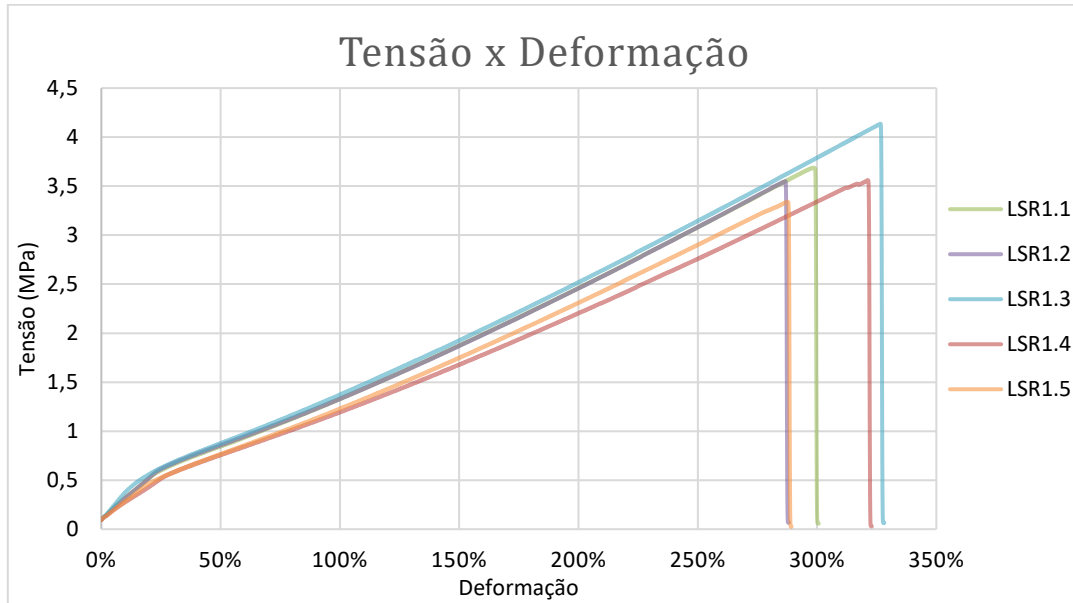


Figura 4.1 - Gráfico tensão x deformação para as amostras LSR1

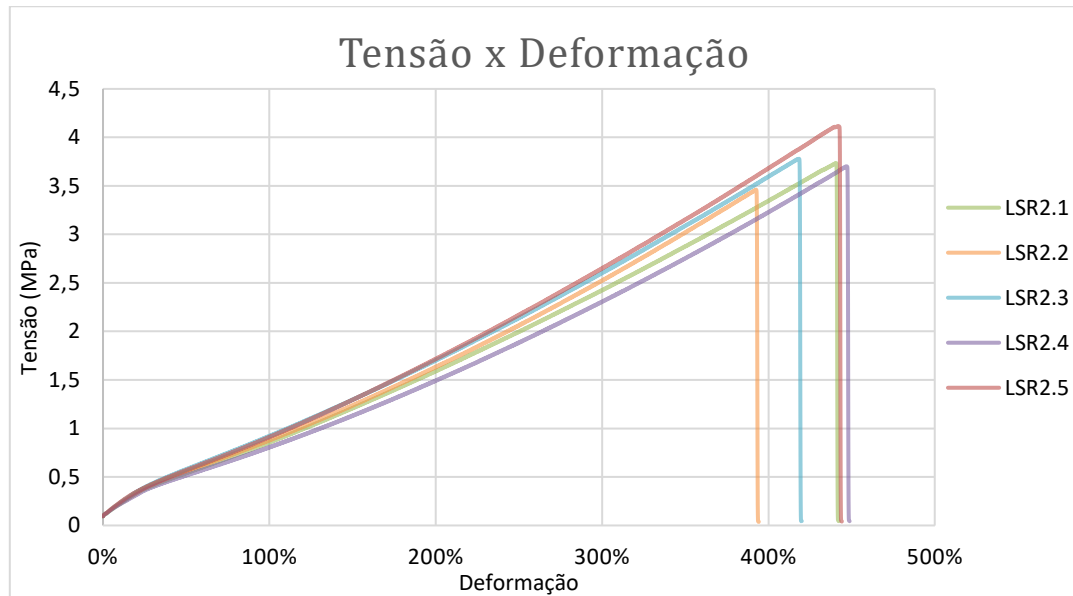


Figura 4.2 - Gráfico tensão x deformação para as amostras LSR2

A tensão de engenharia para o ensaio de tração foi calculada conforme equação 1 apresentada na seção 2.5.1. As tensões máximas para os dois lotes de corpos de prova analisados são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Tensões máximas de tração das amostras de LSR

Amostra	Tensão máxima (MPa)
LSR1.1	3,688
LSR1.2	3,551
LSR1.3	4,137
LSR1.4	3,561
LSR1.5	3,342
Média	3,656
Desvio Padrão	0,296
LSR2.1	3,735
LSR2.2	3,461
LSR2.3	3,779
LSR2.4	3,701
LSR2.5	4,114
Média	3,758
Desvio Padrão	0,2343
Média total	3,707
Desvio Padrão total	0,2574

Avaliando todas as amostras do primeiro lote, o valor da tensão máxima encontrado é de, aproximadamente, $3,66 \pm 0,30$ MPa e do segundo lote o valor é de, aproximadamente, $3,76 \pm 0,23$ MPa. A resistência à tração indicada pelo fabricante é de 9,3 MPa. Uma comparação entre as tensões máximas encontradas e o informado pelo fabricante pode observada nas Figura 4.3 e Figura 4.4.

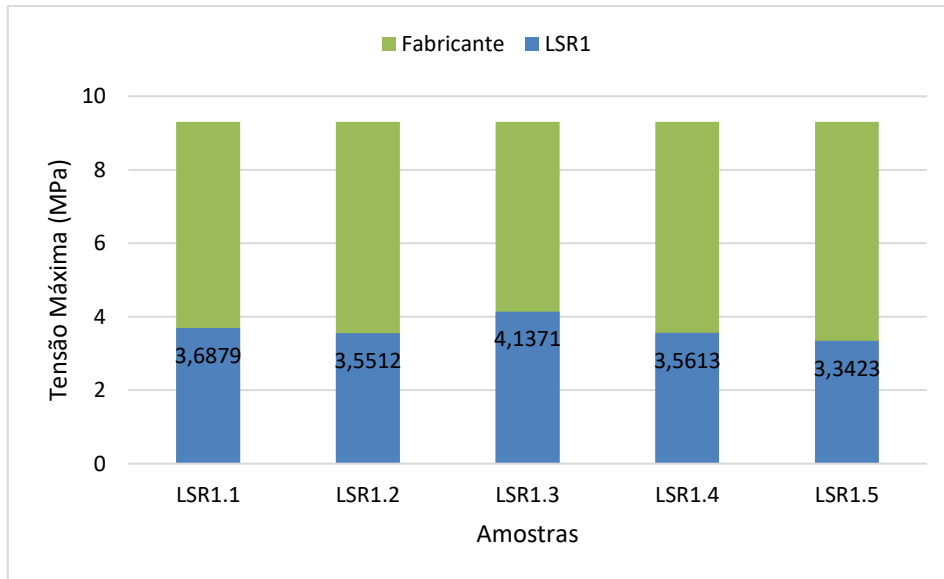


Figura 4.3 - Tensões máximas das amostras LSR1 em comparação com o informado pelo fabricante

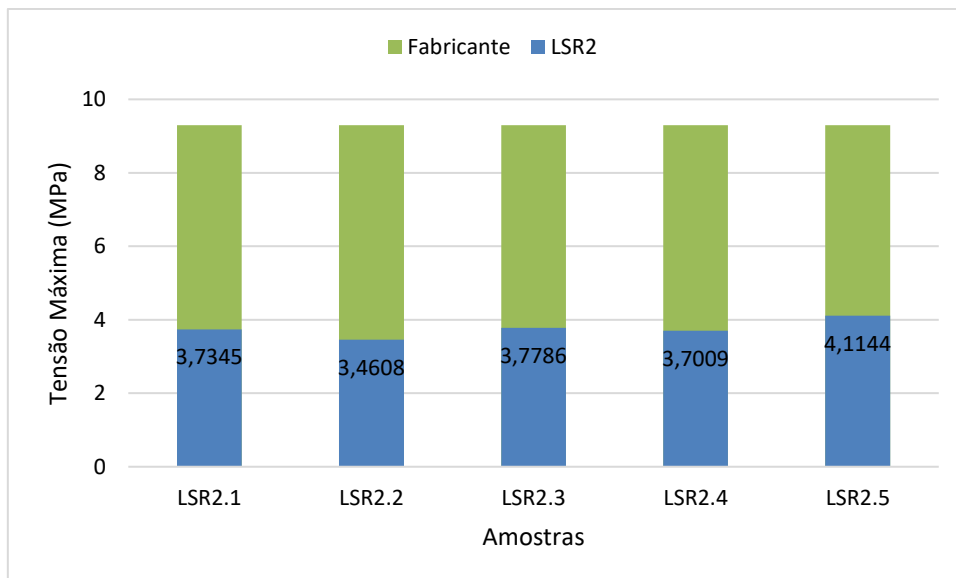


Figura 4.4 - Tensões máximas das amostras LSR2 em comparação com o informado pelo fabricante

Conforme observado na tabela e figuras apresentadas, a alteração na proporção dos componentes 'A' e 'B' não causou alteração significativa na Resistência à Tração do material analisado, mas provocou um aumento na deformação máxima. A comparação

entre os dois lotes pode ser observada de forma mais clara através do gráfico tensão x deformação mostrado na Figura 4.5.

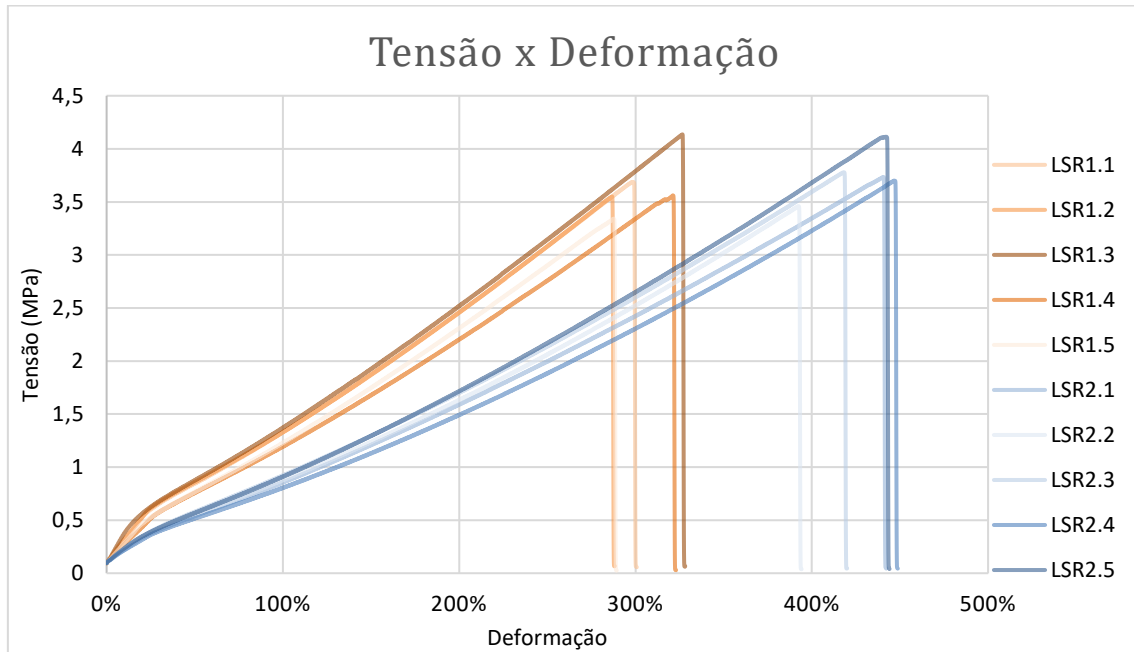


Figura 4.5 - Gráfico tensão x deformação comparativo entre as amostras LSR1 e LSR2

A deformação de engenharia foi calculada conforme equação 2 apresentada na seção 2.5.1. O comprimento inicial, que é a distância entre as garras durante o ensaio, foi de 60 mm. Os deslocamentos e deformações máximas são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras de LSR

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
LSR1.1	180,42	301%
LSR1.2	172,94	288%
LSR1.3	196,92	328%
LSR1.4	193,77	323%
LSR1.5	173,59	289%
Média	183,53	306%
Desvio Padrão	11,23	19%
LSR2.1	265,34	442%
LSR2.2	236,50	394%
LSR2.3	251,95	420%
LSR2.4	269,26	449%
LSR2.5	266,44	444%
Média	257,90	430%
Desvio Padrão	13,70	23%
Média total	220,71	368%
Desvio Padrão total	40,94	68%

O valor médio de Resistência à Tração encontrado no primeiro lote, $3,66 \pm 0,30$ MPa, está 61% abaixo do valor previsto na ficha de especificação técnica do fabricante, 9,3 MPa. O valor médio de deformação máxima encontrado no primeiro lote, $306\% \pm 19\%$, está 56% abaixo do alongamento máximo fornecido pelo fabricante, 700%. Somente o primeiro lote será utilizado como parâmetro devido às propriedades apresentadas pelo fabricante utilizarem a proporção 1:1 para mistura dos componentes ‘A’ e ‘B’.

