

CARLOS TOSHIYUKI HIRANOBE

**COMPÓSITOS ECO-EFICIENTES: UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE LENTES
OCULARES COMO CARGA EM BORRACHA ESTIRENO BUTADIENO**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Departamento de Física, Presidente
Prudente/SP.

Supervisor(a): Prof. Dr. Aldo Eloizo Job

Presidente Prudente

2025

Título do Projeto de Pesquisa:

Compósitos Eco-Eficientes: Utilização de resíduos de lentes oculares como carga em borracha estireno butadieno.

RESUMO

O projeto proposto consiste no desenvolvimento de compósitos poliméricos obtidos pela combinação de resíduos de lente ocular (RLO), provenientes do processo de lixamento em água da fábrica de lentes oculares, com borracha sintética do tipo estireno butadieno (SBR). A mistura de resíduo de lente em SBR será preparada em um misturador aberto de rolos, juntamente com agentes de ativação e de cura, visando assim obter propriedades aprimoradas para o novo material. Diferentes formulações, contendo diversas proporções de resíduo, serão elaboradas para analisar o comportamento estrutural, morfológico, mecânico e térmico do material resultante. Os compósitos serão caracterizados por meio de técnicas como reometria, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR modo ATR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), determinação da densidade de ligações cruzadas por meio de inchamento em solvente orgânico, ensaios mecânicos para avaliar a resistência à tração, ao rasgo, à abrasão, a dureza e ensaio térmico como a análise termogravimétrica. Além disso, será analisado o reforço gerado na interação entre carga e matriz por meio da Equação de Lorenz-Park. Os compósitos serão preparados sob alta pressão, em uma faixa específica de temperatura e tempo de cura que será determinada durante o processo de reometria. Os resultados obtidos a partir da reticulação dos compósitos de borracha SBR/RLO fornecerão orientações necessárias para a escolha de uma aplicação industrial viável dos resíduos de lentes oculares.

Palavras-Chave: Borracha estireno butadieno, compósitos eco-eficiente, interação-interfacial, Lorenz-Parks, resíduo de lente ocular.

Research Project Title:

Eco-Efficient Composites: Utilization of Waste Ophthalmic Lenses as Fillers in Styrene-Butadiene Rubber.

ABSTRACT

The proposed project involves the development of polymeric composites obtained by combining ocular lens waste (OLW) from the water-based grinding process at an optical lens manufacturing facility with styrene-butadiene rubber (SBR). The lens waste and SBR mixture will be prepared in an open-roll mixer, along with activation and curing agents, to achieve enhanced properties in the new material. Various formulations, containing different proportions of waste material, will be developed to analyse the structural, morphological, mechanical, and thermal behaviour of the resulting material. The composites will be characterized using techniques such as rheometric, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR in ATR mode), scanning electron microscopy (SEM), determination of crosslink density via swelling in organic solvents, and mechanical tests to assess tensile strength, tear resistance, abrasion resistance, hardness, and thermal analysis such as thermogravimetric analysis. Additionally, the reinforcement generated by the interaction between filler and matrix will be analysed using the Lorenz-Park equation. The composites will be prepared under high pressure, within a specific temperature range and curing time, which will be determined during the rheometric process. The results obtained from the crosslinking of the SBR/OLW rubber composites will provide necessary guidance for the selection of a viable industrial application for ocular lens waste.

Keywords: Styrene-Butadiene Rubber, Eco-Efficient Composites, Interfacial Interaction, Lorenz-Parks, Waste Ophthalmic Lens.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Borracha Sintética Estireno Butadieno (SBR) e suas Propriedades	10
2.1.1 Estrutura molecular	10
2.1.2 Características físicas.....	11
2.1.3 Características mecânicas	11
2.2 Resíduos de Lentes Oculares	12
2.2.1 Composição e classificação dos resíduos de lentes oculares	12
2.2.2 Desafios e impactos ambientais associados ao descarte inadequado de lentes	13
2.3 Compósitos de Borracha SBR Reforçados com Resíduo de Lente Ocular	15
2.4 Processo de Vulcanização dos Compósitos de Borracha	16
2.5 Potencial de Aplicações Industriais.....	17
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 Objetivos Específicos:.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Resíduo de Lente Ocular.....	20
4.2 Matriz Polimérica	20
4.3 Método de Preparação dos Compósitos	21
5. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	24
5.1 Comportamento Reológico	24
5.2 Análise Morfológica e Estrutural	24
5.2.1 Determinação da densidade de ligações cruzadas por inchamento em solvente orgânico.....	24
5.2.2 Determinação da densidade de ligações cruzadas pela metodologia de Mooney-Rivlin....	25
5.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier	26
5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	26
5.3 Análises Mecânicas.....	26
5.3.1 Ensaio de resistência à tração	26
5.3.2 Ensaio de resistência ao rasgo	27
5.3.3 Ensaio de resistência à abrasão	27
5.3.4 Dureza do compósito	28
5.4 Análise das Interações entre a Carga e a Matriz Polimérica utilizando a Equação de Lorenz-Parks	28
5.5 Análise Térmica	29
5.5.1 Análise termogravimétrica (TG).....	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1 Análise Reométrica	30

6.2 <i>Análise Morfológica e Estrutural</i>	31
6.2.1 <i>Análise da densidade de ligações cruzadas pelo método do inchamento em solvente orgânico (Flory-Rehner)</i>	31
6.2.2 <i>Análise da densidade de ligações cruzadas pelo método de Mooney-Rivlin</i>	31
6.2.3 <i>Análise da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier</i>	33
6.2.4 <i>Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	34
6.3 <i>Análises Mecânicas</i>	37
6.3.1 <i>Análise da resistência à tração</i>	37
6.3.2 <i>Análise da resistência ao rasgo</i>	38
6.3.3 <i>Análise da dureza e resistência à abrasão dos compósitos</i>	39
6.4 <i>Análise das interações entre a carga e a matriz polimérica utilizando a Equação de Lorenz-Parks</i>	40
6.5 <i>Análise Térmica</i>	42
6.5.1 <i>Análise termogravimétrica (TG) dos compósitos</i>	42
7. APLICAÇÃO DO COMPÓSITO	44
8. CONCLUSÃO	45
9. PRÓXIMAS ETAPAS	47
10. ATIVIDADES EXERCIDAS DURANTE A FASE DE EXECUÇÃO DO PÓS-DOUTORADO	48
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

O Relatório Mundial sobre Visão da Organização Mundial da Saúde (OMS), publicado em 2019, revela dados alarmantes: estima-se que pelo menos 2,2 bilhões de pessoas no mundo apresentem algum tipo de comprometimento da visão ou cegueira. Dentre esses, pelo menos 1 bilhão possui um problema que poderia ter sido prevenido ou ainda não foi tratado [1]. A miopia, popularmente conhecida como "vista curta", tem apresentado um crescimento significativo, principalmente entre a população mais jovem. Essa prevalência crescente está diretamente relacionada ao tempo excessivo que crianças e jovens passam em frente a dispositivos digitais. Em contraposição, o envelhecimento da população impulsiona a demanda por lentes monofocais para correção da presbiopia, uma condição ocular relacionada à idade. Fatores como estilo de vida e moda também influenciam a escolha e consumo de lentes oftálmicas, evidenciando a necessidade de soluções personalizadas que atendam às necessidades específicas de cada indivíduo [2].

Acompanhando o ritmo acelerado da demanda, o mercado de lentes oftálmicas deve apresentar um crescimento anual composto (CAGR) de 4,85% entre 2022 e 2027. Em termos monetários, isso equivale a um aumento de US\$ 14,3 bilhões no tamanho do mercado de lentes [3]. Ao abordar esse crescimento, é fundamental considerar as implicações ambientais do aumento da produção. O aumento da demanda por lentes resultará em um aumento proporcional nos resíduos gerados, que podem causar impactos ambientais negativos se não forem gerenciados adequadamente. Os materiais utilizados na produção de lentes oftálmicas, como vidro, plástico e acrílico, têm um tempo de decomposição longo, podendo poluir aterros sanitários e oceanos [4].

Na fabricação de lentes de grau, há uma predominância de materiais orgânicos, como plástico, em vez de vidro, devido a questões de segurança, peso e estética [5]. Entre os

polímeros mais comuns estão o CR-39TM, o policarbonato e os poliuretanos de médio/alto índice de refração, cada um com suas características específicas, como resistência ao impacto, leveza e bloqueio dos raios UV. O processo de fabricação das lentes oftálmicas envolve quatro fases principais: moldagem, surfaçagem, polimento e verificação. Na fase de moldagem, são produzidos blocos de material que servirão como matéria-prima para as lentes, geralmente feitos por empresas distintas das que finalizam a fabricação das lentes. Na fase de surfaçagem, o bloco de material é moldado para adquirir a curvatura necessária, gerando resíduos de plástico como as aparas e águas residuais. Esse processo pode ser convencional, utilizando blocos semiacabados, ou de última geração ("Free-Form"), que trabalha com blocos sem forma definitiva em nenhuma das faces. Na fase de polimento, as lentes são aperfeiçoadas e polidas, e na fase de verificação são conferidas quanto à graduação, espessura e qualidade. Após a fabricação, as lentes podem receber tratamentos superficiais, como camadas hidrofóbicas e antirreflexo [6].

Para mitigar esses impactos, é necessário implementar medidas para reduzir, reutilizar e reciclar resíduos de lentes oculares. Algumas iniciativas que podem ser tomadas: Perez et al. [7] e Pillay et al. [8], destacam que plásticos são o material padrão para todos os tipos de lentes e óculos nessa indústria. Contudo, durante a fabricação de lentes de prescrição, até 90% do material termofixo é desperdiçado e não pode ser reciclado. Para melhorar o balanço energético total e reduzir o impacto ambiental, várias medidas foram propostas. Estas incluem a redução do tempo total do processo, o aumento da eficiência de resistência a arranhões, a melhoria dos sistemas de revestimento a vácuo e o uso de dados gerados pelo processo, bem como a reciclagem de resíduos de material de evaporação. Argumenta-se que todas essas medidas podem ajudar a reduzir a energia necessária, assim como a pegada de carbono, os resíduos e os custos associados à fabricação de lentes e óculos oftálmicos.

