

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**JOSÉ AFONSO ROCHA**

**SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO:**  
**INCORPORANDO RESÍDUOS DE LENTES OFTÁLMICAS EM**  
**COMPÓSITOS DE BORRACHA NATURAL**

**ROSANA - SP**

**2025**



**JOSÉ AFONSO ROCHA**

**SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÃO:  
INCORPORANDO RESÍDUOS DE LENTES OFTÁLMICAS EM  
COMPÓSITOS DE BORRACHA NATURAL**

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutor à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, linha de pesquisa em Materiais Poliméricos, Híbridos e Nano-Estruturados; área de concentração em Ciência dos Materiais, sob a orientação do Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos.

**ROSANA - SP**

**2025**

R672s Rocha, José Afonso  
Sustentabilidade e inovação : incorporando resíduos de lentes  
oftálmicas em Compósitos de borracha natural / José Afonso Rocha. --  
Rosana, 2025  
99 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana  
Orientador: Renivaldo José dos Santos  
Coorientador: José Francisco Resende da Silva

1. Policarbonato. 2. Elastômero. 3. Cis-1,4-poliisopreno. 4.  
Compósito de borracha. 5. Sola de calçado. I. Título.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Neste trabalho de pesquisa espera-se obter um impacto potencial ao desenvolver por meio de processos científicos e práticas sustentáveis a produção de solados de calçados, utilizando uma matriz polimérica (borracha natural) e o aproveitamento dos resíduos descartados na natureza (lentes oftálmicas), colaborando com uma prática de reciclagem e aproveitamento econômico do resíduo (RLO). A pesquisa busca informar para a sociedade, meio ambiente e a iniciativa privada (empresas que produzem e comercializam calçados e produtos óticos) que a instituição pública de ensino (Unesp – Campus de Rosana) preocupada com o quadro ambiental relacionado à expressiva quantidade de resíduos descartados em aterros sanitários, estuda e trabalha em conhecimento para utilizar esses resíduos (RLO), incorporando-os com outros materiais e proporcionando condições para o aproveitamento dos mesmos. Inclusive preocupada com a questão político-ambiental e destinação adequada de seus resíduos, a empresa Perego Indústria e Comércio de Lentes Ltda, situada no município de Araçatuba/SP, consultou o Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) para ajudá-la a minimizar os impactos ambientais gerados em sua produção. Atualmente esta empresa produz, mensalmente, 3 toneladas de resíduos, que são recolhidos, mediante pagamento, por uma outra empresa e encaminhados ao aterro sanitário. Observa-se a potencialidade do resíduo para a sua utilização no trabalho de pesquisa, esperando que ocorram parcerias (Unesp, empresas e órgãos públicos ligados ao meio ambiente) na celebração de compromissos para alcançar os objetivos e avaliar os reais impactos do potencial desta pesquisa.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research work is expected to have a potential impact by developing, through scientific processes and sustainable practices, the production of shoe soles, using a polymeric matrix (natural rubber) and the use of waste discarded in nature (ophthalmic lenses), collaborating with a practice of recycling and economic use of waste (RLO). The research seeks to inform society, the environment and the private sector (companies that produce and sell footwear and optical products) that the public educational institution (Unesp – Rosana Campus), concerned with the environmental situation related to the significant amount of waste discarded in landfills, studies and works on knowledge to use this waste (RLO), incorporating it with other materials and providing conditions for its use. Concerned about political and environmental issues and the proper disposal of its waste, the company Perego Indústria e Comércio de Lentes Ltda, located in the city of Araçatuba/SP, consulted the Biomass and Polymer Technology Laboratory (LTBPol) to help it minimize the environmental impacts generated by its production. This company currently produces 3 tons of waste per month, which are collected, upon payment, by another company and sent to a landfill. The potential of the waste for use in research work is observed, and it is expected that partnerships will occur (Unesp, companies and public agencies linked to the environment) in the celebration of commitments to achieve the objectives and evaluate the real impacts of the potential of this research.



Dedico este Trabalho à minha mãe Maria (“in memoriam”), educadora que sempre me incentivou, ao meu orientador Prof. Renivaldo José dos Santos e ao meu coorientador Prof. José Francisco Resende da Silva que contribuíram nos esforços para estimular, orientar e apoiar durante esta trajetória árdua.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, por ter dado a oportunidade de chegar a este momento e com esta conquista.

À minha esposa Maderly, educadora e que sempre apoiou na caminhada para essa conquista.

Aos meus filhos, Breno e Rodrigo (ambos engenheiros e docentes) que sempre me apoiaram nesta trajetória da vida profissional e acadêmica.

Ao professor Dr. Renivaldo José dos Santos, meu orientador que acreditou nos meus sonhos, na minha proposta de pesquisa e me acolheu como o seu orientando, contribuindo com os seus ensinamentos e indicações na realização do presente trabalho.

Ao meu coorientador professor Dr. José Francisco Resende da Silva, que proporcionou condições para que houvesse investimento financeiro no início dos trabalhos (FEPISA - bolsa nº 002/2022), bem como suas indicações para a pesquisa.

Ao professor Dr. Carlos Toshiyuki Hiranobe, pesquisador e docente com as suas contribuições na pesquisa e nos procedimentos laboratoriais.

Ao professor Dr. Silvio Rainho Teixeira do Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) – UNESP Campus de Presidente Prudente, sob a sua supervisão e com a assistência do (a) mestrando Gleyson e Gabrieli na realização dos ensaios de Fluorescência de Raios – X.

Ao amigo (a) Matheus da Silva Filgueira (mestre) e Samara da Silva Araújo (mestra) pelo companheirismo durante o período que cursamos as aulas das disciplinas do curso de pós-graduação, bem como as trocas de informações.

A todos os professores e funcionários do Programa Posmat.

Aos professores da banca por aceitarem o convite para a composição da banca.

Ao Laboratório de Microscopia de Ilha Solteira (LaMIS) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP Campus de Ilha Solteira/SP e ao Técnico de Laboratório Elton, pela realização dos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura.

À empresa Perego Industria e Comércio de Lentes Ltda pelo fornecimento dos resíduos de lentes oftálmicas (RLO).

Ao Grupo Arizona Componentes para Calçados Ltda pela moldagem dos solados de calçados.

“Um dia, quando olhares para trás, verás que os dias mais belos foram aqueles em que lutaste”.

**Sigmund Freud**

ROCHA, J. A. **Sustentabilidade e inovação:** incorporando resíduos de lentes oftálmicas em compósitos de borracha natural. 2025. 99 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Faculdade de Engenharia e Ciências, Universidade Estadual Paulista, Rosana, 2025.

## RESUMO

O presente trabalho estudou a incorporação de resíduos de lentes oftálmicas (RLO) na formulação de compósitos de borracha natural (BN) vulcanizada, visando aproveitar estes resíduos que são gerados no processo de produção de lentes oftálmicas e descartados em aterros sanitários. Pesquisas indicam que há um aumento crescente de resíduos na fabricação de lentes oftálmicas diante dos processos de produção, devido às necessidades oftálmicas da população agravadas por doenças oculares existentes e também pelo envelhecimento. Políticas públicas precisam ser implementadas com o objetivo de descartar corretamente esses resíduos, pois são tratados como lixo doméstico, mas podem agregar valor aos compósitos. Utilizando borracha natural (BN) e resíduos de lentes oftálmicas (RLO), os compósitos foram preparados com diferentes razões de carga, variando de 0 a 50 phr. Ensaio reométrico mostraram que a presença de RLO reduz o tempo de vulcanização. A densidade de cruzamentos, analisada pelos métodos Flory-Rehner e Mooney-Rivlin, aumentou com a adição das cargas. As análises térmicas e espectroscópicas mostraram que os compósitos apresentam estabilidade térmica e ausência de interações químicas entre a matriz polimérica e a RLO. Estudos mecânicos indicaram que os compósitos possuem propriedades satisfatórias de resistência à tração e ao rasgo, destacando que a carga atua como um enchimento, e não como um reforço mecânico. A incorporação de resíduos de lentes oftálmicas em compósitos de borracha natural representa uma alternativa promissora para o reaproveitamento de resíduos industriais, contribuindo para práticas mais sustentáveis e eficientes na indústria de polímeros.

**Palavras-chave:** Policarbonato; elastômero; cis-1,4-poliisopreno; compósito de borracha; sola de calçado.

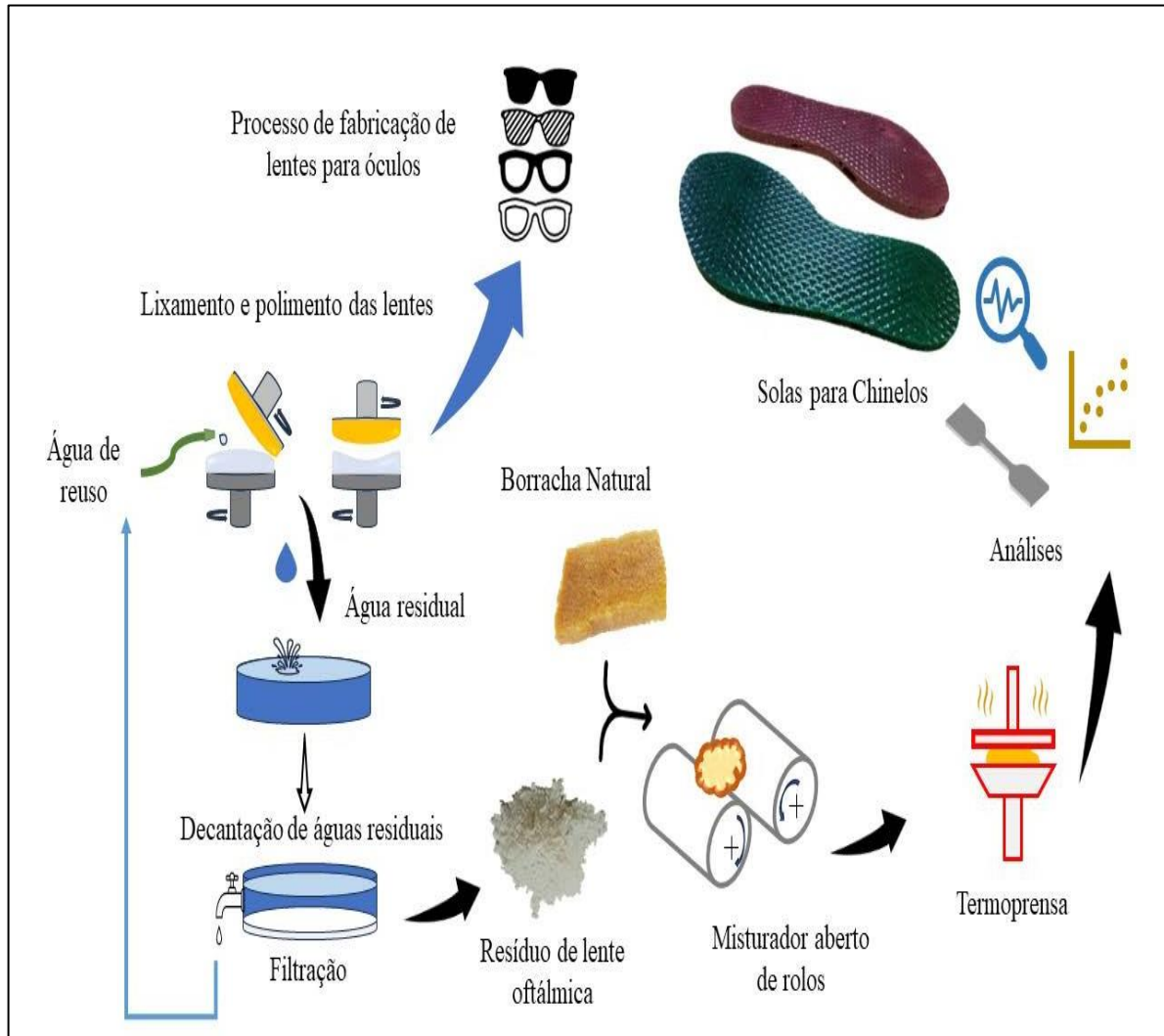
ROCHA, J. A. **Sustainability and innovation:** incorporating waste ophthalmic lenses into natural rubber composites. 2025. 99 f. Thesis (Doctor in Materials Science and Technology) - School of Engineering and Sciences, São Paulo State University, Rosana, 2025.

### **ABSTRACT**

The present work studied the incorporation of ophthalmic lens waste (ORT) in the formulation of vulcanized natural rubber (BN) composites, aiming to take advantage of these residues that are generated in the production process of ophthalmic lenses and discarded in landfills. Research indicates that there is a growing increase in waste in the manufacture of ophthalmic lenses in the face of production processes, due to the ophthalmic needs of the population aggravated by existing eye diseases and also by aging. Public policies need to be implemented with the aim of correctly disposing of this waste, as it is treated as household waste, but can add value to composites. Using natural rubber (BN) and ophthalmic lens waste (RLO), the composites were prepared with different load ratios, ranging from 0 to 50 phr. Rheometric assays showed that the presence of RLO reduces vulcanization time. The density of crosses, analyzed by the Flory-Rehner and Mooney-Rivlin methods, increased with the addition of loads. The thermal and spectroscopic analyses showed that the composites present thermal stability and absence of chemical interactions between the polymeric matrix and the RLO. Mechanical studies have indicated that composites have satisfactory tensile and tear strength properties, highlighting that the load acts as a filler, and not as a mechanical reinforcement. The incorporation of ophthalmic lens waste into natural rubber composites represents a promising alternative for the reuse of industrial waste, contributing to more sustainable and efficient practices in the polymer industry.

**Keywords:** Polycarbonate; elastomer; cis-1,4-polyisoprene; rubber composite; shoe sole.

## RESUMO GRÁFICO



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura molecular dos polímeros (a) lineares, (b) ramificados, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede .....	20
Figura 2 - Estrutura química de termoplásticos e termofixos .....	20
Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de carga.....	22
Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de matriz .....	23
Figura 5 - Borracha natural (cis1,4-poliisopreno).....	24
Figura 6 - Extração do látex da seringueira (sangria) .....	27
Figura 7 - Coágulos de látex da seringueira.....	29
Figura 8 - Lavagem.....	30
Figura 9 - Homogeneização .....	30
Figura 10 - Granulação .....	31
Figura 11 - Secagem/ Desidratação .....	31
Figura 12 - Desidratação .....	31
Figura 13 - Retirado da queima .....	31
Figura 14 - Prensagem .....	32
Figura 15 - Empacotamento.....	32
Figura 16 - Látex líquido .....	32
Figura 17 - Vulcanização da borracha natural .....	34
Figura 18 - Curvas Tensão x Deformação .....	37
Figura 19 - Bloco oftálmico.....	41
Figura 20 - Gerador de curva .....	42
Figura 21 - Bloco oftálmico e porta-bloco.....	42
Figura 22 - Equipamentos e operador.....	43
Figura 23 - Lente desgastada, com a dioptria indicada pelo código de barras .....	43
Figura 24 - Resíduos de resina e policarbonato misturados com água .....	44
Figura 25 - Lente trabalhada nas duas faces .....	44
Figura 26 - Mapa Macrorregião (S. J. Rio Preto) .....	46
Figura 27 - Aparas de CR-39.....	48
Figura 28 - Poliuretano .....	48
Figura 29 - Policarbonato.....	48
Figura 30 - Lentes fabricação - sucata .....	49
Figura 31 - Lentes usadas - sucata .....	49
Figura 32 - Fluxo de resíduos ao longo do ciclo de vida das lentes oftálmicas.....	49

Figura 33 - Tanque de decantação .....	50
Figura 34 - Pó de lentes oftálmicas.....	50
Figura 35 - Borracha Natural .....	53
Figura 36 - Resíduo lente oftálmica (RLO) .....	53
Figura 37 - Misturador aberto de cilindros .....	55
Figura 38 - Prensa hidráulica .....	55
Figura 39 - Reômetro .....	56
Figura 40 - Curva reométrica característica dos compostos de borracha .....	57
Figura 41 - Corpo de prova (modelo gravata) tipo A .....	61
Figura 42 - Corpo de prova (modelo haltere) tipo C .....	61
Figura 43 - Abrasímetro (ensaios de resistência a abrasão).....	62
Figura 44 - Curva Reométrica dos compósitos BN/RLO .....	66
Figura 45 - Grau de dispersão das cargas de RLO em matriz de BN .....	69
Figura 46 - <b>(a)</b> Imagem fotográfica do resíduo de lente oftálmica; Imagens de MEVs na escala de 10 µm e com magnificação de 1,0 K ×: <b>(b)</b> do resíduo de lente oftálmica; regiões de fratura dos corpos de prova do ensaio de resistência à tração dos compósitos de BN contendo <b>(c)</b> 0 phr, <b>(d)</b> 10 phr, <b>(e)</b> 20 phr, <b>(f)</b> 30 phr, <b>(g)</b> 40 phr e <b>(h)</b> 50 phr de resíduo de lente.....	70
Figura 47 - Resultados de densidade, dureza e perda por abrasão dos compósitos.....	72
Figura 48 - Curvas de resistência à tração dos compósitos BN/RLO.....	73
Figura 49 - Curvas de resistência ao rasgo dos compósitos de BN/RLO .....	75
Figura 50 - Plotagem de $\sigma/(\lambda - \lambda^{-2})$ versus $\lambda^{-1}$ dos compósitos BN/RLO com <b>(a)</b> 0 phr, <b>(b)</b> 10 phr, <b>(c)</b> 20 phr, <b>(d)</b> 30 phr, <b>(e)</b> 40 phr e <b>(f)</b> 50 phr .....	76
Figura 51- Variação de $Q_c/Q_g$ versus e-Z dos compósitos BN/RLO e goma como referência .....	77
Figura 52 - Efeito da carga de enchimento em $Q_c/Q_g$ de compósitos BN/RLO e goma como referência.....	78
Figura 53 - Espectros de FTIR do resíduo de lentes oftálmicas e dos compósitos de BN/RLO. ....	79
Figura 54 - Curvas de (a) TG dos compósitos de BN/RLO e (b) DTG dos compósitos de BN/RLO.....	81
Figura 55 - Curvas de DSC dos compósitos vulcanizados .....	83
Figura 56 - Protótipo de sola de chinelo produzido com resíduo de lentes oftálmicas, com vistas <b>(a)</b> superior da sola lisa, <b>(b)</b> inferior da sola com ranhuras, <b>(c)</b> bloco superior liso, <b>(d)</b> bloco inferior com ranhuras e <b>(e)</b> vista inferior ampliada da sola de chinelo com ranhuras....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas de vulcanização CV, SEV e EV .....	38
Tabela 2 - Propriedades dos vulcanizados .....	38
Tabela 3 - Dados pesquisados (produção, resíduos e descartes).....	47
Tabela 4 - Formulação dos compósitos de borracha BN e resíduo de lentes oftálmicas .....	54
Tabela 5 - Composição química do resíduo de lentes oftálmicas por FRX.....	65
Tabela 6 - Parâmetros reológicos dos compósitos BN/RLO .....	66
Tabela 7 - Densidade de ligações cruzadas por inchamento - método de Flory-Rehner .....	68
Tabela 8 - Valores dos ensaios de resistência à tração na ruptura dos compósitos BN/RLO...	74
Tabela 9 - Densidade de ligações cruzadas pelo método de Mooney-Rivlin .....	77
Tabela 10 - Número de ondas dos espectros de FTIR do resíduo de lentes oftálmicas e compósitos de BN/RLO.....	80
Tabela 11 - Normas Técnicas e métodos de testes (calçados em compósitos vulcanizados) ...	85

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

**ACV** - Associação Comercial de Votuporanga/SP

**ASTM** - Sociedade Americana de Testes e Materiais

**ATR** - Reflexão total atenuada

**BN** - Borracha Natural

**c** - Carga

**CBT** - Ciência e Tecnologia da Borracha

**CMC** - Compósitos de matrizes cerâmicas

**CMM** - Compósitos de matrizes metálicas

**CMP** - Compósitos de matrizes poliméricas

**CR-39** - Nome comercial

**CV** - Sistema de vulcanização convencional

**DIN** - Instituto Alemão de Normalização

**DRC** - Quantidade de borracha seca

**DSC** - Calorimetria Diferencial de Varredura

**EV** - Sistema de vulcanização eficiente

**FTIR** - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

**g** - Goma pura

**IAC** - Instituto Agrônomo de Campinas/SP

**IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**L** - Grau de dispersão da carga na matriz polimérica

**LOO** - Lentes oftálmicas orgânicas

**LTBPol** - Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros

**LTDA** - Limitada

**MBTS** - Dissulfeto de benzoatiasol

**MEV** - Microscopia eletrônica de varredura

**M<sub>L</sub>** - Torque mínimo

**M<sub>H</sub>** - Torque máximo

**MPa** - Mega Pascal

**OMS** - Organização Mundial da Saúde

**PEG 4000** - Polietileno glicol 4000

**phr** - por cem partes de borracha

**POSMAT** - Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

**RLO** - Resíduo de lentes oftálmicas

**S** - Enxofre molecular (S<sub>8</sub>)

**SAEV** - Superintendência de Água e Esgoto de Votuporanga/SP

**SEV** - Sistema de vulcanização semi-eficiente

**T<sub>c</sub>** - Temperatura de cristalização

**T<sub>g</sub>** - Temperatura de transição vítrea

**TG** - Termogravimetria

**T<sub>m</sub>** - Temperatura de fusão

**TMTD** - Dissulfeto de tetrametiltiuram

**t<sub>s1</sub>** - Tempo de segurança (pré-cura)

**t<sub>s90</sub>** - Tempo ótimo de cura

**UNESP** - Universidade Estadual Paulista

**UV** - Raios solares ultra-violeta

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	21
2.2 BORRACHA NATURAL .....	24
2.2.1 <i>Extração do Látex (Produção da Borracha Natural)</i> .....	26
2.2.2 <i>Características Relacionadas à Qualidade do Látex da Seringueira</i> .....	27
2.2.3 <i>Composição do Látex</i> .....	28
2.2.4 <i>Beneficiamento do Látex de Borracha Natural</i> .....	29
2.3 VULCANIZAÇÃO DA BORRACHA NATURAL.....	33
2.4 SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO .....	36
2.5 LENTES OFTÁLMICAS .....	39
2.5.1 <i>Tipos de Materiais de Lentes Oftálmicas</i> .....	39
2.5.2 <i>Fabricação das Lentes Oftálmicas</i> .....	41
2.5.3 <i>Comercio e Consumo de Lentes Oftálmicas</i> .....	45
2.5.4 <i>Resíduos de Lentes Oftálmicas (RLO)</i> .....	48
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>52</b>
3.1 OBJETIVO GERAL .....	52
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	52
<b>4 PROCESSO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>53</b>
4.1 MATERIAIS.....	53
4.2 PREPARO DOS COMPÓSITOS .....	54
4.3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS .....	55
4.3.1 <i>Estudo da Fluorescência de Raios-X das Amostras</i> .....	55
4.3.2 <i>Caracterização dos Parâmetros Reológicos</i> .....	55
4.3.3 <i>Reometria</i> .....	56
4.3.4 <i>Análise do Grau de Dispersão das Cargas na Matriz Polimérica</i> .....	58
4.3.5 <i>Análise da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	58
4.3.6 <i>Medição da Densidade dos Compósitos</i> .....	59
4.3.7 <i>Análise das Densidades de Ligações Cruzadas dos Compósitos</i> .....	59
4.3.8 <i>Exame por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)</i> ....	60
4.3.9 <i>Teste de Resistência à Tração e ao Rasgo dos Compósitos</i> .....	60
4.3.10 <i>Medição da Dureza dos Compósitos</i> .....	62
4.3.11 <i>Teste de Resistência à Abrasão</i> .....	62

4.3.12 <i>Estudo das Interações entre a Borracha Natural e o Resíduo de Lentes Oftálmicas por Meio da Equação de Lorenz-Parks</i> .....	63
4.3.13 <i>Estudo Termogravimétrico dos Compósitos</i> .....	63
4.3.14 <i>Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)</i> .....	64
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>65</b>
5.1 ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DO RESÍDUO DE LENTES OFTÁLMICAS.....	65
5.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS REOMÉTRICOS.....	65
5.3 ANÁLISE DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS POR INCHAMENTO EM SOLVENTE ORGÂNICO – MÉTODO DE FLORY-REHNER.....	67
5.4 ANÁLISE DO GRAU DE DISPERSÃO DAS CARGAS DE RLO NA MATRIZ DE BN .....	68
5.5 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	69
5.6 ANÁLISE DA DENSIDADE, DUREZA E PERDA POR ABRASÃO DOS COMPÓSITOS BN/RLO .....	71
5.7 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS BN/RLO.....	73
5.8 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO RASGO DOS COMPÓSITOS DE BN/RLO.....	74
5.9 ANÁLISE DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS POR MEIO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: MÉTODO DE MOONEY-RIVLIN .....	75
5.10 ESTUDO DA INTERAÇÃO INTERFACIAL PELO MÉTODO DE LORENZ-PARKS .....	77
5.11 ANÁLISE DOS ESPECTROS NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER NO MODO ATR .....	78
5.12 ANÁLISE DA PERDA DE MASSA POR TERMOGRAVIMETRIA (TG).....	80
5.13 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	82
<b>6 APLICAÇÃO DO NOVO COMPÓSITO DE BN/RLO</b> .....	<b>84</b>
<b>7 CONCLUSÃO</b> .....	<b>86</b>
<b>8 TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA PESQUISA DA TESE</b> .....	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os compósitos de borracha natural vulcanizada têm ganhado destaque devido à sua ampla aplicação industrial e propriedades mecânicas superiores. Uma tendência crescente na pesquisa de materiais compósitos é a utilização de resíduos como cargas de reforço, promovendo a sustentabilidade e a redução de custos. Neste contexto, o uso de resíduos de lentes oftálmicas como carga de reforço surge como uma alternativa promissora e inovadora. Este trabalho explora a incorporação de resíduos de lentes oftálmicas em compósitos de borracha natural vulcanizada, analisando suas propriedades mecânicas, térmicas e de reforço.

A produção de resíduos industriais é uma preocupação ambiental significativa. A utilização de resíduos como materiais de enchimento em compósitos de borracha não apenas contribui para a redução de resíduos, mas também promove a economia circular.

Estudos têm demonstrado o potencial de diversos tipos de resíduos, como resíduos agrícolas, cascas de amendoim e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, como cargas de reforço em compósitos de borracha natural [1,2,3]. No entanto, o uso de resíduos de lentes oftálmicas ainda é pouco explorado e apresenta um campo vasto para investigação.

A inclusão de resíduos como carga de reforço em compósitos de borracha pode influenciar significativamente suas propriedades mecânicas e térmicas. Por exemplo, a adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em compósitos de borracha natural mostrou melhorar as propriedades mecânicas do material vulcanizado [2]. Similarmente, resíduos de cascas de amendoim e de ovos têm sido estudados como potenciais reforços para compósitos de borracha, demonstrando melhorias na resistência à tração e no módulo de elasticidade [4,5]. O estudo realizado por Batista *et al.* [6], produziram compósitos de resina de poliéster com pó de pecíolos de bambu e resíduos de lentes oftálmicas como cargas de enchimento, materiais que comumente são descartados em aterros sanitários. Os pós de bambu e resíduos de lentes foram misturados em várias proporções para fabricar placas de compósito por moldagem a frio. Testes mostraram que esses compósitos, apesar de menor resistência mecânica, apresentaram aumento significativo na resistência ao impacto. O compósito mais viável, contendo 40% de resíduos de lentes, foi usado para fabricar tampos de mesas e bancos [6].