Alguns fatores podem explicar os valores inferiores ao esperado, conforme mencionados abaixo:

- Extrema dificuldade de manipulação do material devido ao alto valor de viscosidade dinâmica, impedindo uma mistura eficiente dos componentes de forma manual. O Silopren LSR 2740 é utilizado para moldagem por injeção;
- Devido, também, à alta viscosidade, a etapa de submeter o material a uma câmara de vácuo para degaseificação foi ineficaz, resultando em corpos de prova com considerável presença de bolhas de ar, o que compromete a

resistência do material (tanto na diminuição da área resistente quanto na criação de concentradores de tensão);

- Durante a realização dos ensaios de tração não foi utilizado um extensômetro, e, por isso, o deslocamento medido é o deslocamento do travessão móvel da máquina de ensaios. Desta forma, a rigidez do sistema de tração pode influenciar os resultados obtidos;
- Apesar dos ajustes realizados, durante o ensaio pode ter ocorrido um pequeno escorregamento das amostras em relação às garras.

4.1.2 Determinação do módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade (E) para o ensaio de tração foi calculado conforme Figura 2.8 apresentada na seção 2.5.1. Um exemplo pode ser visualizado na Figura 4.6 para a amostra LSR1.1. O módulo de elasticidade para essa amostra é de 1,1494 MPa.

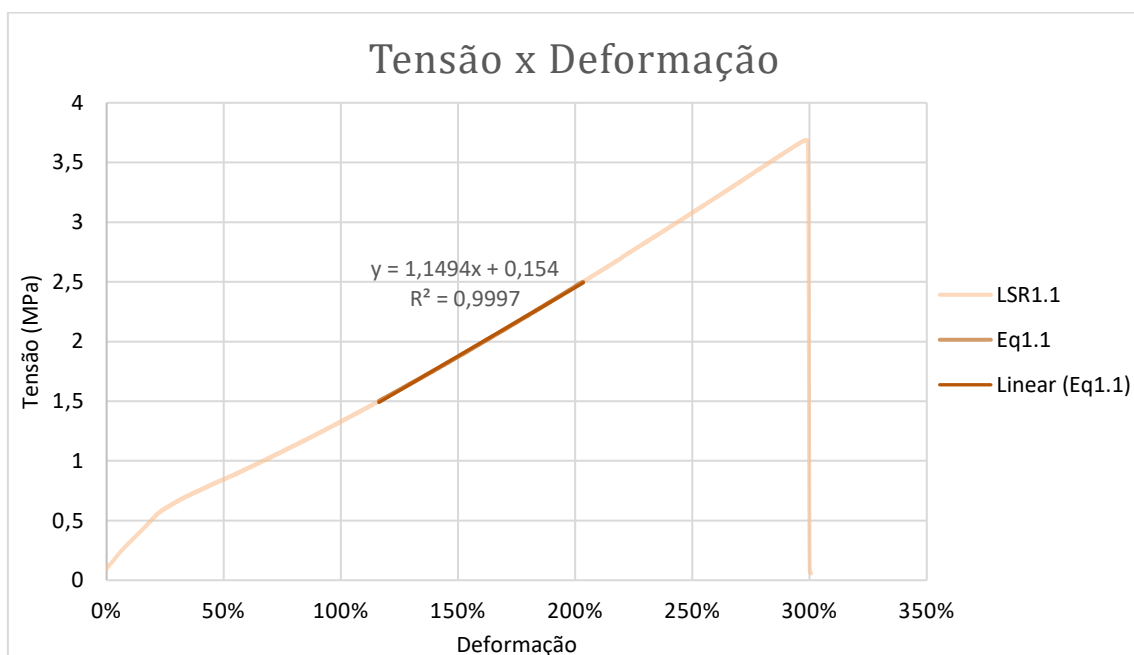


Figura 4.6 - Inclinação da reta no gráfico tensão x deformação

Os módulos de elasticidade das amostras analisadas podem ser observados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade (E) para o ensaio de tração das amostras de LSR

Amostra	E (MPa)
LSR1.1	1,149
LSR1.2	1,149
LSR1.3	1,155
LSR1.4	1,054
LSR1.5	1,117
Média	1,125
Desvio Padrão	0,042
LSR2.1	0,8329
LSR2.2	0,8794
LSR2.3	0,8820
LSR2.4	0,8270
LSR2.5	0,9117
Média	0,8666
Desvio Padrão	0,0358
Média total	0,9957
Desvio Padrão total	0,1409

Para as amostras analisadas o valor médio do módulo de elasticidade para o primeiro lote foi de $1,12 \pm 0,04$ MPa e para o segundo lote foi de $0,87 \pm 0,04$ MPa.

O módulo de elasticidade não é especificado na ficha técnica do material, mas a dureza Shore A de 38 sugere que o Silopren LSR 2740 pode ser considerado uma borracha de silicone de baixo a médio módulo [48].

Com base no valor apresentado pode concluir-se que:

- Os valores do módulo de elasticidade das amostras de silicone analisadas foram superiores aos encontrados na bibliografia consultada, podendo chegar a valores inferiores a 0,4 MPa [49]. Este fato pode ser, de novo, justificado pela alta viscosidade do material, impossibilitando mistura dos componentes de forma manual e degaseificação de forma eficaz, além da ausência de extensômetros e possíveis escorregamentos durante os ensaios, conforme já mencionado.

4.2 Caracterização das propriedades mecânicas da resina epóxi

Para caracterização da resina epóxi foram realizados ensaios mecânicos de tração e flexão.

4.2.1 Determinação da resistência à tração e deformação máxima

As amostras de resina epóxi foram denominadas como EP e a área da seção transversal de cada corpo de prova foi medida e esses dados podem ser vistos na Tabela 4.5. A área média foi de $50,51 \pm 3,92 \text{ mm}^2$.

Tabela 4.5 – Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de EP para ensaio de tração

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)
EP1	4,40	12,67	55,75
EP2	4,15	12,71	52,75
EP3	3,70	12,71	47,03
EP4	3,97	12,75	50,62
EP5	3,65	12,71	46,39
Média	3,97	12,71	50,51
Desvio Padrão	0,31	0,03	3,92

A tensão de engenharia para o ensaio de tração foi calculada conforme equação 1 apresentada na seção 2.5.1. As tensões máximas são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Tensões máximas de tração das amostras de EP

Amostra	Tensão máxima (MPa)
EP1	34,88
EP2	45,19
EP3	34,46
EP4	42,35
EP5	43,11
Média	40,00
Desvio Padrão	4,98

Avaliando todas as amostras, o valor da tensão máxima encontrado é de, aproximadamente, $40,00 \pm 4,98$ MPa. O valor de resistência à tração fornecido pelo fabricante é de 49 MPa. Uma comparação entre as tensões máximas e o informado pelo fabricante pode observada na Figura 4.7.

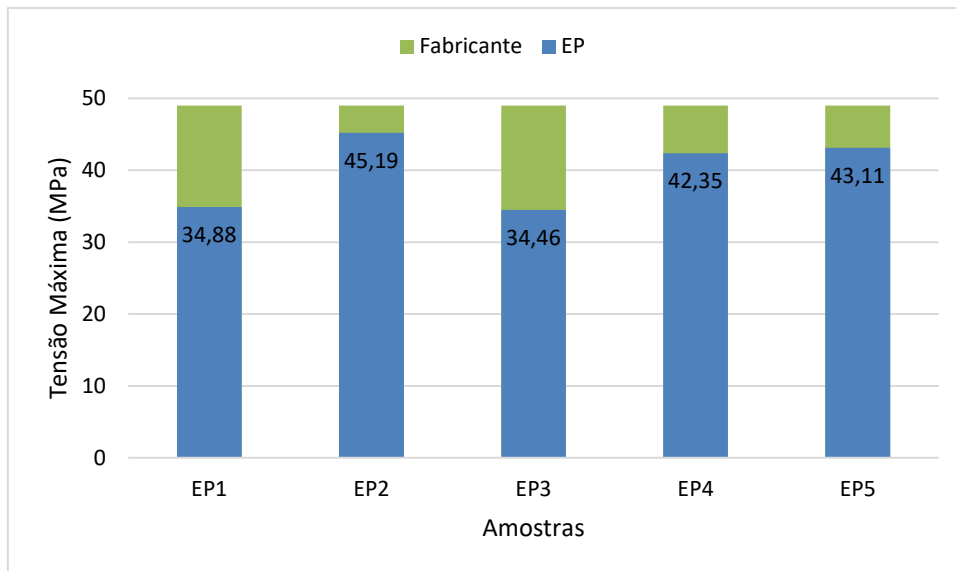


Figura 4.7 - Tensões máximas de tração das amostras EP em comparação com o informado pelo fabricante

A deformação de engenharia foi calculada conforme equação 2 apresentada na seção 2.5.1. O comprimento inicial, que é a distância entre as garras durante o ensaio, foi de 110 mm. Os deslocamentos e deformações máximas são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras de EP

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
EP1	2,41	2,19%
EP2	2,60	2,36%
EP3	2,76	2,51%
EP4	2,43	2,21%
EP5	2,72	2,47%
Média	2,58	2,35%
Desvio Padrão	0,16	0,15%

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de tensão e deformação medidos durante o ensaio apresentam o aspecto típico representando na Figura 4.8.