A abordagem proposta por Encarnação et al. [9], envolve a integração de materiais de resíduos sólidos de lentes oftálmicas em matrizes poliméricas e de cimento, além da utilização do efluente para o cultivo de microalgas. Essa estratégia inovadora tem como foco a geração de biomassa e a valorização econômica dos resíduos. Por meio da adoção de um modelo de economia circular, o objetivo é transformar os poluentes ambientais presentes no efluente em produtos orgânicos valiosos.

Batista et al. [10], pesquisaram sobre a viabilidade de criar compósitos utilizando pós de bambu e resíduos de lentes oftálmicas, juntamente com resina de poliéster. Esses materiais são frequentemente descartados em grandes quantidades e têm potencial para serem reaproveitados de forma ecologicamente sustentável. Foram realizados testes para determinar as proporções ideais de cada material na composição dos compósitos, visando garantir boa processabilidade e características mecânicas adequadas. Os resultados indicaram que os compósitos produzidos apresentaram uma diminuição na resistência mecânica em relação à matriz de resina, mas mostraram um aumento significativo na resistência ao impacto. Como aplicação prática, foram fabricadas mesas e bancadas utilizando o compósito mais viável economicamente e ecologicamente, composto por 40% de resíduos de lentes oftálmicas.

Diante do exposto, é evidente que os estudos estão direcionados para a conscientização ambiental e redução do consumo de água, energia elétrica e volume de resíduos produzidos. No entanto, pouca atenção tem sido dada à destinação dos resíduos sólidos gerados durante a fabricação de lentes oculares. Com o intuito de preencher essa lacuna, este trabalho tem como objetivo explorar o potencial do resíduo de lente ocular para melhorar as propriedades do compósito vulcanizado de borracha, especialmente a borracha de estireno-butadieno (SBR). Os efeitos da incorporação do resíduo de lente oftálmica nas propriedades reométricas, estruturais e morfológicas, foram analisados. Submeteu-se os compósitos de SBR/Resíduo de

lente sob várias condições de análises e avaliou-se a resposta mecânica, térmica e o grau de reforço entre a carga e a matriz elastomérica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos, a preocupação com a sustentabilidade e a gestão de resíduos tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais que incorporem resíduos em suas formulações. Entre esses materiais, os compósitos têm se destacado devido à sua capacidade de combinar diferentes propriedades de materiais base, resultando em produtos com desempenho superior e maior durabilidade. Nesta seção, serão abordados, de forma breve, a borracha sintética SBR (Estireno-Butadieno), os resíduos de lentes oftálmicas, os compósitos de borracha, o processo de vulcanização e o potencial de aplicações industriais.

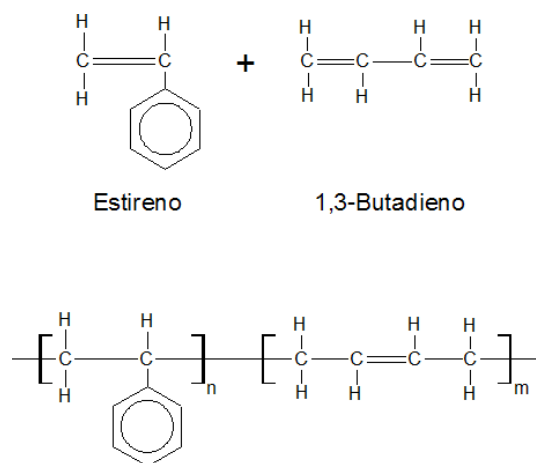
2.1 Borracha Sintética Estireno Butadieno (SBR) e suas Propriedades

A borracha SBR (Styrene-Butadiene Rubber ou BUNA-S) é um copolímero de estireno e butadieno, amplamente empregada na indústria devido às suas propriedades físicas e mecânicas excepcionais. Sua estrutura molecular é constituída predominantemente por unidades repetitivas desses dois monômeros, o que lhe confere uma combinação singular de elasticidade, resistência e durabilidade. [11]. A seguir, será descrita sua estrutura e características físicas e mecânicas:

2.1.1 Estrutura molecular

A estrutura da borracha SBR é obtida pela polimerização de estireno e butadieno. Durante esse processo, as unidades desses monômeros se alternam na cadeia, resultando em um arranjo molecular regular. Essa regularidade é responsável pela flexibilidade da borracha, permitindo que ela se estenda e retorne à sua forma original de maneira eficaz [12]. O copolímero aleatório tem características semelhantes à borracha natural (BN) e contém de 10 a 25% de teor de estireno, contribuindo para boas características de desgaste e colagem, enquanto a unidade butadieno é composta aproximadamente: 60 a 70% trans-1,4; 15 a 20% cis-1,4; e 15 a 20% 1,2 configurações para o polímero a 50 °C [13]. A Figura 1 apresenta a estrutura química de formação da borracha estireno butadieno.

Figura 1 – Estrutura química do estireno butadieno.



Fonte: [14].

Devido às características físicas e mecânicas do SBR serem muito semelhantes às da BN, ele pode substituí-la em diversas aplicações industriais [15]:

2.1.2 Características físicas

Elasticidade: A borracha SBR exibe uma alta elasticidade, o que significa que ela pode ser esticada consideravelmente sem sofrer deformações permanentes. Isso a torna ideal para aplicações que exigem materiais resilientes, como pneus e solados de sapatos.

Flexibilidade: A flexibilidade da borracha SBR permite que ela se adapte a diversas formas e superfícies, tornando-a versátil para várias aplicações industriais.

Impermeabilidade: A estrutura da borracha SBR também confere a ela propriedades impermeáveis, tornando-a resistente à água e a outros líquidos.

2.1.3 Características mecânicas

Resistência ao Desgaste: A borracha SBR possui excelente resistência ao desgaste, o que a torna uma escolha popular para a fabricação de pneus, correias transportadoras e outras aplicações que envolvem atrito constante.

Resistência à Tração: A capacidade da borracha SBR de resistir à força de tração é uma de suas características marcantes, o que a torna adequada para aplicações que exigem materiais fortes e duráveis.

Resiliência: A resiliência da borracha SBR permite que ela absorva impactos e choques, sendo fundamental em aplicações que envolvem movimentos repetitivos ou vibrações.

2.2 Resíduos de Lentes Oculares

As cargas de enchimento e de reforço são componentes adicionados a materiais como compósitos para modificar suas propriedades. Enchimentos são substâncias sólidas que aumentam o volume e reduzem custos, melhorando a consistência, a resistência ao calor e outras propriedades, sem contribuir significativamente para a resistência mecânica [16]. Já as cargas de reforço são usadas para aumentar a resistência e a durabilidade, geralmente formando ligações mais fortes com a matriz [17]. A escolha entre enchimentos e reforços, assim como suas quantidades, depende das propriedades desejadas no produto e da compatibilidade com o material base.

Os resíduos de lentes oculares podem ser utilizados como carga quando incorporados em uma matriz, como, por exemplo, uma matriz de borracha. Esses resíduos são gerados durante a etapa de lixamento e polimento em água no processo de fabricação de lentes oftálmicas [18]. Nas subseções seguintes, serão descritas a composição e classificação dos resíduos de lentes, além dos desafios e impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses resíduos.

2.2.1 Composição e classificação dos resíduos de lentes oculares

As lentes oculares podem ser feitas de diversos materiais, incluindo vidro, plástico e materiais especiais como policarbonato. A composição específica das lentes oculares pode variar dependendo do tipo de material usado na fabricação. No entanto, independentemente do material, as lentes oculares são geralmente classificadas como resíduos sólidos urbanos ou resíduos especiais, dependendo das regulamentações locais e nacionais de gerenciamento de resíduos [19].

A classificação e o gerenciamento dos resíduos de lentes oculares devem ser feitos de acordo com as leis e regulamentos locais. É importante verificar as políticas de gerenciamento de resíduos sólidos na região em que a fábrica se localiza para determinar como os resíduos de lentes oculares devem ser descartados corretamente. Isso pode envolver a separação dos resíduos para reciclagem, quando possível, ou o descarte em locais apropriados para resíduos especiais, como instalações de tratamento de resíduos perigosos [20].