O resíduo de lentes oftálmicas (RLO) analisado no presente estudo e incorporado na matriz polimérica (BN), resulta dos diferentes processos de produção de lentes para a correção dos problemas ópticos como a miopia, hipermetropia, astigmatismo; onde as lentes têm uma função corretiva e podem proporcionar uma maior capacidade visual, considerando as várias anomalias apresentadas pelas pessoas.

Segundo Ottaiano *et al.* (2019) [7], o relatório das Condições de Saúde Ocular Brasil 2019, elaborado pelo Conselho Brasileiro de Oftalmologia, demonstrou que o Brasil possuía uma população de 208 milhões de habitantes, sendo que pessoas míopes foram estimadas entre 23 e 74 milhões, pessoas com hipermetropia somavam 34% da população, representando 71 milhões e os presbiópicos 18,3% da população, ou seja, aproximadamente 39 milhões de pessoas, identificando a necessidade real de uso de lentes oftálmicas para corrigir estes problemas.

Em face da situação brasileira e também a de outros países, a revista *Isto É Dinheiro* (2019) [8] publicou a notícia da expansão de uma das maiores empresas do segmento óptico do mundo, a Zeiss, apresentando um aumento das vendas de 1,8 milhões de lentes em 2018 para 2,5 milhões de lentes em 2019, representando um aumento da ordem de 39%; quantitativo expressivo tanto em lentes, como em resíduo dessas lentes, muitas vezes descartadas no meio ambiente sem nenhum tratamento adequado de descarte.

A geração dos RLO está relacionada aos vários processos para preparação das lentes, considerando o formato, o tamanho e a graduação necessária para a correção da deficiência visual.

Para preparar a lente é utilizado o bloco oftálmico (estado bruto) processado em operações como o corte, desbaste e acabamento; processos que geram expressivas quantidades de resíduos. Segundo Cury e Saraiva (2018) [9] constataram uma produção anual de 5,5 milhões de lentes oftálmicas apenas em uma fábrica instalada no polo industrial de Manaus (AM).

Os RLO são formados por uma mistura de vários tipos de plásticos, termoplásticos e termorrígidos, utilizados para a produção de lentes oftálmicas; destacando-se o polimetilmetacrilato (acrílico), o policarbonato e o vidro [9].

Os compósitos de borracha natural preenchidos com resíduos apresentam diversas vantagens, incluindo menor custo de produção, redução da dependência de cargas tradicionais como negro de fumo, e menor impacto ambiental [10].

No entanto, a compatibilidade entre a matriz de borracha e o resíduo utilizado como carga de reforço é crucial para assegurar a uniformidade e a qualidade das propriedades do compósito final. Desafios como a dispersão homogênea do resíduo na matriz de borracha e a manutenção das propriedades mecânicas são aspectos que necessitam de atenção detalhada [11].

Este trabalho de pesquisa visa investigar as propriedades de compósitos de borracha natural vulcanizada (BN) utilizando resíduos de lentes oftálmicas como carga de reforço. Serão analisados os efeitos desta incorporação nas propriedades estrutural, mecânicas, térmicas e de

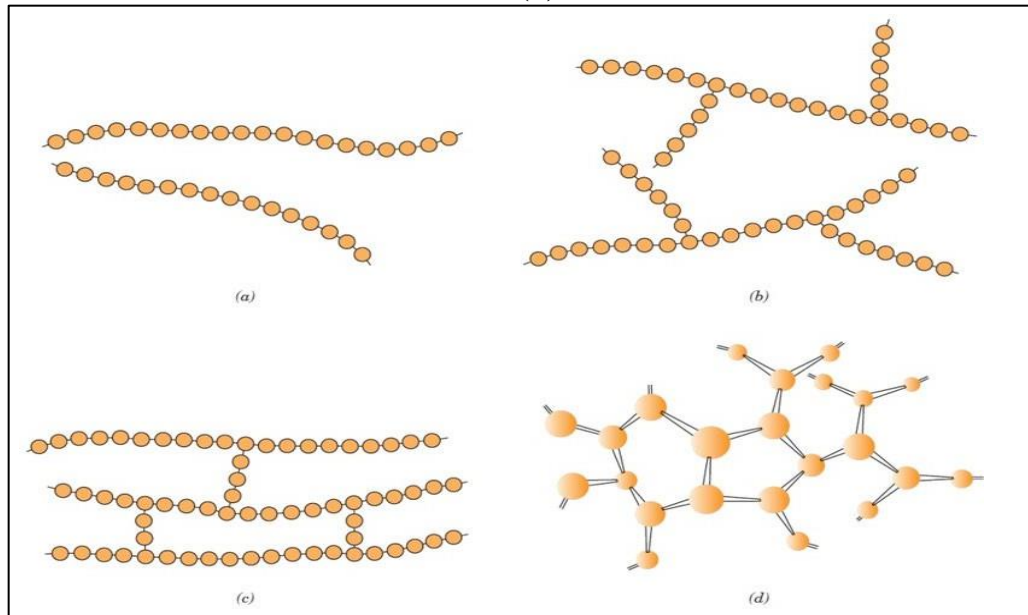
reforço dos compósitos. A metodologia inclui a preparação dos compósitos com diferentes proporções de resíduo de lentes oftálmicas, seguida de testes de resistência à tração, módulo de elasticidade, dureza e análises térmicas. Além disso, serão analisados a interação interfacial entre a carga e a matriz polimérica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os materiais são agrupados em três classificações básicas: metais, cerâmicos e polímeros; essa classificação se baseia principalmente na composição química e na estrutura atômica. Existem três outros grupos de materiais importantes na engenharia que são os compósitos, os semicondutores e os biomateriais. Os compósitos consistem em combinações de dois ou mais materiais diferentes, enquanto os semicondutores são utilizados devido às suas características elétricas e os biomateriais são implantados no interior do corpo humano. Os polímeros naturais são derivados de plantas e animais (madeira, borracha, algodão, lã, couro e seda) tem seu uso identificado ao longo da história, outros polímeros como as proteínas, as enzimas, os amidos e a celulose, são importantes em processos biológicos e fisiológicos, nas plantas e nos animais [12].

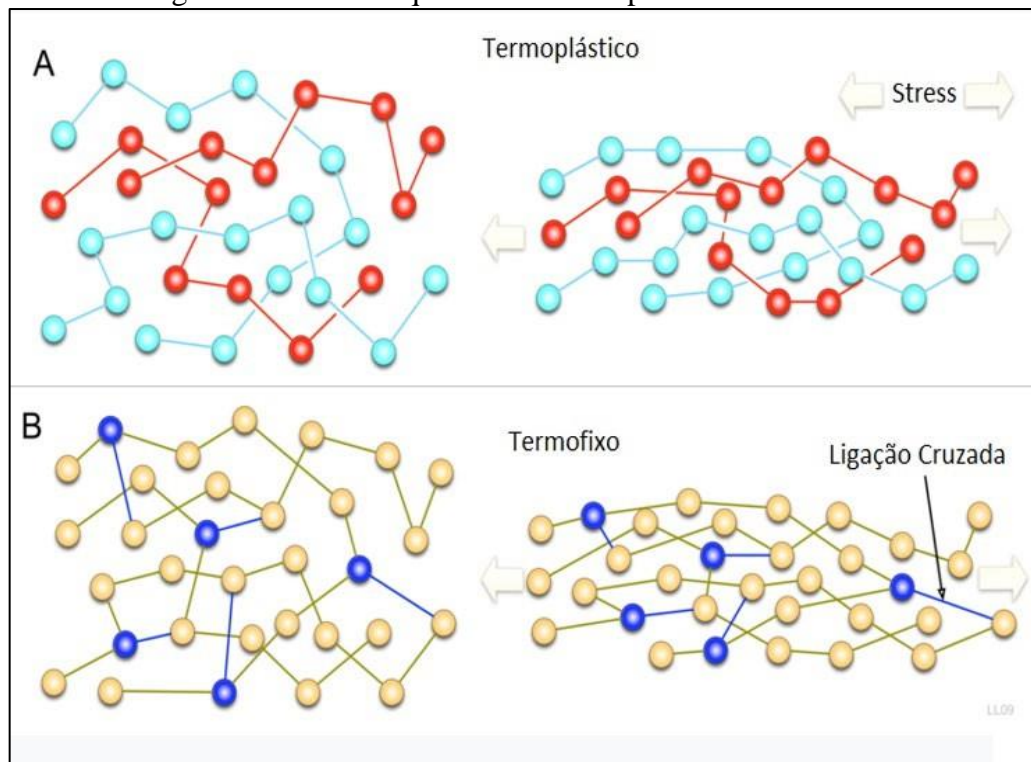
Os polímeros apresentam uma alta massa molecular com uma estrutura definida pela repetição de unidades denominadas “mero” (palavra grega meros, que significa parte), polímero significa muitos meros. As características de um polímero também dependem das diferenças na estrutura das cadeias moleculares. Dentre as estruturas moleculares dos polímeros, destacam-se as estruturas lineares, as ramificadas, as com ligações cruzadas e as em rede. Uma classificação dos materiais poliméricos é feita considerando a sua resposta mecânica a temperaturas elevadas, os polímeros termoplásticos amolecem quando são aquecidos e endurecem quando são resfriados através de processos totalmente reversíveis, os polímeros termofixos se tornam permanentemente duros quando submetidos a aplicação de calor e não amolecem com um aquecimento subsequente [12]. As Figuras 1 e 2 apresentam as estruturas moleculares dos polímeros e as classificações quanto as suas estruturas intermoleculares respectivamente.

Figura 1 - Estrutura molecular dos polímeros (a) lineares, (b) ramificados, (c) com ligações cruzadas e (d) em rede



Fonte: Canevarolo Júnior *et al.* (2006) [12].

Figura 2 - Estrutura química de termoplásticos e termofixos



Fonte: Wikimedia Commons (2009) [13].

O estado de cristalinidade dos polímeros envolve moléculas em vez de apenas átomos e íons (como ocorre com os metais e as cerâmicas) sendo que os arranjos atômicos serão mais complexos, criando um empacotamento de cadeias moleculares e produzindo uma matriz atômica ordenada. As substâncias moleculares que possuem moléculas pequenas, como a água e o metano, normalmente são cristalinas (quando sólidos) ou amorfas (quando líquidos). Como consequência dos seus tamanhos e complexidade, as moléculas dos polímeros, são apenas parcialmente cristalinas (ou semicristalinas), possuindo regiões cristalinas dispersas no interior do material amorfo restante; sendo que o grau de cristalinidade pode variar desde o estado completamente amorfo até quase totalmente cristalino. O grau de cristalinidade pode ter uma influência significativa sobre as propriedades mecânicas, uma vez que ele afeta a extensão das ligações secundárias intermoleculares [12, 14].

Considerando que as propriedades mecânicas dos polímeros são altamente sensíveis a mudanças de temperatura, iremos abordar algumas das temperaturas que influenciam nas características dos polímeros. A Temperatura de fusão ( $T_m$ ) é a temperatura de aquecimento que transforma um material sólido, que contém uma estrutura ordenada de cadeias moleculares alinhadas, em um líquido viscoso com estrutura altamente aleatória; a Temperatura de cristalização ( $T_c$ ) é a temperatura de resfriamento que proporciona a mudança do estado líquido – amorfo para o estado cristalino, onde as cadeias moleculares se organizam em uma estrutura ordenada (cristalização) e a Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é a temperatura na qual o polímero com o resfriamento, experimenta uma transição gradual de um líquido para um material com características de uma borracha e posteriormente em um sólido rígido; ocorrendo em polímeros amorfos e semicristalinos onde há uma redução no movimento de grandes segmentos de cadeias moleculares devido a diminuição da temperatura [12, 14].

A seguir apresentaremos dados e características dos elementos BN (borracha natural) e RLO (resíduos de lentes oftálmicas) que compõem os compósitos analisados na presente tese, inclusive a sua representação e importância no meio terrestre através de dados e estatísticas que comprovam o seu valor econômico e ambiental, com vistas à economia circular.

## 2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Material formado pela combinação de dois ou mais materiais com propriedades distintas de ambas as fases que o constituem, de maneira que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Dessa forma, este tipo de material permite que certas características desejáveis sejam valorizadas, enquanto as indesejáveis sejam minimizadas [14].

Embora acredite-se que estes materiais são recentes (década de 1960 em diante) como o caso da fibra de carbono, eles são bem mais antigos, e baseiam-se na pretensão de combinar dois ou mais materiais macro-constituintes distintos com o objetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas que cada constituinte apresenta separadamente. Sua utilização é requerida em aplicações que exigem características importantes como resistência mecânica, rigidez e durabilidade [15].

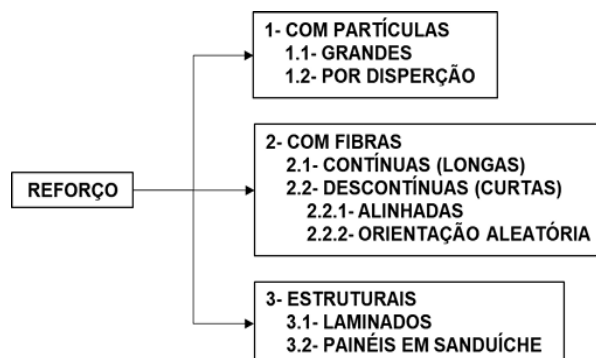
Os compósitos de borracha podem ser elaborados utilizando outras substâncias denominadas de cargas de reforço, com a capacidade de melhorar algumas características da borracha como resistência mecânica, durabilidade, elasticidade e aderência [16].

Em termos de sustentabilidade, o uso de elementos (cargas) na elaboração de compósitos, muitas vezes classificados como resíduos (natural ou industrial), tem como objetivos a inovação (agregando propriedades favoráveis), redução de custos de produção e contribuem para o meio ambiente e a economia circular.

A classificação dos materiais compósitos é baseada no tipo de matriz neles contido; compósitos de matrizes metálicas (CMM), compósitos de matrizes cerâmicas (CMC) e compósitos de matrizes poliméricas (CMP). Os compósitos metálicos são dúcteis, com maior resistência e os cerâmicos são geralmente frágeis. Atualmente os compósitos poliméricos tem sido importante em vários campos de aplicação [17].

A maioria dos compósitos são compostos por apenas duas fases; uma contínua, que envolve a outra fase; e outra dispersa. Essa fase dispersa pode ser classificada de acordo com suas características quanto à forma das partículas, e seu tamanho, sua distribuição e orientação. De maneira geral, conforme Figura 3, os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de reforço e quanto à natureza da matriz [18].

Figura 3 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de carga



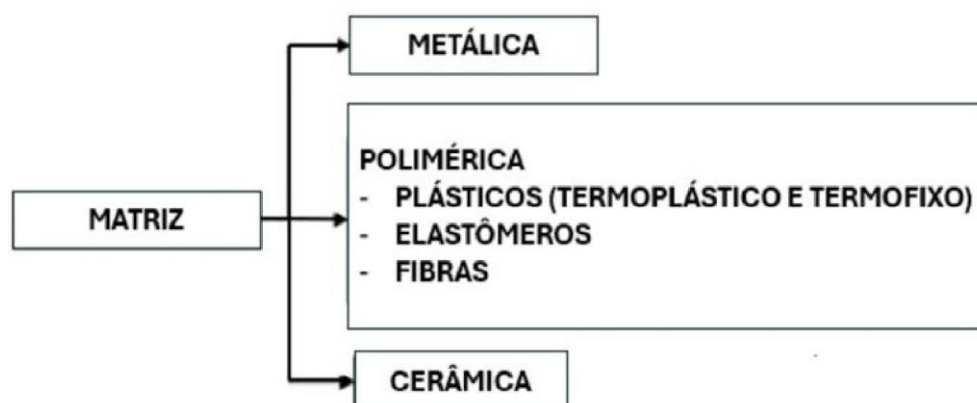
Fonte: Adaptado de Callister (2020) [19].

Os compósitos contendo partículas como cargas podem ainda se subdividir entre “partículas grandes” e “por dispersão”. A diferença entre ambas está no nível de interação entre a matriz e o reforço. De modo sucinto, a formação de compósitos baseados em carga de partícula grande se dá a nível macroscópico e as propriedades do compósito são influenciadas pelo teor, tamanho e da adesão entre a matriz e a partícula, sendo frequentemente utilizados em compósitos de matrizes de materiais plásticos e elastoméricos. Já o carregamento por dispersão, a interação matriz/carga é a nível atômico ou molecular, por isso, o tamanho das partículas varia entre 10 e 100 nm. É comumente empregado em compósitos de ligas metálicas e a relação entre a partícula e as discordâncias no interior da matriz tem papel crucial nas propriedades do material resultante [19].

Os compósitos reforçados com fibra são aqueles cuja carga se apresenta na forma de fibra, empregando-a onde se necessita de materiais de propriedades mecânicas elevadas com constituintes de baixa densidade, ou seja, mais leves que outros materiais puros de mesma rigidez. As propriedades destes compósitos são influenciadas pelo comprimento das fibras e, quando curtas, pela sua orientação [18].

Os compósitos estruturais são aqueles cujas propriedades dependem tanto dos atributos e da geometria dos componentes. Dividem-se em laminados, onde os componentes são empilhados em camadas com alinhamento preferencial de alta resistência, e painéis sanduíches, os quais são constituídos por duas faces externas mais resistentes separadas por uma região central (recheio) menos densa. Classificado de acordo com a matriz utilizada, pode ser metálica, cerâmica ou polimérica, conforme Figura 4 [20].

Figura 4 - Classificação dos materiais compósitos em função do tipo de matriz



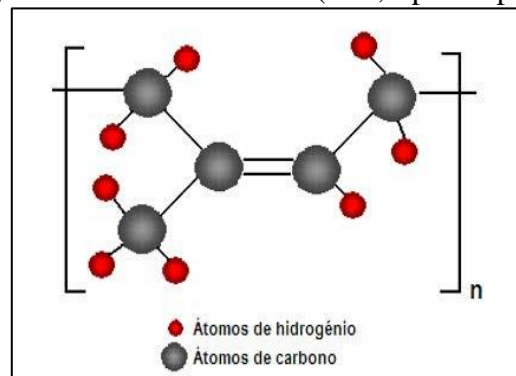
Fonte: Adaptado de Souza Filho (2015) [21].

## 2.2 BORRACHA NATURAL

A borracha natural é um polímero natural, obtido a partir da coagulação do látex recolhido de algumas espécies vegetais, principalmente da *Hevea brasiliensis*, da família das Euforbiáceas. Diferentes tratamentos do látex conduzem à obtenção de diversos tipos de borracha natural. Quimicamente a borracha natural é um polímero do isopreno, conforme a Figura 5 [22]. A borracha natural pode reagir com o enxofre sob temperaturas elevadas para formar reticulações, ocorrendo a transformação de um estado pegajoso e fundamentalmente plástico em estado elástico [23].

Os graus de qualidade mais elevados são obtidos através da coagulação por acidificação, sob condições fabris cuidadosamente controladas [24].

Figura 5 - Borracha natural (cis1,4-poliisopreno)



Fonte: Ciência e Tecnologia da Borracha [22].

A borracha natural possui as seguintes propriedades: elasticidade, insolubilidade, capacidade de aumentar seu volume com a ação da umidade. Os vulcanizados da borracha natural possuem: boa resistência à tração, boa elasticidade, resistência ao calor (80° - 90°C), boa flexibilidade sob baixas temperaturas (até aproximadamente -55°C), excelentes propriedades dinâmicas, alta permeabilidade ao gás, tornando-a ideal para aplicações como pneus, solados de calçados, luvas, mangueiras e muitos outros produtos industriais e comerciais.

A Indonésia é o maior produtor de borracha do mundo. A Tailândia, Malásia e Vietnã também são grandes produtores, e juntos concentram 71% da produção mundial. O Brasil já foi o maior produtor mundial de borracha, mas perdeu o posto na década de 1950. Atualmente, o Brasil detém apenas 1,5% do mercado mundial e importa 60% da borracha natural que consome. O estado de São Paulo é o maior produtor de borracha natural do Brasil.

Segundo Gonçalves *et al.* (2011) [25] pesquisador científico do IAC de Votuporanga/SP, a região noroeste do estado de São Paulo, maior produtora de borracha natural do País, com 66% de área cultivada, ganhou ainda mais força com as pesquisas e programas de melhoramento genético de seringueiras ao desenvolver “clones” com o intuito de tornar as plantações mais produtivas; buscando com isso uma antecipação na sangria das árvores.

No Brasil, a evolução da heveicultura em regiões como os estados do Espírito Santo, São Paulo, norte do Paraná e Minas Gerais justifica-se pelo fato das condições ambientais não serem favoráveis ao desenvolvimento do fungo *Microcyclus ulei* (P. Henn) v. Arx., causador do mal-das-folhas. Este fungo é considerado o principal entrave para o desenvolvimento da heveicultura [26, 27]. O sucesso da cultura nesses estados deve-se, principalmente, ao desenvolvimento de clones produtivos, mais tolerantes às doenças e com alta capacidade de adaptação a um grande número de padrões edafoclimáticos [28, 29].

Segundo a CTB (Ciência e Tecnologia da Borracha) [22], quanto a classificação e especificações da borracha natural, existem muitos tipos de borracha natural na forma sólida, que se podem agrupar em quatro categorias:

Tipos internacionais normalizados: (folhas fumadas, crepes brancos e pálidos, crepes castanhos, crepes compostos, crepes castanhos re-misturados, crepes blankets e outros tipos de crepes castanhos, obtidos de aproveitamentos.

Tipos de borrachas tecnicamente especificadas: vários graus de borracha produzidos pela Malásia (SMR – Standard Malaysian Rubber); pela Indonésia (SIR – Standard Indonesian Rubber); por Singapura (SSR – Specified Singapore Rubber); pelo Sri Lanka (antigo Ceilão) (SLR – Standard Sri Lanka Rubber); pela Tailândia (STR – Standard Thai Rubber), pelo Vietnã (SVR – Standard Vietnamese Rubber); pela Índia; pela China; pela Libéria e pela Nigéria (NSR – Nigerian Standard Rubber). Outros países, tais como Camarões, Costa do Marfim, Gana, Gabão, Brasil, apresentam interessantes contributos para a produção mundial.

Tipos de borrachas especialmente preparados: ADS – Folhas secas ao ar ou “air dried sheets”; DPNR – borracha natural desproteínada ou “deproteinized natural rubber”; borracha peptizada; borrachas em pó ou granulada; borracha líquida – LNR; borrachas de superior processamento – tipos “SP”; borracha de baixo nível de cheiro (Sumar); CV – Tipos de borracha com viscosidade controlada.

Tipos de borracha modificada: ENR – borracha natural epoxidada (epoxidized natural rubber); MGNR – borracha natural enxertada com metacrilato (methacrylate grafted natural rubber); borracha natural estendida em óleo – OENR (oil extended natural rubber);

TPNR – borracha natural termoplástica (thermoplastic natural rubber); TPENR – borracha natural termoplástica epoxidada (thermoplastic epoxidized natural rubber) e “tire rubber”.

Na presente tese foi utilizada a borracha natural vietnamita (BN) do tipo SVR-CV60 (Standard Vietnamese Rubber) com viscosidade Mooney superior a 60,0 (medida a 100° C) e teor de nitrogênio 0,6% em massa.

### *2.2.1 Extração do Látex (Produção da Borracha Natural)*

O látex é uma substância que pode ser extraída de algumas árvores, e sua coagulação, feita com a adição de ácido acético, resulta na borracha natural, um material elástico. A extração do látex se faz com incisões no tronco da árvore, com um instrumento que possui uma lâmina afiada acabada em formato de gancho. Um corte oblíquo é feito na árvore, que apresenta uma espessura de aproximadamente 13 mm, é de seis milímetros de largura e avança até a metade do tronco. A cada corte, é formada uma canaleta que permite o fluxo do látex até a bica e à caneca coletora e então é colhido e levado para o processo de coagulação. A sangria é geralmente realizada entre seis e oito anos após o plantio da seringueira. É preferível realizar a sangria nos meses secos do ano para evitar ataques de fungos [30].

Atualmente, o sistema de sangria normalmente utilizado para a exploração da seringueira é o descendente em meio espiral (1/2S), no qual apenas metade do tronco da árvore é explorada conforme Figura 6. Os principais fatores condicionantes dos sistemas de sangria são: padrão de entrada em sangria, horário da sangria, descanso anual, comprimento do corte, sentido e inclinação do corte, frequência de sangria e balanceamento do painel. Em relação aos tipos de cortes de sangria, produtores do estado de São Paulo vem utilizando uma técnica alternativa à que é praticada normalmente, que é denominada sangria ascendente, que consiste na exploração racional do tronco da seringueira, respeitando o tempo de regeneração da casca e explorando de forma alternada os painéis de sangria. Sangra-se por três anos em um painel e, no ano seguinte, explora-se outro painel do lado oposto do tronco com uma distância vertical mínima de 10 cm entre eles [25].

Figura 6 - Extração do látex da seringueira (sangria)



Fonte: Portal Agro (2024) [31].

### 2.2.2 Características Relacionadas à Qualidade do Látex da Seringueira

A borracha de *Hevea brasiliensis* é um politerpeno formado por 5.000 a 10.000 unidades de isopreno, organizada em uma cadeia ramificada [32]. Dentre os fatores que envolvem a qualidade do látex pode-se considerar o dry rubber content ou DRC, que representa a quantidade de borracha seca presente no látex e reflete a regeneração do látex no interior dos laticíferos. Vários fatores influenciam na porcentagem final de DRC da borracha, tais como o clone usado, o sistema de sangria e as condições climáticas [33].

No início da estação seca, quando as árvores iniciam o processo de perda das folhas, fator que desfavorece a fotossíntese, diminui a atividade biossintética da seringueira e, portanto, também o DRC [34].

Na borracha natural seca, a porcentagem de extrato acetônico pode variar de 2% a 5% e consiste dos elementos não borracha, dos quais os lipídeos são os principais componentes; sendo que quando o seu valor supera 5% indica a presença destas substâncias estranhas no látex [35].

A plasticidade Wallace mede o grau de degradação causado nos coágulos do campo, nas condições de estocagem ou usinagem. Se for inferior a 30, indica que a borracha deverá ser rejeitada em função da sua má qualidade. Este parâmetro representa a porcentagem de plasticidade retida ou resistência a deterioração apresentada pela borracha após trinta minutos

sob alta temperatura (140°C), que simula a temperatura durante o processamento na indústria de pneumáticos [35].

A viscosidade Mooney (VR) é um parâmetro usado pelos países consumidores de borracha e pela indústria em geral. O valor da viscosidade varia com o tempo de estocagem e com as condições de temperatura e umidade [33].

### 2.2.3 Composição do Látex

O látex é um material viscoso, branco de aspecto leitoso, às vezes de coloração amarelada, produzido por algumas plantas e árvores. Quimicamente, é uma espécie de suspensão coloidal natural constituída por micropartículas orgânicas dispersas em meio aquoso, usado principalmente na produção de borracha. Esse líquido contém de 30% a 40% de borracha, além de água, proteínas, resinas e pequenas quantidades de minerais. Vale ressaltar que a borracha natural não é uma substância, mas sim um material de composição heterogênea que tem como principal componente um polímero do isopreno denominado cis-1,4-poli-isopreno, cuja fórmula mínima é (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>).