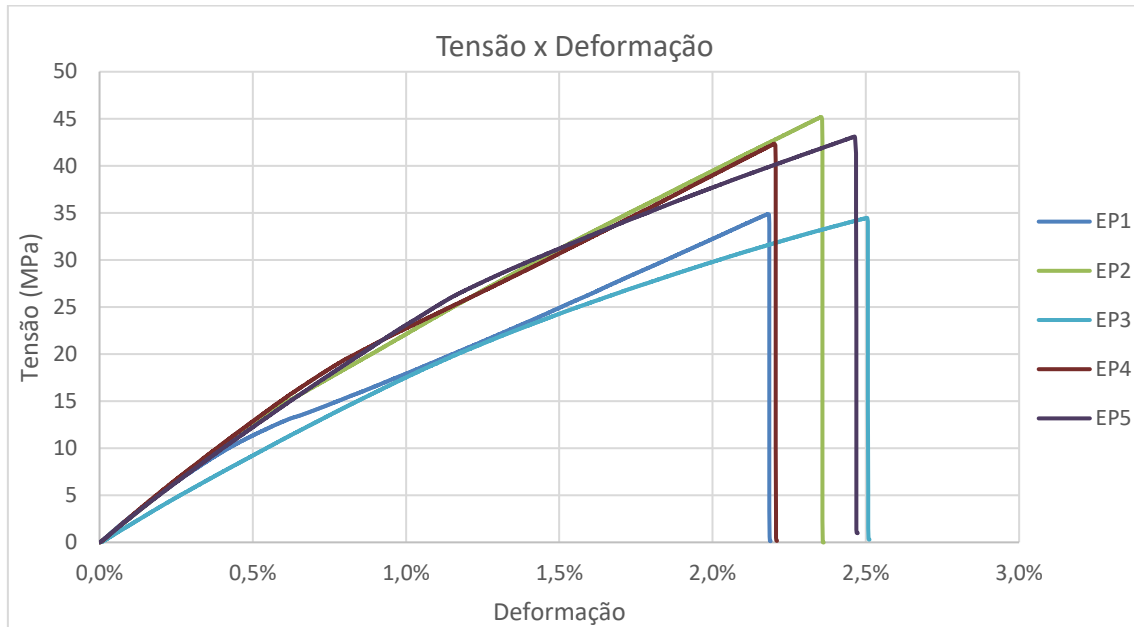


Figura 4.8 - Gráfico tensão x deformação para o ensaio de tração

O valor médio de tensão máxima encontrado, $40,00 \pm 4,98$ MPa, é um valor considerável visto que está próximo do valor fornecido pelo fabricante. O valor médio de deformação máxima encontrado, $2,35 \pm 0,15$ %, está, aproximadamente, 47% acima do alongamento máximo fornecido pelo fabricante, 1,6 %.

Alguns fatores podem explicar os valores acima do esperado para a deformação máxima, conforme mencionados abaixo:

- O processo de cura do material não foi totalmente controlado, visto que o forno utilizado é para secagem de materiais e durante o processo o grau de cura e a taxa de reação afeta fortemente o processamento e as propriedades físicas das resinas epóxi curadas [50].

4.2.2 Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de tração

O módulo de elasticidade para o ensaio de tração foi calculado conforme Figura 2.8 apresentada na seção 2.5.1. Os módulos de elasticidade das amostras analisadas podem ser observados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Módulo de elasticidade para o ensaio de tração das amostras de EP

Amostra	E (MPa)
EP1	2649,30
EP2	2584,40
EP3	1947,70
EP4	2642,00
EP5	2489,50
Média	2462,58
Desvio Padrão	294,84

Para as amostras analisadas, o valor médio do módulo de elasticidade (E) foi de $2462,58 \pm 294,84$ MPa, aproximadamente 25% abaixo do módulo de elasticidade fornecido pelo fabricante, 3300 MPa.

O valor abaixo do esperado pode ser justificado, novamente, pelo processo de cura do material não ter sido totalmente controlado, afetando as propriedades mecânicas da resina curada.

4.2.3 Determinação da resistência à flexão e deformação máxima

As amostras de resina epóxi foram denominadas novamente como EP. A área da seção transversal de cada corpo de prova foi medida e esses dados podem ser vistos na Tabela 4.9. A área média foi de $40,72 \pm 4,17$ mm².

Tabela 4.9 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de EP para ensaio de flexão

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm²)
EP1	9,77	3,81	37,22
EP2	9,81	4,30	42,18
EP3	9,77	4,28	41,82
EP4	9,74	4,76	46,36
EP5	9,60	3,75	36,00
Média	9,74	4,18	40,72
Desvio Padrão	0,08	0,41	4,17

A tensão de engenharia para o ensaio de flexão foi calculada conforme equação 4 apresentada na seção 2.5.2. A distância entre os pontos de apoio, L , é de 64 mm. As tensões máximas são apresentadas na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de EP

Amostra	Tensão máxima (MPa)
EP1	58,05
EP2	64,22
EP3	62,65
EP4	67,21
EP5	70,01
Média	64,43
Desvio Padrão	4,55

Avaliando todas as amostras, o valor da tensão máxima encontrado é de, aproximadamente, $64,43 \pm 4,55$ MPa. A resistência à flexão fornecida pelo fabricante é de 114 MPa. Uma comparação entre as tensões máximas e o informado pelo fabricante pode observada na Figura 4.9.

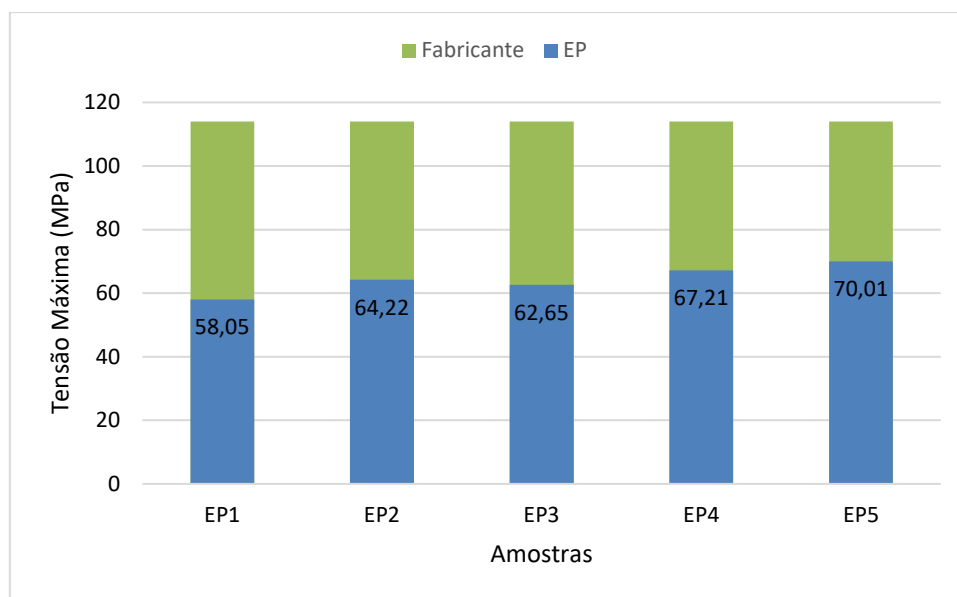


Figura 4.9 – Tensões máximas de flexão das amostras EP em comparação com o informado pelo fabricante

A deformação de engenharia para o ensaio de flexão foi calculada conforme equação 5 apresentada na seção 2.5.2. Os deslocamentos e deformações máximas são apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras de EP

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
EP1	3,57	1,99%
EP2	3,59	2,26%
EP3	3,70	2,32%
EP4	3,33	2,32%
EP5	3,74	2,06%
Média	3,59	2,19%
Desvio Padrão	0,16	0,16%

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de tensão e deformação medidos durante o ensaio de flexão apresentam o aspecto típico representando na Figura 4.10.

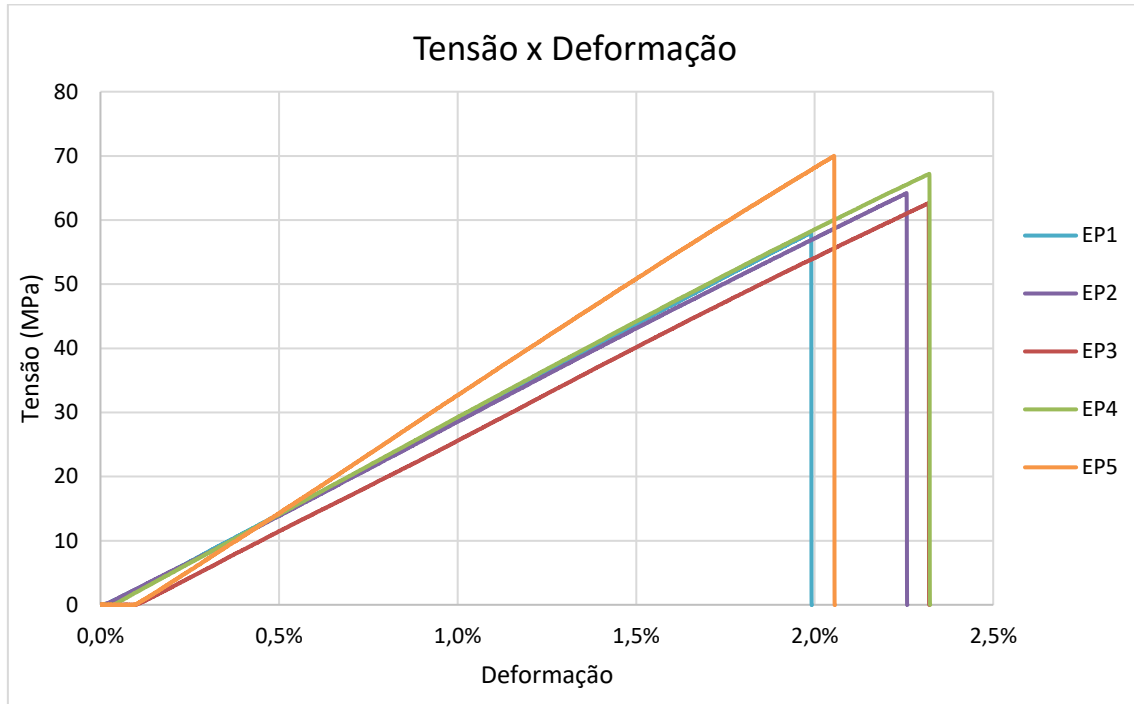


Figura 4.10 - Gráfico tensão x deformação das amostras EP para o ensaio de flexão

O valor médio de tensão máxima encontrado foi de $64,43 \pm 4,55$ MPa, que está, aproximadamente, 43% abaixo do valor de resistência máxima prevista na ficha de especificação técnica do fabricante, 114 MPa. O valor médio de deformação máxima encontrado, $2,19 \% \pm 0,16 \%$, está, cerca de 60% abaixo do alongamento máximo fornecido pelo fabricante, 5,5 %.

Alguns fatores podem explicar os valores abaixo do esperado, conforme mencionados abaixo:

- Os corpos de prova que iniciaram o processo de cura com ausência de vazios, após processo de polimerização, apresentem pequenas bolhas de ar, o que compromete a resistência mecânica do material;

- Novamente, a ausência de um extensômetro, possíveis escorregamentos durante o ensaio e ausência de um processo de cura mais controlado também devem ser levados em consideração.

4.2.4 Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de flexão

O módulo de elasticidade para o ensaio de flexão, também conhecido como módulo de flexão, foi calculado conforme Figura 2.8 apresentada na seção 2.5.1. Os valores determinados de módulos de elasticidade das amostras analisadas podem ser observados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Módulo de elasticidade (E) para o ensaio de flexão das amostras de EP

Amostra	E (MPa)
EP1	2994,30
EP2	2830,80
EP3	2854,00
EP4	3029,60
EP5	3575,90
Média	3056,92
Desvio Padrão	302,62

Para as amostras analisadas, o valor médio do módulo de elasticidade foi de $3056,92 \pm 302,62$ MPa, um valor considerável visto que a ficha de especificação técnica do fabricante prevê um módulo de elasticidade de 3400 MPa para o ensaio de flexão.

4.3 Caracterização das propriedades mecânicas dos compósitos fabricados

As amostras dos compósitos fabricados foram denominadas conforme a fração volumétrica das partículas de silicone, sendo elas: C1%, C5% e C10%. Como a matriz dos compósitos é de resina epóxi, todos os parâmetros de ensaios, medidas dos corpos de prova e cálculos efetuados estão conforme realizados para o epóxi puro.

4.3.1 Determinação da resistência à tração e deformação máxima

A área da seção transversal de cada corpo de prova foi medida e esses dados podem ser vistos na Tabela 4.13. A área média foi de $47,92 \pm 2,49$ mm².