2.2.2 Desafios e impactos ambientais associados ao descarte inadequado de lentes

O descarte inadequado de lentes oculares, tanto de óculos quanto de lentes de contato, pode ter vários desafios e impactos ambientais significativos, incluindo [21]:

a) Desafios Ambientais:

- **Volume Considerável de Resíduos:** Fábricas de lentes oculares produzem em grande escala, resultando em um volume considerável de resíduos, incluindo recortes, defeitos de produção e materiais não utilizados. Gerenciar esse volume de resíduos de forma adequada é um desafio significativo.
- **Produtos Químicos e Poluentes:** A produção de lentes oculares muitas vezes envolve o uso de produtos químicos, solventes e materiais plásticos que, se não forem descartados corretamente, podem contaminar o solo e a água, prejudicando o meio ambiente.
- **Consumo de Recursos Naturais:** A produção em massa de lentes oculares consome grandes quantidades de recursos naturais, como plástico, água e energia. A prática do consumo racional deve ser internalizada.

b) Impactos Ambientais:

- **Poluição do Solo e da Água:** O descarte inadequado de resíduos de fábricas de lentes oculares pode levar à contaminação do solo e da água circundante. Produtos químicos tóxicos e poluentes podem infiltrar-se no solo, prejudicando a qualidade do solo e contaminando os lençóis freáticos.
- **Emissões Atmosféricas:** Processos de produção e métodos inadequados de descarte podem resultar em emissões de poluentes atmosféricos, contribuindo para a poluição do ar local.
- **Impactos na Vida Selvagem:** A contaminação ambiental proveniente do descarte inadequado de resíduos de fábricas de lentes oculares pode afetar a vida selvagem, levando à ingestão acidental de materiais plásticos e produtos químicos por animais, prejudicando sua saúde e ecossistemas locais.
- **Desperdício de Recursos:** O descarte inadequado representa um desperdício de materiais que poderiam ser reciclados ou reutilizados, contribuindo para a exploração contínua de recursos naturais.

c) Estratégias para Mitigação:

- **Gerenciamento Responsável de Resíduos:** As fábricas devem implementar práticas de gestão de resíduos responsáveis, incluindo reciclagem, reutilização e disposição adequada de produtos químicos, para minimizar a poluição.
- **Adoção de Tecnologias Sustentáveis:** Investir em tecnologias de produção mais limpas e eficientes pode reduzir o consumo de recursos e minimizar a geração de resíduos.

- **Conformidade com Regulamentações Ambientais:** As fábricas devem cumprir rigorosamente as regulamentações ambientais locais e internacionais relacionadas ao descarte de resíduos industriais.
- **Inovação em Materiais:** Pesquisa e desenvolvimento de materiais biodegradáveis e ecologicamente corretos podem reduzir o impacto ambiental dos resíduos de lentes oculares.
- **Conscientização e Educação:** Sensibilizar os funcionários, clientes e a comunidade local sobre a importância do descarte adequado e das práticas de produção sustentável pode promover uma mudança de comportamento.

2.3 Compósitos de Borracha SBR Reforçados com Resíduo de Lente Ocular

Atualmente, não há informações específicas disponíveis sobre compósitos de borracha SBR (borracha de estireno-butadieno) reforçados com resíduos de lente ocular [19].

Em geral, compósitos de borracha são materiais compostos feitos combinando uma matriz de borracha com materiais de reforço, como fibras, partículas ou pós, para melhorar suas propriedades mecânicas, térmicas ou elétricas [22]. O processo de desenvolvimento de tais compósitos envolveria várias etapas, incluindo a coleta e preparação dos resíduos de lente ocular, a modificação química, se necessária, para garantir uma boa aderência à matriz de borracha, e a incorporação dos resíduos no material compósito. Testes laboratoriais e análises seriam realizados para avaliar as propriedades mecânicas, térmicas, de resistência ao desgaste, entre outras, do compósito resultante.

É importante destacar que a pesquisa nesse campo está relacionada à busca por soluções sustentáveis para o gerenciamento de resíduos, visando a reutilização eficaz de materiais descartados. Tal abordagem pode trazer benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

2.4 Processo de Vulcanização dos Compósitos de Borracha

A borracha, um material polimérico com características elásticas, é amplamente empregada em muitas aplicações devido às suas propriedades mecânicas únicas. No entanto, ela apresenta limitações como baixa resistência ao envelhecimento e aos produtos químicos, além de alta aderência, o que restringe seu uso em determinadas áreas. Para superar essas limitações, foi introduzido o processo de vulcanização, uma descoberta de Charles Goodyear no século XIX [23].

A vulcanização é um processo crucial no tratamento da borracha, que envolve a adição de compostos de enxofre à borracha natural ou sintética e a aplicação de calor. Esse procedimento resulta em um material mais rígido e menos pegajoso. Durante a vulcanização, ocorrem ligações cruzadas entre as moléculas de borracha, formando uma rede tridimensional que melhora significativamente a resistência mecânica, a durabilidade e a resistência química e à abrasão [24].

O processo de vulcanização começa com a mistura da borracha com compostos de enxofre e aceleradores, como sulfenamidas, tiurames e ditiocarbamatos. Depois, essa mistura é aquecida a altas temperaturas, geralmente acima de 140 °C, em um processo denominado cura. A cura é uma reação exotérmica entre o enxofre e as cadeias de polímeros da borracha, durante a qual se formam ligações cruzadas entre as moléculas, criando a rede tridimensional. A vulcanização distingue-se do simples processo de cura pela utilização do enxofre como agente de reticulação [25].

O tempo e a temperatura de cura dependem da natureza dos compostos usados e da aplicação final do produto de borracha. A taxa de cura pode ser ajustada pela quantidade e tipo de aceleradores utilizados, que aumentam a eficiência da cura, reduzindo o tempo e a temperatura necessários para a vulcanização. No entanto, o uso excessivo de aceleradores pode

resultar em uma vulcanização acelerada demais, causando a quebra prematura do produto de borracha [26].

Atualmente, o processo de vulcanização inclui a adição de diversos reagentes químicos à borracha. Essa combinação de substâncias, conhecida como formulação ou composição da borracha, é cuidadosamente projetada para conferir propriedades específicas, facilitar o processamento e melhorar o desempenho do material final [27].

2.5 Potencial de Aplicações Industriais

O desenvolvimento de compósitos de borracha SBR (borracha de estireno-butadieno) reforçados com resíduos de lente ocular poderia ter várias aplicações industriais potenciais, aproveitando as propriedades específicas desses materiais. Algumas das possíveis aplicações incluem:

1. **Componentes Automotivos:** Os compósitos de borracha SBR reforçados poderiam ser usados em peças automotivas, como juntas de vedação, amortecedores, mangueiras e revestimentos, devido às propriedades de absorção de choque e resistência ao desgaste.
2. **Pisos e Revestimentos:** Esses compósitos poderiam ser utilizados na fabricação de pisos industriais, tapetes antiderrapantes e revestimentos para áreas de alto tráfego devido à sua durabilidade, resistência ao desgaste e propriedades antiderrapantes.
3. **Peças de Equipamentos Esportivos:** Equipamentos esportivos, como solados de sapatos esportivos e bolas, poderiam se beneficiar das propriedades de amortecimento e resistência ao impacto dos compósitos de borracha reforçados.
4. **Isolamento Acústico e Vibracional:** Devido à capacidade de absorção de vibrações e som, esses compósitos poderiam ser usados em aplicações de isolamento acústico e vibracional em indústrias de construção e transporte.

5. **Peças de Máquinas e Equipamentos Industriais:** Componentes de máquinas e equipamentos industriais, como mangueiras, correias transportadoras e peças de vedação, poderiam ser fabricados com esses compósitos devido à sua resistência e durabilidade.
6. **Produtos de Consumo:** Além de aplicações industriais, esses compósitos poderiam ser usados na fabricação de produtos de consumo, como solados de sapatos, tapetes de yoga, capas de celulares resistentes a impactos, entre outros.
7. **Produtos de Engenharia:** Em aplicações de engenharia civil, os compósitos de borracha SBR reforçados poderiam ser usados para criar materiais de construção mais sustentáveis e duráveis, como elementos de amortecimento em pontes e estruturas.
8. **Materiais de Embalagem Específicos:** Em algumas aplicações específicas de embalagens industriais, onde a resistência ao impacto e a flexibilidade são cruciais, esses compósitos poderiam ser utilizados.

É importante mencionar que a viabilidade e a aceitação dessas aplicações dependerão de testes rigorosos para garantir que os compósitos atendam aos padrões de qualidade, segurança e desempenho necessários para cada aplicação específica. Além disso, considerações ambientais, como a capacidade de biodegradação ou reciclagem dos compósitos, também podem influenciar suas aplicações industriais.

3. OBJETIVOS

O objetivo principal deste projeto é desenvolver um compósito polimérico, reaproveitando o resíduo de lente ocular com a borracha de estireno butadieno, visando inovação tecnológica em aplicações nas quais o compósito seja economicamente viável e além de um direcionamento seguro e ambientalmente correto.

3.1 *Objetivos Específicos:*

- Determinar a proporção ideal de resíduo de lente ocular na formulação do compósito de borracha, buscando otimizar suas propriedades;
- Investigar os processos de reologia dos compósitos, analisando os parâmetros reométricos, como: torque mínimo e máximo, tempo de pré-cura e tempo ótimo de cura;
- Avaliar as densidades de ligações cruzadas por inchamento em solvente orgânico, bem como o reforço proporcionado pela interação entre a matriz de borracha e a carga de resíduo de lente;
- Caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos por meio de ensaios mecânicos, incluindo análise da tensão *versus* deformação, resistência à abrasão e dureza, a fim de verificar a viabilidade de uso em diferentes aplicações;
- Estudar a morfologia dos compósitos, bem como a interação e a interface entre os constituintes, por meio de técnicas de análise como FTIR (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier) e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura), a fim de compreender a estrutura e a distribuição das fases no material.
- Avaliar a estabilidade térmica por meio do ensaio termogravimétrico (TG).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os materiais e a metodologia de caracterização dos compósitos.

4.1 Resíduo de Lente Ocular

O resíduo de lente ocular (RLO) foi coletado na fábrica Perego Indústria e Comércio de Lentes LTDA, localizada no município de Araçatuba, São Paulo. Nesta empresa, são geradas, em média, três toneladas mensais de resíduos de lentes, os quais são destinados a outra empresa privada responsável pelo descarte em aterro sanitário. Após a coleta, os resíduos foram levados a uma estufa para secagem a uma temperatura de 100 °C durante 24 horas, visando a retirada da umidade. Em seguida, foi realizada a separação por granulometria para a obtenção de partículas com diâmetros superiores a 200 mesh. A Figura 2 mostra as imagens do tanque de decantação, do filtro prensa e do resíduo após prensagem.

Figura 2 – Tanque de decantação (esquerda), filtro-prensa (centro) e resíduo de lente ocular (direita).