As proteínas presentes são, em geral, responsáveis pelo aparecimento de maus odores e ocorrência de alergias. Ao ser colhido na natureza, micro-organismos se aproveitam da presença de carboidratos, proteínas e sais minerais para se desenvolverem no soro do látex, tornando-o perecível (instável). Por isso, de 8 a 10 horas após colheita, ele coagula espontaneamente em um processo conhecido como coacervação, onde ocorre a passagem do látex do estado líquido para o estado sólido. Um agente comum para evitar a coacervação do látex é a amônia, NH<sub>3</sub> [36].

O látex é uma dispersão coloidal aquosa de partículas poliméricas, geralmente esféricas. Convém lembrar que uma dispersão coloidal é entendida quando uma substância sólida, líquida ou gasosa, por meio de partículas de dimensão entre 1 µm (10<sup>-6</sup> m) e 1 nm (10<sup>-9</sup> m), está dispersa em uma outra substância (a qual também pode ser sólida, líquida ou gasosa). Quando se trata da dispersão de partículas sólidas em um meio líquido, estamos diante de um sol ou um gel, portanto o látex é um hidrossol. Por vezes, é comum utilizar o termo “borracha natural” como sinônimo para látex [36].

A seguir é apresentada a composição típica do látex de borracha natural, em porcentagem, massa/massa, do látex *in natura* [37]:

- a) Sólidos totais, 36%;
- b) Borracha seca, 33%;
- c) Substâncias proteicas, 1 a 1,5%;
- d) Substâncias resinosas, 1 a 2,5%;
- e) Cinzas, até 1%;
- f) Açúcares, 1%;
- g) Água, complemento para 100%.

#### 2.2.4 Beneficiamento do Látex de Borracha Natural

Durante a sangria o látex escorre pelas incisões do tronco da árvore e acumula-se na caneca de armazenamento, a logística mais praticada é a de coletar o material (coágulos) quinzenalmente, pois, se deixar aumentar o volume (em processo de maturação) por muito tempo na caneca de coleta, mantendo umidade, ocorre excesso de acidificação pela remontagem de sangrias. O látex coletado é levado para um local onde é coagulado. Tradicionalmente, coagulantes naturais, como ácido acético (vinagre) ou suco de limão, são adicionados ao látex para induzir a coagulação. Isso leva à formação de aglomerados sólidos de borracha conhecidos como coágulos [39], conforme Figura 7.

Figura 7 - Coágulos de látex da seringueira



Fonte: Embrapa [39].

Destaca-se as principais atividades aplicadas no beneficiamento do látex (coágulos de borracha natural) [38]:

- a) Lavagem;
- b) Homogeneização;
- c) Granulação;
- d) Secagem;
- e) Desidratação por circulação forçada de ar quente e;
- f) Prensagem em fardos.

Lembrando que cada usina de beneficiamento pode apresentar uma atividade com algumas características acessórias (diferentes) em função da sua estrutura, como também considerando os aspectos comerciais a que se propõe. Tendo assim as atividades específicas para cada tipo de produto beneficiado, e para isso, contam com laboratórios tecnológicos e controle de qualidade próprio. As atividades são apresentadas a seguir, segundo as Figuras 8 a 15 [38].

Figura 8 - Lavagem



Fonte: Viahevea [38].

Figura 9 - Homogeneização



Fonte: Viahevea [38].

Figura 10 - Granulação



Fonte: Viahevea [38].

Figura 11 - Secagem/ Desidratação



Fonte: Viahevea [38].

Figura 12 - Desidratação



Fonte: Viahevea [38].

Figura 13 - Retirado da queima



Fonte: Viahevea [38].

Figura 14 - Prensagem



Fonte: Viahevea [38].

Figura 15 - Empacotamento



Fonte: Viahevea [38].

Há também a comercialização do látex em forma líquida, entregue em latas tampadas, geralmente combinado com amoníaco para que não coagule, conforme Figura 16. Dependendo de qual produto será fabricado, é exigido o látex em estados físicos diferentes. Em fábricas de pneu, por exemplo, são demandados os coagulados. Para a fabricação de preservativos, ou luvas cirúrgicas, já é preciso do látex na forma líquida [39].

Figura 16 - Látex líquido



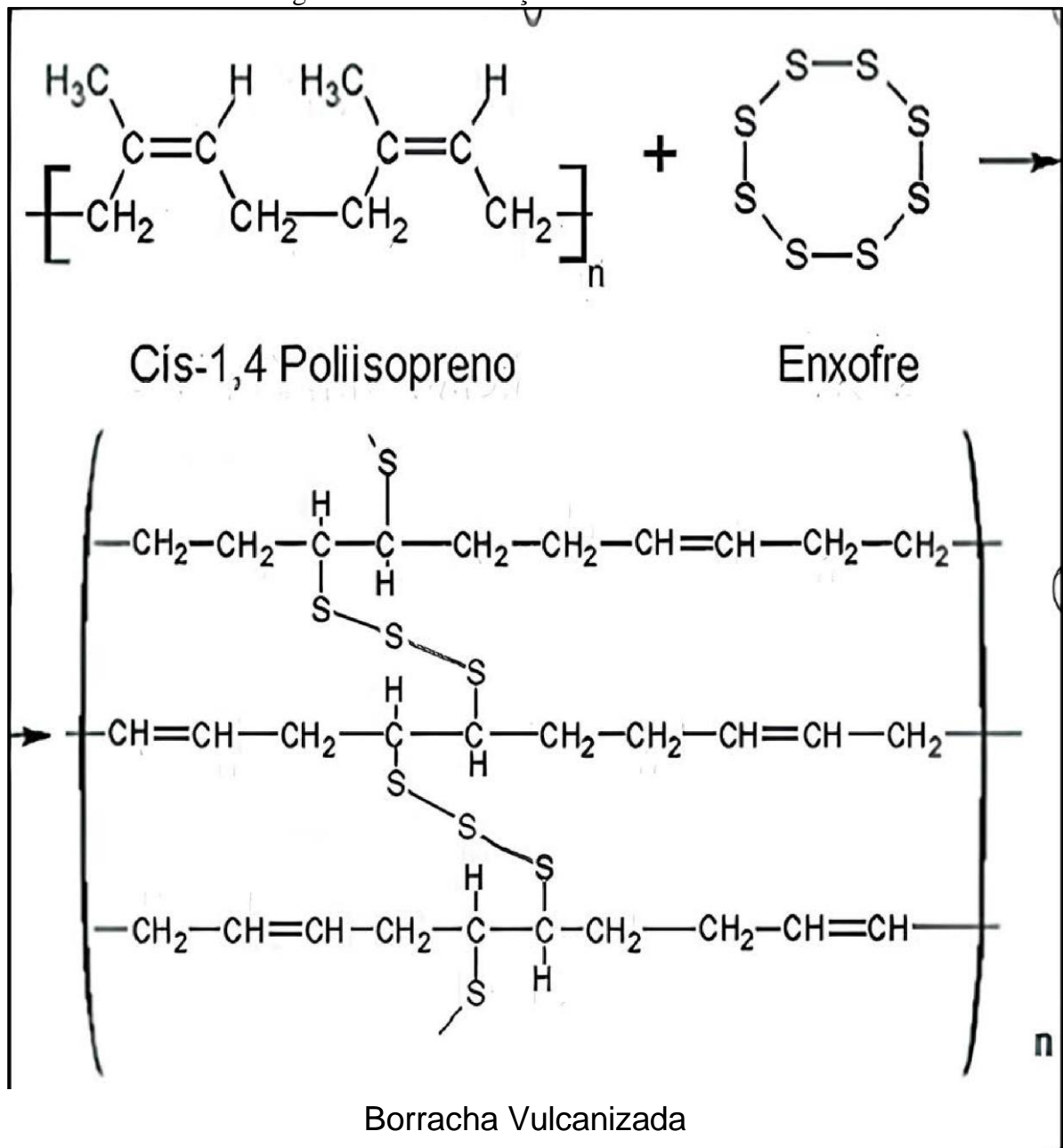
Fonte: Embrapa [39].

### 2.3 VULCANIZAÇÃO DA BORRACHA NATURAL

A vulcanização é um processo de reticulação pelo qual a estrutura química da borracha, matéria-prima, é alterada pela conversão das moléculas do polímero independente, numa rede tridimensional onde ficam ligadas entre si. A vulcanização converte um emaranhamento viscoso de moléculas com longa cadeia numa rede elástica tridimensional, unindo quimicamente (reticulação) estas moléculas em vários pontos ao longo da cadeia.

Para melhorar a qualidade da borracha e deixá-la propícia para ser usada industrialmente para as mais diversas finalidades, ela precisa passar pelo processo da vulcanização. A vulcanização da borracha é obtida através da adição de agentes de cura, como o enxofre, óxidos metálicos ou peróxidos orgânicos. Na adição do enxofre (agente de cura) e aceleradores como o MBTS (dissulfeto de benzoatiasol) e o TMTD (dissulfeto de tetrametiluram) sob aquecimento (normalmente a uma temperatura superior a 140°C), os átomos de enxofre quebram as ligações duplas e formam ligações unindo as moléculas da borracha, que são os poli-isoprenos. Essa nova estrutura é melhor porque, como se pode ver na Figura 17, sem a vulcanização, as moléculas de poli-isopreno podem deslizar umas sobre as outras. Agora, com a realização da vulcanização, os átomos de enxofre unem as estruturas lineares iniciais, formando pontes de enxofre que aumentam a resistência e a dureza da borracha [40].

Figura 17 - Vulcanização da borracha natural



Fonte: Rubberpedia [40].

As borrachas insaturadas, com ligações duplas, são geralmente vulcanizadas com enxofre. A vulcanização com enxofre é preferida pelas seguintes razões:

- a) ajuste mais simples entre o início da vulcanização e o patamar de vulcanização;
- b) maior flexibilidade na composição;
- c) melhores propriedades mecânicas e;
- d) maior economia no processo.

A reação de vulcanização é determinada pelo sistema de vulcanização, pela temperatura e tempo de vulcanização. Quanto maior for o número de reticulações formadas maior será o módulo da borracha [41]. Atualmente o processo de vulcanização envolve a mistura de diversos produtos químicos à borracha. Esta mistura é denominada de formulação da borracha, tendo como objetivo proporcionar à borracha suas propriedades específicas, facilitar e agilizar o processo melhorando o seu desempenho. Abaixo apresentamos as substâncias químicas mais utilizadas para a vulcanização da borracha:

- a)** Agente de cura: elementos químicos introduzidos na borracha, buscando a ocorrência da vulcanização na criação de ligações cruzadas entre as cadeias do polímero. Contribuindo na melhoria das propriedades mecânicas como a sua resistência à tração, ao rasgo, à deformação e à abrasão, melhorando a estabilidade térmica e química do composto. Alguns tipos de agente de cura utilizados e disponíveis no mercado, como o enxofre, óxidos metálicos ou peróxidos orgânicos [42];
- b)** Aceleradores: elementos químicos que aceleram a velocidade de vulcanização, reduzindo o tempo de processamento da borracha. Aumentando a taxa de reação entre os agentes de cura (enxofre) e as cadeias poliméricas, resultando em uma vulcanização com mais rapidez e eficiência. Existem vários tipos de aceleradores com características diferentes e apropriados para diferentes tipos de borracha, destacando o MBTS (dissulfeto de benzoatiazol) como acelerador primário e o TMTD (dissulfeto de tetrametiltiuram) como acelerador secundário [42];
- c)** Ativadores: os ativadores de vulcanização são adicionados à borracha para aumentar a taxa de reação entre as moléculas de borracha e o agente de cura. Existem vários tipos de ativadores de cura como o óxido de zinco, ácido esteárico, aminas e outros, com características favoráveis ou desfavoráveis (desempenho e custo); sendo que a sua escolha depende do tipo de borracha e da aplicação desejada [42];
- d)** Cargas: as cargas podem ser de reforço ou de enchimento, materiais adicionados aos compostos de borracha curada com o objetivo de melhorias em suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas, proporcionando aumento na resistência, na durabilidade, na estabilidade dimensional e na resistência a intempéries da borracha. As cargas de reforço são materiais ativos, como negro de fumo, sílica, fibras de vidro, caulim tratados e outros materiais, que, adicionados à borracha tem o propósito de aumentar a resistência à tração, ao rasgo e à flexão, melhorando a rigidez e a estabilidade dimensional. Cargas utilizadas em aplicações que exigem maiores resistências e que sejam mais duráveis, como pneus e correias transportadoras. Quanto às cargas de enchimento, são materiais inertes como a sílica, carbonato de cálcio, talco, caulim

e outros, que adicionados à borracha tem como objetivos, a redução de custos e melhorias na resistência ao desgaste e à abrasão, também contribuindo no aumento do volume do composto [42];

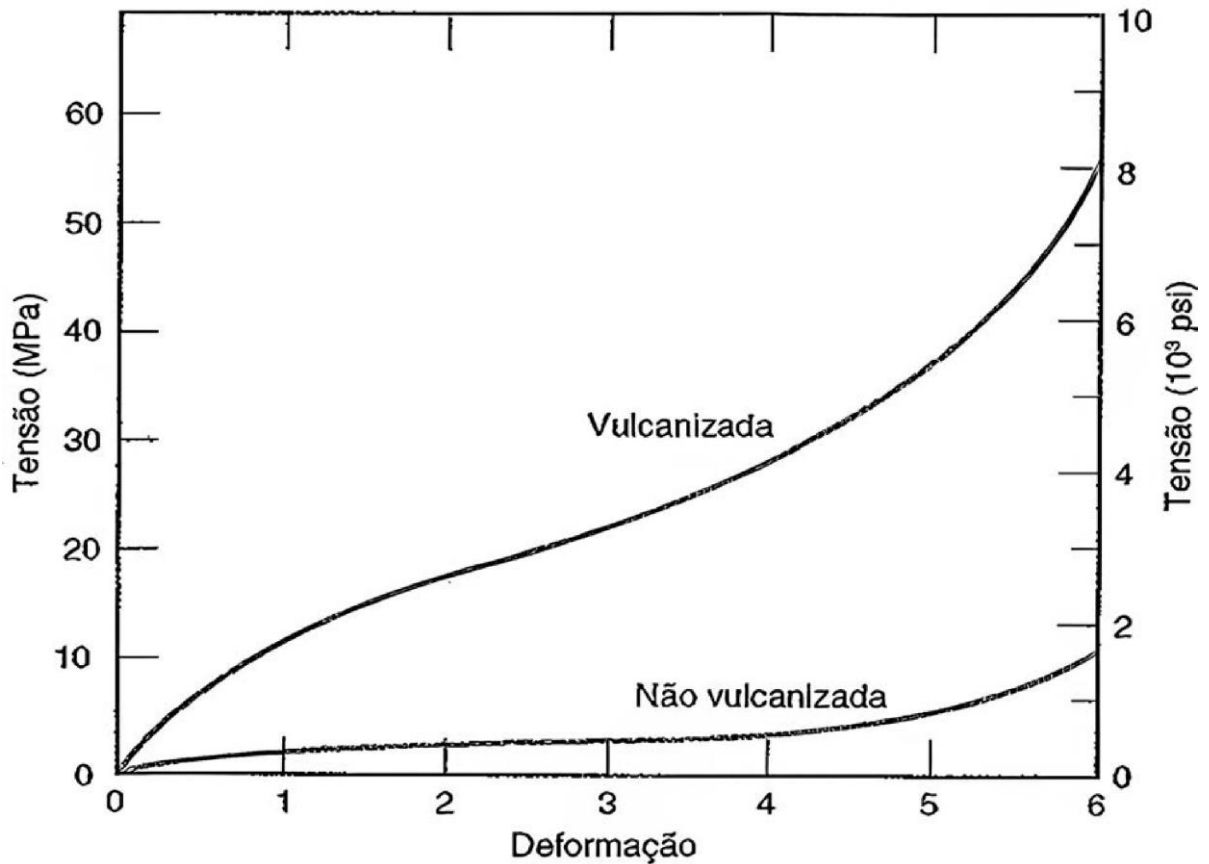
e) Plastificantes: substâncias utilizadas no processo de vulcanização da borracha, buscando proporcionar uma maior maleabilidade e flexibilidade, também contribuem para diminuir a rigidez e a dureza durante o processamento, inclusive melhoram a resistência à fadiga, à fratura e ao envelhecimento. Podemos citar o polietileno glicol (PEG 4000) que é um polímero estável e hidrófilo formado pela adição de óxido de etileno e água, sem adição de eletrólitos (sólido em temperatura ambiente) [42];

f) Agente de acoplamento: tem como objetivo melhorar a aderência entre os componentes na formulação dos compósitos de borracha natural vulcanizada, diminuindo a probabilidade de delaminação ou separação entre os componentes. O agente de acoplamento Chartwell® é muito utilizado no desenvolvimento de compósitos [42].

#### 2.4 SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO

A borracha não vulcanizada é mole e pegajosa, possuindo uma resistência ruim à abrasão. O módulo de elasticidade, o limite de resistência à tração e a resistência à degradação por oxidação são melhoradas pela vulcanização. A magnitude do módulo de elasticidade é diretamente proporcional à densidade das ligações cruzadas. Para produzir uma borracha capaz de ser submetida a grandes deformações sem que ocorra a ruptura das ligações da cadeia primária devem existir relativamente poucas ligações cruzadas, e estas devem estar bastante separadas na cadeia. Tem-se como resultado borrachas úteis quando entre aproximadamente 1 a 5 phr de enxofre são adicionados a 100 phr de borracha [12]. Na Figura 18 observa-se a curva de tensão *versus* deformação da borracha natural vulcanizada e não vulcanizada, onde é identificada um crescimento expressivo nos valores relacionados às características elásticas após a vulcanização [12].

Figura 18 - Curvas Tensão x Deformação



Fonte: Callister [12].

A vulcanização é determinada pelo sistema de vulcanização, pela temperatura e tempo de vulcanização. Quanto maior for o número de reticulações formadas maior será o módulo da borracha. O número de reticulações formadas depende da quantidade de agente de vulcanização, da sua atividade e do tempo de reação. Chamamos-lhe o grau de vulcanização ou densidade de reticulação. O tipo e quantidade de cargas e plastificantes utilizados, podem ter um forte efeito nas propriedades do vulcanizado, mais forte que a densidade de reticulação [40, 16].

Obtêm-se diferentes estruturas de reticulação conforme o sistema de vulcanização usado, considerando três sistemas de vulcanização baseando-se no nível de enxofre utilizado e na relação entre os aceleradores e o enxofre [43].

Para o sistema convencional (CV) é comum utilizar-se, por exemplo, 1,5 a 3,5 phr (partes por cem de borracha) de enxofre e 0,3 a 1,0 de um ou mais aceleradores. Formam-se ligações de polissulfureto ( $C-S_x-C$ ,  $x > 2$ ). Quando a dosagem do acelerador é aumentada, a do enxofre deve diminuir para se obter a mesma densidade de reticulação. Como consequência

formam-se reticulações com menos átomos de enxofre. O sistema convencional (CV) origina melhores propriedades dinâmicas e de flexão, mas pior resistência térmica e à reversão [44].

O sistema eficiente (EV) são caracterizados por usarem 0,25 a 0,7 phr de enxofre e 5 a 2,5 phr de aceleradores. Neles, mesmo na presença de aceleradores, predominam as reticulações, estruturas monossulfídicas (C-S-C) e dissulfídicas (C-S-S-C). Como consequência obtêm-se vulcanizados caracterizados por apresentarem uma excelente resistência ao calor e à reversão, mas pior resistência à fadiga [15, 24, 44, 45].

Nos sistemas semi-eficientes (SEV), são utilizados 0,8 a 2 phr de enxofre e 2,5 a 1 phr de aceleradores, formando-se ligações dissulfídicas (C-S-S-C). Estes sistemas conferem aos vulcanizados boas propriedades mecânicas e dinâmicas e propriedades intermédias de resistência ao calor e reversão [44].

Segundo Datta, R.N. [44] a quantidade de enxofre e aceleradores para a classificação dos sistemas em CV, SEV e EV é um pouco diferente do anteriormente referido e consta da Tabela 1.

Tabela 1 - Sistemas de vulcanização CV, SEV e EV

TIPO	ENXOFRE (phr)	ACELERADOR (A, phr)	A/S
CV	2,0 – 3,5	1,2 – 0,4	0,1 – 0,6
SEV	1,0 – 1,7	2,4 – 1,2	0,7 – 2,5
EV	0,4 – 0,8	5,0 – 2,0	2,5 - 12

Fonte: Datta [44].

Para melhor compararmos as propriedades conferidas por cada um dos três sistemas referidos (CV, SEV e EV), apresentamos um resumo das mesmas na Tabela 2 [44].

Tabela 2 - Propriedades dos vulcanizados

PROPRIEDADES	SISTEMAS DE VULCANIZAÇÃO		
	CV	SEV	EV
Reticulações poli e dissulfídica (%)	95	50	20
Reticulações monossulfídicas (%)	5	50	80
Resistência à reversão	Pequena	Média	Elevada
Resistência ao envelhecimento por calor	Pequena	Média	Elevada
Resistência à fadiga	Elevada	Média	Pequena
Aquecimento interno (acúmulo de calor)	Elevado	Médio	Pequeno
Resistência ao rasgamento	Elevada	Média	Pequena
Resistência à compressão (%)	Elevada	Média	Pequena

Fonte: Datta [44].

## 2.5 LENTES OFTÁLMICAS

Lentes oftálmicas são lentes destinadas a compensar alguns problemas de visão denominados erros de refração (ou vícios de refração - miopia, hipermetropia, presbiopia ou astigmatismo). Elas diferem das lentes utilizadas em instrumentos ópticos porque são lentes projetadas para produzir uma interação com o olho humano, corrigindo assim o problema de visão. Podem ser produzidas com materiais minerais, como o vidro, ou orgânicos, como policarbonatos, poliuretanas, poliacrílicos [46].

As lentes graduadas desenvolveram-se durante a idade média e eram constituídas por cristais de quartzo ou pedras semi-preciosas fatiadas e polidas de forma a produzir um aumento da visão de perto. A partir de 1000 d.C. aumentaram os conhecimentos sobre o comportamento do olho humano face à luz captada e desenvolveram-se as lentes de Berilo de forma a aumentar a visão de perto. Estas eram utilizadas pelos monges nos seus trabalhos de biblioteca e distinguiam pela sua nitidez e brilho [47].

A existência de lentes para a correção da visão de longe (miopia) surge referenciada no livro de Nicolaus Cusanos “De Berillo” que data do século XV. No século XVIII surgem as lentes bifocais (visão de perto e de longe) e no século XIX surgiram na Inglaterra as primeiras lentes para astigmatismo [47].

No que diz respeito aos materiais, até há 60 anos atrás, existiam apenas lentes minerais, feitas de cristais. Em 1941 foi introduzido o CR-39, como primeiro material orgânico (plástico), indicado para a produção de lentes oftálmicas [48].

Hoje, com o desenvolvimento das matérias orgânicas (plásticas), existem muitos materiais patenteados e comercializados com as mais variadas designações comerciais. No entanto, todos eles são polímeros sintéticos dos quais os mais conhecidos são o CR-39, o Policarbonato, os Médios e Altos índices e dentro destes o Trivex. A evolução destes materiais tem sido no sentido de serem mais resistentes, mais leves e com melhor qualidade óptica.

### *2.5.1 Tipos de Materiais de Lentes Oftálmicas*

Os materiais mais utilizados na produção de lentes oftálmicas são de origem orgânica, sendo que existem produtores que fabricam e comercializam lentes de origem mineral (vidro) em função do seu baixo custo. É um material em decadência na fabricação de lentes oftálmicas devido à algumas características, como, problemas de segurança a fraturas, altas massas e limitações estéticas.

Existem os principais polímeros naturais (borracha, madeira, algodão, lã, couro, seda, etc.) e os principais polímeros sintéticos (policarbonato, polietileno, poliuretano etc.) [49]. Sendo que os polímeros sintéticos são produzidos industrialmente principalmente do petróleo, contudo existem outras matérias com alto teor de carbono que podem ser usadas para produzir polímeros, como é o caso do carvão mineral [50].

Os polímeros sintéticos são caracterizados através de suas propriedades básicas, em específico pelas propriedades mecânicas, podendo os polímeros serem classificados como Termoplásticos, Termofixos, Elastômeros e Fibras [49, 50].

Em relação aos polímeros que constituem as lentes oftálmicas, os que são mais utilizados comercialmente são:

**a) CR-39**, nome comercial com que ficou registrado este produto, produzido pelo Laboratório Columbia na cidade de Ohio, nos EUA. Baseado na formulação de um Di-carbonato Di-alila do Etileno Glicol, classificado na categoria dos polímeros Termofixos [51];

**b) Policarbonato**, é um polímero termoplástico da família dos poliésteres aromáticos [42]. O fato de ser um Termoplástico permite-lhe ser remoldado várias vezes através de um processo de aquecimento e arrefecimento [52,53]. O Policarbonato é um polímero de engenharia, com elevadas capacidades técnicas e várias aplicações, na produção de lentes oftálmicas as principais características são a elevada resistência ao impacto, a leveza, a transparência e a capacidade de bloqueio dos raios UV [52,54];

**c) Poliuretanos (Materiais orgânicos de médio/alto índice de refração)**, são polímeros pouco específicos quanto aos monômeros que utilizam, pois precisam apenas de ter ligações uretânicas entre as unidades orgânicas para pertencer a este grupo [55]. Como matéria constituinte de lentes oftálmicas destaca-se pela sua reduzida espessura, resultante do seu alto índice e pela sua dureza e resistência ao impacto (apesar de inferior ao policarbonato) [55]. Os poliuretanos constituem uma classe de polímeros importantes porque podem originar produtos macios ou duros, elásticos ou rígidos, dependendo das suas condições de síntese [56]. Entretanto, os poliuretanos constituintes das lentes oftálmicas orgânicas são poliuretanos termoplásticos (TPU) constituídos, por exemplo, por repetidas unidades uretânicas [57]. O Trivex é um material relativamente recente que entra na categoria dos poliuretanos, sendo desenvolvido especialmente para a indústria de lentes oftálmicas, combinando as melhores características do Policarbonato com as do CR-39. Sendo que as suas principais vantagens estão relacionadas com a resistência, a leveza, a qualidade óptica e o bloqueio dos raios UV [52, 54, 58].

### 2.5.2 Fabricação das Lentes Oftálmicas

A confecção das lentes oftálmicas inicia-se com o preparo dos blocos oftálmicos, constituído em forma circular com dimensões padrões, tendo um diâmetro em torno de 80 mm e espessura de 13 mm (matéria-prima para cada tipo de material), processados para produzir lentes com a dioptria (“grau”) desejada, conforme Figura 19 [59].

Figura 19 - Bloco oftálmico



Fonte: Prime Optical [59].

As principais fornecedoras de blocos oftálmicos são, atualmente, *Hoya, Essilor e Zeiss*. A maioria das empresas ópticas apresentam três tipos de processos produtivos:

- a) Cristal;
- b) tradicional e;
- c) digital [59].

**Cristal**, é um processo mais antigo e específico para lentes de cristal (vidro), os blocos oftálmicos são desgastados em suas duas faces. Da combinação entre o índice de refração e a diferença entre as curvaturas interna e externa resulta a dioptria desejada. A peça é desgastada (processo denominado “surfaçagem”), primeiramente, na sua face externa (o mínimo possível) e posteriormente na interna, o desgaste é realizado com a adição de água conforme Figura 20. As etapas seguintes para o preparo das lentes, compreendem: acabamento e polimento [60].

Figura 20 - Gerador de curva



Fonte: Moodle USP (2014) [60].