Tabela 4.13 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova dos compósitos para ensaio de tração

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Área (mm²)
1_C1%	3,85	12,70	48,90
2_C1%	4,10	12,64	51,82
3_C1%	3,99	12,56	50,11
4_C1%	3,84	12,60	48,38
5_C1%	4,11	12,69	52,16
1_C5%	3,39	12,60	42,71
2_C5%	3,72	12,62	46,95
3_C5%	3,49	12,74	44,46
4_C5%	3,77	12,61	47,54
5_C5%	3,86	12,68	48,94
1_C10%	3,95	12,68	50,09
2_C10%	3,70	12,52	46,32
3_C10%	3,80	12,52	47,58
4_C10%	3,80	12,41	47,16
5_C10%	3,67	12,45	45,69
Média	3,80	12,60	47,92
Desvio Padrão	0,19	0,09	2,49

A tensão de engenharia para o ensaio de tração foi calculada conforme equação 1, apresentada na seção 2.5.1. Os dados de tensão máxima são apresentados nas Tabela 4.14, Tabela 4.15 e Tabela 4.16.

Tabela 4.14 - Tensões máximas de tração das amostras C1%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C1%	25,67
2_C1%	26,79
3_C1%	21,87
4_C1%	23,82
5_C1%	21,00
Média	23,83
Desvio Padrão	2,45

Tabela 4.15 - Tensões máximas de tração das amostras C5%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C5%	11,75
2_C5%	11,85
3_C5%	13,42
4_C5%	11,05
5_C5%	13,36
Média	12,28
Desvio Padrão	1,05

Tabela 4.16 - Tensões máximas de tração das amostras C10%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C10%	12,83
2_C10%	12,88
4_C10%	11,22
5_C10%	11,17
5_C10%	12,97
Média	12,21
Desvio Padrão	0,93

Avaliando todas as amostras, o valor da tensão máxima encontrado é de, aproximadamente, $23,83 \pm 2,45$ MPa para os compósitos de 1%, $12,28 \pm 1,05$ MPa para os

compósitos de 5% e $12,21 \pm 0,93$ MPa para os compósitos de 10%. Uma comparação entre as tensões máximas de tração dos compósitos e do epóxi puro pode ser observada nas Figura 4.11, Figura 4.12 e Figura 4.13.

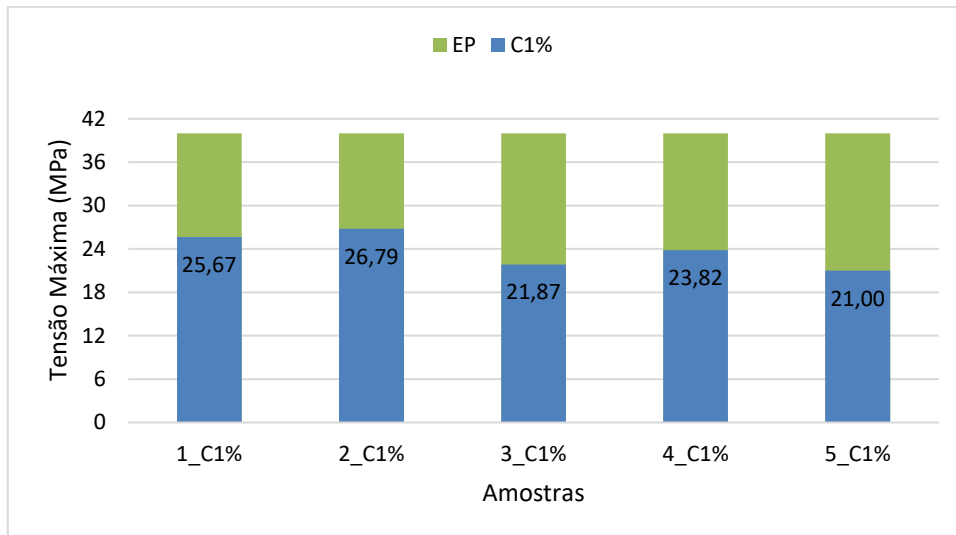


Figura 4.11 – Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C1% e EP

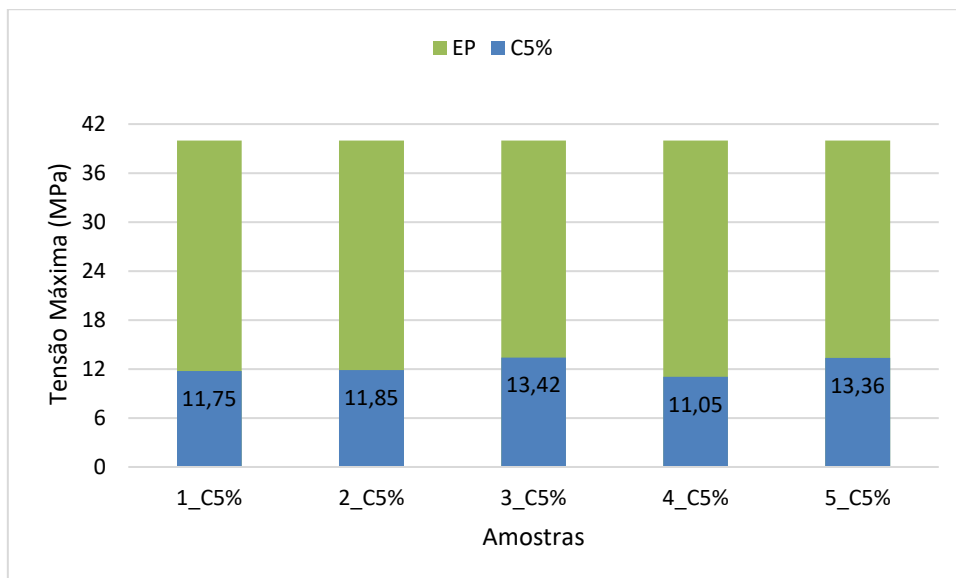


Figura 4.12 - Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C5% e EP

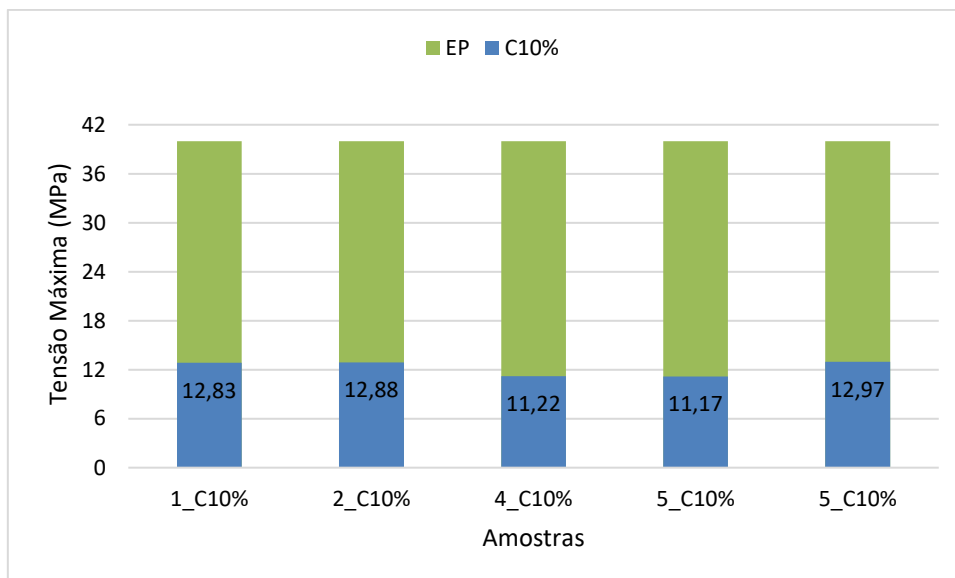


Figura 4.13 - Comparativo entre tensões máximas de tração das amostras C10% e EP

A deformação de engenharia foi calculada conforme equação 2 apresentada na seção 2.5.1. O comprimento inicial foi de 110 mm. Os deslocamentos e deformações máximas são apresentados nas Tabela 4.17, Tabela 4.18 e Tabela 4.19.

Tabela 4.17 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C1%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C1%	1,20	1,09%
2_C1%	1,24	1,13%
3_C1%	1,00	0,91%
4_C1%	1,22	1,11%
5_C1%	1,04	0,94%
Média	1,14	1,04%
Desvio Padrão	0,112	0,10%

Tabela 4.18 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C5%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C5%	0,760	0,69%
2_C5%	0,696	0,63%
3_C5%	0,756	0,63%
4_C5%	0,695	0,63%
5_C5%	0,763	0,69%
Média	0,734	0,66%
Desvio Padrão	0,0352	0,03%

Tabela 4.19 - Deslocamentos e deformações máximas de tração das amostras C10%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C10%	0,672	0,61%
2_C10%	0,768	0,70%
3_C10%	0,776	0,71%
4_C10%	0,797	0,72%
5_C10%	0,780	0,71%
Média	0,759	0,69%
Desvio Padrão	0,0495	0,05%

Avaliando todas as amostras, o valor de deformação máxima encontrado é de, aproximadamente, $1,04\% \pm 0,10\%$ para os compósitos de 1%, $0,66\% \pm 0,03\%$ para os compósitos de 5% e $0,69\% \pm 0,05\%$ para os compósitos de 10%.

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de tensão e deformação medidos durante o ensaio de tração dos compósitos apresentam o aspecto típico representando nas Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16.

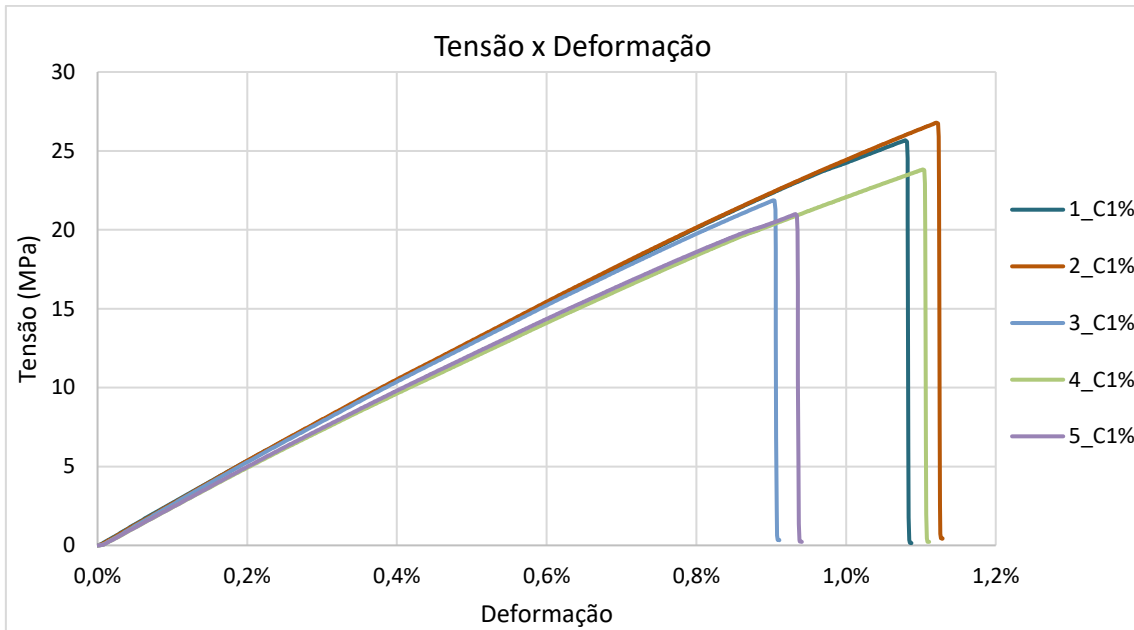


Figura 4.14 - Gráfico tensão x deformação das amostras C1% para o ensaio de tração