Fonte: Autoria própria.

4.2 Matriz Polimérica

A aquisição da borracha sintética do tipo estireno butadieno (SBR 1502) com uma viscosidade Mooney superior a 49,0 (medida a 100 °C) e um teor de estireno ligado de 23,5%

foi adquirida junto à empresa DLP Indústria e Comércio de Borracha e Artefatos LTDA, localizada em Poloni, São Paulo. A Figura 3 mostra a imagem da borracha sintética utilizada na produção dos compósitos.

Figura 3 – Borracha do tipo estireno butadieno (SBR 1502).



Fonte: Autoria própria.

4.3 Método de Preparação dos Compósitos

Os compósitos utilizados neste estudo foram preparados em duas fases. Na primeira fase, a borracha sintética foi plastificada em um misturador aberto de cilindros da marca Veiga Sul, a uma temperatura de 45 °C e uma relação de fricção de 1:1,25. Em seguida, os agentes de ativação e processamento (óxido de zinco, ácido esteárico, polietileno glicol, agente de acoplamento Chartwell e óleo naftênico) foram adicionados juntamente com a carga (RLO) nas quantidades previamente definidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Formulações para os compósitos de SBR/RLO.

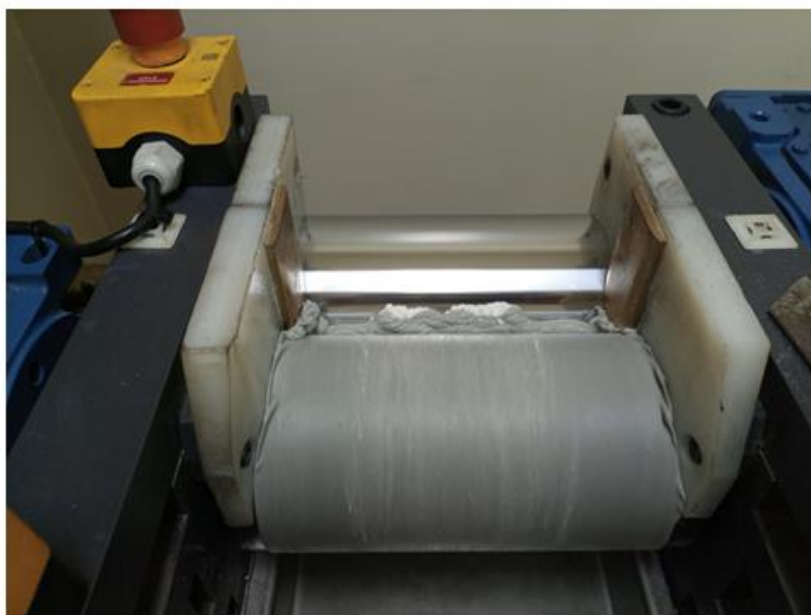
Componentes da formulação	Quantidades dos componentes em phr					
	SBR/RLO ₀	SBR/RLO ₁₀	SBR/RLO ₂₀	SBR/RLO ₃₀	SBR/RLO ₄₀	SBR/RLO ₅₀
SBR 1502	100	100	100	100	100	100
Óxido de zinco	5	5	5	5	5	5
Ácido esteárico	3	3	3	3	3	3
PEG 4000	2	2	2	2	2	2
Chartwell	2	2	2	2	2	2
Óleo naftênico	10	10	10	10	10	10
Carga RLO	0	10	20	30	40	50
Enxofre	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
MBTS	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
TMTD	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Total	125	135	145	155	165	175

Fonte: Autoria própria.

A quantidade de resíduo de lentes oftálmicas (RLO) nas amostras foi testada com 0, 10, 20, 30, 40 e 50 phr (per hundred rubber), acima de 50 phr torna-se difícil a incorporação do resíduo na matriz polimérica. A unidade de medida phr (do inglês, "partes por cem borrachas") é utilizada na formulação de compósitos de borracha e indica a quantidade de um aditivo ou componente específico em relação a cada cem partes de borracha.

Na segunda fase, após 24 horas de descanso do composto, o agente de vulcanização (enxofre) e os aceleradores de vulcanização (dissulfeto de benzotiazol/MBTS e dissulfeto de tetrametiltiuram/TMTD) foram adicionados, seguindo a norma ASTM D3182-21a [28]. A Figura 4 mostra a imagem do misturador aberto de cilindros utilizado no preparo e mistura dos componentes da formulação.

Figura 4 – Misturador aberto de cilindros.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, as amostras foram submetidas aos ensaios reométricos utilizando a norma técnica ASTM D2084-19a [29] para a determinação do tempo ótimo de vulcanização (t_{90}), torque máximo (M_H) e torque mínimo (M_L). E com os resultados dos parâmetros reométricos,

os compostos, foram termo prensados. A moldagem dos compostos foi realizada por compressão em prensa hidráulica na temperatura de 160 °C e sob pressão de 2 MPa para confecção de corpos de provas. A Figura 5 mostra as imagens do reômetro e da termo prensa hidráulica utilizado nos ensaios dos compostos.

Figura 5 – Reômetro de disco oscilatório (esquerda) e Termo prensa hidráulica (direita).



Fonte: Autoria própria.

5. TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Nesta seção, serão descritas as metodologias (reometria, análise morfológica e estrutural, análises mecânicas, análises de reforço e análise térmica) utilizadas para analisar as propriedades dos compósitos de SBR/RLO reticulados com enxofre.

5.1 Comportamento Reológico

Este ensaio é utilizado para determinar as características de vulcanização dos compostos de borracha e pode ser empregada no processo de controle de qualidade, na pesquisa e desenvolvimento de novos compostos. A partir desta técnica, são obtidas informações como tempo ótimo de vulcanização (t_{90}), tempo de pré-vulcanização (t_{s1}), torques máximo e mínimo (M_H e M_L) aplicados em cada amostra. Os ensaios foram realizados em um reômetro de disco oscilatório da marca Team Equipamentos, fabricada no Brasil, e as propriedades viscoelásticas dos compostos vulcanizados com enxofre foram analisadas a 160 °C e arco de 1°.

5.2 Análise Morfológica e Estrutural

Nesta seção, serão abordadas as técnicas e normas aplicadas nos ensaios de determinação de densidade de ligação cruzada por inchamento, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier e microscopia eletrônica de varredura.

5.2.1 Determinação da densidade de ligações cruzadas por inchamento em solvente orgânico

O procedimento de análise de inchamento envolve a imersão de uma amostra em um solvente orgânico, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma técnica ASTM D3616 [30]. Devido à interação molecular entre o SBR e o solvente orgânico, a densidade de ligações cruzadas é calculada utilizando a equação de Flory-Rehner.

As amostras, com uma massa aproximada de $0,25 \pm 0,05$ g, foram submersas em tolueno e, após um período de 5 dias, foram removidas, secas para eliminar o excesso de

solvente e, por fim, pesadas. As amostras passaram por um processo de secagem adicional em uma estufa a 60 °C por 24 horas. Após a secagem, foram pesadas novamente. Esses valores, juntamente com os registros da massa da amostra seca, massa da amostra após o inchamento e massa do solvente retido na amostra, foram utilizados para o cálculo do valor de V_B . Dessa forma, a densidade de ligações cruzadas foi determinada por meio da aplicação da equação desenvolvida por Flory-Rehner [31], conforme a Equação (1):

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

Onde ν é a densidade de ligações cruzadas (mol cm^{-3}); χ parâmetro de interação polímero-solvente (ou parâmetro de Flory); ρ_B densidade da borracha; V_0 volume molar do solvente e V_B : fração de volume de borracha da forma inchada, determinada a partir do aumento de peso pelo inchamento.

5.2.2 Determinação da densidade de ligações cruzadas pela metodologia de Mooney-Rivlin

As densidades de ligações cruzadas também foram estimadas pelo método de Mooney-Rivlin [32] com base nos ensaios de resistência à tração. A Equação semiempírica (2) foi utilizada para plotar o gráfico, na região linear, e obter os parâmetros de rede [33].

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

Onde F é a força requerida no material vulcanizado; A_0 é a área da seção transversal (mm^2); λ é a taxa de extensão ($1 + \varepsilon$) onde ε 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.

A constante do material C_1 pode ser utilizada para calcular as densidades de ligações cruzadas por meio da Equação (3) [34]:

$$\eta = \frac{C_1}{RT} \quad (3)$$

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

5.2.3 Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

A técnica de espectroscopia FT-IR modo ATR foi realizada em um equipamento da marca Bruker modelo Invenio, fabricada na Alemanha, na região entre 4000 e 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 scans.

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A investigação da superfície dos compósitos e a região de fratura será realizada em um microscópio eletrônico de varredura da marca Carls Zeiss modelo EVO LS15, fabricado na Alemanha, utilizando um detector de elétrons secundários em alto vácuo e temperatura constante com voltagem de 20 kV. As amostras foram fixadas com fita condutora dupla face de carbono no porta-amostra (stub). Na sequência, a amostra foi metalizada com uma fina camada de ouro utilizando o Sputtering da marca Quorum modelo Q 150R ES.

5.3 Análises Mecânicas

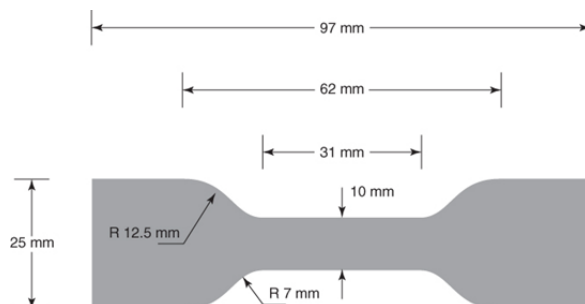
Nesta seção serão abordadas os ensaios e normas de resistência à tração, resistência ao rasgo, resistência à abrasão e dureza.