**Tradicional**, este processo é o mais utilizado atualmente, sendo aplicado em resinas e policarbonato como matérias-primas, tratando apenas a parte interna do bloco oftálmico (a outra face já foi desgastada pelo fornecedor). A maior parte das lentes produzidas são de baixas dioptrias, o bloco oftálmico fica com espessura reduzida (em torno de 10 mm de remoção do material) em comparação ao processo do cristal. O desgaste interno do bloco oftálmico (“surfaçagem”) é realizado em um torno automático programável por computador e usa a água como lubrificante (após fixação em um porta-bloco) e posterior polimento da lente oftálmica (Figura 21) [60].

Figura 21 - Bloco oftálmico e porta-bloco



Fonte: Moodle USP (2014) [60].

**Digital**, processo produtivo mais moderno e como no tradicional, trabalha-se apenas a face interna dos blocos oftálmicos. Ele é operado a maior parte do tempo por uma máquina, que substitui grande parte das etapas. Inicialmente, faz-se a proteção do bloco, como no processo tradicional, máquinas modernas fazem a leitura do código de barra e, assim, ela entende quais as configurações necessárias para produzir a dioptria requerida. Entra-se com o bloco e a máquina tem como produto final a lente com a curvatura adequada, sendo necessário apenas o polimento da peça. Os restos de resina e policarbonato misturados com água são escoados para um recipiente, no qual a resina fica retida e a água é recolhida para ser reutilizada no processo, conforme Figuras 22, 23 e 24 [60].

Figura 22 - Equipamentos e operador



Fonte: Moodle USP (2014) [60].

Figura 23 - Lente desgastada, com a dioptria indicada pelo código de barras



Fonte: Moodle USP (2014) [60].

Figura 24 - Resíduos de resina e policarbonato misturados com água



Fonte: Moodle USP-2014 [60].

Considerando que o processo **Tradicional** de fabricação de lentes oftálmicas é o mais utilizado entre as empresas ópticas, o desgaste interno do bloco oftálmico (surfaçagem) requer uma atenção especial na fabricação das lentes, pois, consiste em alcançar a curvatura desejada da lente através do processo de lixamento da mesma. É durante esta etapa que resultam as aparas do material trabalhado, que vão constituir um dos tipos de resíduos gerados na produção de lentes oftálmicas [61].

A surfaçagem compreendida como a segunda fase do processo de produção, do qual resulta a lente acabada, processará o desbaste do bloco oftálmico de material previamente produzido e que tem uma das faces já acabada, ela é protegida por uma película adesiva. A outra face será desbastada para que fique com a curvatura que confere à lente as dioptrias desejadas conforme Figura 25 [61].

Figura 25 - Lente trabalhada nas duas faces



Fonte: Graça (2010) [61].

O processo de surfacagem pode ser realizado utilizando duas tecnologias diferentes, a convencional que utiliza blocos semi-acabados, pelo que apenas vai desbastar a face interna do bloco oftálmico e a de última geração (“Free-Form”) que utiliza blocos em que ambas as faces serão desbastadas. A tecnologia convencional, continua ainda a ser utilizada, o desbaste é efetuado por uma máquina de corte que segue as instruções de um computador que, através de cálculos matemáticos, determina a curvatura interna correta para conseguir a graduação, diâmetro e espessura pretendidas [56].

A tecnologia “Free-Form” ou Surfacagem digital é a última tecnologia disponível e caracteriza-se por utilizar blocos oftálmicos sem forma definitiva em nenhuma das faces. A surfacagem digital combina uma máquina especial geradora de superfícies e um software de computador específico. Juntos, traçam curvas complexas nas duas faces do bloco oftálmico produzindo lentes de alta qualidade, pois o desenho da lente é adaptado aos parâmetros visuais do usuário. Esta tecnologia permite reduzir em 30% as distorções das lentes, aumentar 20% os campos visuais e garantir uma precisão de 0,01 dioptrias em qualquer ponto da lente [59].

A etapa seguinte no processo de fabricação de lentes oftálmicas consiste do Polimento, processo pelo qual é aperfeiçoada e polida a face ou as faces da lente, adquirindo o seu brilho característico. Depois de polidas, as lentes passam à fase de verificação, onde são conferidas através de um lensômetro, aparelho que verifica a graduação (medida em dioptrias) e o eixo. A espessura central e a do bordo da lente também são analisadas e as lentes estão prontas para serem submetidas ao Controle de Qualidade [56].

### *2.5.3 Comercio e Consumo de Lentes Oftálmicas*

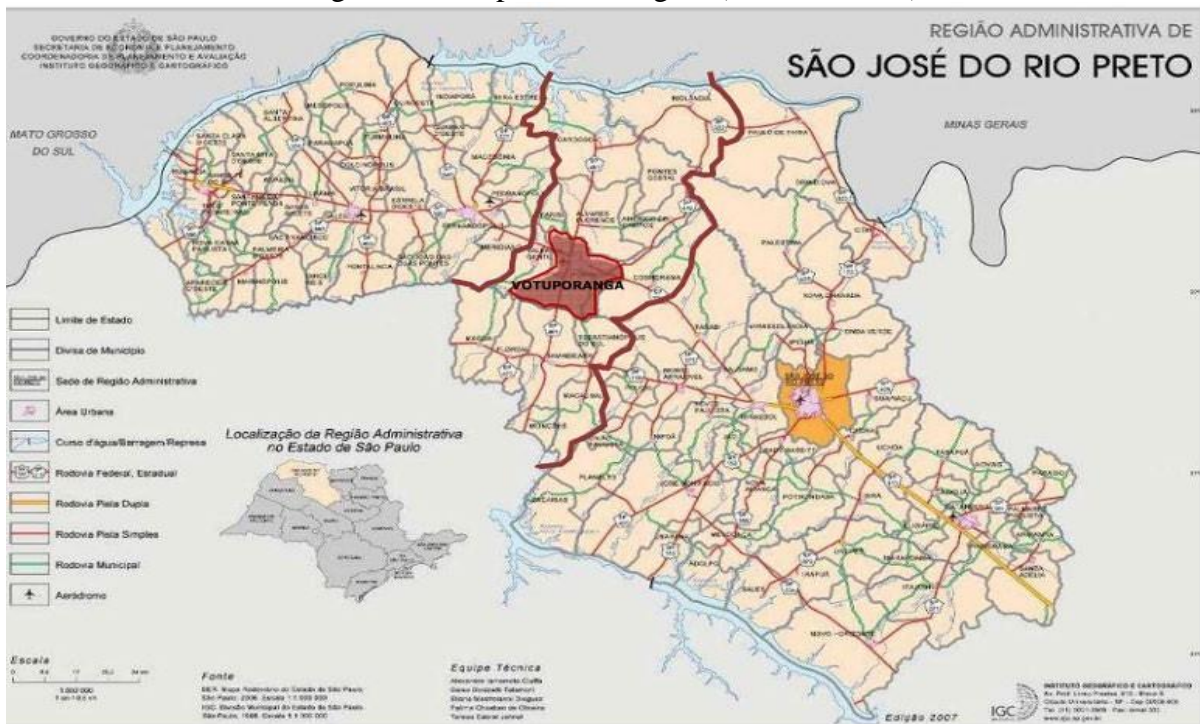
Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a miopia, dificuldade de enxergar à distância, é um dos problemas de saúde pública que mais cresce no mundo. A projeção do órgão é de que metade da população mundial seja míope em 2050, e o pior: em alguns países, a alta miopia, que configura graus acima de seis, está aumentando mais que a baixa ou moderada dificuldade de enxergar — este é o caso do Brasil [62].

Os dados preveem que entre 2020 e 2040 o número global de altos míopes aumente 74%, passando de 399 milhões para 695 milhões. Neste mesmo período, o número de brasileiros com alta miopia deve aumentar 84,8%, passando de 6,6 milhões para 12,2 milhões. Ante as projeções, especialistas chamam atenção para as crianças com ou sem miopia, primeiro devido à era tecnológica que vivemos, segundo porque elas serão os adultos em 2040 [62].

Considerando esta situação, na presente tese, procurando avaliar com maior precisão a realidade em relação ao “mundo oftálmico”, realizamos uma pesquisa, na qual buscou maiores informações das empresas ópticas em relação às operações de venda de lentes oftálmicas e manejo operacional (processo produtivo) em conformidade com o descarte dos resíduos de lentes oftálmicas (RLO).

As empresas ópticas pesquisadas estão estabelecidas na cidade de Votuporanga/SP e conforme Censo Demográfico realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em 2022, o município de Votuporanga possuía 96.634 habitantes com uma população estimada em 2024 para 100.159 habitantes [63]. Votuporanga está localizada na região noroeste do Estado de São Paulo, distante cerca de 527 km da cidade de São Paulo conforme ilustrado na Figura 26. Possui uma área de 424,1 km<sup>2</sup> e altitude média de 525 metros. Suas coordenadas geográficas são: Latitude: 20°25'02" Sul e Longitude: 49°58'22" Oeste [64].

Figura 26 - Mapa Macrorregião (S. J. Rio Preto)



Fonte: Instituto Geográfico e Cartográfico (2008) [65].

Segundo a A.C.V. (Associação Comercial de Votuporanga) foi informado que no município existem 30 empresas óticas tendo como objeto social o comércio de produtos oftálmicos [66]. A pesquisa procurou levantar os seguintes dados:

- a) Número de lentes produzidas e comercializadas, inclusive o número de armações de óculos;
- b) Tipos de lentes produzidas (cristal, CR-39, policarbonato e poliuretanos);
- c) A empresa possui laboratório para produzir as lentes oftálmicas, ou utiliza laboratórios de outras empresas;
- d) Caso produza as lentes em laboratório próprio, tem controle sobre o número de lentes “não conformes” (erros de produção transformando-as em lentes de sucata);
- e) Controle do número de lentes oftálmicas (óculos) deixados pelos clientes no estabelecimento, quando da retirada dos novos óculos;
- f) Como é realizado o controle do descarte em relação aos resíduos gerados no processo (fabricação das lentes, lentes de sucata durante a fabricação e os óculos deixados pelos clientes);
- g) Tem apropriado a quantidade de resíduos gerados (massa ou volume) e;
- h) Há algum protocolo exigido pelos órgãos públicos municipais em relação ao encaminhamento do descarte destes resíduos.

Os dados coletados na pesquisa são apresentados na Tabela 3, informados por 4 empresas.

Tabela 3 - Dados pesquisados (produção, resíduos e descartes)

AÇÕES	Empresa 1	Empresa 2	Empresa 3	Empresa 4
Quantidade de lentes	1100/mês	1200/mês	900/mês	950/mês
Tipos de lentes	CR39 / policarbonato	CR39 / policarbonato	CR39 / policarbonato	CR39 / policarbonato
Possuí laboratório	SIM	SIM	NÃO	SIM
Laboratório terceirizado	_____	_____	SIM	_____
Geração de resíduos	70 kg/mês	75 kg/mês	_____	60 kg/mês
Manejo de descartes	domiciliar	domiciliar	domiciliar	domiciliar

Fonte: Autoria própria.

As empresas pesquisadas que não possuem laboratórios próprios para a produção das lentes utilizam os serviços de um grande laboratório sediado em São José do Rio Preto/SP.

### 2.5.4 Resíduos de Lentes Oftálmicas (RLO)

As lentes oftálmicas sofrem várias transformações desde o início do processo de fabricação, representadas pela arte de manuseio dos blocos oftálmicos (lentes semi-acabadas) com especificações de cada material de origem, adequação das dioptrias desejadas (surfaçagem), polimento das lentes, até instaladas em armações (óculos) para serem comercializadas e utilizadas pelo cliente. No período em que são utilizadas (correção visual), até o momento em que é necessária uma nova adequação (aumento de dioptrias, por exemplo), será necessária a troca das lentes oftálmicas (novos óculos). Ao longo deste caminho são gerados diversos resíduos com características diferenciadas (forma, texturas, granulometrias, etc.) [61].

Os RLO resultantes durante o processo, são apresentados conforme características descritas a seguir:

- a)** Desgaste das faces do bloco oftálmico (surfaçagem) = aparas (resíduo úmido);
- b)** Corte das lentes oftálmicas (para adaptar na armação) = aparas;
- c)** Lentes mal-acabadas ou com imperfeições = lentes de sucata;
- d)** Lentes devolvidas nas ópticas quando da retirada de novas lentes = lentes de sucata.

Aparas: resíduos úmidos constituídos por partículas de material resultantes do corte de um bloco oftálmico (resina), que dependendo do material de origem (CR-39, Policarbonato e Poliuretano) apresenta um aspecto pastoso conforme Figuras 27, 28 e 29 [61].

Figura 27 - Aparas de CR-39



Fonte: Graça [61].

Figura 28 - Poliuretano



Fonte: Graça [61].

Figura 29 - Policarbonato



Fonte: Graça [61].

Lentes de sucata: resíduos secos constituídos por lentes acabadas no processo de fabricação (sucatas) e usadas (sucatas) conforme Figuras 30 e 31 [61].

Figura 30 - Lentes fabricação - sucata



Fonte: Graça [61].

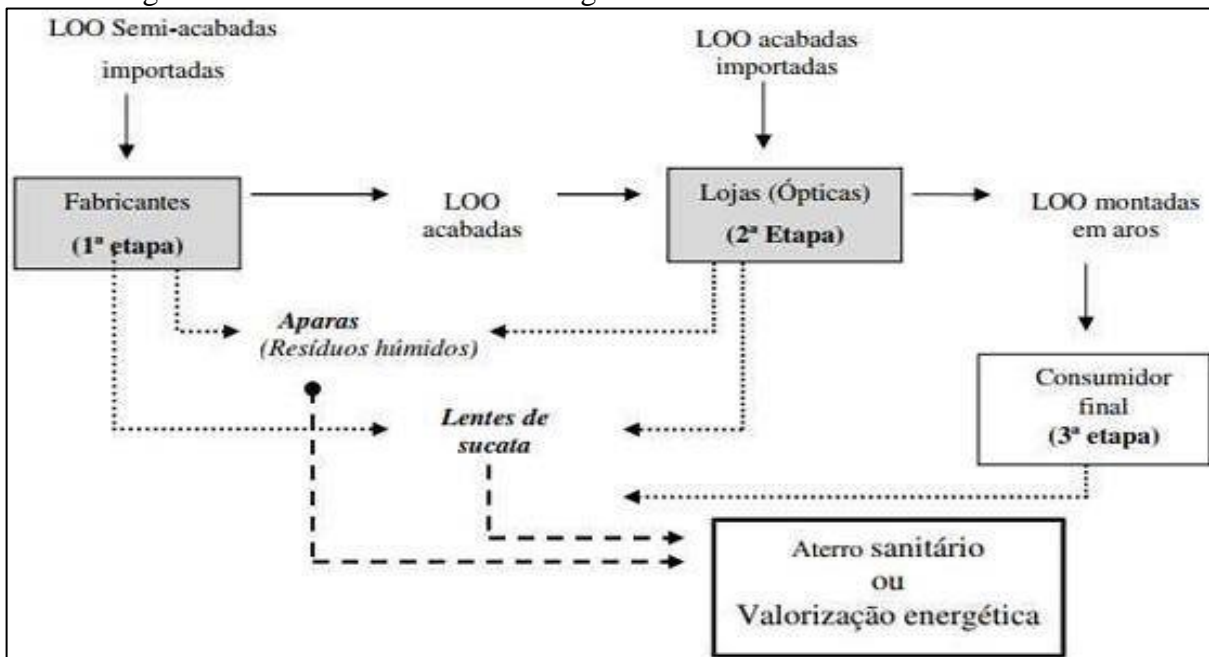
Figura 31 - Lentes usadas - sucata



Fonte: Graça [61].

O destino final destes resíduos é a deposição em aterro sanitário, contribuindo para problemas associados à concentração de plásticos, redução do tempo de vida útil do aterro, dificuldades em obter os devidos graus de compactação dos resíduos e prejuízos na decomposição dos materiais biodegradáveis [61]. A Figura 32 mostra o fluxo dos resíduos (RLO) gerados ao longo do ciclo de vida das lentes oftálmicas em Portugal.

Figura 32 - Fluxo de resíduos ao longo do ciclo de vida das lentes oftálmicas



Fonte: Graça [61].

Durante o processo de surfacagem (desgastes das lentes para atingir os graus desejados) auxiliado com a presença de água, resulta em um material aquoso o qual é

encaminhado ao tanque de decantação para separação das fases (sólida e líquida). A fase sólida úmida após passar pelo filtro, reduz sensivelmente a umidade caracterizando-se em resíduo de lente oftálmica (RLO). O resíduo de lentes oftálmicas (RLO) é tratado em estudo no qual é utilizado em matriz polimérica e também em matriz de cimento, além disso usando a água residual para cultivo de microalgas [67]. As Figuras 33 e 34 mostram o tanque de decantação e o pó de lentes oftálmicas (material filtrado) respectivamente.

Figura 33 - Tanque de decantação



Fonte: Encarnação [67].

Figura 34 - Pó de lentes oftálmicas



Fonte: Encarnação [67].

Como podemos observar, não existe até o momento uma preocupação em protocolos e procedimentos para que haja o descarte seletivo, adotando políticas de reutilização do resíduo de lentes oftálmicas (RLO), inclusive com visão sustentável ambiental e econômica.

Graça (2010) [61], pesquisou que em Portugal havia uma produção de 221,6 toneladas/ano de resíduo seco, com cerca de 70,6 toneladas de policarbonato, material de maior resistência mecânica quando comparado a outros materiais constituintes das lentes oftálmicas e 151 toneladas de outros resíduos, geralmente resinas poliméricas. Diante da dificuldade de separação do policarbonato com outro material, a única solução para esse quantitativo de rejeito era a valorização energética (queima e geração de energia térmica).

Galdino *et al.* (2017) [68] relatou em um trabalho de pesquisa, que teve como objetivo a determinação dos resíduos gerados no processo de fabricação de uma indústria de lentes oftálmicas situada em João Pessoa/PB, um quantitativo de 1300 kg/mês de resíduos do tipo II, provenientes da fabricação das lentes e do processo de superfície.

Em Votuporanga/SP a S.A.E.V. Ambiental em cumprimento ao PMGIRS-2014 (Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos) [69], trata os resíduos das lentes

oftálmicas (RLO) como resíduo domiciliar, não prevendo nenhum protocolo quanto ao seu armazenamento, transporte e destinação. Sendo recolhido através da coleta convencional e encaminhado ao aterro sanitário para a sua deposição.

A literatura mostra o potencial dos resíduos de lentes oftálmicas (RLO) que é resultante dos processos de fabricação de lentes, caracterizando-se como um elemento muito importante que não é devidamente aproveitado em suas características e propriedades, deixando de ser aproveitado para incorporação em compósitos que possam ser utilizados de maneira a contribuir para a economia circular.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral do presente projeto é elaborar um material compósito utilizando o Resíduo de Lentes Oftálmicas (RLO) incorporado com a Borracha Natural (BN), buscando possível inovação tecnológica em suas aplicações; considerando as possibilidades de contribuir com a mitigação do resíduo descartado no meio ambiente.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a)** Avaliar os parâmetros reológicos dos compósitos (BN/RLO);
- b)** Analisar as densidades de ligações cruzadas (por inchamento em solvente orgânico e por meio de ensaios de resistência à tração);
- c)** Analisar as propriedades mecânicas (dureza, resistência à abrasão, à tração e ao rasgo) dos compósitos (BN/RLO);
- d)** Caracterização dos compósitos através de técnicas de comportamento térmico (DSC e TG);
- e)** Estudar a morfologia dos compósitos (BN/RLO) e;
- f)** Determinar o compósito com maior viabilidade para o uso proposto.

## 4 PROCESSO EXPERIMENTAL

### 4.1 MATERIAIS

A borracha natural do tipo SVR-CV60 (Standard Vietnamese Rubber), com viscosidade Mooney superior a 60,0 (medida a 100°C) e teor de nitrogênio de 0,6% em peso, foi adquirida comercialmente da empresa DLP Indústria e Comércio de Borracha e Artefatos Ltda, sediada em Poloni, São Paulo, Brasil, conforme Figura 35. O resíduo de lentes oftálmicas (RLO) foi gentilmente cedido pela empresa Perego Indústria e Comércio de Lentes Ltda, localizada em Araçatuba, São Paulo, Brasil. Esse material passou por um processo de secagem a uma temperatura de 100°C e submetido a um peneiramento para garantir granulometria superior a 120 mesh, conforme Figura 36. Todos os insumos necessários para a vulcanização foram adquiridos de fornecedores confiáveis, garantindo elevado grau de pureza, incluindo óxido de zinco (99%, Synth), ácido esteárico (98%, Synth), polietileno glicol PEG 4000 (99%, Synth), agente de acoplamento Chartwell C-515.71HR<sup>®</sup> (Chartwell International - Massachusetts, EUA), enxofre (99%, Scientific Exotic) e aceleradores como MBTS/dissulfeto de benzoatiazol (99%, Basile Química) e TMTD/dissulfeto de tetrametiltiuram (99%, Basile Química).

Figura 35 - Borracha Natural



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 - Resíduo lente oftálmica (RLO)



Fonte: Autoria própria.

A formulação utilizada para a preparação dos compósitos de BN/RLO está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Formulação dos compósitos de borracha BN e resíduo de lentes oftálmicas

Componentes da formulação	Quantidades dos componentes em phr					
	BN/RLO <sub>0</sub>	BN/RLO <sub>10</sub>	BN/RLO <sub>20</sub>	BN/RLO <sub>30</sub>	BN/RLO <sub>40</sub>	BN/RLO <sub>50</sub>
BN SVR CV60	100	100	100	100	100	100
Óxido de zinco	4	4	4	4	4	4
Ácido esteárico	2	2	2	2	2	2
PEG 4000	3	3	3	3	3	3
Chartwell	2	2	2	2	2	2
Óleo naftênico	5	5	5	5	5	5
Resíduo de lente oftálmica	0	10	20	30	40	50
Enxofre	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Acelerador MBTS	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Acelerador TMTD	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
<b>Total</b>	<b>119,8</b>	<b>129,8</b>	<b>139,8</b>	<b>149,8</b>	<b>159,8</b>	<b>169,8</b>

Fonte: Autoria própria.

\*phr (per hundred rubber); BN/RLO (compósito de borracha natural e resíduo de lentes oftálmicas).

## 4.2 PREPARO DOS COMPÓSITOS

Os compostos foram preparados em conformidade com os protocolos estabelecidos pela norma ASTM D3182-21a [70], utilizando um misturador aberto de cilindros a uma razão de fricção de 1:1,25 conforme Figura 37, pertencente ao Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) – Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) - UNESP Campus de Rosana. Foram empregadas quantidades variáveis de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 phr (porcentagem parte por milhão) de RLO. No processo de mistura, a borracha natural foi combinada com os agentes de ativação, tais como óxido de zinco e ácido esteárico, juntamente com plastificantes como polietilenoglicol 4000 e óleo de processamento, além do resíduo de lentes oftálmicas utilizado como carga. Após homogeneização por um período de 20 minutos, a mistura foi deixada em repouso por 24 horas, a uma temperatura ambiente de 22°C. Posteriormente, a massa foi reintroduzida no misturador para a adição do agente de reticulação (enxofre) e dos aceleradores de vulcanização (MBTS e TMTD). Após uma nova homogeneização por 15 minutos, a mistura foi deixada em repouso por 2 horas à temperatura ambiente. Concluídas estas etapas, os compósitos foram submetidos a testes reométricos e, em seguida, moldados por compressão em uma prensa hidráulica da marca Mastermac, modelo

Vulcan 400/20-1, no Laboratório da FEC-UNESP-Rosana/SP, conforme características apresentadas na Figura 38.

Figura 37 - Misturador aberto de cilindros



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Prensa hidráulica



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

#### 4.3.1 Estudo da Fluorescência de Raios-X das Amostras

A análise da composição química das amostras foi realizada no Laboratório de Caracterização e Gestão de Resíduos Sólidos (LCGRS) – Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) – UNESP Campus de Presidente Prudente/SP, por meio do ensaio de fluorescência de raios-X, utilizando o espectrômetro da Panalytical, série Axios, modelo PW 4400/40, fabricado na Holanda. A leitura e interpretação dos dados foi conduzida com auxílio do software SUPERQ 5.1B, na aplicação Om. Esse método oferece informações detalhadas sobre a composição elementar das amostras, tanto em termos quantitativos quanto qualitativos, identificando os elementos presentes nos materiais e suas respectivas proporções.

#### 4.3.2 Caracterização dos Parâmetros Reológicos

As propriedades reológicas foram avaliadas por meio de um reômetro de disco oscilatório, fabricado pela empresa Team Equipamentos do Brasil conforme Figura 39,

instalado no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros da UNESP-Rosana/SP. Os ensaios seguiram as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D2084-19a [71], que envolvem a exposição do compósito a um ângulo de oscilação de  $1^\circ$  e temperatura constante de  $150^\circ\text{C}$ . Após a determinação dos parâmetros reológicos, as formulações de BN/RLO foram submetidas ao processo de termoprensagem. Esse procedimento foi conduzido no Laboratório da FEC-UNESP-Rosana utilizando uma prensa da marca Mastermac, modelo Vulcan 400/20-1, fabricado no Brasil, capaz de exercer uma pressão máxima de  $210\text{ kgf.cm}^{-2}$ , em conjunto com um molde fabricado em aço 1010/1020 ( $150 \times 150 \times 2\text{ mm}$ ), conforme Figura 38.

Figura 39 - Reômetro



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.3 Reometria

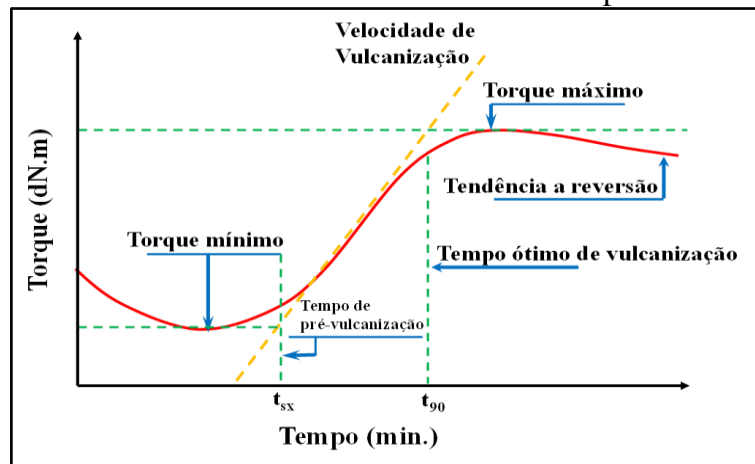
O ensaio de reometria fornece dados sobre o tempo ótimo de vulcanização, tempo de pré-vulcanização, torques máximos e torques mínimos resultantes em cada amostra avaliada.

A Figura 40 mostra a curva reométrica com destaque para os torques máximos, torques mínimos, a tendência a reversão, os tempos de pré-vulcanização ( $t_{sx}$ ) e o tempo ótimo de vulcanização ( $t_{90}$ ). O tempo ótimo de vulcanização representa o tempo em que 90% das ligações cruzadas se formaram, sendo que esse tempo é importante no processo de vulcanização, pois, determina o momento em que deve ser cessada a transferência de calor para que não haja a degradação do material em processo de vulcanização [72].

Conforme a Figura 40, no ponto mais baixo da curva temos o torque mínimo que está relacionado com a viscosidade do material, neste momento o material ainda não sofreu o processo de cura. A medida em que o tempo passa, o material começa a aquecer, e surgem as ligações cruzadas promovidas pelo agente reticulador, que neste caso foi utilizado o enxofre. A reticulação atinge o ponto alto da curva, e aqui temos o torque máximo que está relacionado com a formação das ligações cruzadas e a presença das cargas.