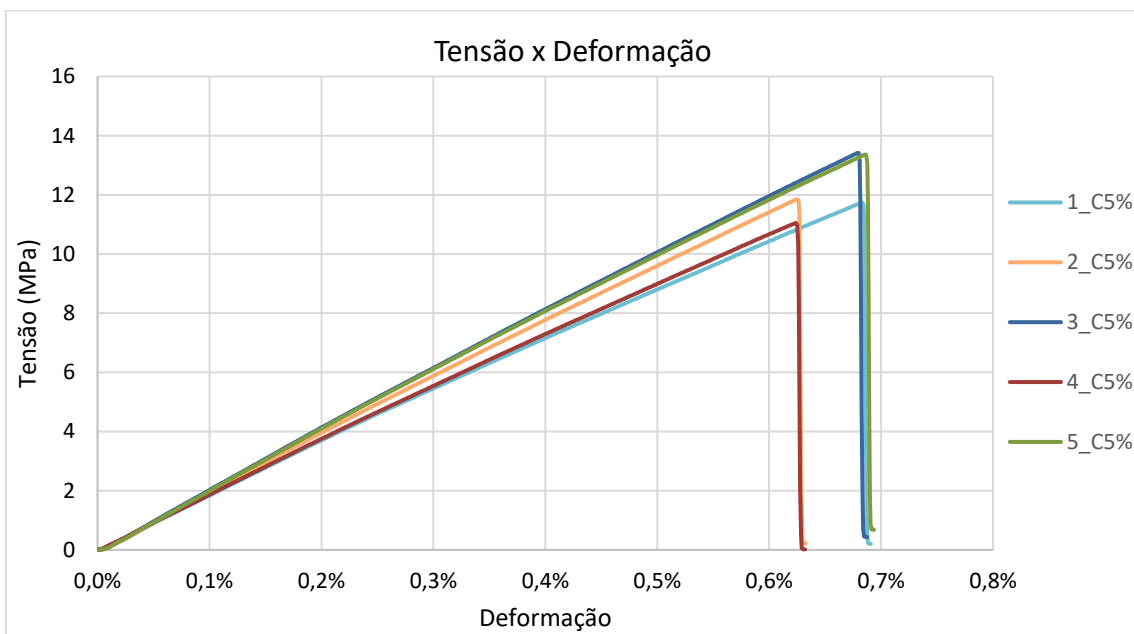


Figura 4.15 - Gráfico tensão x deformação das amostras C5% para o ensaio de tração

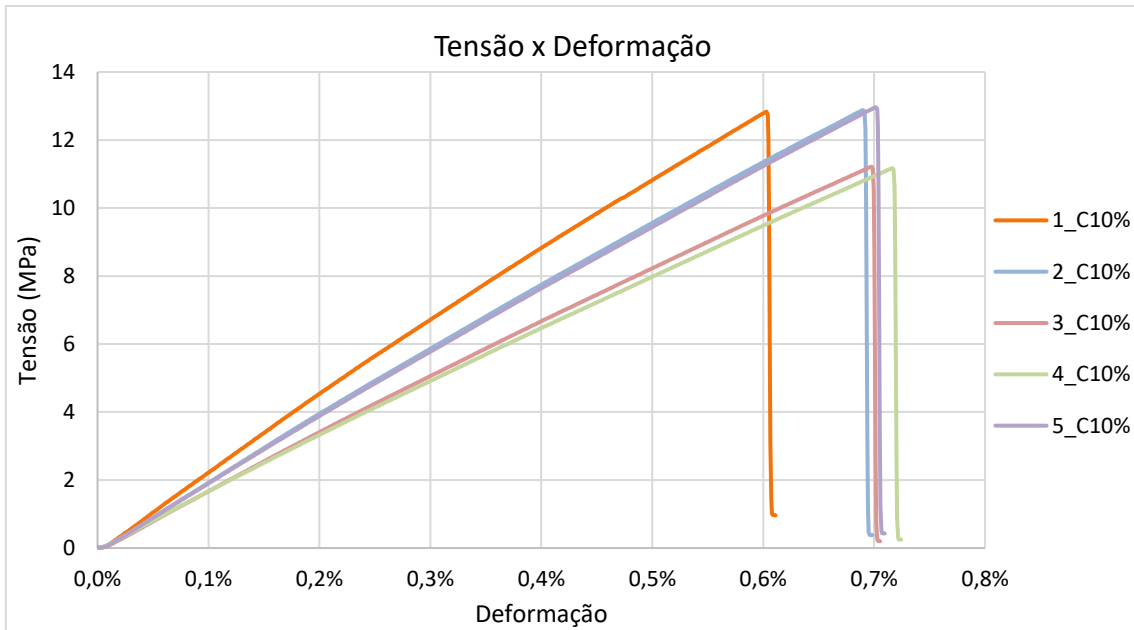


Figura 4.16 - Gráfico tensão x deformação das amostras C10% para o ensaio de tração

Uma comparação entre os compósitos fabricados e a resina pura pode ser observada de forma mais clara na Figura 4.17.

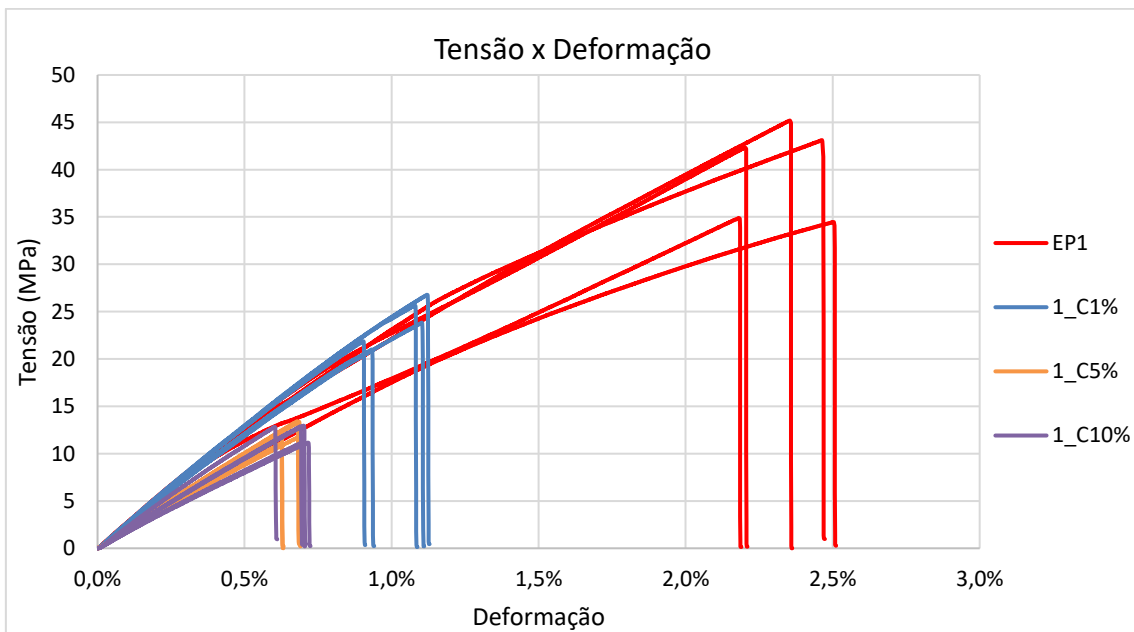


Figura 4.17 - Gráfico tensão x deformação comparativo entre as amostras C1%, C5%, C10% e EP

4.3.2 Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de tração

O módulo de elasticidade para o ensaio de tração foi calculado conforme Figura 2.8 apresentada na seção 2.5.1. Os módulos de elasticidade das amostras dos compósitos analisadas podem ser observados nas Tabela 4.20, Tabela 4.21 e Tabela 4.22.

Tabela 4.20 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C1%

Amostra	E (MPa)
1_C1%	2711,30
2_C1%	2723,80
3_C1%	2720,80
4_C1%	2536,30
5_C1%	2565,10
Média	2651,46
Desvio Padrão	92,66

Tabela 4.21 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C5%

Amostra	E (MPa)
1_C5%	1876,40
2_C5%	2047,30
3_C5%	2121,10
4_C5%	1899,60
5_C5%	2112,10
Média	2011,30
Desvio Padrão	116,39

Tabela 4.22 - Módulo de elasticidade de tração das amostras de C10%

Amostra	E (MPa)
1_C10%	2337,60
2_C10%	2037,40
3_C10%	1760,70
4_C10%	1703,60
5_C10%	1997,30
Média	1967,32
Desvio Padrão	252,57

Para as amostras analisadas, o valor médio do módulo de elasticidade no ensaio de tração foi de $2651,46 \pm 92,66$ MPa para os compósitos de 1%, $2011,30 \pm 116,39$ MPa para os compósitos de 5% e $1967,32 \pm 252,57$ MPa para os compósitos de 10%.

4.3.3 Determinação da resistência à flexão e deformação máxima

A área da seção transversal de cada corpo de prova foi medida e esses dados podem ser vistos na Tabela 4.23. A área média foi de $39,53 \pm 3,56$ mm².

Tabela 4.23 - Medidas da área da seção transversal dos corpos de prova de compósitos para ensaio de flexão

Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm²)
1_C1%	9,75	4,03	39,29
2_C1%	9,79	4,56	44,64
3_C1%	9,84	4,40	43,30
4_C1%	9,80	4,35	42,63
5_C1%	9,85	4,67	46,00
1_C5%	9,83	4,06	39,91
2_C5%	9,80	3,85	37,73
3_C5%	9,78	3,58	35,01
4_C5%	9,90	3,89	38,51
5_C5%	9,82	3,76	36,92
1_C10%	9,76	3,96	38,65
2_C10%	9,71	3,92	38,06
3_C10%	9,77	3,66	35,76
4_C10%	9,77	4,34	42,40
5_C10%	9,77	3,50	34,20
Média	9,80	4,04	39,53
Desvio Padrão	0,05	0,36	3,56

A tensão de engenharia para o ensaio de flexão foi calculada conforme equação 4 apresentada na seção 2.5.2. As tensões máximas são apresentadas nas Tabela 4.24, Tabela 4.25 e Tabela 4.26.

Tabela 4.24 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C1%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C1%	55,08
2_C1%	49,94
3_C1%	31,52
4_C1%	53,90
5_C1%	55,88
Média	49,27
Desvio Padrão	10,18

Tabela 4.25 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C5%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C5%	28,91
2_C5%	39,52
3_C5%	30,81
4_C5%	38,75
5_C5%	36,08
Média	34,82
Desvio Padrão	4,75

Tabela 4.26 - Tensões máximas para o ensaio de flexão das amostras de C10%

Amostra	Tensão máxima (MPa)
1_C10%	23,31
2_C10%	22,76
3_C10%	27,89
4_C10%	25,38
5_C10%	27,00
Média	25,27
Desvio Padrão	2,24

Avaliando todas as amostras, o valor da tensão máxima encontrado é de, aproximadamente, $49,27 \pm 10,18$ MPa para o compósito de 1%, $34,85 \pm 4,75$ MPa para o compósito de 5% e $25,27 \pm 2,24$ MPa para o compósito de 10%. Uma comparação entre as

tensões máximas médias de flexão dos compósitos e do epóxi pode ser observada nas Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20.