5.3.1 Ensaio de resistência à tração

Os ensaios de tensão vs. deformação foram realizados na máquina universal de ensaios da marca Biopdi, fabricada no Brasil, a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ com célula de carga de 5 kN e um transdutor de deformação interno, conforme norma ASTM D412-16 [35]. Nesse ensaio, foi

realizado quintuplicatas de corpos de provas tipo A (corpos de provas de seção reta e haltere), conforme apresentados na Figura 6.

Figura 6 - Modelo gravata tipo A para ensaios de tensão x deformação.

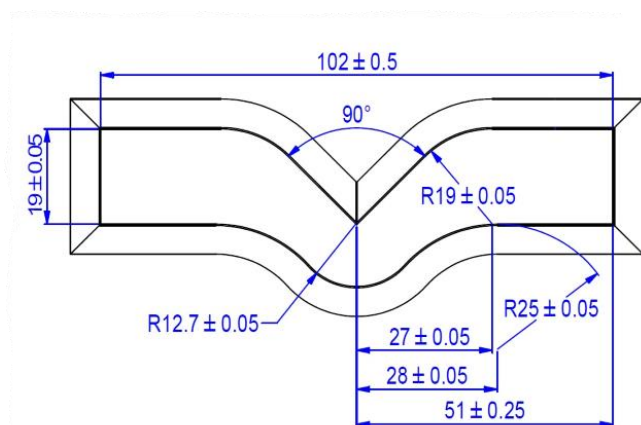


Fonte: [36].

5.3.2 Ensaio de resistência ao rasgo

Os ensaios resistência ao rasgo foram realizados na máquina universal de ensaios da marca Bopdi, fabricada no Brasil, a $500 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ com célula de carga de 5 kN e um transdutor de deformação interno, conforme norma ASTM D624-00 [37]. Nesses ensaios, utilizaram-se quintuplicatas de corpos de provas tipo C (corpos de provas com ângulo reto), conforme Figura 7.

Figura 7 - Cortador em forma de haltere tipo C.



Fonte: Kind Snail, 2021.

5.3.3 Ensaio de resistência à abrasão

Os ensaios de resistência à abrasão foram realizados, segundo a norma ASTM D5963 [38], em um abrasímetro da marca Maqtest, fabricada no Brasil, de rolo de rotação constante

com frequência 40 ciclos por minuto. O cilindro tem diâmetro de 150 mm com curso de abrasão de 40 m, o deslocamento lateral do corpo de prova por uma volta do cilindro é 4,2 mm, e a força aplicada pelo corpo de prova sobre o cilindro é de 5,0 N. A inclinação em relação à vertical do centro do eixo do suporte do corpo de prova é de 3°.

5.3.4 Dureza do compósito

A determinação da dureza foi realizada utilizando um durômetro analógico da marca Digimess, fabricado na China. O ensaio foi conduzido na escala Shore A, com capacidade de 0 a 100 e uma graduação de 1 Shore A, de acordo com a norma ASTM D2240-15 [39]. Este método consiste em forçar um penetrador sobre o corpo de prova resultando em um valor que é menor quanto maior for a profundidade alcançada. A escala Shore A possui relação com o módulo elástico do material. Quanto maior for o valor resultante, maior será a dureza e, portanto, a rigidez do material.

5.4 Análise das Interações entre a Carga e a Matriz Polimérica utilizando a Equação de Lorenz-Parks

A interação entre o pó de resíduo de poliuretano e a blenda de borrachas foi determinada pelo método desenvolvido por Lorenz-Parks [40] e os parâmetros obtidos dos ensaios de inchamento em solvente utilizado a Equação (5) [41]:

$$\frac{Q_f}{Q_g} = ae^{-z} + b \quad (5)$$

Onde Q é o peso de tolueno absorvido por grama de borracha, os subscritos f 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 as constantes. O valor de Q é calculado usando a Equação (6):

$$Q = \frac{w_s - w_d}{w_r \times 100 / w_F} \quad (6)$$

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.

5.5 *Análise Térmica*

Nesta seção será descrita a análise térmica utilizada neste trabalho.

5.5.1 *Análise termogravimétrica (TG)*

As análises termogravimétricas em compostos vulcanizados foram utilizadas para determinar a estabilidade térmica (resistência do material à degradação térmica) e sua composição. As TGs foram conduzidas utilizando um equipamento da marca Netzsch, modelo 209, fabricado na Alemanha. O ensaio abrangeu uma faixa de temperatura ambiente, variando aproximadamente de 25 °C a 900 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹, em uma atmosfera de nitrogênio com um fluxo de 15 mL min⁻¹. A quantidade de massa empregada para as medidas foi de cerca de 10 mg, conforme estabelecido pela norma ASTM D6370-99 [42].

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise Reométrica

A Tabela 2 apresenta os valores dos resultados dos parâmetros reométricos. O incremento na quantidade de carga ocasionou um aumento progressivo nos valores dos torques mínimos, os quais, por sua vez, estão relacionados à viscosidade do material. Com o decorrer do processo e fornecimento de calor, ocorrem a formação de ligações cruzadas, o que contribui para o aumento do torque máximo. A variação de torque está relacionada com a formação de ligações cruzadas e a presença de cargas. Considerando o erro estatístico, nota-se que a variação de torque permanece praticamente constante, mesmo com a adição de cargas. A mesma observação ocorre em relação ao tempo de pré-cura e ao tempo ótimo de cura, quando comparados ao compósito de referência (0 phr). Vale ressaltar que o tempo de pré-cura, também conhecido como tempo de scorch, refere-se ao intervalo de tempo durante o qual a borracha é exposta a uma temperatura elevada antes de ser submetida à temperatura de vulcanização completa. E o tempo ótimo de cura (t_{90}) é o intervalo de tempo no qual 90% das ligações químicas entre as moléculas de borracha são formadas de maneira eficiente. Assim pode-se inferir que a carga não altera no tempo de vulcanização e na processabilidade do compósito.

Tabela 2 – Parâmetros reométricos dos compósitos vulcanizados.

Compósitos SBR/RLO	M_L (dNm)	M_H (dNm)	$\Delta M = (M_H - M_L)$ (dNm)	t_s (min)	t_{90} (min)
0 phr	$5,34 \pm 0,11$	$27,62 \pm 1,94$	$22,29 \pm 1,87$	$1,94 \pm 0,03$	$3,83 \pm 0,16$
10 phr	$5,71 \pm 0,07$	$28,36 \pm 0,76$	$22,65 \pm 0,81$	$1,85 \pm 0,01$	$3,88 \pm 0,39$
20 phr	$6,27 \pm 0,07$	$29,40 \pm 0,96$	$23,13 \pm 1,00$	$1,82 \pm 0,01$	$3,80 \pm 0,35$
30 phr	$6,51 \pm 0,08$	$29,69 \pm 0,96$	$23,18 \pm 0,99$	$1,79 \pm 0,02$	$3,74 \pm 0,22$
40 phr	$6,89 \pm 0,00$	$29,63 \pm 0,59$	$22,74 \pm 0,59$	$1,93 \pm 0,03$	$4,26 \pm 0,33$
50 phr	$7,26 \pm 0,11$	$31,24 \pm 0,85$	$23,98 \pm 0,91$	$1,84 \pm 0,03$	$3,88 \pm 0,40$

Fonte: Autoria própria.

6.2 Análise Morfológica e Estrutural

6.2.1 Análise da densidade de ligações cruzadas pelo método do inchamento em solvente orgânico (Flory-Rehner)

A formação das reticulações desempenham um papel crucial na avaliação global da borracha, e a análise das densidades de ligações cruzadas fornece “insights” significativos que podem ser aplicados para aprimorar as características mecânicas e térmicas dos compósitos [43]. A estimativa das densidades de ligações cruzadas, usando um solvente orgânico até a saturação, por meio da equação derivada por Flory-Rehner, produz resultados satisfatórios [44]. Na Tabela 3, são fornecidos os valores das densidades de ligações cruzadas conforme a abordagem de Flory-Rehner. É observado um aumento progressivo nas densidades de reticulações dos compósitos com a incorporação da carga. Esse resultado confirma a eficaz interação entre a carga e a matriz polimérica. No entanto, essa abordagem não consegue diferenciar uma ligação cruzada entre duas cadeias moleculares do isopreno da borracha de uma partícula da carga, uma vez que a carga funciona como uma barreira à penetração do solvente na estrutura da cadeia polimérica, levando a um aumento no valor calculado das densidades de ligações cruzadas.

Tabela 3 - Densidade de ligações cruzadas por inchamento – método de Flory-Rehner.