A curva pode sofrer uma tendência a reversão ou atingir um estado de equilíbrio. Na reversão, as ligações cruzadas começam a se desfazerem por excesso de aquecimento. Geralmente o desmolde da amostra é feito no tempo ideal de cura, ou seja,  $t_{90}$  para evitar que ocorra a reversão. O  $t_{90}$  é o tempo ideal de cura, onde ocorreram 90% das ligações cruzadas, em que os 10% restantes é atingido por inércia térmica. A reta tangente ao crescimento da curva, representa a velocidade de vulcanização.

Figura 40 - Curva reométrica característica dos compostos de borracha



Fonte: Caetano (2020) [73].

#### 4.3.4 Análise do Grau de Dispersão das Cargas na Matriz Polimérica

A homogeneidade na dispersão das partículas de carga dentro de uma matriz de borracha é indicada pelo nível de dispersão. Um alto grau de homogeneidade sugere uma distribuição uniforme em termos de tamanho e forma das partículas de carga. Essa condição pode melhorar várias propriedades mecânicas da borracha, incluindo sua resistência ao desgaste, à abrasão e à fratura. A análise quantitativa da homogeneidade do resíduo de lente oftálmica nos compostos de borracha pode ser realizada aplicando-se a Equação (1) [74]:

$$L = \eta_r - m_r = \frac{M_{Lc}}{M_{Lg}} - \frac{M_{Hc}}{M_{Hg}} \quad (1)$$

Onde L representa o grau de dispersão da carga na matriz polimérica;  $\eta_r$  indica a quantidade de aglomerados de carga que efetivamente se ligam ou interagem com a superfície da partícula de carga, o que contribui para uma boa dispersão;  $m_r$  representa a quantidade de aglomerados de carga que não são completamente dispersos, permanecendo agregados ou não interagem com a superfície, o que indica uma dispersão incompleta ou problemas de aglomeração;  $M_L$  é o torque mínimo;  $M_H$  é o torque máximo; c e g representam a carga e a goma pura, respectivamente.

#### 4.3.5 Análise da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise da morfologia das superfícies dos compósitos fraturados foi conduzida utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca Carl Zeiss EVO LS15, operando a 20 kV, de fabricação alemã. As amostras foram recobertas com uma fina camada de ouro, aplicada por meio de um revestidor *sputter* modelo Quorum Q 150R ES. Ensaio realizado no Laboratório de Microscopia de Ilha Solteira (LaMIS) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP Campus de Ilha Solteira.

#### 4.3.6 Medição da Densidade dos Compósitos

Para determinar a densidade dos compósitos, seguiu-se os protocolos descritos na norma ASTM D297-21 [75], empregando-se álcool etílico com uma densidade de  $0,79 \text{ g.cm}^{-3}$ . A densidade foi calculada utilizando a Equação (2):

$$\rho = \frac{\rho_L * m_A}{m_A - m_B} \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é a densidade da amostra ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $\rho_L$  representa a densidade do etanol na temperatura de análise ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $m_A$  é a massa da amostra (g) e  $m_B$  é a massa da amostra no líquido (g).

#### 4.3.7 Análise das Densidades de Ligações Cruzadas dos Compósitos

A densidade de reticulação dos compósitos foi avaliada por meio da técnica de inchamento. Corpos de prova com uma massa aproximada de  $0,25 \pm 0,05 \text{ g}$  foram preparados e imersos em tolueno por um período de 5 dias. Após a imersão, os corpos de prova foram retirados, secos para remover o excesso de solvente e pesados novamente. Em seguida, foram submetidos à secagem em estufa a  $80^\circ\text{C}$  por 24 horas e pesados novamente. Os valores resultantes da massa inicial do corpo de prova, da massa após inchamento com solvente e da massa após secagem em estufa foram registrados e empregados para calcular a fração volumétrica de borracha no corpo de prova inchado. A densidade de reticulação foi então determinada utilizando a Equação (3), estabelecida por Flory e Rehner [76]. Para este cálculo, foram utilizados os valores conhecidos do volume molar do tolueno ( $V_0$ ) e do parâmetro de interação Flory-Huggins ( $\chi$ ) para borracha natural e tolueno foram  $106,3 \text{ cm}^3.\text{mol}^{-1}$  e  $0,393$ , respectivamente.

$$v = \frac{-\ln(1 - V_B) + V_B + \chi(V_B)^2}{(\rho_B)(V_0)(V_B^3 - \frac{V_B^2}{2})} \quad (3)$$

Onde  $v$  é a densidade de ligações cruzadas ( $\text{mol cm}^{-3}$ );  $\rho_B$  é a densidade da borracha ( $\text{g cm}^{-3}$ ) e  $V_B$  é a fração de volume de borracha na forma inchada, determinada a partir do aumento de peso pelo inchamento.

As densidades de ligações cruzadas foram estimadas utilizando o método de Mooney-Rivlin [77] fundamentado nos resultados dos ensaios de resistência à tração. Para a construção do gráfico na região linear e a obtenção dos parâmetros da rede, aplicou-se a Equação semiempírica (4) [78]:

$$\sigma = \frac{F}{2A_0(\lambda - \lambda^{-2})} = C_1 + \frac{1}{\lambda}C_2 \quad (4)$$

Onde  $F$  é a força requerida no material vulcanizado;  $A_0$  é a área da seção transversal ( $\text{mm}^2$ );  $\lambda$  é a taxa de extensão ( $1 + \varepsilon$ ) onde  $\varepsilon$  é a deformação;  $C_1$  e  $C_2$  são constantes do material, enquanto  $C_1$  é assumido como sendo a contribuição das unidades de reticulação,  $C_2$  é a constante elástica de Mooney-Rivlin e considerada como a contribuição de emaranhados presos.

O coeficiente  $C_1$  é utilizado na determinação das densidades de ligações cruzadas, podendo ser empregado na formulação da Equação (5) [79]:

$$\eta = \frac{C_1}{RT} \quad (5)$$

Onde  $\eta$  é a densidade de ligações cruzadas ( $\text{mol cm}^{-3}$ );  $R$  é a constante universal dos gases e  $T$  é a temperatura absoluta (K).

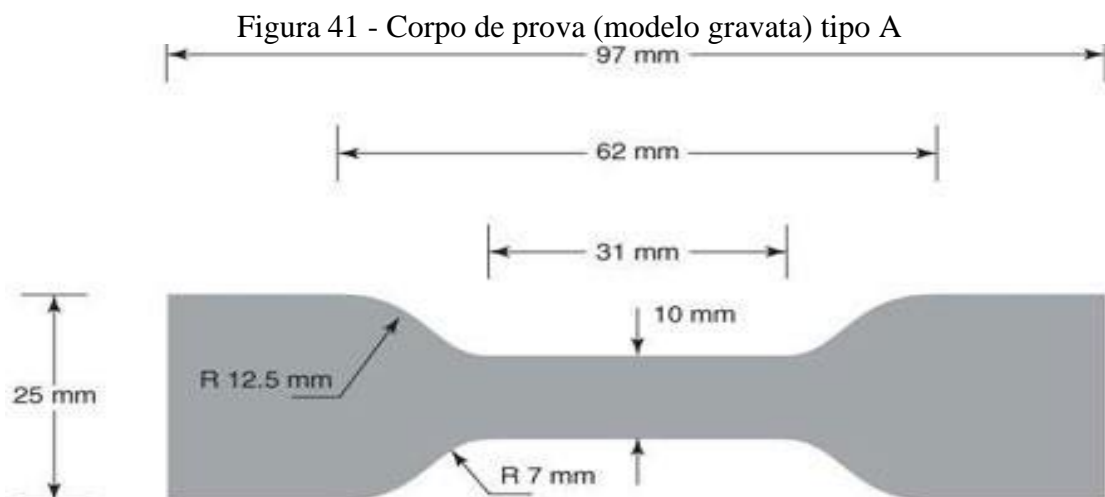
#### 4.3.8 Exame por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Foi conduzida a espectroscopia FTIR utilizando um espectrômetro da marca Bruker e modelo Invenio, fabricado na Alemanha, operando no modo ATR (reflexão total atenuada), cobrindo a faixa de  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ , com uma resolução espectral de  $4\text{ cm}^{-1}$  e realizando 32 varreduras. Realizada no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana.

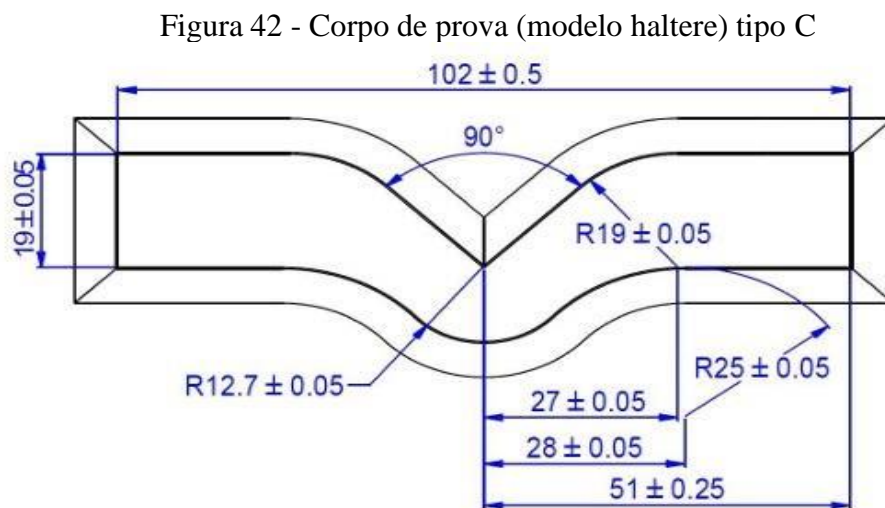
#### 4.3.9 Teste de Resistência à Tração e ao Rasgo dos Compósitos

Os testes de tração e rasgo foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana, utilizando uma máquina

universal de ensaios da marca Biopdi Universal, fabricada no Brasil, com uma velocidade de  $500 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , equipada com uma célula de carga de 5 kN e um transdutor de deformação interno. Para os ensaios de resistência à tração, foram utilizadas cinco amostras do tipo A (com seção reta e formato haltere), especificado na norma ASTM D412-16 [80], conforme Figura 41. Já para os ensaios de resistência ao rasgo, foram empregadas cinco amostras do tipo C (com formato de ângulo reto), estabelecido na norma ASTM D624-00 [81], conforme Figura 42.



Fonte: Silva (2020) (82).



Fonte: Kind Snail (2021) (83).

#### 4.3.10 Medição da Dureza dos Compósitos

A determinação da dureza na superfície dos compósitos seguiu os protocolos estipulados pela norma ASTM D2240-15 [84], utilizando um durômetro analógico da marca Digimess, fabricado na China. O teste foi realizado na escala Shore A, com capacidade de 0 a 100 e uma graduação de 1 Shore A. Realizada no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana.

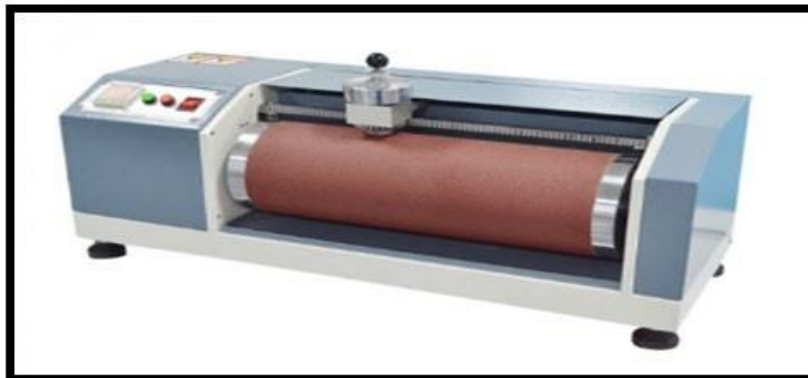
#### 4.3.11 Teste de Resistência à Abrasão

Para determinar a perda por abrasão, seguiu-se o método descrito pela norma ASTM D5963-22 [85], utilizando a Equação (6). Para tal, empregou-se o equipamento da marca MaqTest, fabricado no Brasil, com um curso de abrasão de 40 metros e uma pressão de 5 N aplicada sobre o corpo de prova em contato com o cilindro, conforme Figura 43.

$$PA = \frac{\Delta m * S_0}{\rho S} \quad (6)$$

Onde  $PA$  representa a perda por abrasão ( $\text{mm}^3/40 \text{ m}$ );  $\Delta m$  é a perda de massa do compósito (mg);  $S_0$  é o índice de ataque teórico da lixa na borracha padrão ( $200 \pm 20 \text{ mg}$ );  $S$  é o índice de ataque real da lixa na borracha padrão (mg) e  $\rho$  é a densidade do compósito ( $\text{mg} \cdot \text{mm}^{-3}$ ). Ensaio realizado no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana.

Figura 43 - Abrasímetro (ensaio de resistência a abrasão)



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.12 Estudo das Interações entre a Borracha Natural e o Resíduo de Lentes Oftálmicas por Meio da Equação de Lorenz-Parks

A interação entre o resíduo de lentes oftálmicas e a borracha natural foi determinada pelo método desenvolvido por Lorenz-Parks [86] e os parâmetros obtidos dos ensaios de inchamento em solvente orgânico utilizado a Equação (7) [87]:

$$\frac{Q_{cg}}{Q_{gg}} = ae^{-z} + b \quad (7)$$

Onde  $Q$  é o peso de tolueno absorvido por grama de borracha, os subscritos  $c$  e  $g$  representam o compósito vulcanizado com carga e goma, respectivamente;  $z$  é a razão da massa do enchimento por unidade de massa de borracha e  $a$  e  $b$  são constantes. O valor de  $Q$  é calculado usando a Equação (8):

$$Q = \frac{w_s - w_d}{w_r \times 100 / w_F} \quad (8)$$

Onde  $w_s$  é o peso do compósito inchado quando atingido o equilíbrio;  $w_d$  é o peso do compósito seco;  $w_r$  é o peso da borracha no compósito seco e  $w_F$  é o peso total da formulação.

#### 4.3.13 Estudo Termogravimétrico dos Compósitos

Foram realizadas análises termogravimétricas (TG) utilizando um equipamento da marca NETZSCH, modelo 209, fabricado na Alemanha. O ensaio abarcou uma ampla faixa de temperatura, variando aproximadamente de 25°C a 900°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, em uma atmosfera de nitrogênio com um fluxo de 15 mL.min<sup>-1</sup>. A quantidade de massa utilizada para as medições foi de cerca de 10 mg, conforme especificado pela norma ASTM D6370-99 [88]. Ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana.

#### *4.3.14 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)*

Os ensaios de calorimetria diferencial de varredura (DSC) foram realizados através de um equipamento da marca NETZCH modelo Phoenix. Os ensaios foram realizados com uma razão de aquecimento de 10°C /min., na faixa de – 100 a 500°C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 15 mL/min., sendo que a quantidade de massa utilizada foi de aproximadamente 10 mg. Ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia de Biomassa e Polímeros (LTBPol) - FEC-UNESP Campus de Rosana.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ANÁLISE DA FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DO RESÍDUO DE LENTES OFTÁLMICAS

Os dados relativos à composição química do resíduo de lente oftálmica foram obtidos por meio de análises de fluorescência de raios-X, conforme detalhado na Tabela 5. É notável que a amostra é principalmente composta por carbono, além da presença de alguns metais alcalinos, como cálcio e potássio, que têm o potencial de amplificar a atividade dos aceleradores. Ademais, o zinco está presente, podendo colaborar como agente de ativação no processo de vulcanização. Além disso, o enxofre presente, colabora para a formação das ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares da borracha. Vale ressaltar também a presença de sílica, originada do carбето de silício ou dióxido de silício liberado durante o processo de lixamento. Esse elemento químico é capaz de estruturar o reforço na matriz polimérica, colaborando, assim, para o aumento da resistência do compósito de borracha [89].

Tabela 5 - Composição química do resíduo de lentes oftálmicas por FRX

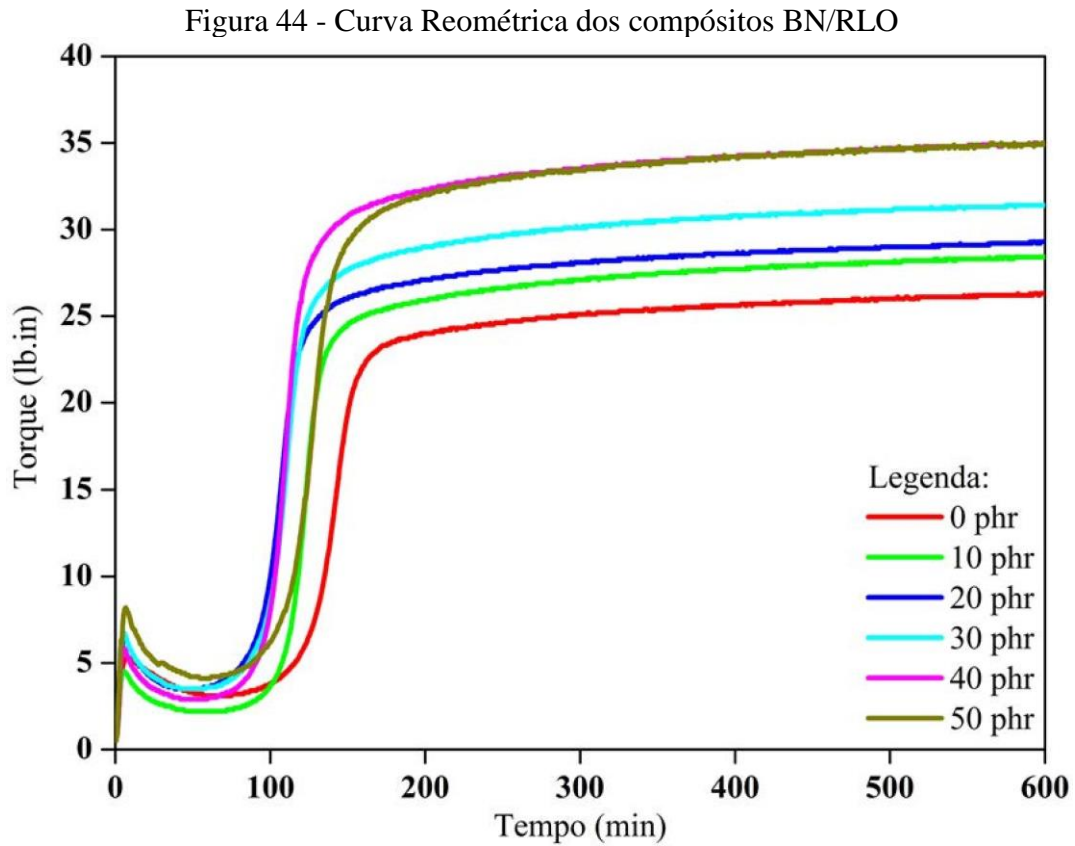
<b>Resíduo de Lentes Oftálmicas</b>	
<b>Elemento químico</b>	<b>Quantidade (%)</b>
C	98,128
S	0,776
Si	0,551
Bi	0,180
In	0,110
Sn	0,052
Br	0,030
Ca	0,030
K	0,013
Fe	0,012
Cu	0,008
Zn	0,003
Pb	0,011
Outros	0,096
<b>Total</b>	<b>100,000</b>

Fonte: Autoria própria.

### 5.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS REOMÉTRICOS

O ensaio específico de Reometria determina os parâmetros reométricos dos compósitos durante o processo de reticulação, analisando o torque mínimo (ML), torque

máximo ( $M_H$ ), variação de torque ( $\Delta M$ ), tempo de pré-cura ( $t_{s1}$ ) e tempo ótimo de cura ( $t_{90}$ ). Na Figura 44 é indicada as curvas de reometria (torque *versus* tempo) ilustrando o comportamento dos compósitos vulcanizados a uma temperatura constante de 150 °C.



Fonte: Team Equipamentos (2024) [71].

Os valores do torque mínimo ( $M_L$ ), torque máximo ( $M_H$ ), variação de torque ( $\Delta M$ ), tempo de pré-cura ( $t_{s1}$ ) e tempo ótimo de cura ( $t_{90}$ ) dos compósitos são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros reológicos dos compósitos BN/RLO

Compósitos BN/RLO	$M_L$ (dNm)	$M_H$ (dNm)	$\Delta M = (M_H - M_L)$ (dNm)	$t_s$ (min)	$t_{90}$ (min)
0 phr	$3,42 \pm 0,11$	$27,48 \pm 1,49$	$24,07 \pm 1,44$	$1,70 \pm 0,04$	$2,71 \pm 0,37$
10 phr	$2,51 \pm 0,06$	$29,69 \pm 1,66$	$27,09 \pm 1,68$	$1,59 \pm 0,02$	$2,52 \pm 0,43$
20 phr	$3,81 \pm 0,11$	$30,82 \pm 1,53$	$27,00 \pm 1,44$	$1,26 \pm 0,02$	$2,32 \pm 0,44$
30 phr	$3,90 \pm 0,07$	$33,19 \pm 1,54$	$29,29 \pm 1,51$	$1,30 \pm 0,03$	$2,34 \pm 0,46$
40 phr	$3,30 \pm 0,11$	$37,03 \pm 1,69$	$33,73 \pm 1,71$	$1,38 \pm 0,03$	$2,38 \pm 0,36$
50 phr	$4,87 \pm 0,16$	$38,22 \pm 1,00$	$33,35 \pm 1,13$	$1,46 \pm 0,03$	$2,57 \pm 0,49$

Fonte: Autoria própria.

Segundo a Tabela 6 são mostrados os valores dos torques mínimos dos compósitos, observa-se que há um incremento de valor dos compósitos com 20, 30 e 50 phr de cargas em relação ao compósito sem carga, devido ao aumento da viscosidade que provoca a redução da mobilidade da cadeia macromolecular da borracha em função da dispersão das cargas na matriz polimérica. Há uma tendência natural das cargas na formação de aglomerados, dificultando o envolvimento completo pela matriz e conseqüentemente gerando concentração de tensões. Ao longo do processo e à medida que o calor é fornecido, ocorre a formação de ligações cruzadas, contribuindo para o incremento do torque máximo (MH). A variação do torque está intrinsecamente ligada à formação de ligações cruzadas e a interações com a carga, observando valores estáveis até a proporção de 30 phr em relação ao compósito de referência (isento de carga), considerando as margens de erro estatístico. Enquanto, a partir de 40 phr, observa-se um aumento no torque máximo com a incorporação das cargas.

O intervalo de tempo de pré-cura ( $t_{s1}$ ), correspondente ao momento em que o compósito adquire calor suficiente para iniciar o processo de reticulação, decresce significativamente com a adição de cargas, comparativamente ao compósito de referência. Por outro lado, o tempo ideal de cura ( $t_{90}$ ), representando o período no qual ocorre 90% do torque máximo, diminui em relação ao compósito de referência, porém mantém valores estáveis quando consideramos a margem de erro estatístico. O  $t_{s1}$  e o  $t_{90}$  diminuíram em relação ao compósito sem carga, sendo que este fato possa ter sofrido influência dos elementos químicos constituintes do resíduo de lentes oftálmicas (RLO) segundo análise de Fluorescência de Raios-X, conforme Tabela 5, em específico os metais alcalinos que potencializam a ação dos aceleradores (potássio e cálcio) e o zinco utilizado como agente de ativação no processo de vulcanização.

Pode-se deduzir que a incorporação de carga resulta em uma redução no consumo de energia térmica.

### 5.3 ANÁLISE DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS POR INCHAMENTO EM SOLVENTE ORGÂNICO – MÉTODO DE FLORY-REHNER

A formação das reticulações desempenha um papel essencial na avaliação global da borracha, e a análise das densidades de ligações cruzadas oferece compreensões significativas que podem ser utilizados para melhorar as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos [90]. A estimativa das densidades de ligações cruzadas, através da saturação com

um solvente orgânico e aplicação da equação derivada por Flory-Rehner, produz resultados confiáveis [91]. Na Tabela 7, são apresentados os valores das densidades de ligações cruzadas conforme a abordagem de Flory-Rehner. Observa-se um pequeno aumento progressivo nas densidades de reticulações dos compósitos com a adição de cargas (20, 30, 40 e 50 phr) em comparação com o compósito isento de carga (0 phr). Este resultado não confirma uma interação eficaz entre as cargas e a matriz polimérica, tendo em vista que os compósitos não apresentaram valores consideráveis em relação ao seu módulo (por exemplo o módulo a 300%), não proporcionou melhorias de propriedades como a tensão e a deformação na ruptura, a resistência ao rasgo e à abrasão, conforme Tabela 8, Figura 49 e Figura 47 respectivamente. A reticulação de um composto de BN vulcanizada com enxofre, consiste em reticulações químicas do enxofre entre átomos de carbono, emaranhamentos e grupos pendentos nas extremidades da cadeia polimérica. A densidade de ligações cruzadas por inchamento em solvente orgânico (método de Flory-Rehner) leva em conta apenas as estimativas de reticulações quimicamente pura [92]. No entanto, essa abordagem não consegue distinguir uma ligação cruzada entre duas cadeias moleculares do isopreno da borracha de uma partícula da carga, uma vez que a carga atua como uma barreira à penetração do solvente na estrutura da cadeia polimérica, resultando em um aumento no valor calculado das densidades de ligações cruzadas.

Tabela 7 - Densidade de ligações cruzadas por inchamento - método de Flory-Rehner

<b>Compósitos</b>	<b>Flory-Rehner <math>v \times 10^{-4} \text{ (mol.cm}^{-3}\text{)}</math></b>
BN/RLO <sub>0</sub>	1,91
BN/RLO <sub>10</sub>	1,91
BN/RLO <sub>20</sub>	1,93
BN/RLO <sub>30</sub>	1,94
BN/RLO <sub>40</sub>	2,18
BN/RLO <sub>50</sub>	2,24

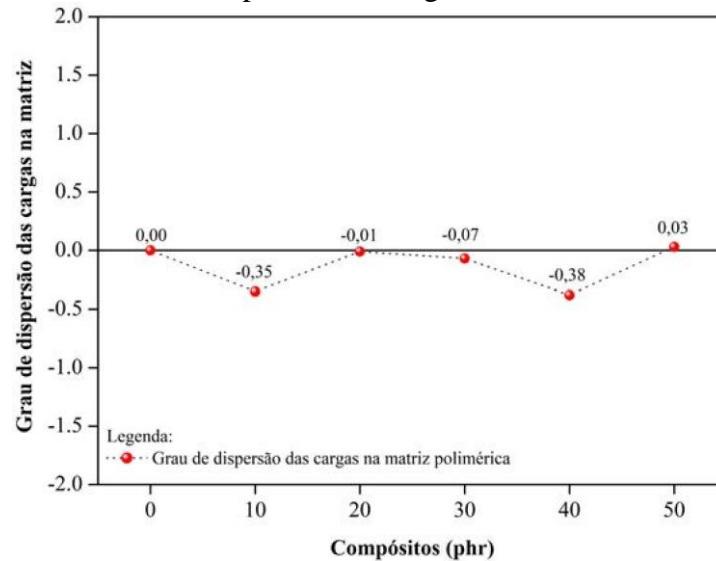
Fonte: Autoria própria.