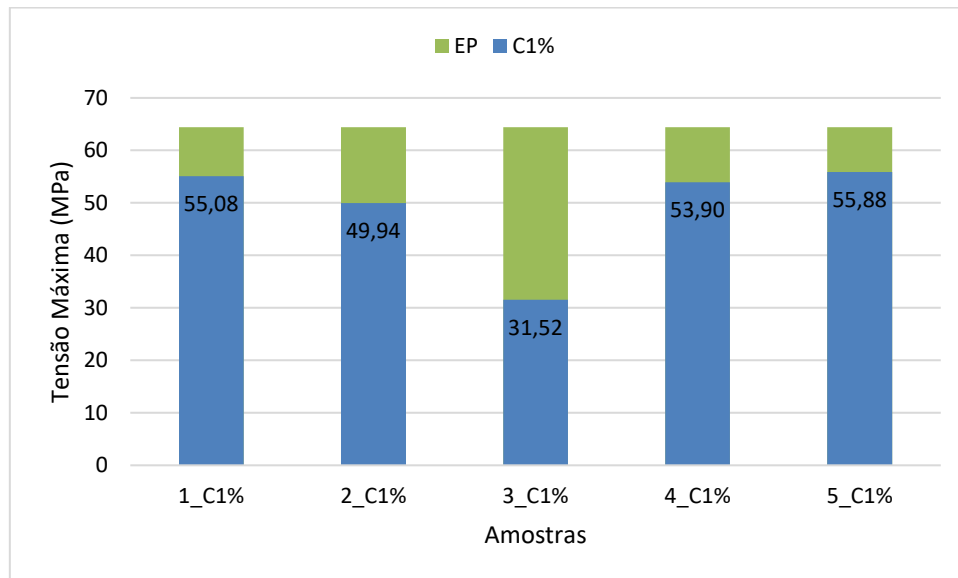


Figura 4.18 - Comparativo entre as tensões máximas de flexão das amostras C1% e EP

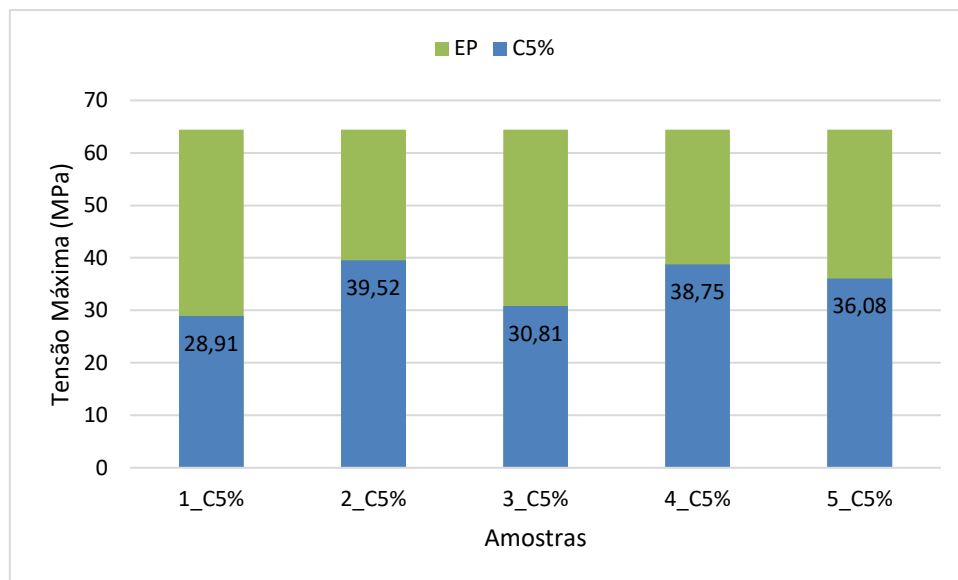


Figura 4.19 - Comparativo entre tensões máximas de flexão das amostras C5% e EP

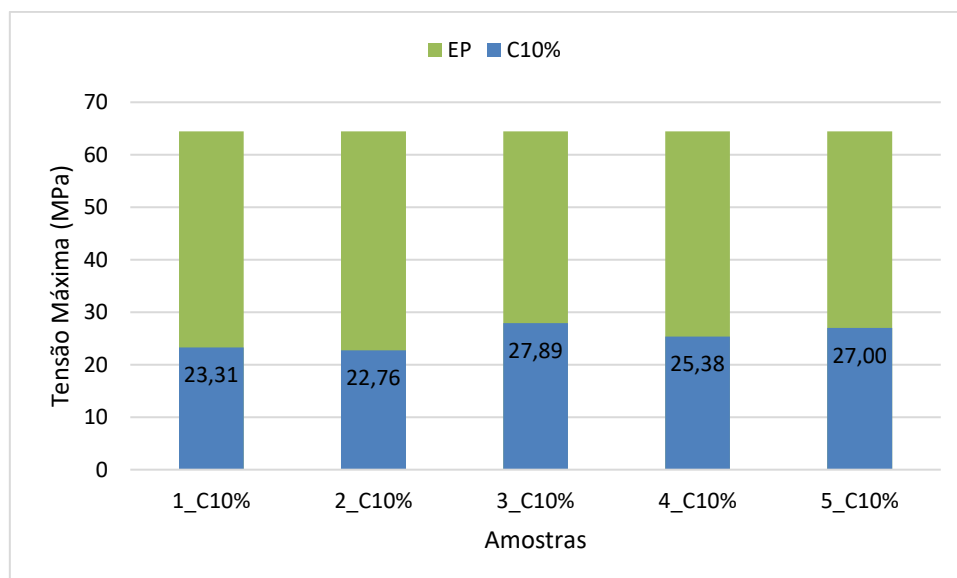


Figura 4.20 - Comparativo entre tensões máximas de flexão das amostras C10% e EP

A deformação de engenharia foi calculada conforme equação 2 apresentada na seção 2.5.1. Os deslocamentos e deformações máximas são apresentados nas Tabela 4.27, Tabela 4.28 e Tabela 4.29.

Tabela 4.27 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C1%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C1%	3,84	2,26%
2_C1%	3,35	2,24%
3_C1%	2,05	1,32%
4_C1%	3,96	2,53%
5_C1%	3,52	2,41%
Média	3,34	2,15%
Desvio Padrão	0,765	0,48%

Tabela 4.28 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C5%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C5%	2,40	1,43%
2_C5%	2,94	1,66%
3_C5%	2,60	1,36%
4_C5%	2,75	1,57%
5_C5%	2,52	1,39%
Média	2,64	1,48%
Desvio Padrão	0,209	0,13%

Tabela 4.29 - Deslocamentos e deformações máximas de flexão das amostras C10%

Amostra	Deslocamento máximo (mm)	Deformação máxima (%)
1_C10%	1,97	1,14%
2_C10%	2,28	1,31%
3_C10%	2,61	1,40%
4_C10%	2,07	1,32%
5_C10%	2,38	1,22%
Média	2,26	1,28%
Desvio Padrão	0,255	0,10%

Avaliando todas as amostras, o valor da deformação máxima encontrado é de, aproximadamente, $2,15\% \pm 0,48\%$ para o compósito de 1%, $1,48\% \pm 0,13\%$ para o compósito de 5% e $1,28\% \pm 0,10\%$ para o compósito de 10%.

Quando representados graficamente, o conjunto de valores de tensão e deformação medidos durante o ensaio de flexão dos compósitos apresentam o aspecto típico representando nas Figura 4.21, Figura 4.22 e Figura 4.23.

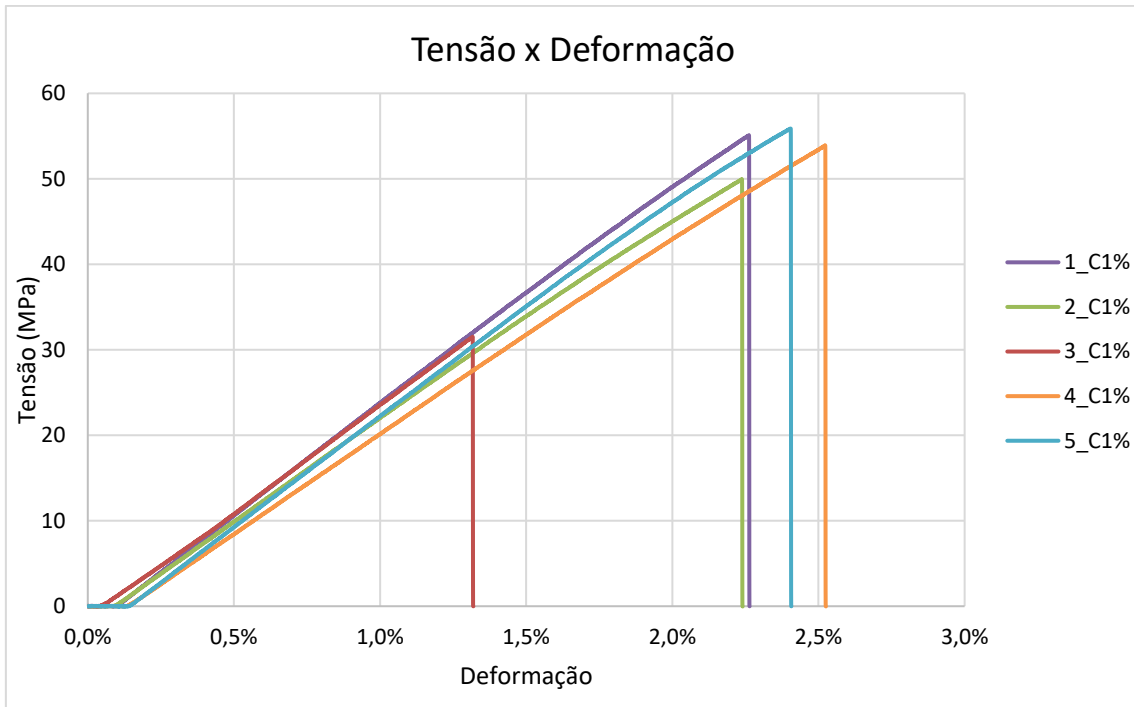


Figura 4.21 - Gráfico tensão x deformação das amostras C1% para o ensaio de flexão

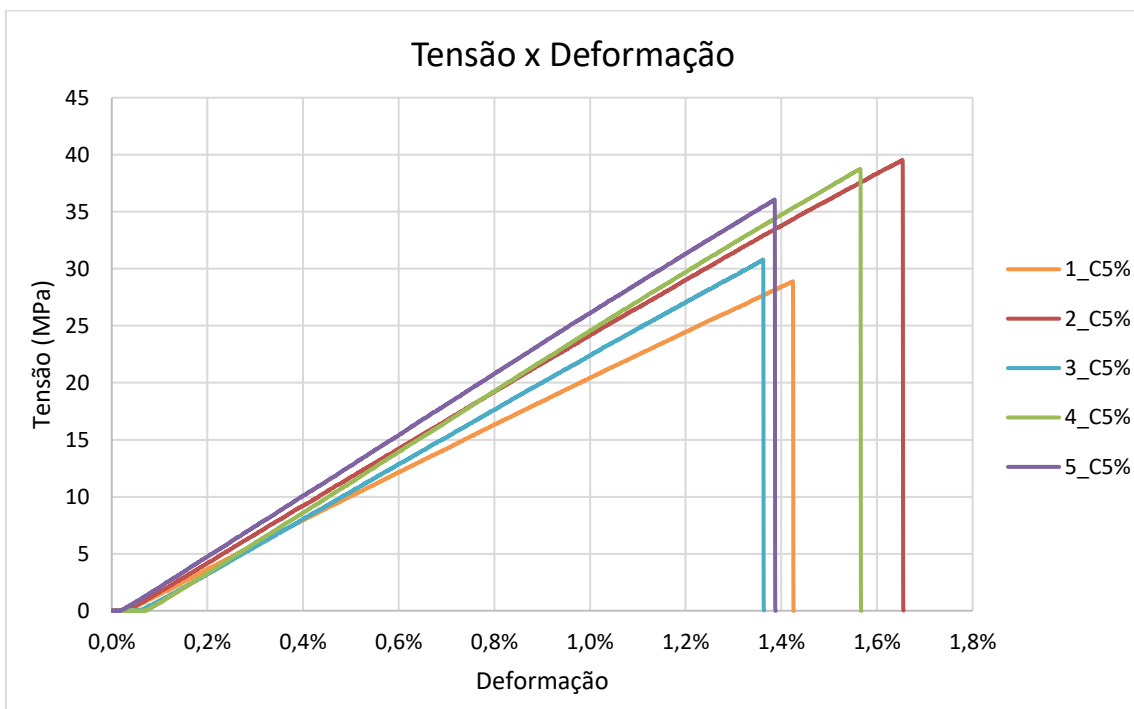


Figura 4.22 - Gráfico tensão x deformação das amostras C5% para o ensaio de flexão