Compósitos	Flory-Rehner $v \times 10^{-4} \text{ (mol cm}^{-3}\text{)}$
SBR/RLO ₀	1,31
SBR/RLO ₁₀	1,37
SBR/RLO ₂₀	1,40
SBR/RLO ₃₀	1,40
SBR/RLO ₄₀	1,43
SBR/RLO ₅₀	1,47

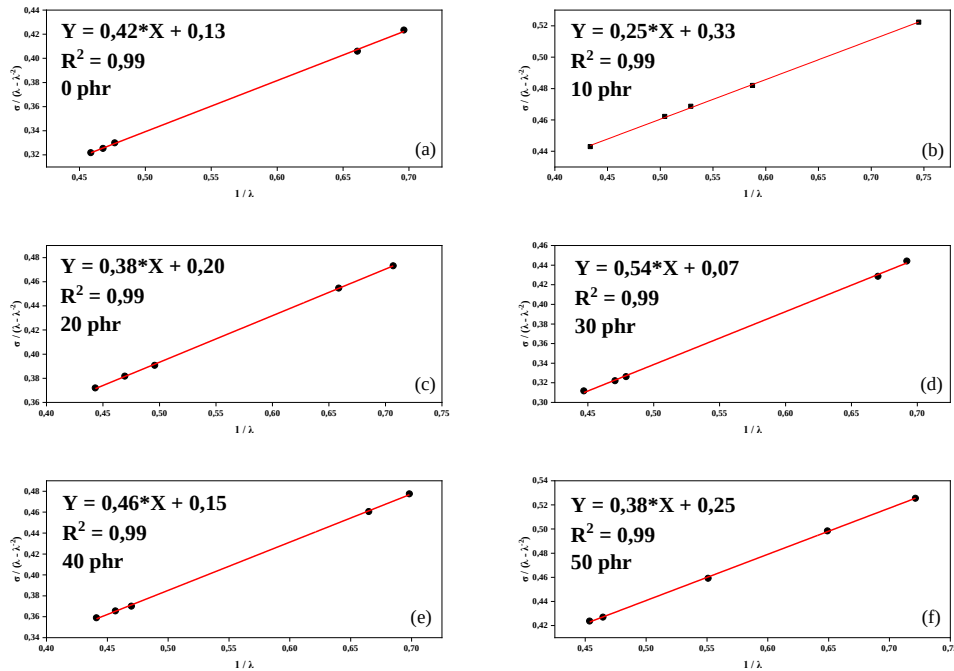
Fonte: Autoria própria.

6.2.2 Análise da densidade de ligações cruzadas pelo método de Mooney-Rivlin

A densidade de ligações cruzadas foi estabelecida empregando o método de Mooney-Rivlin, utilizando os dados derivados dos ensaios de resistência à tração dos compósitos

vulcanizados de SBR/RLO. Na Figura 8, plotou-se uma curva de regressão linear para calcular os valores das constantes C_1 e C_2 da abordagem de Mooney-Rivlin.

Figura 8 - Plotagem de $\sigma/(\lambda - \lambda^{-2})$ versus λ^{-1} dos compósitos SBR/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 apresentados na Tabela 4 mostram as densidades de ligações cruzadas, destacando-se o aumento dos valores da constante C_1 em consonância com a crescente incorporação de cargas nos compósitos. Segundo a pesquisa conduzida por Rooj et al. [45], as constantes C_1 e C_2 estão associadas à estrutura da rede e à flexibilidade das cadeias da mesma, respectivamente. O acréscimo na inclinação das curvas de Mooney-Rivlin é atribuído à reduzida elasticidade das cadeias devido à interação entre o polímero e a carga de enchimento, conforme documentado por outros pesquisadores [46,47]. Os coeficientes de Mooney-Rivlin, derivados das curvas de tensão-deformação, observado na Tabela 4, corroboram a interação entre o resíduo de lente ocular e a matriz elastomérica.

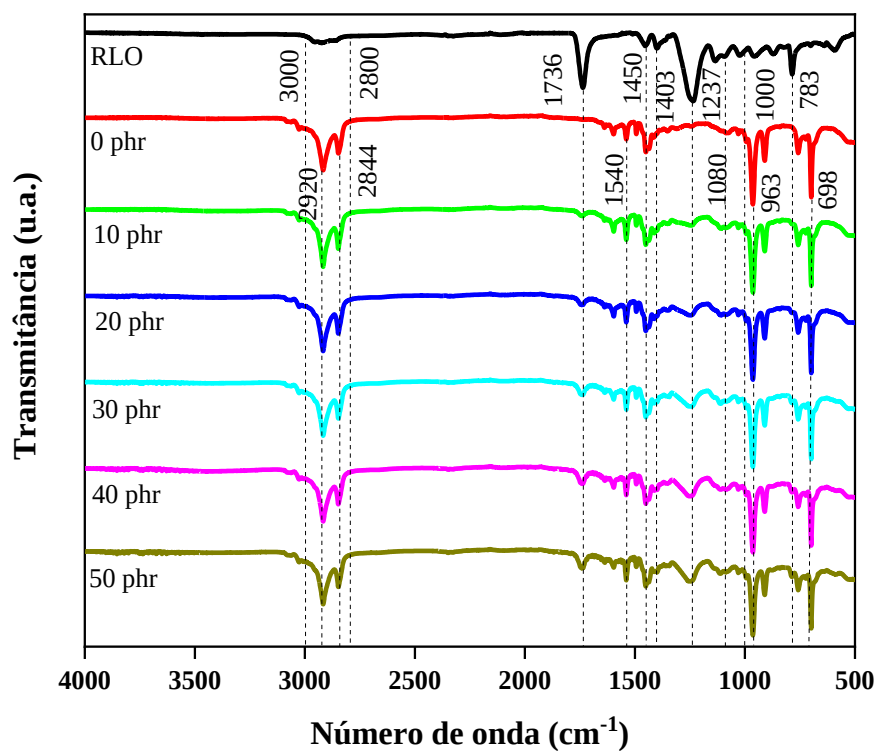
Tabela 4 - Densidade de ligações cruzadas pelo método de Mooney-Rivlin.

Compósitos	Mooney-Rivlin		
	$\eta \times 10^{-4} \text{ (mol cm}^{-3}\text{)}$	C ₁	C ₂
SBR/RLO ₀	4,44	0,26	0,85
SBR/RLO ₁₀	4,73	0,67	0,51
SBR/RLO ₂₀	4,73	0,40	0,77
SBR/RLO ₃₀	4,91	0,14	1,08
SBR/RLO ₄₀	4,97	0,31	0,92
SBR/RLO ₅₀	5,1	0,50	0,77

Fonte: Autoria própria.

6.2.3 Análise da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier

Os espectros no infravermelho obtidos por transformada de Fourier do resíduo de lente ocular e dos compósitos de borracha SBR estão apresentados na Figura 9, e seus respectivos números de onda são identificados na Tabela 5.

Figura 9 - Espectros de FTIR do resíduo de lente oftálmico e dos compósitos de SBR/RLO.*Fonte: Autoria própria.*

A análise do espectro de FTIR do resíduo de lente permite inferir que este se assemelha bastante ao espectro do polimetil metacrilato (PMMA) [48], contudo, com a presença de algumas impurezas, como a sílica, proveniente do processo de lixamento das lentes oculares, constituídas por lixas fabricadas de carvão de silício ou dióxido de silício. Após o processo de vulcanização, não são observados novos espectros derivados de reações químicas entre a carga e a matriz. Portanto, pode-se inferir que a carga está aderida ou encapsulada pela matriz.

Tabela 5 – Número de ondas dos espectros de FTIR do resíduo de lente oftálmico e compósitos de SBR/RLO.

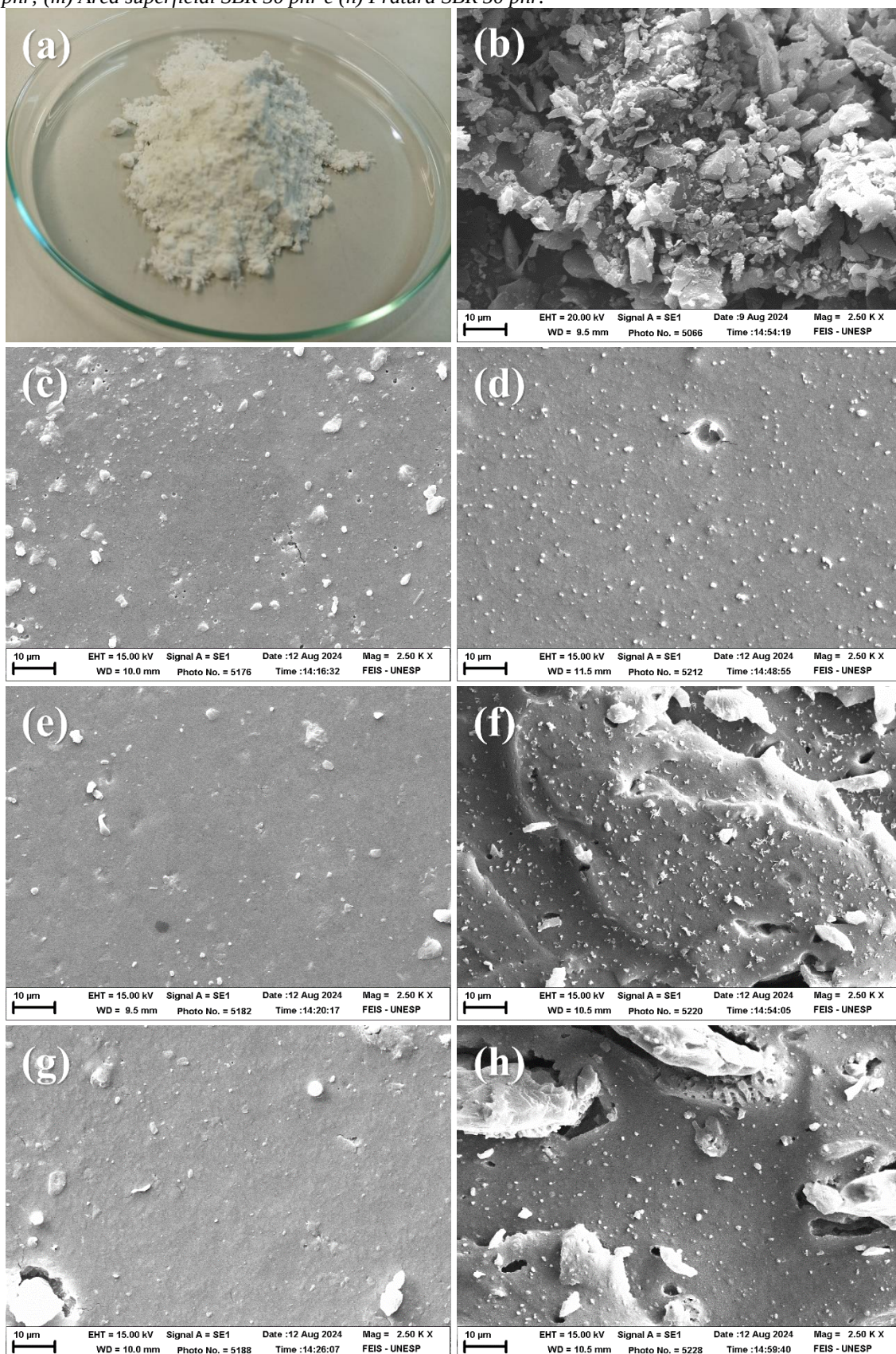
Resíduo de Lente Oftálmico (RLO)		
Núm. de onda (cm ⁻¹)	Atribuições	Referência
3000-2800	Estiramento C-H simétrico e assimétrico do PMMA	[49]
1736	Vibração do estiramento C=O do PMMA	[49]
1450	Dobramento CH ₃ do PMMA	[49]
1403	Estiramento C-H do PMMA	[49]
1237	Estiramento C-O-C do PMMA	[49]
1130	Estiramento simétrico C-H do PMMA	[50]
1080	Estiramento Si-O (impureza - processo de lixamento)	[51]
783	Dobramento C-H do PMMA	[49]
Borracha Estireno Butadieno (SBR)		
Núm. de onda (cm ⁻¹)	Atribuições	Referência
2920	Estiramento C-H do anel aromático	[52]
2844	Estiramento C-H do anel aromático	[52]
1540	Dobramento CH ₂	[52]
1450	Dobramento CH ₃	[52]
1080	Estiramento Si-O (impureza e agente de acoplamento adicionado)	[51]
963	Estiramento C-C do anel aromático	[53]
698	Estiramento C-C do anel aromático	[54]