#### 5.4 ANÁLISE DO GRAU DE DISPERSÃO DAS CARGAS DE RLO NA MATRIZ DE BN

A Figura 45 ilustra o perfil e os dados referentes ao grau de dispersão da carga de resíduo de lentes oftálmicas na matriz de borracha natural, tendo como ponto de partida o compósito de 0 phr como referência. Quanto mais próximo este valor estiver da referência, melhor será a dispersão das cargas. Verificou-se que o grau de dispersão das cargas manteve-se próximo à linha de base de referência, com alguns valores apresentando-se negativos. Isso

sugere que as cargas tendem a reduzir a viscosidade dos compósitos, facilitando a homogeneidade da mistura da carga na matriz. Quanto menor o valor de L, em relação ao compósito de referência, melhor é o grau de dispersão das partículas na matriz elastomérica, isso quer dizer que quanto menor for a viscosidade, menor é o torque mínimo e melhor é a dispersão das cargas.

Figura 45 - Grau de dispersão das cargas de RLO em matriz de BN

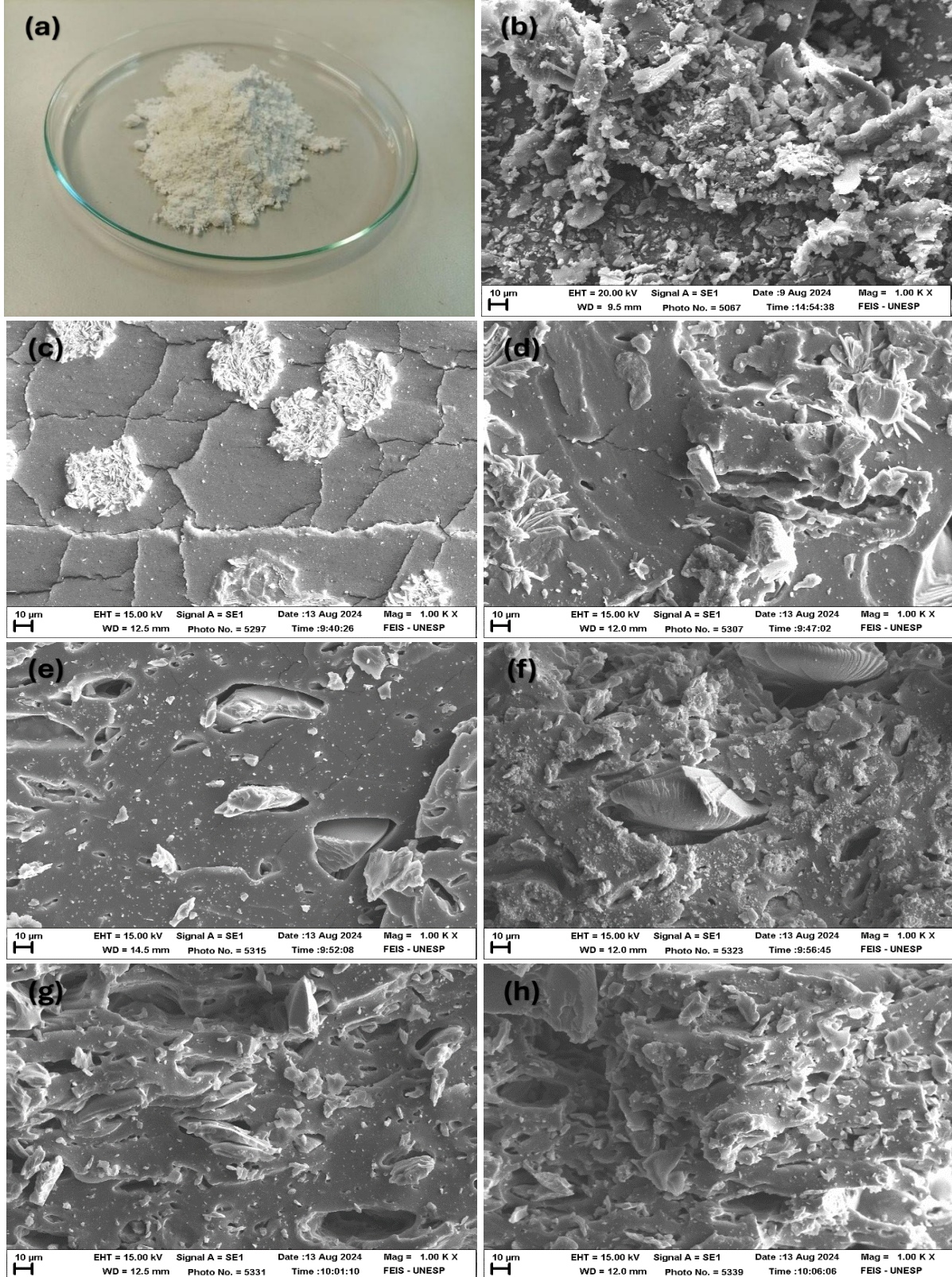


Fonte: Autoria própria.

## 5.5 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 46 ilustra fotografia dos resíduos de lentes oftálmicas e micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos resíduos e dos compósitos resultantes, realizadas nas áreas de fratura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à tração.

Figura 46 - (a) Imagem fotográfica do resíduo de lente oftálmica; Imagens de MEVs na escala de 10 µm e com magnificação de 1,0 K ×: (b) do resíduo de lente oftálmica; regiões de fratura dos corpos de prova do ensaio de resistência à tração dos compósitos de BN contendo (c) 0 phr, (d) 10 phr, (e) 20 phr, (f) 30 phr, (g) 40 phr e (h) 50 phr de resíduo de lente.



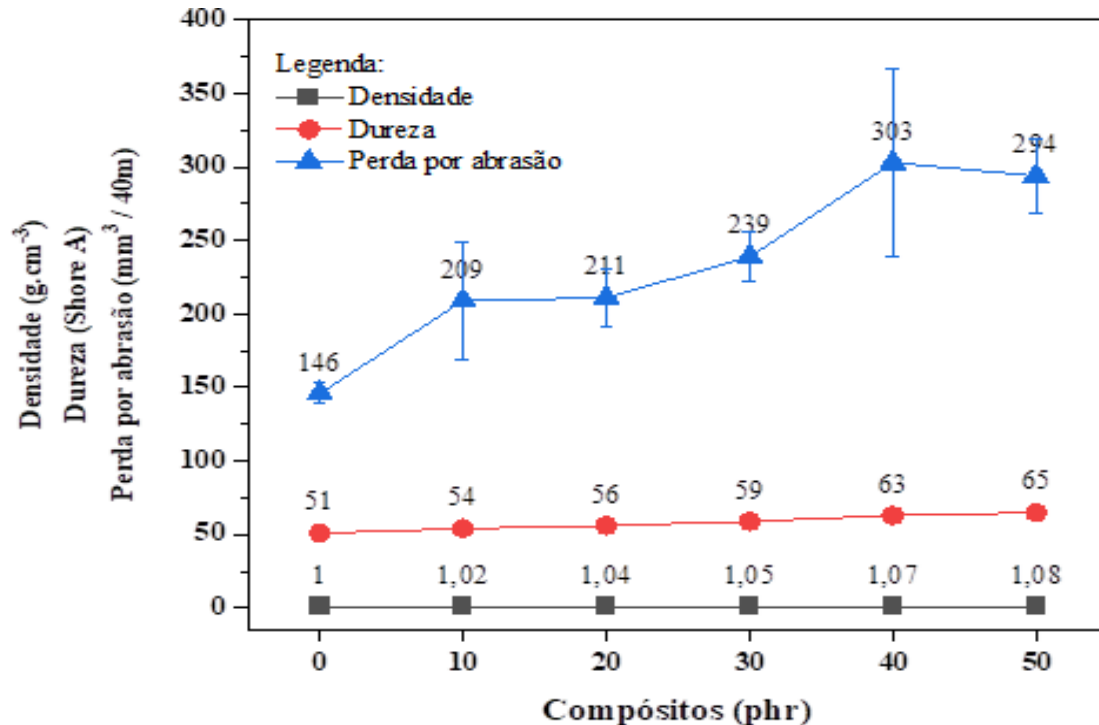
Fonte: Autoria própria.

A Figura 46(a) apresenta uma fotografia dos resíduos de lentes oftálmicas obtidos através do processo de lixamento e polimento das lentes, após serem secos em estufa a 100 °C e passados por uma peneira de 120 mesh. As Figuras 46(b-h) mostram micrografias de MEV com escala de 10 µm e magnificação de 1,0 k ×. A Figura 46(b) revela a micrografia dos resíduos de lente, onde é possível observar partículas com variadas formas e tamanhos, lembrando flocos de neve. A Figura 46(c) exibe a imagem MEV do compósito sem carga, na região de fratura, destacando uma superfície marcada por fissuras e pequenos círculos brancos dispersos na matriz de borracha natural. Esses círculos são provavelmente devidos ao agente plastificante polietileno glicol 4000, que confere maior flexibilidade e elasticidade ao compósito. Na Figura 46(d), a imagem MEV do compósito contendo 10 phr de resíduo de lente oftálmica (RLO) mostra uma superfície homogênea, porém com elevações e depressões, além de cargas dispersas na matriz polimérica. As Figuras 46(e-h) correspondem aos compósitos com 20, 30, 40 e 50 phr de RLO, respectivamente. Nessas imagens, nota-se que as cargas aderem à matriz sem criar pontos de ancoragem suficientes para evitar sua extração. A partir do compósito com 30 phr de RLO, conforme Figura 46(f), observa-se que o excesso de cargas tende a gerar pontos de tensão que enfraquecem as ligações entre as cadeias poliméricas, facilitando sua ruptura. Podemos analisar que nos ensaios de resistência à tração na ruptura conforme a Tabela 8, os valores da tensão dos compósitos com 30, 40 e 50 phr de RLO decrescem progressivamente em relação ao compósito sem carga (0 phr).

## 5.6 ANÁLISE DA DENSIDADE, DUREZA E PERDA POR ABRASÃO DOS COMPÓSITOS BN/RLO

A Figura 47 apresenta as curvas e os resultados dos ensaios de densidade, dureza na escala Shore A e perda por abrasão dos compósitos.

Figura 47 - Resultados de densidade, dureza e perda por abrasão dos compósitos



Fonte: Autoria própria.

Observa-se conforme a Figura 47 um pequeno aumento gradual da densidade dos compósitos com a progressiva adição de cargas, variando entre 1,0 e 1,08 g·cm<sup>-3</sup>, devido ao aumento de massa para um mesmo volume.

A dureza na escala Shore A é uma medida usada na indústria da borracha para estudar a rigidez do material, variando de 0 (muito mole) a 100 (plástico rígido). Os compósitos de BN (matriz polimérica) com RLO (como carga) terão os seus valores influenciados pela formulação adotada (adição de cargas). Os valores de dureza, segundo a Figura 47, aumentaram com a incorporação das cargas, uma vez que sua presença restringe a mobilidade das cargas na matriz polimérica, resultando no endurecimento do compósito (mais rígido). Ocorrência devida ao RLO ser um material que pode preencher os espaços vazios (interstícios) entre as moléculas de BN, contribuindo para que a mistura seja mais rígida e menos elástica.

Por outro lado, houve um aumento significativo nos valores de perda por abrasão com o acréscimo de cargas conforme a Figura 47, representado pela redução da resistência à abrasão, devido à diminuição na interação entre as cargas e a matriz polimérica, resultando em uma maior aglomeração das cargas e, conseqüentemente menor resistência ao atrito. Esse

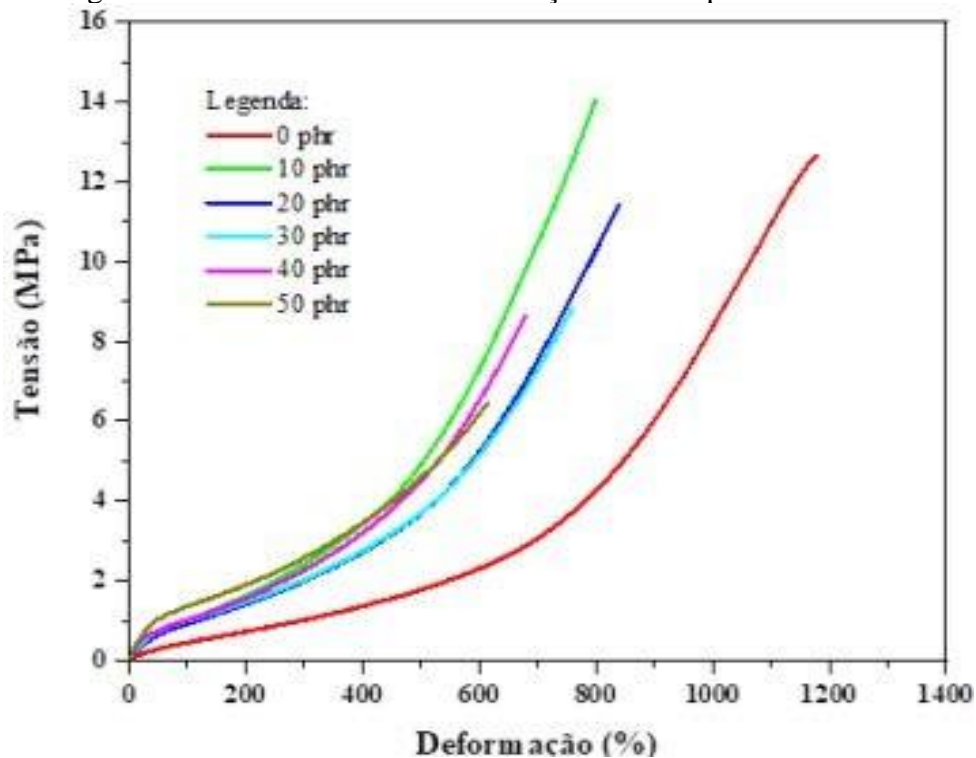
comportamento é atribuído aos pontos de tensão na matriz, que facilitam a remoção de massa durante o desgaste por atrito.

Observa-se que o compósito sem carga (0 phr) apresentou boa resistência à abrasão, entretanto, com a adição progressiva de carga houve uma expressiva redução da resistência ao atrito, determinada nos compósitos com 40 e 50 phr de RLO. Comportamento influenciado por fatores como, força de ligação entre as moléculas, capacidade de resistir ao cisalhamento, quantidade de carga e características da estrutura molecular da carga.

### 5.7 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DOS COMPÓSITOS BN/RLO

A Figura 48 exibe as curvas de resistência à tração, enquanto a Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração dos compósitos de BN/RLO.

Figura 48 - Curvas de resistência à tração dos compósitos BN/RLO



Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os módulos de elasticidade a 100% e 300% tendem a aumentar com a incorporação de cargas, o que resulta em um compósito mais rígido, conforme indicado pelos dados apresentados na Tabela 8 e pelo perfil das curvas demonstradas na Figura 48.

Em relação aos valores de tensão na ruptura, observa-se que os compósitos com 10 e 20 phr de carga apresentaram um pequeno aumento na tensão de ruptura em comparação com o

compósito de referência (isento de carga). Os demais compósitos (30, 40 e 50 phr de RLO) apresentaram diminuição de valores comparados com o compósito de referência. Quanto aos valores da deformação na ruptura, observa-se uma diminuição desses valores com o aumento das cargas em comparação com o compósito de referência. Este comportamento indica que a incorporação de carga diminui a adesão interfacial entre o RLO e a BN expondo a cadeia principal e aumentando a capacidade de deformação da matriz polimérica. Os dados apresentados (Tabela 8 e Figura 48) corroboram a condição de carga de reforço praticamente para os compósitos com 10 e 20 phr de resíduo, quanto aos demais desempenham um papel de destaque como agentes de enchimento.

Tabela 8 - Valores dos ensaios de resistência à tração na ruptura dos compósitos BN/RLO

Compósitos	M 100% (MPa)	M 300% (MPa)	Tensão ruptura (MPa)	Deformação ruptura (%)
BN/RLO <sub>0</sub>	0,45	1,01	12,58 ± 0,81	1149,86 ± 53,28
BN/RLO <sub>10</sub>	0,99	2,41	13,81 ± 0,93	849,36 ± 57,43
BN/RLO <sub>20</sub>	0,92	1,99	11,33 ± 0,67	854,72 ± 22,60
BN/RLO <sub>30</sub>	0,99	2,03	8,80 ± 1,70	738,60 ± 47,89
BN/RLO <sub>40</sub>	1,01	2,25	8,24 ± 0,71	698,67 ± 40,92
BN/RLO <sub>50</sub>	1,36	2,56	6,24 ± 0,99	607,21 ± 31,65

Fonte: Autoria própria.

## 5.8 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO RASGO DOS COMPÓSITOS DE BN/RLO

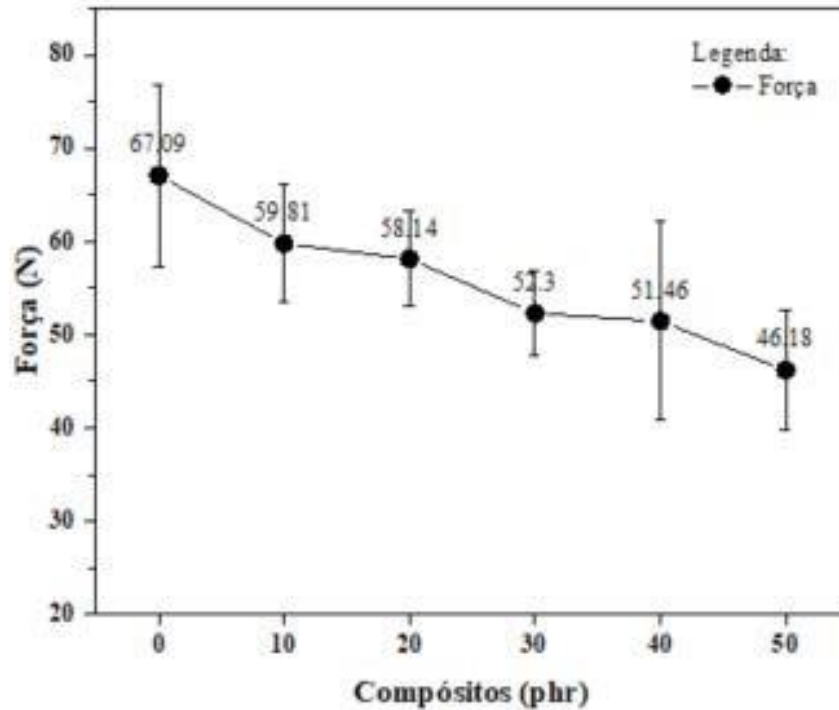
Os resultados dos testes de resistência ao rasgo são apresentados na Figura 49. De forma análoga aos ensaios de resistência à tração, observa-se que o aumento das cargas não parece melhorar a resistência ao rasgo em comparação com o compósito de referência. A presença de carga pode reforçar a matriz elastomérica, reduzindo a propagação de trincas na superfície e consequentemente melhorando a resistência ao rasgo.

Entretanto, à medida que aumenta a adição de cargas incorporadas, as suas partículas tem a tendência de aglomerar, criando regiões de maior rigidez e automaticamente enfraquece a matriz elastomérica, segundo imagens de MEV da Figura 46 (g-h). Criando uma distribuição não homogênea de tensões na rede polimérica, com o aumento de probabilidades à formação de trincas e diminuição da resistência ao rasgo.

A Figura 49 apresenta valores que corroboram o comportamento dos compósitos com cargas (10, 20, 30, 40 e 50 phr) em comparação ao compósito isento de carga, em relação

à resistência ao rasgo. Isso indica que as cargas não atuam como barreiras que impeçam ou diminuam a propagação do rasgo.

Figura 49 - Curvas de resistência ao rasgo dos compósitos de BN/RLO

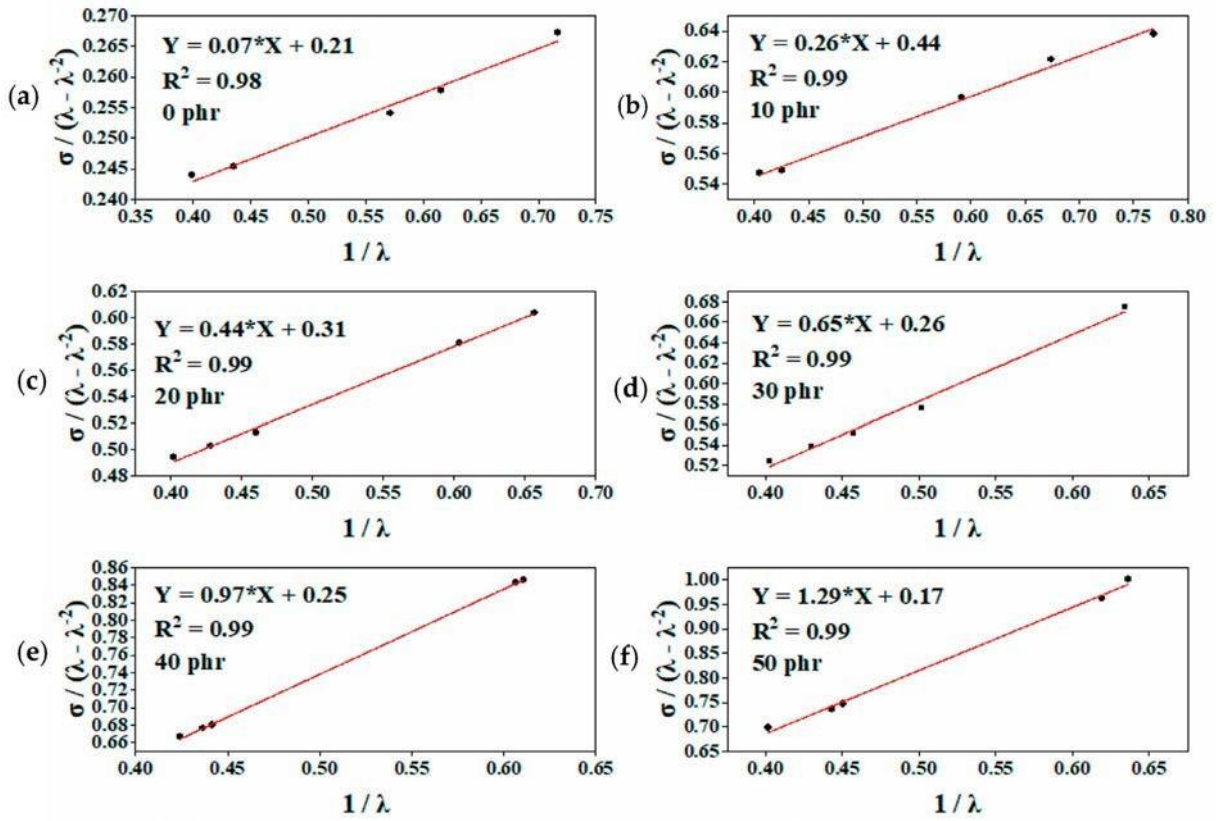


Fonte: Autoria própria.

### 5.9 ANÁLISE DA DENSIDADE DE LIGAÇÕES CRUZADAS POR MEIO DE ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO: MÉTODO DE MOONEY-RIVLIN

A densidade de ligações cruzadas foi determinada utilizando o método de Mooney-Rivlin, com base nos dados obtidos dos ensaios de resistência à tração dos compósitos vulcanizados de BN/RLO. Na Figura 50, foi traçada uma curva de regressão linear para calcular os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$  da abordagem de Mooney-Rivlin.

Figura 50 - Plotagem de  $\sigma / (\lambda - \lambda^{-2})$  versus  $\lambda^{-1}$  dos compósitos BN/RLO com (a) 0 phr, (b) 10 phr, (c) 20 phr, (d) 30 phr, (e) 40 phr e (f) 50 phr



Fonte: Autoria própria.

Os dados fornecidos na Tabela 9 revelam as densidades de ligações cruzadas, evidenciando a diminuição dos valores da constante  $C_1$  e o aumento dos valores de  $C_2$  em concordância com a crescente incorporação de cargas nos compósitos. De acordo com a pesquisa realizada por Rooj *et al.* [93], as constantes  $C_1$  e  $C_2$  estão relacionadas à estrutura da rede e à flexibilidade das cadeias, respectivamente. O aumento na inclinação das curvas de Mooney-Rivlin é atribuído à diminuição da elasticidade das cadeias devido à interação entre o polímero e a carga de enchimento, como documentado por outros pesquisadores [94,95]. Os coeficientes de Mooney-Rivlin, derivados das curvas de tensão *versus* deformação e apresentados na Tabela 9, mostram uma pequena interação entre o resíduo de lentes oftálmicas e a matriz elastomérica. Esta metodologia confirma os resultados das densidades de ligações cruzadas pelo método de Flory-Rehner, tendo em vista que geralmente apresentam valores mais altos, pois, considera também reticulações dos emaranhamentos e grupos pendentes [92].

Tabela 9 - Densidade de ligações cruzadas pelo método de Mooney-Rivlin

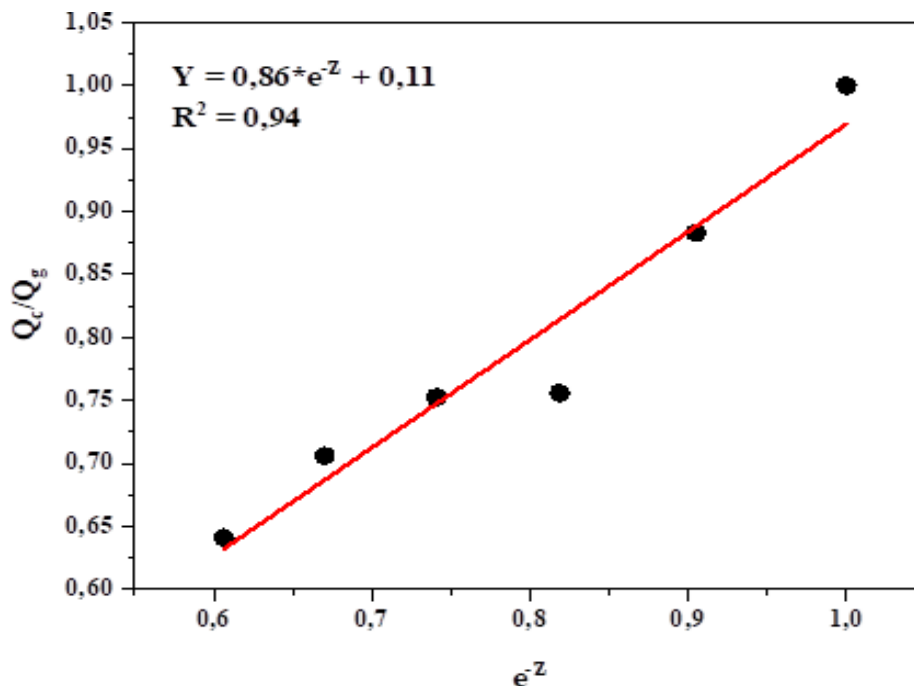
Mooney-Rivlin			
$\eta \times 10^{-4}$ (mol.cm <sup>-3</sup> )		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
0 phr	2,31	0,43	0,14
10 phr	5,67	0,88	0,52
20 phr	6,09	0,63	0,88
30 phr	7,33	0,51	1,30
40 phr	9,88	0,50	1,95
50 phr	11,81	0,34	2,58

Fonte: Autoria própria.

### 5.10 ESTUDO DA INTERAÇÃO INTERFACIAL PELO MÉTODO DE LORENZ-PARKS

A análise da interação interfacial entre a carga e a matriz foi conduzida empregando a equação desenvolvida por Lorenz e Parks. Na Figura 51, foram traçadas as curvas de variação de  $Q_c/Q_g$  versus  $e^{-Z}$  para os compósitos BN que incorporam resíduos de lentes oftálmicas, tendo como ponto de referência a goma pura (isento de carga).