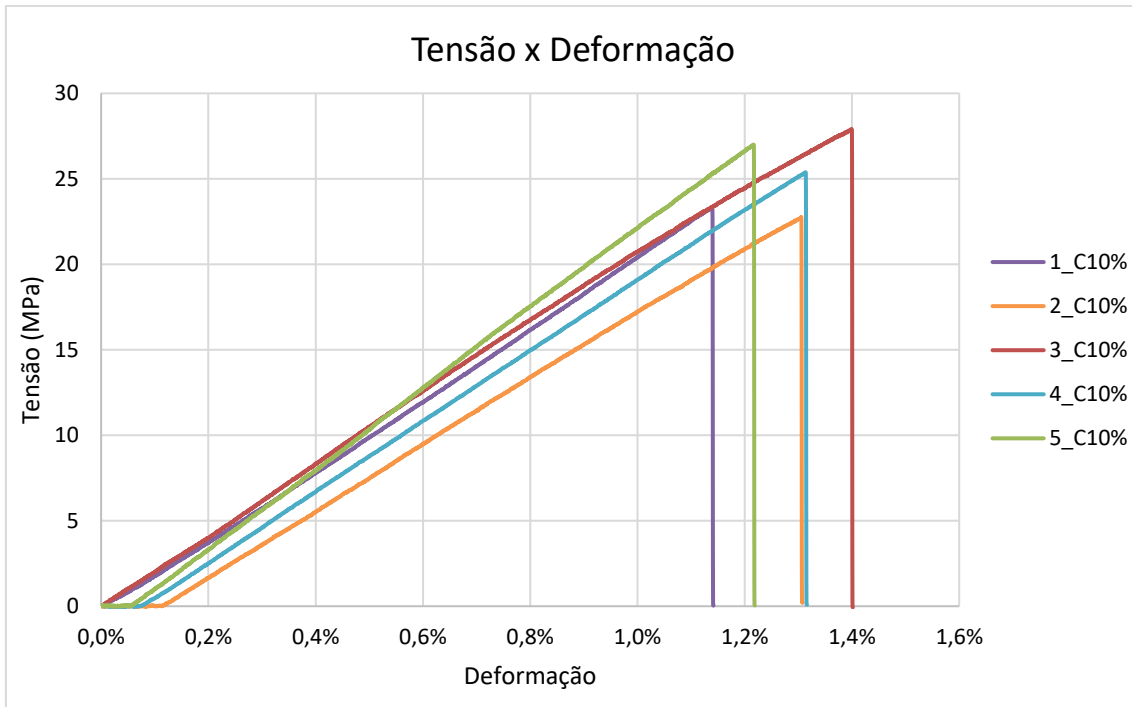


Figura 4.23 - Gráfico tensão x deformação das amostras C10% para o ensaio de flexão

Uma comparação entre os compósitos fabricados e a resina epóxi pura pode ser observada de forma mais clara na Figura 4.24.

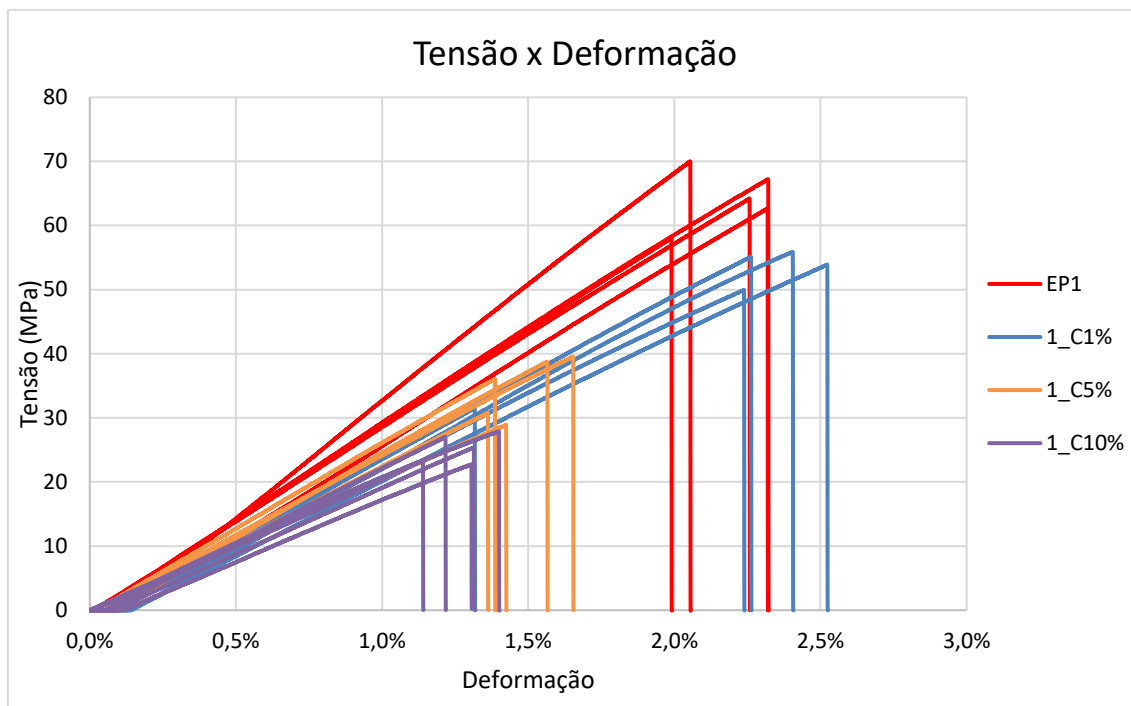


Figura 4.24 - Gráfico tensão x deformação de flexão comparativo entre as amostras C1%, C5%, C10% e EP

4.3.4 Determinação do módulo de elasticidade para o ensaio de flexão

O módulo de elasticidade para o ensaio de flexão, ou módulo de flexão, foi calculado conforme Figura 2.8 apresentada na seção 2.5.1. Os módulos de elasticidade das amostras dos compósitos analisadas podem ser observados nas Tabela 4.30, Tabela 4.31 e Tabela 4.32.

Tabela 4.30 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C1%

Amostra	E (MPa)
1_C1%	2651,30
2_C1%	2432,20
3_C1%	2350,40
4_C1%	2334,90
5_C1%	2597,30
Média	2473,22
Desvio Padrão	144,06

Tabela 4.31 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C5%

Amostra	E (MPa)
1_C5%	2180,10
2_C5%	2497,50
3_C5%	2350,10
4_C5%	2615,10
5_C5%	2650,50
Média	2458,66
Desvio Padrão	195,04

Tabela 4.32 - Módulo de elasticidade de flexão das amostras de C10%

Amostra	E (MPa)
1_C10%	1919,70
2_C10%	1935,90
3_C10%	2005,20
4_C10%	2067,40
5_C10%	2312,20
Média	2048,08
Desvio Padrão	158,93

Para as amostras analisadas, o valor médio do módulo de elasticidade no ensaio de tração foi de $2473,22 \pm 144,06$ MPa para os compósitos de 1%, $2458,66 \pm 195,04$ MPa para os compósitos de 5% e $2048,08 \pm 158,93$ MPa para os compósitos de 10%.

4.3.5 Discussões sobre as propriedades mecânicas dos compósitos fabricados

Através do presente estudo, esperava-se unir propriedades do epóxi, como resistência mecânica, com propriedades do silicone, com o baixo módulo de elasticidade. Era esperado uma queda na resistência mecânica, mas um aumento na deformação máxima do material devido à adição de partículas de um material elastômero. Uma diminuição no módulo de elasticidade também era esperada, visto que a adição do silicone deixaria a matriz de epóxi menos rígida.

A Tabela 4.33 une todas as propriedades mecânicas encontradas nos ensaios de tração e evidencia a alteração no valor dos parâmetros estudados e encontrados nos compósitos fabricados em relação ao epóxi puro.

Tabela 4.33 - Propriedades mecânicas através dos ensaios de tração

Amostra	Tensão máxima (MPa)		Deformação máxima (%)		E (MPa)	
EP	40,00 ± 4,98		2,35 ± 0,15		2462,58 ± 294,84	
C1%	23,83 ± 2,45	-40,4%	1,04 ± 0,10	-55,74%	2651,46 ± 92,66	7,67%
C5%	12,28 ± 1,05	-69,3%	0,66 ± 0,03	-71,91%	2011,30 ± 116,39	-18,33%
C10%	12,21 ± 0,93	-69,5%	0,69 ± 0,05	-70,64%	1967,32 ± 252,57	-20,11%

Esperava-se uma queda linear no valor de resistência mecânica, mas através dos dados apresentados na Tabela 4.33 não houve alteração significativa das amostras de 5% para as amostras de 10%. Os valores de deformação máxima também não sofreram alteração significativa nesses dois lotes de amostras.

A diminuição do módulo de elasticidade evidencia o fato das partículas de silicone tornarem a matriz epóxi menos rígida. No entanto, nota-se que o módulo de elasticidade só sofreu alteração significativa com a adição de 5% de partículas, mas manteve-se estável com a adição de 10%.

A diminuição da deformação máxima não era esperada, mas pode-se explicar devido a todos os problemas já relatados neste estudo, como presença de bolhas de ar proporcionalmente ao aumento da fração volumétrica, ausência de controle rígido para o processo de curso e possíveis erros durante os ensaios de tração.

A Tabela 4.34 une todas as propriedades mecânicas encontradas nos ensaios de flexão e evidencia a alteração no valor dos parâmetros estudados e encontrados nos compósitos fabricados em relação ao epóxi puro.

Nota-se que, nos ensaios de flexão, houve uma queda linear no valor de resistência mecânica, proporcional à fração volumétrica do compósito. Os valores de deformação máxima só sofreram alteração significativa a partir da fração volumétrica de 5% e o valor decaiu no compósito de 10%, mas não de forma linear.

Houve diminuição no módulo de elasticidade, mas não houve alteração significativa entre os compósitos de 1% e 5%.

Tabela 4.34 - Propriedades mecânicas através dos ensaios de flexão

Amostra	Tensão máxima (MPa)		Deformação máxima (%)		E (MPa)	
EP	64,43 ± 4,55		2,19 ± 0,16		3056,92 ± 302,62	
C1%	49,27 ± 10,18	-23,5%	2,15 ± 0,48	-1,83%	2473,22 ± 144,06	-19,09%
C5%	34,85 ± 4,75	-45,9%	1,48 ± 0,13	-32,42%	2458,66 ± 195,04	-19,57%
C10%	25,27 ± 2,24	-60,8%	1,28 ± 0,10	-41,55%	2048,08 ± 158,93	-33,00%

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

O estudo realizado na presente dissertação permitiu uma análise das propriedades mecânicas de compósitos de matriz de resina epóxi reforçados com partículas de silicone em diferentes frações volumétricas. As propriedades mecânicas dos referidos compósitos foram determinadas através de ensaios mecânicos de tração e flexão.

Os valores de tensão e deformação máximas obtidos para o silicone foram inferiores que os descritos na literatura. Os valores de módulo de elasticidade obtidos para o silicone foram superiores aos descritos na literatura. A discrepância entre os valores ocorre devido à alta viscosidade do material, condições e controle no processo de cura e velocidade e condições ambientais de ensaio.

Para o ensaio de tração, os valores de tensão máxima obtidos para a resina epóxi pura estão conforme descritos na literatura. No entanto, os valores de deformação máxima obtidos estão acima do esperado e o módulo de elasticidade obtido está abaixo do esperado. Para o ensaio de flexão, os valores de tensão e deformação máximas obtidos para a resina epóxi pura estão abaixo do informado pela literatura. No entanto, o módulo de elasticidade obtido está próximo do valor esperado. Tais discrepâncias podem ser justificadas devido à ausência de controle mais preciso no processo de cura e parâmetros de ensaio.