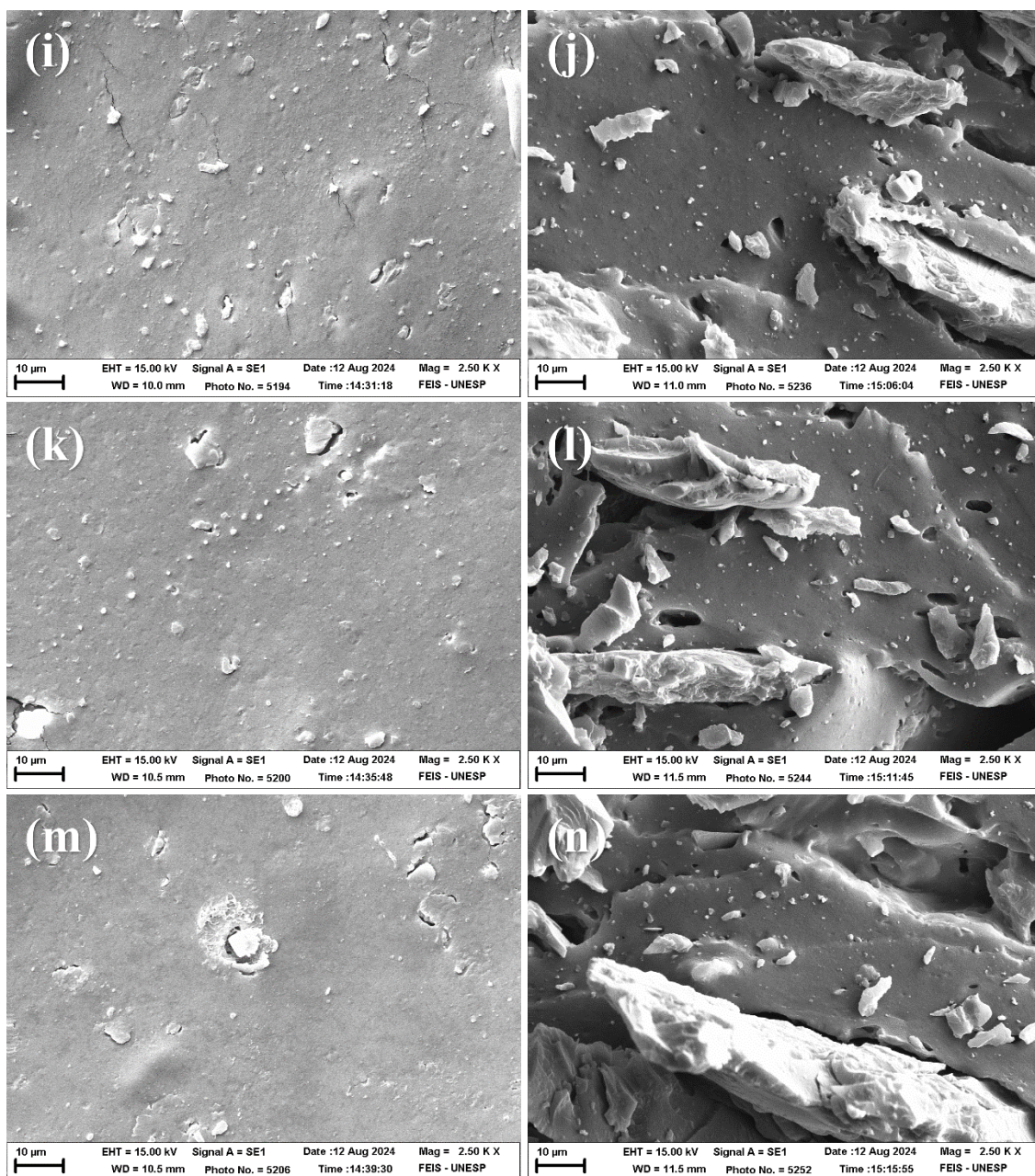
Fonte: Autoria própria.

6.2.4 Análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 10 apresenta imagens fotográfica do resíduo de lentes oftálmicas e de micrografias eletrônicas de varredura dos resíduos de lente e de seus compósitos, obtidas a partir dos corpos de prova dos ensaios de resistência à tração, nas regiões de área superficial lisa e de rompimento.

Figura 10 - a) Imagem fotográfica do resíduo de lente oftálmica; Imagens de MEVs na escala de 10 μm e com magnificação de 2,5 K $\times$: (b) do resíduo de lente oftálmica; (c) Área superficial SBR 0 phr; (d) Fratura SBR 0 phr; (e) Área superficial SBR 10 phr; (f) Fratura SBR 10 phr; (g) Área superficial SBR 20 phr; (h) Fratura SBR 20 phr; (i) Área superficial SBR 30 phr; (j) Fratura SBR 30 phr; (k) Área superficial SBR 40 phr; (l) Fratura SBR 40 phr; (m) Área superficial SBR 50 phr e (n) Fratura SBR 50 phr.





Fonte: Autoria própria.

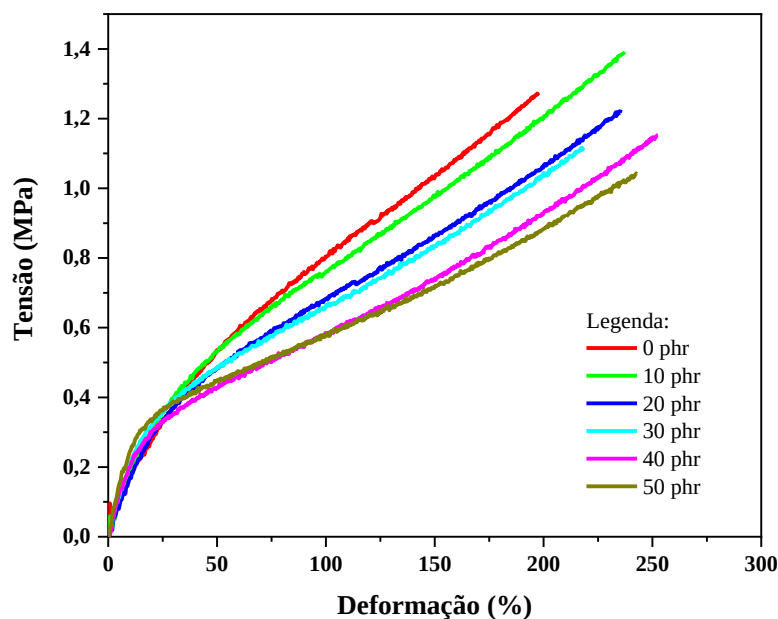
Na Figura 10 (a) é apresentada a imagem fotográfica do resíduo de lente oftálmica obtido do processo de lixamento e polimento das lentes, após secagem em estufa a 100 °C e peneiramento em malha de 200 mesh. As Figuras 10 (b-n) mostram imagens de microscopia eletrônica de varredura na escala de 10 µm e magnificação de 2,5 k ×. A Figura 10 (b) exibe a micrografia dos resíduos de lente oftálmica, na qual é possível observar partículas de diversos tamanhos e formatos, assemelhando-se a rochas terrestres de bordas lisas. As Figuras 10 (c, e, g, i, k e m) mostram as regiões de área superficial lisa dos compósitos, observa-se boa

homogeneidade dos componentes da formulação, porém a partir de 30 phr (Fig.10-i) há ocorrência de fissuras nas amostras. Na Figura 10 (d) é apresentada a imagem de MEV do compósito sem carga, na região de fratura do corpo de prova, onde se observa uma superfície lisa e homogênea, com a presença de pequenos grânulos dispersos na matriz de borracha SBR. Esses grânulos podem ser atribuídos ao agente plastificante polietileno glicol 4000, que tem a função de melhorar a flexibilidade e elasticidade do compósito. A Figura 10 (f) mostra a imagem de MEV do compósito de SBR com 10 phr de RLO, na qual é possível observar uma superfície homogênea, porém com elevações e depressões, além da presença de cargas dispersas na matriz polimérica. As Figuras 10 (h, j, l e n) referem-se aos compósitos com 20, 30, 40 e 50 phr de RLO, respectivamente. Nessas Figuras, é possível observar que as cargas estão apenas aderidas à matriz, sem pontos de ancoragem que impeçam sua extração. Além disso, a partir do compósito com 20 phr de RLO, o excesso de cargas tende a formar pontos de tensão que enfraquecem as ligações entre as cadeias poliméricas, provocando sua ruptura com maior facilidade.