Figura 51- Variação de  $Q_c/Q_g$  versus  $e^{-Z}$  dos compósitos BN/RLO e goma como referência

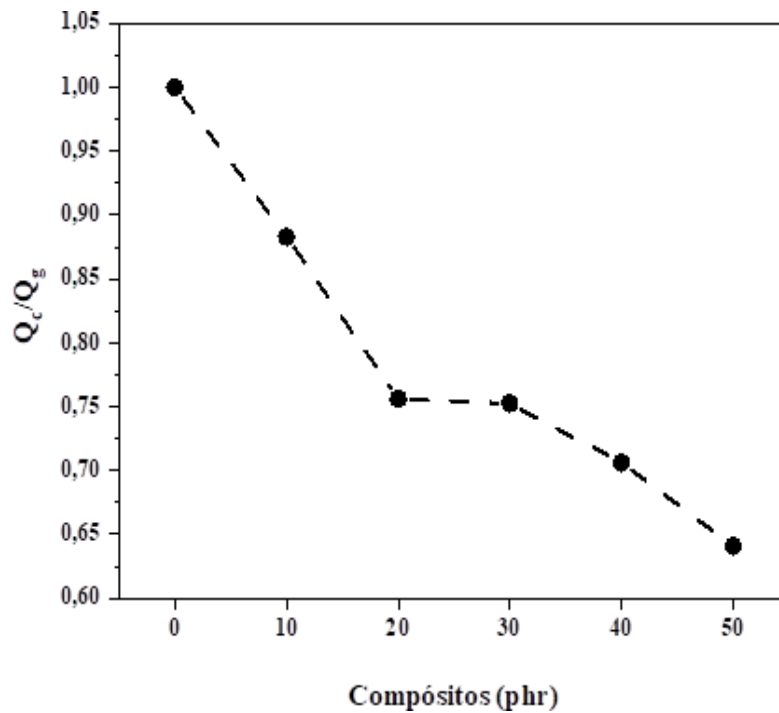


Fonte: Autoria própria.

Os valores dos parâmetros "a" e "b" são constantes da equação, com valores numéricos de 0,86 e 0,11, respectivamente, exibindo um coeficiente de correlação de 0,94. Conforme as observações de Lorentz e Park, valores da constante "a" superiores a 0,7 indicam

interação entre a carga (RLO) e a matriz de borracha. Santos *et al.* [87] obtiveram resultados semelhantes para as constantes "a" e "b" em compostos derivados de borracha natural com resíduo de couro. Entretanto, esta interação não melhora o reforço mecânico agindo apenas como carga de enchimento. Na Figura 52, observa-se uma redução nos valores de  $\frac{Q_c}{Q_g}$  à medida que a quantidade de RLO adicionada aumenta, o que confirma a interação entre a carga e a matriz.

Figura 52 - Efeito da carga de enchimento em  $Q_c/Q_g$  de compósitos BN/RLO e goma como referência



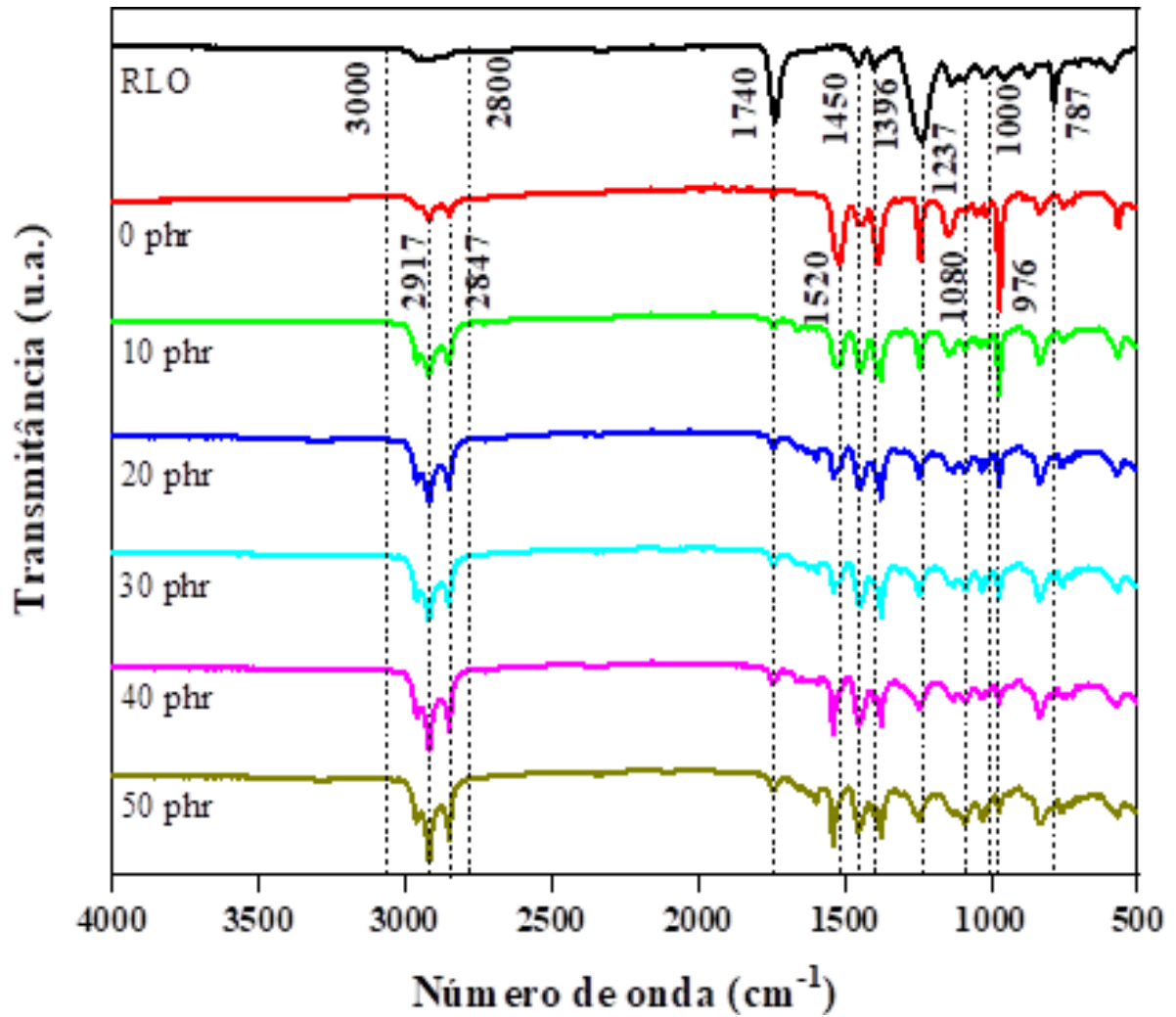
Fonte: Autoria própria.

### 5.11 ANÁLISE DOS ESPECTROS NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER NO MODO ATR

Os espectros no infravermelho obtidos através da transformada de Fourier do resíduo proveniente de lentes oftálmicas e dos compósitos de borracha BN são apresentados na Figura 53, enquanto seus respectivos números de onda são detalhados na Tabela 10. Uma análise do espectro de FTIR do resíduo da lente sugere uma semelhança significativa com o espectro do polimetil metacrilato (PMMA) [96], embora apresente a presença de impurezas, como sílica, decorrente do processo de lixamento das lentes oftálmicas, com abrasivos à base de carvão de silício ou dióxido de silício. Após a incorporação do RLO na matriz polimérica

para fins de vulcanização, não foram detectados novos espectros decorrentes de reações químicas entre a carga e a matriz. Portanto, é possível inferir que a carga esteja aderida ou encapsulada pela matriz.

Figura 53 - Espectros de FTIR do resíduo de lentes oftálmicas e dos compósitos de BN/RLO.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Número de ondas dos espectros de FTIR do resíduo de lentes oftálmicas e compósitos de BN/RLO

<b>Resíduo de Lente Oftálmico (RLO)</b>		
Nº de onda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuições	Referência
3000-2800	Estiramento C-H simétrico e assimétrico do PMMA	[97]
1740	Vibração do estiramento C=O do PMMA	[97]
1450	Dobramento CH <sub>3</sub> do PMMA	[97]
1396	Estiramento C-H do PMMA	[97]
1237	Estiramento C-O-C do PMMA	[97]
1080	Estiramento Si-O (impureza - processo de lixamento)	[98]
787	Dobramento C-H do PMMA	[97]
<b>Borracha Natural Vietnamita (BN)</b>		
Nº de onda (cm <sup>-1</sup> )	Atribuições	Referência
2917	Estiramento assimétrico C-H <sub>3</sub>	[99]
2847	Estiramento simétrico C-H <sub>2</sub>	[99]
1520	Dobramento CH <sub>2</sub>	[94]
1080	Estiramento Si-O (impureza e agente de acoplamento adicionado)	[98]
976	Estiramento C=C do anel aromático	[99]

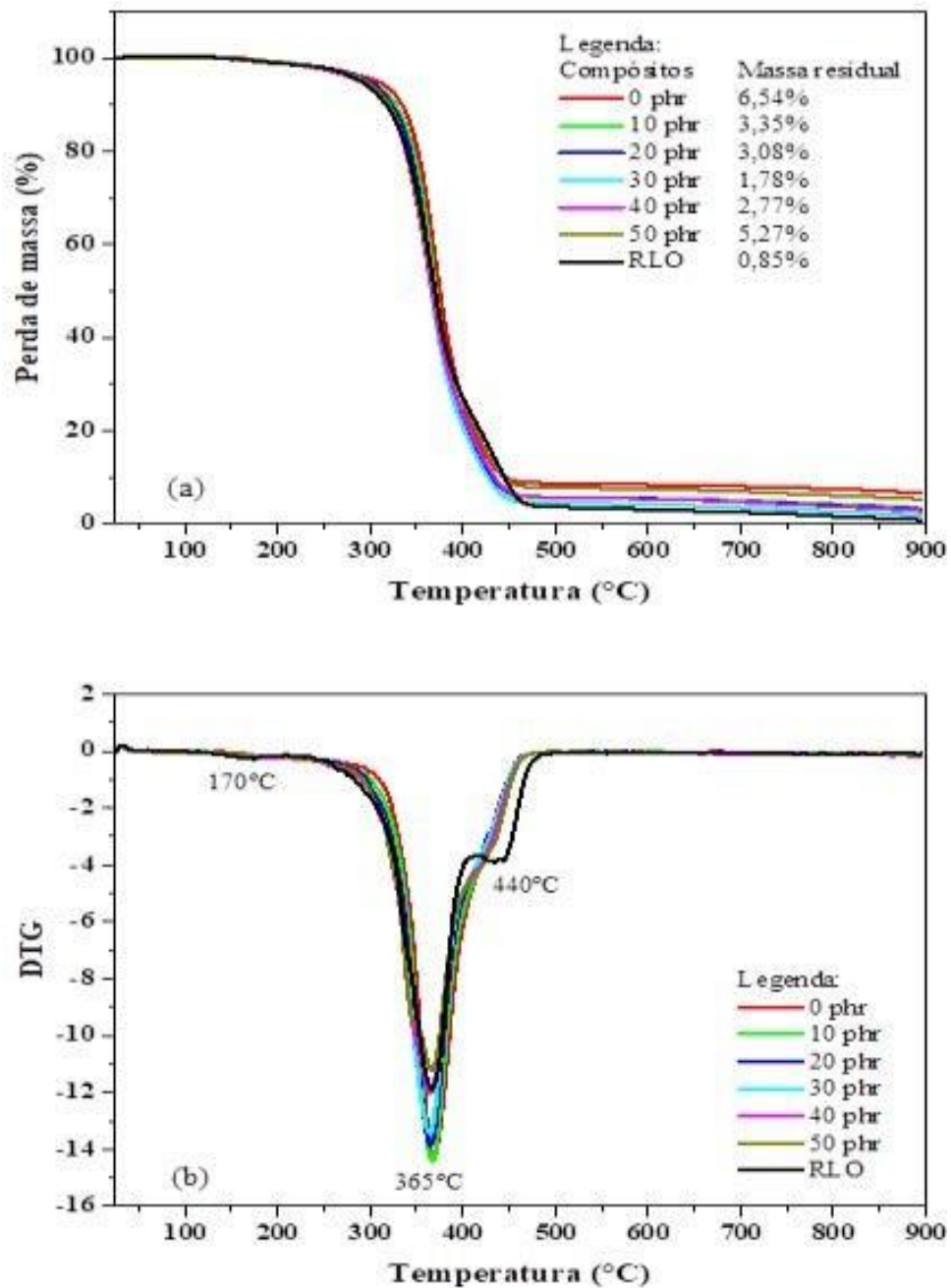
Fonte: Autoria própria.

## 5.12 ANÁLISE DA PERDA DE MASSA POR TERMOGRAVIMETRIA (TG)

A estabilidade térmica dos compósitos foi investigada através de análises termogravimétricas. Na Figura 54 (a), é representada a curva de perda de massa do RLO (indicado pela linha preta). É observado que a degradação deste material acontece em três estágios distintos. O primeiro estágio ocorre por volta de 170°C, com uma perda de massa de 0,85%, atribuída à despolimerização das ligações H-H fracas do PMMA. O segundo estágio, mais intenso, ocorre a 365°C, resultando em uma perda de massa de 77,62%, sendo atribuído à despolimerização do grupo vinil [100]. O terceiro estágio, evidenciado em 440°C, resulta em uma perda de massa de 20,68%, correspondente à degradação do oligômero [101]. A massa residual do RLO é de aproximadamente 0,85%, atribuída a materiais inorgânicos presentes na amostra, como sílica, bismuto, estanho, bromo, entre outros, identificados na análise de fluorescência de raios-X. Na Figura 54 (a), o termograma do compósito sem carga (indicado pela linha vermelha) revela um evento de maior intensidade ocorrendo em 365°C. Este evento corresponde à degradação dos compostos orgânicos presentes na borracha natural, deixando um resíduo de 6,54% de material inorgânico [102]. É pouco evidente, porém, conforme mais cargas são incorporadas, há uma tendência de deslocamento das temperaturas de degradação dos

compósitos para níveis inferiores. Na Figura 54 (b), são apresentadas as curvas da primeira derivada da perda de massa (DTG) dos compósitos. Para os compósitos com carga (10-50 phr), observa-se a presença de um evento relacionado às temperaturas de degradação com maior intensidade em torno de 365°C, correspondente à degradação do isopreno e de materiais orgânicos presentes na borracha natural.

Figura 54 - Curvas de (a) TG dos compósitos de BN/RLO e (b) DTG dos compósitos de BN/RLO



Fonte: Autoria própria.

### 5.13 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

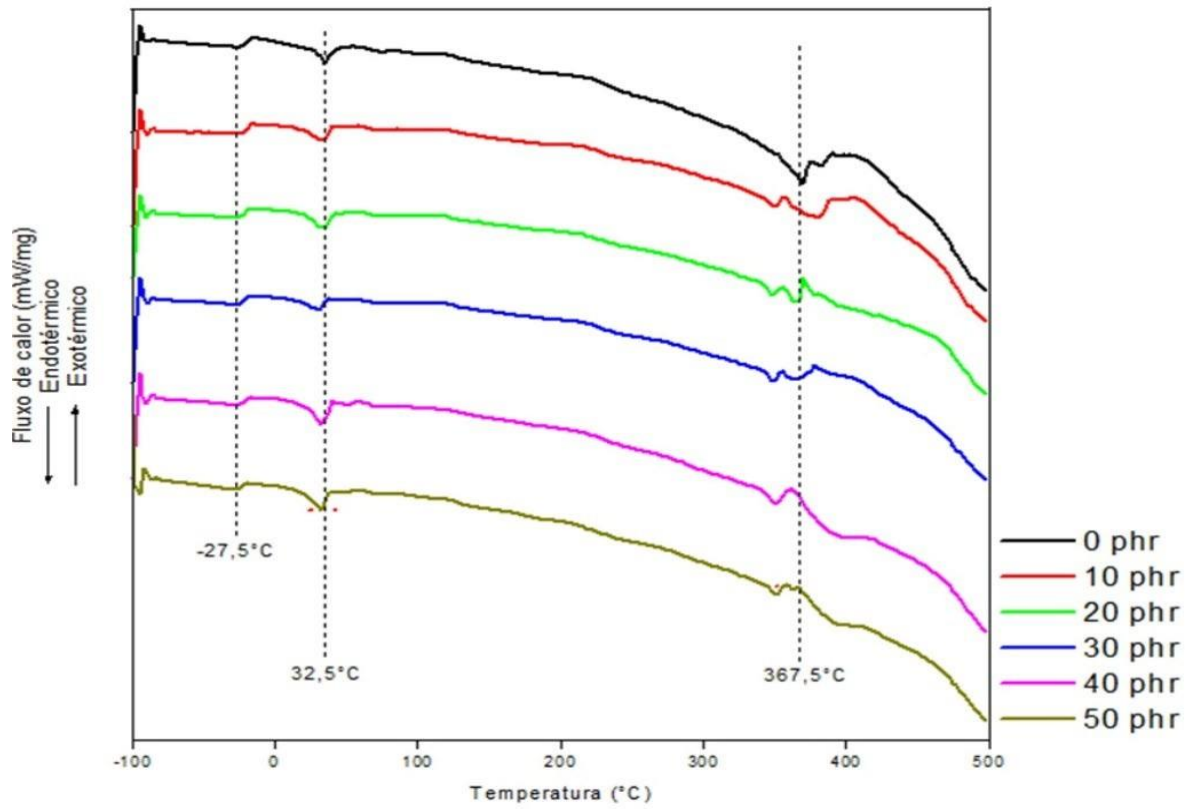
É um tipo de análise térmica que mensura a quantidade de energia que é absorvida ou liberada por uma amostra quando a mesma sofre aquecimentos e resfriamentos controlados. Durante a análise o equipamento mede a diferença de fluxo de calor entre a amostra e uma referência, gerando curvas representativas desse fluxo de calor em função da temperatura. Se a reação fizer o material liberar energia, é classificada como exotérmica e vai representar um pico positivo na curva, e se absorver energia será endotérmica e caracteriza um pico negativo [103].

Conforme observamos através da Figura 55, a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) dos compósitos não apresenta grandes variações em seus valores. A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) refere-se ao intervalo de temperatura na qual o material polimérico muda de um estado vítreo (mais rígido) para um estado mais borrachoso (elastomérico). Abaixo da faixa de transição há relativamente pouca movimentação molecular e os segmentos da cadeia estão como que congelados, sendo capazes de vibrar nessas posições fixas, mas com poucas chances de rearranjos nas posições. Aumentando-se a temperatura, a amplitude das vibrações torna-se maior e é possível a movimentação ocasional de segmentos da cadeia. Quanto mais flexível a cadeia, mais baixa a temperatura na qual isto irá ocorrer [104].

Os valores das temperaturas de transição vítrea da borracha natural crua e da borracha vulcanizada encontradas na literatura são de  $-72^\circ\text{C}$  e de  $-63^\circ\text{C}$  [105,106] respectivamente.

As curvas de fluxo de calor dos compósitos são apresentadas na Figura 55, nas quais observamos três eventos de destaque. Um evento de destaque endotérmico em torno da faixa de  $-27,5^\circ\text{C}$  atribuída a temperatura vítrea dos compósitos. O segundo evento endotérmico em torno de  $32,5^\circ\text{C}$  devido a evaporação de alguns materiais dos compósitos (líquido para o gasoso). O terceiro evento agora exotérmico ocorrendo em torno de  $360^\circ\text{C}$ , associado à degradação da cadeia polimérica da borracha.

Figura 55 - Curvas de DSC dos compósitos vulcanizados



Fonte: Aatoria própria.

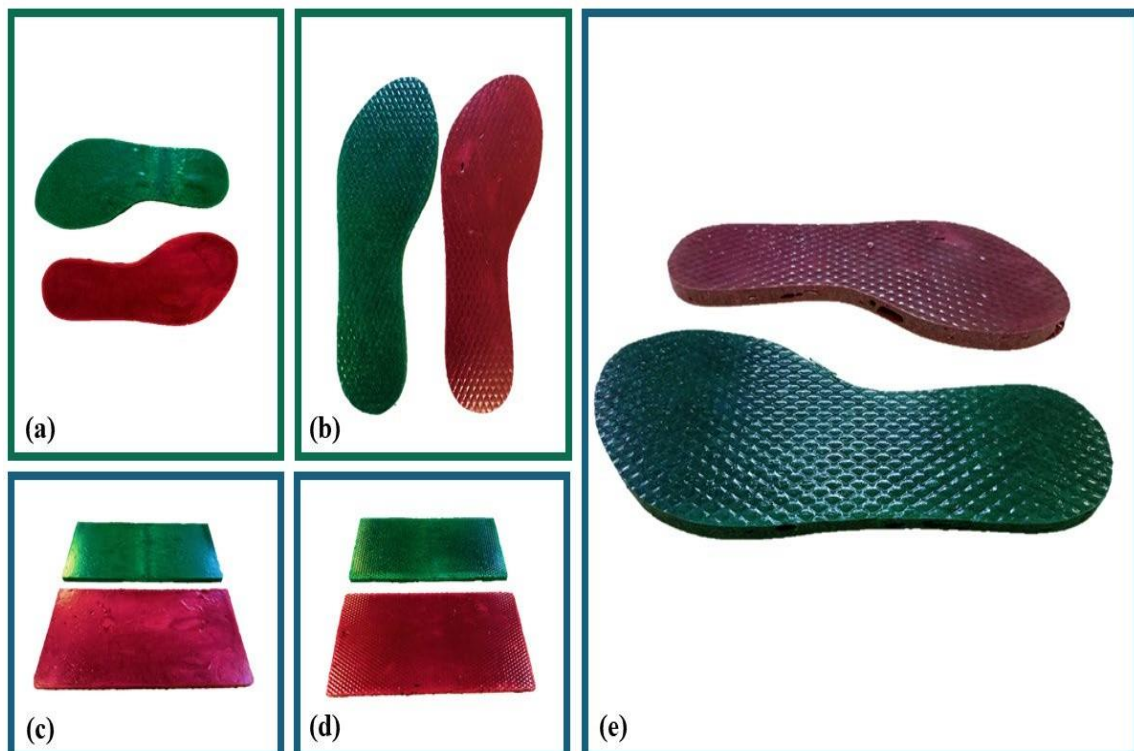
## 6 APLICAÇÃO DO NOVO COMPÓSITO DE BN/RLO

Segundo as normas DIN 53504:2017-03 [107], DIN 53505:2008-08 [108] e DIN 53516:1987 [109] que tratam dos ensaios de controle da qualidade em calçados e analisando os parâmetros de densidade, ruptura, deformação na ruptura, dureza (Shore A) e resistência à abrasão respectivamente, observamos que os compósitos de borracha natural com 10 e 20 phr de resíduo de lentes oftálmicas (RLO) apresentam valores consistentes quanto aos requisitos técnicos mínimos especificados nas Normas.

Entretanto, adotou-se o compósito de borracha natural com 10 phr de resíduo de lentes oftálmicas (RLO) para produzir o protótipo de sola de chinelo, por ter apresentado nos ensaios, valores expressivos de resistência à tração, ao rasgo, maior percentual de deformação na ruptura e menor perda por abrasão; em relação às demais proporções.

A Figura 56 mostra o protótipo de sola de chinelo produzido a partir do compósito de borracha natural com 10 phr de resíduo de lentes oftálmicas.

Figura 56 - Protótipo de sola de chinelo produzido com resíduo de lentes oftálmicas, com vistas (a) superior da sola lisa, (b) inferior da sola com ranhuras, (c) bloco superior liso, (d) bloco inferior com ranhuras e (e) vista inferior ampliada da sola de chinelo com ranhuras



Fonte: Autoria própria.

Adota-se no Brasil a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) [110], norma padronizada e regulamentada com alinhamento às diretrizes da ISO (Organização Internacional de Normalização) [111] e da DIN (Instituto Alemão de Normalização) [107-108-109], para ensaios e testes de componentes produzidos pela indústria calçadista.

Entretanto, além destes instrumentos normativos, existem países que possuem suas próprias regulamentações, considerando características próprias em termos de culturas de design e também em função dos insumos e da matéria prima na confecção de calçados. Sendo que temos como exemplo, o KEBS (Escritório de Padrões do Quênia) [112-113], não deixando de citar o Framas Group [114], laboratório especializado no estudo, desenvolvimento e realização de testes de componentes para calçados.

Na Tabela 11 é apresentado os valores obtidos em ensaios dos compósitos de BN/RLO e os limites definidos em Normas Técnicas considerados pela DIN e pelo KEBS. Podemos observar que com os valores resultantes nos ensaios realizados (ensaios mecânicos) e comparados com as Normas Técnicas, a proposta de utilização dos compósitos na produção de solados para calçados mostra-se extremamente viável.

Tabela 11 - Normas Técnicas e métodos de testes (calçados em compósitos vulcanizados)

Método de Teste de calçado	Densidade (g.cm <sup>-3</sup> )	Dureza (Shore A)	Abrasão (mm <sup>3</sup> /40m)	Tensão na ruptura (MPa)	Deformação na ruptura (%)	
Compósitos de BN/RLO	0 phr	1,00	51	146	12,5	1149,8
	10 phr	1,02	54	209	13,8	849,3
	20 phr	1,04	56	211	11,3	854,7
	30 phr	1,05	59	239	8,8	738,6
	40 phr	1,07	63	303	8,2	698,6
	50 phr	1,08	65	294	6,2	607,2
Normas Técnicas	DIN	0,9-1,05	55 – 60	150 – 250	> 5	> 500
	KEBS	---	50 – 60	< 450	> 6	> 100

Fonte: Autoria própria.

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho de tese, investigou-se a viabilidade da reciclagem de resíduos de lentes oftálmicas para a produção de novos compósitos com matriz polimérica. Os parâmetros reométricos indicaram que a presença da carga reduz o tempo de vulcanização, representando economia térmica. As densidades de ligações cruzadas, determinadas pelo método de Flory-Rehner, aumentaram com a adição de cargas, um comportamento também observado com a metodologia de Mooney-Rivlin. A análise da interação entre a matriz polimérica e a carga, utilizando o modelo de Lorenz-Parks, evidenciou que existe uma interação entre a borracha natural e o resíduo de lentes oftálmicas. No entanto, essa interação não é suficiente para melhorar o reforço mecânico, funcionando apenas como carga de enchimento. Nos ensaios termogravimétricos, o compósito apresentou estabilidade térmica. A espectroscopia de infravermelho não detectou qualquer interação química entre a matriz e a carga. Diante desses resultados foi possível identificar que as melhores composições de RLO está entre 10 e 20 phr, e assim, produzir um protótipo de sola de chinelo. Portanto, o uso de resíduos de lentes oftálmicas como carga de enchimento em compósitos de borracha natural vulcanizada representa uma inovação significativa na busca por materiais mais sustentáveis e economicamente viáveis. Este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a reutilização de resíduos industriais e suas aplicações na indústria de polímeros, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes.

## **8 TRABALHOS FUTUROS**

- Elaborar compósitos utilizando o resíduo de lentes oftálmicas (RLO) incorporado com outras matrizes poliméricas, como por exemplo, blendas de Borracha Natural (BN) e Borracha de Estireno Butadieno (SBR);
- Compara-los com os resultados obtidos na presente tese;
- Estudar os resultados testando-os para uso como isolamento Termoacústico e;
- Expor os compósitos obtidos neste estudo à diversos intempéries avaliando possíveis perdas das propriedades obtidas.