De uma forma geral, os compósitos com reforço de partículas de silicone de fração volumétrica de 1% são os que apresentam melhores propriedades mecânicas, visto que tiveram pequenas diminuições na resistência mecânica e deformação máxima e considerável diminuição no módulo de elasticidade. Os valores encontrados foram diminuição de 23,5% na resistência mecânica, diminuição de 1,83% na deformação máxima e diminuição de 19,09% no módulo de elasticidade, ambas as propriedades para o ensaio de flexão. O ensaio de flexão apresentou melhores resultados devido ao fato de a resina epóxi ser um material rígido.

Tanto os ensaios de tração como os de flexão dos compósitos mostraram uma diminuição significativa no módulo de elasticidade em comparação com a resina pura, para todas as frações volumétricas analisadas.

5.2 Trabalhos futuros

Em termos de trabalhos futuros e melhorias da presente dissertação, sugere-se a realização dos seguintes estudos:

- Devido à grande variabilidade dos valores obtidos para as propriedades mecânicas das amostras de silicone e resina puros, é essencial aumentar o número de corpos de prova ensaiados para, assim, confirmar os resultados e interpretar alguns comportamentos observados;
- Modificar o processamento dos compósitos, uma vez que, a distribuição e adesão das partículas na matriz altera consideravelmente as propriedades do material resultante;
- Repetir o processamento do compósito com outro material elastomérico com menor viscosidade;
- Reavaliar os parâmetros de ensaio, como, por exemplo, o uso de extensômetros.
- Utilizar métodos para maior controle dos parâmetros no processo de cura do material.

6 Referências bibliográficas

- [1] D. Feldman, “Polymer history”, *Des Monomers Polym*, vol. 11, n° 1, p. 1–15, fev. 2008, doi: 10.1163/156855508X292383.
- [2] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Material Science and Engineering An introduction*, 10º ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.
- [3] R. J. Young e P. A. Lovell, *Introduction to polymers*, 3º ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2011.
- [4] J. Zheng *et al.*, “Mechanical properties and thermal characteristics of three nano-filler/silk fiber reinforced hybrid composites: A comparative study using a ductile epoxy resin matrix”, *Polym Test*, vol. 130, jan. 2024, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108319.
- [5] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, e A. Elharfi, “Polymer composite materials: A comprehensive review”, *Compos Struct*, vol. 262, abr. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [6] E. J. Barbero, *Introduction to composite materials design*, 3º ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2018.
- [7] J. Yin, X. Wang, W. Tang, X. Xu, S. Zhao, e F. zhen Xuan, “A multiscale model for predicting mechanical properties of polymer composites”, *Chem Eng Sci*, vol. 282, dez. 2023, doi: 10.1016/j.ces.2023.119352.
- [8] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, 2º ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.
- [9] D. Yao, Y. Li, H. Zhang, Y. Xin, W. Fan, e Y. Zheng, “Preparation and mechanical properties of epoxy resin filled with shaped hybrid nanobrushes”, *React Funct Polym*, vol. 195, fev. 2024, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105814.
- [10] J. Wan *et al.*, “Epoxy thermosets and materials derived from bio-based monomeric phenols: Transformations and performances”, *Prog Polym Sci*, vol. 108, set. 2020, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2020.101287.

- [11] L. Wang, Y. Tan, H. Wang, L. Gao, e C. Xiao, “Investigation on fracture behavior and mechanisms of DGEBF toughened by CTBN”, *Chem Phys Lett*, vol. 699, p. 14–21, maio 2018, doi: 10.1016/j.cplett.2018.03.037.
- [12] M. Turkben, S. Kocaman, N. Özmeral, U. Soydal, A. Cerit, e G. Ahmetli, “Sustainable production of recycled rubber waste composites with various epoxy systems: A comparative study on mechanical and thermal properties”, *Ind Crops Prod*, vol. 195, maio 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.116490.
- [13] M. R. Dadfar e F. Ghadami, “Effect of rubber modification on fracture toughness properties of glass reinforced hot cured epoxy composites”, *Mater Des*, vol. 47, p. 16–20, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.12.035.
- [14] N. Chikhi, S. Fellahi, e M. Bakar, “Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber”, *Eur Polym J*, vol. 38, n° 2, p. 251–264, 2002, doi: 10.1016/S0014-3057(01)00194-X.
- [15] F. Wang, L. T. Drzal, Y. Qin, e Z. Huang, “Enhancement of fracture toughness, mechanical and thermal properties of rubber/epoxy composites by incorporation of graphene nanoplatelets”, *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 87, p. 10–22, ago. 2016, doi: 10.1016/j.compositesa.2016.04.009.
- [16] H. M. Naguib, E. O. Taha, A. S. El-Deeb, M. M. A. Kader, e M. A. Ahmed, “Influence of chromium oxide nanoparticles and fiber fillers on silicone rubber nanocomposite”, *Polymer Bulletin*, 2024, doi: 10.1007/s00289-024-05170-8.
- [17] S. Adil, B. Kumar, P. S. Panicker, D. H. Pham, e J. Kim, “High-performance green composites made by cellulose long filament-reinforced vanillin epoxy resin”, *Polym Test*, vol. 123, jun. 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108042.
- [18] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri e A. Ghadi, “Recent advancement in synthesizing bio-epoxy nanocomposites using lignin, plant oils, saccharides, polyphenols, and natural rubbers: A review”, *Int J Biol Macromol*, vol. 256, 2024, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.128041.

- [19] M. Ge, J. T. Miao, G. Liang, e A. Gu, “Biobased epoxy resin with ultrahigh glass transition temperature over 400 °C by post-crosslinking strategy”, *Chemical Engineering Journal*, vol. 482, fev. 2024, doi: 10.1016/j.cej.2024.148993.
- [20] M. Arshad, M. Zubair, S. S. Rahman, e A. Ullah, “Polymers for advanced applications”, *Polymer Science and Nanotechnology: Fundamentals and Applications*, p. 325–340, jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-816806-6.00014-5.
- [21] D. R. Askeland e P. P. Fulay, *Essentials of Materials Science and Engineering*, 2^o ed. Toronto, ON: Cengage Learning, 2009.
- [22] C. M. Gilmore, *Materials Science and Engineering Properties*. Stamford, CT: Cengage Learning, 2013.
- [23] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, 4^o ed. Edinburgh: Pearson, 2013.
- [24] M. S. Loukil, “Experimental and Numerical Studies of Intralaminar Cracking in High Performance Composites”, Lorraine, 2013. [Online]. Disponível em: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750383>
- [25] V. Giurgiutiu, *Stress, Vibration, and Wave Analysis in Aerospace Composites*, 1^o ed. Columbia, SC: Academic Press, 2022. doi: 10.1016/B978-0-12-813308-8.00006-5.
- [26] W. D. Callister e D. G. Rethwisch, *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Integrated Approach*, 3^o ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- [27] V. Chenrayan *et al.*, “Evaluation of dynamic mechanical analysis of crump rubber epoxy composites: experimental and empirical perspective”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, n^o 3, mar. 2023, doi: 10.1007/s40430-023-04033-z.
- [28] J. Neto, H. Queiroz, R. Aguiar, R. Lima, D. Cavalcanti, e M. D. Banea, “A review of recent advances in hybrid natural fiber reinforced polymer composites”, *J Renew Mater*, vol. 10, n^o 3, p. 561–589, 2022, doi: 10.32604/jrm.2022.017434.

- [29] M. A. Fuqua, S. Huo, e C. A. Ulven, “Natural Fiber Reinforced Composites”, *Polymer Reviews*, vol. 52, n° 3, p. 259–320, set. 2012, doi: 10.1080/15583724.2012.705409.
- [30] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, e M. Sain, “Progress report on natural fiber reinforced composites”, *Macromol Mater Eng*, vol. 299, n° 1, p. 9–26, jan. 2014, doi: 10.1002/mame.201300008.
- [31] R. A. Ilyas *et al.*, “Natural-fiber-reinforced chitosan, chitosan blends and their nanocomposites for various advanced applications”, *Polymers (Basel)*, vol. 14, n° 5, mar. 2022, doi: 10.3390/polym14050874.
- [32] M. A. Azman *et al.*, “Natural fiber reinforced composite material for product design: A short review”, *Polymers (Basel)*, vol. 13, n° 12, jun. 2021, doi: 10.3390/polym13121917.
- [33] X. Li, L. G. Tabil, e S. Panigrahi, “Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review”, *J Polym Environ*, vol. 15, n° 1, p. 25–33, jan. 2007, doi: 10.1007/s10924-006-0042-3.
- [34] A. K. Bledzki e J. Gassan, “Composites reinforced with cellulose based fibres”, *Prog. Polym. Sci*, vol. 24, p. 221–274, 1999.
- [35] O. Faruk, A. K. Bledzki, H. P. Fink, e M. Sain, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010”, *Prog Polym Sci*, vol. 37, n° 11, p. 1552–1596, nov. 2012, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [36] C. Wang, Q. Sun, K. Lei, C. Chen, L. Yao, e Z. Peng, “Effect of toughening with different liquid rubber on dielectric relaxation properties of epoxy resin”, *Polymers (Basel)*, vol. 12, n° 2, fev. 2020, doi: 10.3390/polym12020433.
- [37] S. N. Sarmin *et al.*, “Enhancing the properties of date palm fibre reinforced bio-epoxy composites with chitosan – Synthesis, mechanical properties, and dimensional stability”, *J King Saud Univ Sci*, vol. 35, n° 7, out. 2023, doi: 10.1016/j.jksus.2023.102833.

- [38] P. Mazurek, S. Vudayagiri, e A. L. Skov, “How to tailor flexible silicone elastomers with mechanical integrity: A tutorial review”, *Chem Soc Rev*, vol. 48, n° 6, p. 1448–1464, mar. 2019, doi: 10.1039/c8cs00963e.
- [39] S. Kashi *et al.*, “Mechanical, Thermal, and Morphological Behavior of Silicone Rubber during Accelerated Aging”, *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, vol. 57, n° 16, p. 1687–1696, nov. 2018, doi: 10.1080/03602559.2017.1419487.
- [40] K. Mimura, H. Ito, e H. Fujioka, “Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES-modified epoxy resins”, *Polymer (Guildf)*, vol. 41, n° 12, p. 4451–4459, 2000, doi: 10.1016/S0032-3861(99)00700-4.
- [41] Q. Xu, M. Pang, L. Zhu, Y. Zhang, e S. Feng, “Mechanical properties of silicone rubber composed of diverse vinyl content silicone gums blending”, *Mater Des*, vol. 31, n° 9, p. 4083–4087, out. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2010.04.052.
- [42] Momentive, “Silopren™ LSR 2740 TP3783: Technical Datasheet”, out. 2021. Acessado: 12 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: www.momentive.com
- [43] ASTM D790-17, “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials¹”. 2017. Acessado: 12 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <http://www.astm.org>
- [44] ASTM D412-06a, “Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension¹”. 2008. Acessado: 12 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: www.astm.org
- [45] Sicomin Epoxy Systems, “SR GreenPoxy 56 - Clear epoxy resin: Technical Datasheet”, Châteauneuf les Martigues, dez. 2015. Acessado: 12 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: <https://sicomin.com/en/>
- [46] ASTM D638-22, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics¹”. 2022. Acessado: 12 de maio de 2023. [Online]. Disponível em: www.astm.org
- [47] ISO 178:2003, “Plastics — Determination of flexural properties”. 2003. Acessado: 8 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: www.iso.org

- [48] ASTM D2240-15, “Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness¹”. 2017. Acessado: 29 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: www.astm.org
- [49] Y. Huiqin, L. Xiaohong, Y. Dongmei, e C. Hongyi, “Compounding and Properties of Low Modulus Silicone Rubber”, *Special Rubber Products*, vol. 25, n° 5, p. 5–7, nov. 2004, doi: 10.3969/j.issn.1005-4030.2004.05.002.
- [50] A. Mendes Castro, E. Francisquetti, e A. Luís Gasparin, “Influência da temperatura e tempo de cura na transição vítrea da resina epóxi”, *SCIENTIA CUM INDUSTRIA*, vol. 7, n° 3, p. 15–23, 2019, doi: 10.18226/23185279.v7iss3p15.