## REFERÊNCIAS

- [1] MASŁOWSKI, Marcin; MIEDZIANOWSKA, Justyna; STRZELEC, Krzysztof. Natural rubber composites filled with crop residues as an alternative to vulcanizates with common fillers. **Polymers**, v. 11, n. 6, p. 972, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11060972> .
- [2] SANTOS, Renivaldo José dos *et al.* Sugarcane bagasse ash: new filler to natural rubber composite. **Polímeros**, v. 24, p. 646-653, 2014. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1547> .
- [3] BACARIN, Giovani B. *et al.* Natural rubber composites with Grits waste from cellulose industry. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1126-1139, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01011-8> .
- [4] SAREENA, C.; RAMESAN, M. T.; PURUSHOTHAMAN, E. Utilization of peanut shell powder as a novel filler in natural rubber. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 125, n. 3, p. 2322-2334, 2012. <https://doi.org/10.1002/app.36468>.
- [5] SOWIŃSKA-BARANOWSKA, Anna; MACIEJEWSKA, Magdalena. Potential utilization of ground eggshells as a biofiller for natural rubber biocomposites. **Materials**, v. 16, n. 8, p. 2988, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16082988>.
- [6] BATISTA, Salomão Sávio *et al.* Viabilities for obtaining, manufacturing and applying composites using bamboo powders and ophthalmic lens waste. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e775997455-e775997455, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7455>.
- [7] OTTAIANO, José Augusto Alves *et al.* **As condições de saúde ocular no Brasil**: 2019. São Paulo: CBO, 2019. Disponível em: [https://www.cbo.com.br/novo/publicacoes/condicoes\\_saude\\_ocular\\_brasil2019.pdf](https://www.cbo.com.br/novo/publicacoes/condicoes_saude_ocular_brasil2019.pdf). Acesso em: 02 out. 2024.
- [8] A GUERRA do 5G chega ao Brasil, uma empresa de visão. **Revista Isto é Dinheiro**, n. 1148, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://istoedinheiro.com.br>. Acesso em: 05 out. 2024.
- [9] CURY, Pedro Henrique Araujo; SARAIVA, José. Produção de lentes orgânicas no Polo Industrial de Manaus, **Gestão Produção**, São Carlos, v. 25, n. 4, p. 901-915, 2018. <https://doi.org/10.1590/0104-530X2881-18>.
- [10] DWIVEDI, Chandresh; MANJARE, Sampatrao; RAJAN, Sushil K. Recycling of waste tire by pyrolysis to recover carbon black: Alternative & environment-friendly reinforcing filler for natural rubber compounds. **Composites Part B: Engineering**, v. 200, p. 108346, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108346>.
- [11] RAJAK, Dipen Kumar *et al.* Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1667, 2019. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>.
- [12] CANEVAROLO JÚNIOR, Sebastião Vicente *et al.* **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

- [13] FILE: thermoplastic elastomer TPE.png. *In*: WIKIMEDIA COMMONS. 2009. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermoplastic\\_elastomer\\_TPE.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thermoplastic_elastomer_TPE.png). Acesso em: 10 out. 2024.
- [14] CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and engineering**: na introduction. 9. ed. New York: Wiley, 2020.
- [15] WU, Chenchen *et al.* Manufacturing technologies of polymer composites: a review. **Polymers**, v.15, n. 3, p. 712, 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15030712>.
- [16] GREENOUGH, Stephanie; DUMONT, Marie-José; PRASHER, Shiv. The physicochemical properties of biochar and its applicability as a filler natural rubber composites: a review. **Materials Today Communications**, v. 29, p. 102912. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102912> .
- [17] MD SHAH *et al.* A review on the tensile properties of bamboo fiber reinforced polymer composites. **Bioresources**, v. 11, n. 4, 2016.
- [18] MORELLI, A. C. **Materiais compósitos**: constituição, propriedades e reparos. Curitiba: Editora CRV, 2022.
- [19] CALLISTER JR, W. D., RETHWISCH, D. G., **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- [20] SHACKELFORD, J. F., **Introduction to materials science for engineers**, 9. ed. Pearson, 2022.
- [21] SOUZA FILHO, José Ribeiro de. **Obtenção e caracterização de um eco-compósito à base de látex e bainha da palha do coqueiro para isolamento térmico e acústico**. 2015. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/20874>. Acesso em: 11 out. 2024.
- [22] CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. **Borracha natural**: introdução. 20---. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintesehistorica/materiasprimas/borrachas/borracha-natural/>. Acesso em: 12 out. 2024.
- [23] HOFMANN, W. **Rubber technology handbook**. New York: Hanser, 1989.
- [24] MALAYSIAN RUBBER PRODUCER'S ASSOCIATION. **The natural rubber formulary and property index**. London: Luton, 1984.
- [25] GONÇALVES, P. S. *et al.* Assessment of growth and yield performance of rubber tree clones of the IAC 500 series. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1643-1649, dez. 2011.
- [26] ALBUQUERQUE, F. C. **Doenças da seringueira**. 1978. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Heveicultura) - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, Belém, 1978.

- [27] ROCHA NETO, O. G. **Eficiência no uso de água em plantas jovens de seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) submetidas a déficit hídrico**. 1979. 36 p. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1979.
- [28] GONÇALVES, P. S. *et al.* **Clones de hevea: influência dos fatores ambientais na produção e recomendação para o plantio**. Campinas: IAC, 1991. Disponível em: [https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/AISEDE/20277/1/pab07\\_ago\\_94.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/AISEDE/20277/1/pab07_ago_94.pdf). Acesso em: 13 out. 2024.
- [29] MESQUITA, A. C. *et al.* Anatomical characteristics and enzymes of the sucrose metabolism and their relationships with látex yield in the rubber tree (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Viçosa, v. 18, n. 2, p. 263-268, abr./jun. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjpp/a/NBpvNMvr7f64k98K5wzTkVx/?format=pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.
- [30] GASPAROTTO, L. *et al.* **Manual de identificação de doenças da cultura da seringueira**. Brasília: Embrapa, 2016.
- [31] PORTAL AGRO. **Como é feita a sangria da seringueira**. YouTube, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=18z3idJhfM>. Acesso em: 15 out. 2024.
- [32] KUSH, A. Isoprenoid biosynthesis: the Hevea factory. **Plant Physiology and Biochemistry**, New Delhi, v. 32, n. 8, p. 761-767, Aug. 1994.
- [33] CHEAW, C. H. *et al.* Methods for measuring the dry rubber content of field látex. *In*: INSTITUT PENYELIDIKAN GETAH MALAYSIA. **RRIM training manual on látex and rubber analysis**. Kuala Lumpur: RRIM, 1979. p. 65-73.
- [34] MORENO, R. M. B. *et al.* Avaliação do látex e da borracha natural de clones de seringueira no estado de São Paulo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 38, n. 5, p. 583-590, maio 2003. ISSN 1678- 3921. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/issue/archive>. Acesso em: 15 out. 2024.
- [35] WISNIEWSKI, A. **Látex e borracha**. Belém: Faculdade de Ciências Agrárias do Pará, 1983. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/490>. Acesso em: 15 out. 2024.
- [36] SILVA, M. J. *et al.* **Avaliação estrutural da borracha natural de clones de seringueira do Distrito Federal e do Amazonas usando espectroscopia no infravermelho**. São Carlos: Embrapa, 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1170675/1/CT125-Avaliacao-estrutural-da-borracha-natural-de-clones.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- [37] BLACKLEY, D. C. **Polymer latices: types of latices**. 2. ed. London: Chapman & Hall, 1997. v. 2.
- [38] VIAHEVEA: heveicultura e borracha natural. [202-?]. Disponível em: [www.viahevea.com.br](http://www.viahevea.com.br). Acesso em: 22 out. 2024.

- [39] NEVES, M. P. **Látex extraído das seringueiras serve para fabricar de pneu à luva cirúrgica**: entenda como é o processo de extração da seiva e a sua comercialização. [Entrevista cedida a Globo Ciência], 15 set. 2021. Disponível em: <https://glo.bo/R8lxPi>. Acesso em: 30 out. 2024.
- [40] RUBBERPEDIA. **Vulcanização**. Disponível em: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao.php>. Acesso em: 23 out. 2024.
- [41] KRAMBEER, M. **Rubber compounding**: advance course. Hamburgo: Schill and Seilacher, 1991.
- [42] SANTOS, Renivaldo José dos. **Obtenção de compósitos de borracha natural com resíduo industrial de couro reticulados com diferentes peróxidos**. 2014. 101 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/115765>. Acesso 23 out. 2024.
- [43] RUBBERPEDIA. **Vulcanização com enxofre**. Disponível em: <http://www.rubberpedia.com/vulcanizacao/vulcanizacao-com-enxofre.php>. Acesso em: 30 out. 2024.
- [44] DATTA, R. N. **Rubber curing systems**. Shawbury: Rapra Technology Ltd, 2002.
- [45] WHELAN, A.; LEE, K. S. (ed.). **Development in rubber technology**: 4. London: Applied Science Publishers, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3435-1>. Acesso em: 26 out. 2024.
- [46] BARTH, B.; ALVES, M. R.; KARA-JOSÉ, N. Desempenho visual na correção de miopia com óculos e lentes de contato gelatinosas. **Arq. Bras. Oftalmol.**, v. 71, n. 1, fev. 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abo/a/Rp8jmVq4XxJH4fB8WKSqDkz/?lang=pt>. Acesso em: 01 nov. 2024.
- [47] 20/20 BRASIL. **Do oriente ao ocidente**. 2006. Disponível em: [http://www.2020brasil.com.br/publisher/preview.php?edicao=0506&id\\_mat=1359](http://www.2020brasil.com.br/publisher/preview.php?edicao=0506&id_mat=1359). Acesso em: 01 nov. 2024.
- [48] FREGOLENTE, P. B. L. **Estudo da fotopolimerização de monômeros monofuncionais e multifuncionais para produção e recobrimento de lentes oftálmicas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2006.364498>. Acesso em: 02 nov. 2024
- [49] SPINACÉ, M. A.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100014>. Acesso em: 02 nov. 2024.

- [50] GORNI, A. A. Propriedades e características de resinas plásticas usadas em chapas amortecedoras de vibração. *In: PLASTSHOW, FEIRA E CONGRESSO, 2006, São Paulo, Atas [...]*. São Paulo: Aranda Editora, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/378463170\\_Propriedades\\_e\\_Caracteristicas\\_de\\_Resinas\\_Plasticas\\_Usadas\\_em\\_Chapas\\_Amortecedoras\\_de\\_Vibracao\\_Properties\\_and\\_Characteristics\\_of\\_Plastic\\_Resins\\_Used\\_in\\_Vibration\\_Damping\\_Sheet](https://www.researchgate.net/publication/378463170_Propriedades_e_Caracteristicas_de_Resinas_Plasticas_Usadas_em_Chapas_Amortecedoras_de_Vibracao_Properties_and_Characteristics_of_Plastic_Resins_Used_in_Vibration_Damping_Sheet). Acesso em: 01 nov. 2024.
- [51] 20/20 BRASIL. **Lentes oftálmicas: lentes mágicas**. 2008. Disponível em: [http://www.2020brasil.com.br/publisher/preview.php?edicao=1204&id\\_mat=997](http://www.2020brasil.com.br/publisher/preview.php?edicao=1204&id_mat=997). Acesso em: 01 nov. 2024.
- [52] SANTOS, A. B. **Plástico biodegradável**. São Paulo: Instituto de Pesquisa Tecnológicas, 2002. Disponível em: <http://www.ipt.br/atividades/inovacao/exemplos/plastico/definicao>. Acesso em: 01 nov. 2024.
- [53] PERRET OPTICIENS. **Optical correction**. 2003. Disponível em: <http://perret-optic.ch/optometrie>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- [54] ESSILOR DO BRASIL. **Histórico**. 2006. Disponível em: <http://www.varilux.com.br/historico.php>. Acesso em: 02 nov. 2024.
- [55] BECKER, D. **Blendas PP/PU: estudo do efeito do agente compatibilizante e reciclagem de resíduos de PU**. 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83274>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [56] JORGLAIS. **Produção: processo de superfície**. 2006. Disponível em: <http://www.jorglais.com.br/lab.asp>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [57] CHIU, H.; MAYR, R.; YEAN, L. **Thermoplastic polyurethane lenses whit a specified weight percentage of urethane repeating units**: patent application. Woodbury: United States Patent, 2012. Disponível em: <http://www.faqs.org/patents/inv/106802>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [58] PINTO, U. F.; MONTEIRO, E. E. Efeito da massa molar e do teor de poliuretano nas propriedades mecânicas de misturas poli (metacrilato de metila) / poliuretano. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 3, p. 156-162, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000300004>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [59] PRIME OPTICAL. **Superfície**: superfície é o processo de fabricação da lente a partir de um bloco oftálmico. Disponível em: <https://www.primeoptical.com.br/superficie>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [60] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Processamento de lentes oftálmicas**. Conteúdo Moodle USP. São Paulo: USP, 2014. Disponível em: <https://disciplinas.usp.br>. Acesso em: 04 nov. 2024.

- [61] GRAÇA, Cláudia Isabel Carapeto do Carmo Ruivinho. **Valorização dos resíduos de lentes oftálmicas orgânicas**. Faro, Portugal, p.88, Dissertação (Mestrado) Engenharia do Ambiente Tecnologias Ambientais, Universidade de Algarve, Faculdade de Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: <https://share.google/c9ZHH29xtldnssWrj>. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [62] BURTON, M. J. *et al.* A comissão Lancet Global Health sobre Saúde Ocular Global: visão além de 2020. **Lancet Glob Health**, v. 9, n. 4, p.489-551, 2021. Disponível em: doi:10.1016/S2214-109X(20)30489-7. Acesso em: 03 nov. 2024.
- [63] VOTUPORANGA. **População total**: nossos símbolos. Apresenta dados do IBGE sobre censo de 2022. Disponível em: <https://www.votuporanga.sp.gov.br/portal/servicos/1003/populacaototal>. Acesso em: 09 nov. 2024.
- [64] DATEANDTIME.INFO. **Coordenadas geográficas de Votuporanga, Brasil**. 2024. Disponível em: <https://dateandtime.info/pt/citycoordinates.php?id=3444864>. Acesso em: 09 nov. 2024.
- [65] INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. **Região administrativa de São José do Rio Preto**. São Paulo: IGC, 2007. 1 mapa, color. Escala 1:850.000. Disponível em: [https://bibliotecavirtual.sp.gov.br/external-files/IGC/Central%20de%20Downloads/Mapas%20Individuais%20das%20RAs/ra\\_sjrpreto\\_07\\_igc.jpg](https://bibliotecavirtual.sp.gov.br/external-files/IGC/Central%20de%20Downloads/Mapas%20Individuais%20das%20RAs/ra_sjrpreto_07_igc.jpg). Acesso em: 09 nov. 2024.
- [66] ASSOCIAÇÃO COMERCIAL DE VOTUPORANGA. **Dados cadastrais**. [202-]. Disponível em: <http://www.acvnet.com.br/noticias>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- [67] ENCARNAÇÃO, Telma *et al.* Recycling ophthalmic lens wastewater in a circular economy context: a case study with microalgae integration. **Materials**, v. 17, n. 1, p. 75, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17010075>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- [68] GALDINO, Bianca Ramalho *et al.* Gerenciamento dos resíduos gerados na indústria de lentes oftálmicas: estudo de caso: João Pessoa-PB. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 5., 2017, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Ecogestão, 2017. Disponível: <https://eventos.ecogestaobrasil.net/congestas2017/trabalhos/pdf/congestas2017-et-01-020.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2024.
- [69] SAEV AMBIENTAL. **Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos**: 2014. Disponível em: <https://www.saev.com.br>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- [70] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3182-21a**: standard practice for rubber: materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets. West Conshohocken: ASTM International, 2021.
- [71] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2084-19a**: standard test method for rubber property: vulcanization using oscillating disk cure meter. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

[72] GUERRA, B. B.; FURTADO, C. R. G.; COUTINHO, F. M. B. Avaliação reológica de elastômeros e suas composições. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 4, p. 289-294, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000400017>. Acesso em: 10 nov. 2024.

[73] CAETANO, M. J. L. **Misturadores abertos**. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/processos/mistura/tipos-de-misturadores/misturadores-abertos/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[74] LEE, B. L. Reinforcement of uncured and cured rubber composites and its relationship to dispersive mixing: an interpretation of cure meter rheographs of carbon black loaded SBR and cis-polybutadiene compounds. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 52, n. 5, p. 1019-1029, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.5254/1.3535250>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[75] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D297-21**: standard test methods for rubber products: chemical analysis. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[76] FLORY, Paul J.; REHNER JR, John. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks I. Rubberlike elasticity. **The journal of chemical physics**, v. 11, n. 11, p. 512-520, 1943. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1723791>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[77] MOONEY, Melvin. A theory of large elastic deformation. **Journal of applied physics**, v. 11, n. 9, p. 582-592, 1940. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1712836>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[78] GRUENDKEN, M. *et al.* Low molecular weight 'liquid' polymer extended compounds, impact on free volume and crosslink density studied by positron lifetime spectroscopy and stress-strain analysis according to Mooney-Rivlin. **Polymer Testing**, v. 100, p. 107239, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107239>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[79] SOMBATSOMPOP, N. Practical use of the Mooney-Rivlin equation for determination of degree of crosslinking of swollen nr vulcanisates. **J. Sci. Soc. Thailand**, v. 24, n. 3, p. 199-204, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.1998.24.199>. Acesso em: 29 nov. 2024.

[80] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D412-16 (2021)**: standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers: tension. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[81] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D624-00 (2020)**: standard test method for tear strength of conventional vulcanized rubber and thermoplastic elastomers. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

[82] SILVA, L. F. M. *et al.*. Manufacturing of quality specimens. In: SILVA, L. F. M. *et al.* (ed.). **Testing adhesive joints: best practices**. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/7534/37/L-X-0000753437-0001828949.XHTML/index.xhtml>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[83] KIND SNAIL. **ASTM D624 die C tear test cutter (right angle)**. Disponível em: <https://www.kindsnail.com/product.php?mode=show&id=56&lg=en>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[84] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2240-15(2021)**: standard test method for rubber property: durometer hardness. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

[85] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5963-22**: standard test method for rubber property: abrasion resistance (rotary drum abrader). West Conshohocken: ASTM International, 2022.

[86] LORENZ, O.; PARK, C. R. The crosslinking efficiency of some vulcanizing agents in natural rubber. **Journal of Polymer Science**, v. 50, n. 154, p. 299-312, 1961. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pol.1961.1205015404>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[87] SANTOS, Renivaldo J. *et al.* Using the Lorenz–Park, Mooney–Rivlin, and dynamic mechanical analysis relationship on natural rubber/leather shavings composites. **Journal of Applied Polymer Science**, p. 51880, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.51880>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[88] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6370-99 (2019)**: standard test method for rubber: compositional analysis by thermogravimetry (TGA). West Conshohocken: ASTM International, 2019.

[89] NAJAM, Mohsin *et al.* Influence of silica materials on synthesis of elastomer nanocomposites: a review. **Journal of Elastomers & Plastics**, v. 52, n. 8, p. 747-771, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0095244319888768>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[90] KIM, Do Young *et al.* Correlation between the crosslink characteristics and mechanical properties of natural rubber compound via accelerators and reinforcement. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 2020, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12092020>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[91] HIRANOBE, Carlos Toshiyuki *et al.* Cross-linked density determination of natural rubber compounds by different analytical techniques. **Materials Research**, v. 24, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0041>. Acesso em: 01 dez. 2024.

[92] HAGEN, Roger; SALMÉN, Lennart; STENBERG, Bengt. Effects of the type of crosslink on viscoelastic properties of natural rubber. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, v. 34, n. 12, p. 1997-2006, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(19960915\)34:12%3C1997::AIDPOLB5%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0488(19960915)34:12%3C1997::AIDPOLB5%3E3.0.CO;2-N). Acesso em: 01 dez. 2024.

[93] ROOJ, Sandip; DAS, Amit; HEINRICH, Gert. Tube-like natural halloysite/fluoroelastomer nanocomposites with simultaneous enhanced mechanical, dynamic mechanical and thermal properties. **European Polymer Journal**, v. 47, n. 9, p. 1746-1755, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.06.007>. Acesso em: 01 dez. 2024.

- [94] SCHIEPPATI, Jacopo *et al.* Temperature impact on the mechanical and fatigue behavior of a non-crystallizing rubber. **International Journal of Fatigue**, v. 144, p. 106050, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106050>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- [95] HE, Shaojian *et al.* Performance improvement in nano-alumina filled silicone rubber composites by using vinyl tri-methoxysilane. **Polymer Testing**, v. 67, p. 295-301, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.023>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [96] AL-HARBI, Fahad A. *et al.* Effect of nanodiamond addition on flexural strength, impact strength, and surface roughness of PMMA denture base. **Journal of Prosthodontics**, v. 28, n. 1, p. e417-e425, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jopr.12969>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [97] KAUR, Jaspreet *et al.* Improvement in optical absorption and emission characteristics of polymethyl methacrylate in solution cast polymethyl methacrylate/polyvinyl carbazole polyblends. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 36, n. 8, p. 3260-3269, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/08927057221115714>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [98] HAYEEMASAE, Nabil *et al.* Halloysite nanotubes filled natural rubber composites: functionality, crystallinity and thermal studies. **Journal of Engineering Science**, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21315/jes2019.15.1>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [99] ROLERE, Sébastien *et al.* Investigating natural rubber composition with Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy: a rapid and non-destructive method to determine both protein and lipid contents simultaneously. **Polymer Testing**, v. 43, p. 83-93, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.02.011>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [100] NIKOLAIDIS, Alexandros K.; ACHILIAS, Dimitris S. Thermal degradation kinetics and viscoelastic behavior of poly (methyl methacrylate)/organomodified montmorillonite nanocomposites prepared via in situ bulk radical polymerization. **Polymers**, v. 10, n. 5, p. 491, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10050491>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [101] KASHIWAGI, Takashi *et al.* Effects of weak linkages on the thermal and oxidative degradation of poly (methyl methacrylates). **Macromolecules**, v. 19, n. 8, p. 2160-2168, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ma00162a010>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [102] SUI, G. *et al.* Preparation and properties of natural rubber composites reinforced with pretreated carbon nanotubes. **Polymers for advanced technologies**, v. 19, n. 11, p. 1543-1549, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pat.1163>. Acesso em: 06 jan. 2025.
- [103] MENCZEL, J. D.; PRIME, R. B. **Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [104] CANEVAROLO JR., S. V. Análise dinâmico - mecânica para sistemas poliméricos: parte 1 - o amortecimento ( $\tan\delta$ ). **Boletim da ABPol**, v. 6, p. 36-40, 1991.

- [105] BRANDUP, J.; IMMERGUT, E. H. (ed.). **Polymer handbook**. New York: John Wiley and Sons, New York, 1975.
- [106] MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- [107] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53504:2017-03**: testing of rubber: determination of tensile strength at yield, elongation at break and stress values in a tensile test. Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [108] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53505:2000-08**: testing of rubber and elastomers: hore A and Shore D hardness test. Berlin: Beuth Verlag, 2000.
- [109] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 53516:1987-06**: testing of rubber and elastomers: determination of abrasion resistance. Berlin: Beuth Verlag, 1987.
- [110] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT Catálogo**. São Paulo: ABNT, 2025. Disponível em: [www.abntcatalogo.com.br](http://www.abntcatalogo.com.br). Acesso em: 27 jan. 2025.
- [111] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO**: global standards for trusted goods and services. Genebra: ISO, 2025. Disponível em: <https://www.iso.org/home.html>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- [112] KENYA BUREAU OF STANDARDS. **KEBS**. Nairobi: KEBS, 2025. Disponível em: <https://www.kebs.org/>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- [113] MESA, Janet W.; ONYANCHA, Douglas; MAGUT, Paul Sang. Assessment of the quality of leather footwear for school children made by SMEs in Kariokor Kenya. **International Journal of Scientific and Research Publications**, v. 9, n. 7, Jul. 2019. Disponível em: <http://41.89.227.156:8080/xmlui/handle/123456789/958>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- [114] FRAMAS GROUP. **Footwear testing methods 1-2**. 2023. Disponível em: <https://framass.com/en/2023/09/22/footwear-testing-methods1-2/>. Acesso em: 06 jan.2025.

## APÊNDICE A – PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA PESQUISA DA TESE

- Artigo publicado como primeiro autor durante a realização da Tese.

ROCHA, José Afonso; HIRANOBE, Carlos Toshiyuki; SOUZA, Dener da Silva; ARAÚJO, Samara da Silva; HIRANOBE, Márcia Ferreira; SOUZA, Guilherme Henrique Barros de; GENNARO, Elmer Mateus; CABRERA, Flávio Camargo; CARDIM, Guilherme Pina; SILVA, Michael Jones da; SILVA, Erivaldo Antônio da; SILVA, José Francisco Resende da; SANTOS, Renivaldo José dos. Sustainability and Innovation: Incorporating Waste from Ophthalmic Lenses into Natural Rubber Composites. **Recycling**, v. 10, n. 3, p. 90, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling10030090>.

- Artigo publicado em revista como primeiro autor durante a realização da Tese.

ROCHA, José Afonso; HIRANOBE, Carlos Toshiyuki; HIRANOBE, Márcia Ferreira; ARAÚJO, Samara da Silva; FILGUEIRA, Matheus da Silva; RIBEIRO, Gabriel Deltrejo; CARDIM, Henrique Pina; MUKUNO, Jeferson Shiguemi; SILVA, José Francisco Resende da; ANDOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; SANTOS, Renivaldo José dos. Strategic diagnosis for improvements in the execution of structural masonry. **Journal of Engineering Research**. Ponta Grossa, v. 4, n. 13, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174132429043>.

- Artigos publicado em revista como coautor durante a realização da Tese.

HIRANOBE, Carlos Toshiyuki; SILVA, Alex R. da; CRUZ, Marco A. G.; CANHADA, João C. S.; ARAÚJO, Samara S.; ROCHA, José Afonso; SANTOS, Harison F. dos; RIBEIRO, Gabriel Deltrejo; TOLOSA, Gabrieli R.; SANTOS, Gleyson T. A.; BUDEMBERG, Eduardo R.; AZEVEDO, Cláudia G. de; SANTOS, Renivaldo José dos. Evaluation of the properties of natural rubber bio composite and guava residue (*Psidium guajava* L.) as sustainable application. **Materials Research**, v. 26, e20220515, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0515>.

RIBEIRO, Gabriel Deltrejo; HIRANOBE, Carlos Toshiyuki; ARAÚJO, Samara S.; FILGUEIRA, Matheus da Silva; ROCHA, José Afonso; MUKUNO, Jeferson Shiguemi; SALMAZO, Leandra Oliveira; GOMES, Andressa Silva; TOLOSA, Gabrieli R.; GENNARO, Elmer Mateus; JOB, Aldo Eloizo; PÉREZ, Miguel Angel Rodríguez; SANTOS, Renivaldo José dos. Sustainable construction materials for low-cost housing: Thermal insulation potential of expanded SBR composites with leather waste. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 30, May-Jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.234>.

- Depósito de Pedido de Patente de Invenção junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial).

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. Processo de obtenção de compósitos elastoméricos empregando resíduos de lentes oculares, produto obtido e seu uso.**  
Depositante: Agência Unesp de Inovação. BR 10 2025 019673 5. Depósito: 15 set. 2025.