6.3 Análises Mecânicas

6.3.1 Análise da resistência à tração

A Figura 11 exibe as curvas de resistência à tração, enquanto a Tabela 6 fornece os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração dos compósitos de SBR/RLO na ruptura. Observa-se que os módulos de elasticidade a 100% e 200% tendem a reduzir-se com a adição de cargas, resultando em um compósito mais rígido, conforme evidenciado pelos valores apresentados na Tabela 6 e pelo perfil das curvas exibidas na Figura 11.

Figura 11 - Curvas de resistência à tração dos compósitos de SBR/RLO.

Fonte: Autoria própria.

Em relação aos valores de tensão e deformação na ruptura, aparentemente, o aumento das cargas não exerce influência significativa nos compósitos com carga, em comparação com o compósito de referência, sugerindo que as cargas atuam mais como cargas de preenchimento do que de reforço.

Tabela 6 - Valores dos ensaios de resistência à tração na ruptura.

Compósitos	M 100% (MPa)	M 200% (MPa)	Tensão ruptura (Mpa)	Deformação ruptura (%)
SBR/RLO ₀	0,8	---	1,20 ± 0,15	184,02 ± 23,78
SBR/RLO ₁₀	0,76	1,2	1,34 ± 0,16	236,74 ± 27,76
SBR/RLO ₂₀	0,68	1,06	1,13 ± 0,13	206,72 ± 25,41
SBR/RLO ₃₀	0,66	1,04	1,08 ± 0,14	208,74 ± 18,61
SBR/RLO ₄₀	0,58	0,93	1,12 ± 0,13	232,71 ± 37,31
SBR/RLO ₅₀	0,57	0,88	0,91 ± 0,15	208,59 ± 37,45

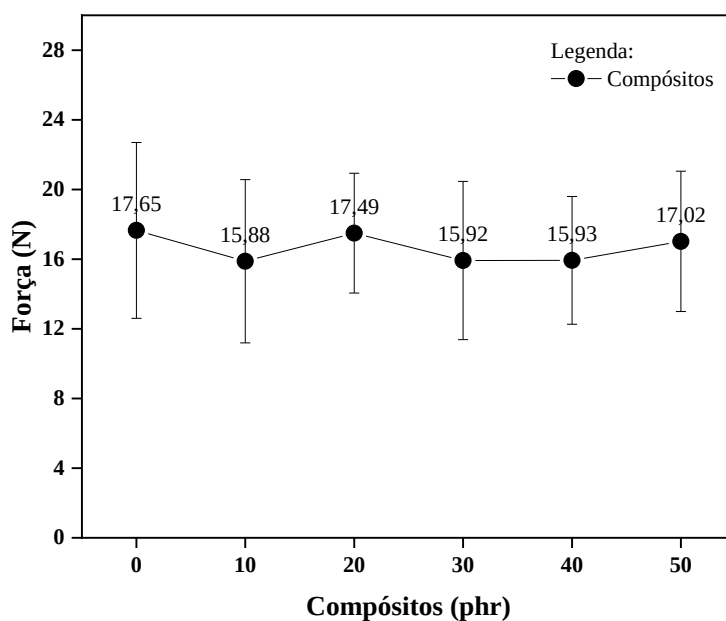
Fonte: Autoria própria.

6.3.2 Análise da resistência ao rasgo

Os resultados dos ensaios de resistência ao rasgo são exibidos na Figura 12. De maneira similar aos ensaios de resistência à tração, nota-se que o aumento das cargas não parece

influenciar a resistência ao rasgo quando comparado com o compósito de referência. Isso sugere que as cargas não funcionam como obstáculos que impedem ou reduzem a propagação ao rasgo.

Figura 12 - Curvas de resistência ao rasgo dos compósitos de SBR/RLO.

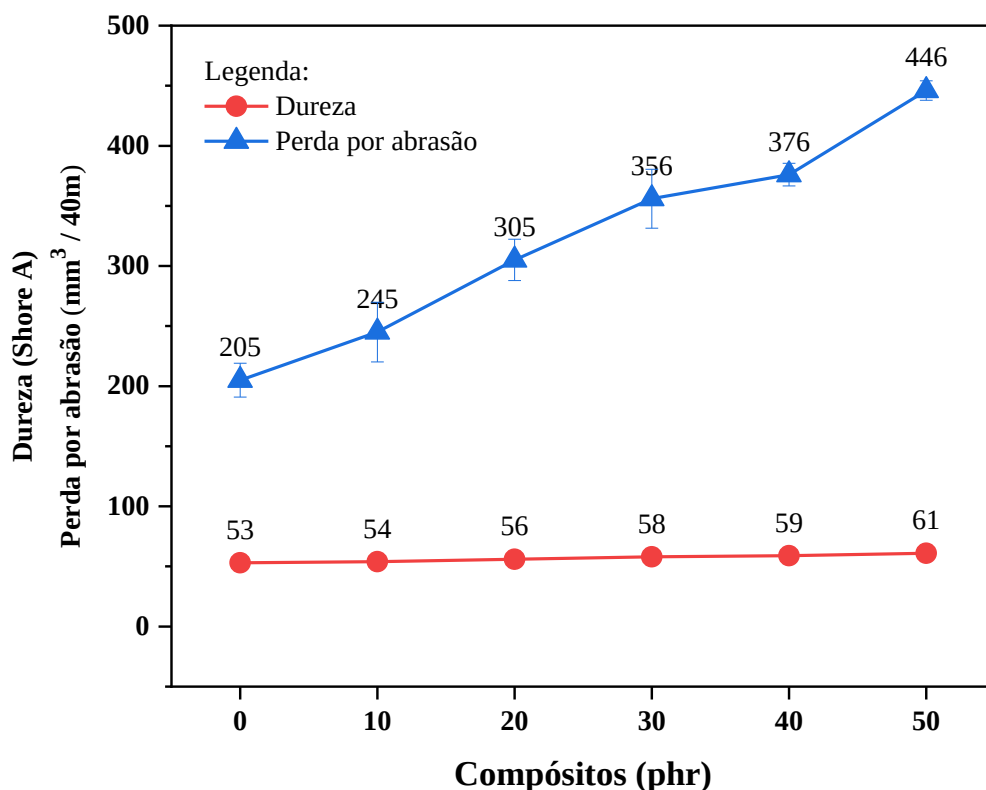


Fonte: Autoria própria.

6.3.3 Análise da dureza e resistência à abrasão dos compósitos

A Figura 13 mostra as curvas e os resultados dos ensaios de dureza na escala Shore A e perda por abrasão dos compósitos. Observa-se que os valores de dureza aumentaram gradualmente com a incorporação das cargas, uma vez que a presença destas restringe a mobilidade das cadeias moleculares da borracha, resultando no endurecimento do compósito. Por outro lado, os valores de perda por abrasão sofreram um aumento significativo com o acréscimo de carga. Esse comportamento é atribuído aos pontos de tensão na matriz que facilitam a saída de massa durante o desgaste por atrito.

Figura 13 - Curvas de dureza e perda por abrasão dos compósitos.



Fonte: Autoria própria.

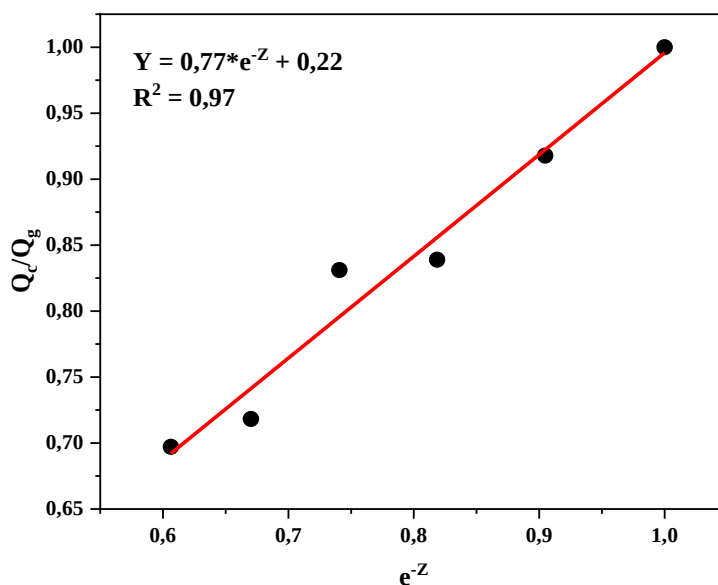
6.4 Análise das interações entre a carga e a matriz polimérica utilizando a Equação de Lorenz-Parks

A avaliação da interação interfacial entre a carga e a matriz foi realizada utilizando a equação proposta por Lorenz e Parks. Na representação gráfica apresentada na Figura 14, foram plotadas as curvas de variação de Q_c/Q_g vs e^{-z} para os compósitos SBR contendo resíduos de lente ocular, tendo como referência a goma pura (sem carga).

Os valores dos parâmetros “a” e “b” são as constantes da equação, com valores numéricos de 0,77 e 0,22, respectivamente, apresentando um coeficiente de correlação R de 0,97. De acordo com as observações de Lorentz e Park, valores da constante “a” acima de 0,7 sugerem uma interação forte entre a carga RLO e a matriz de borracha. Santos et al. [55]

obtiveram resultados similares para as constantes a e b em compostos derivados de borracha natural com resíduo de couro.

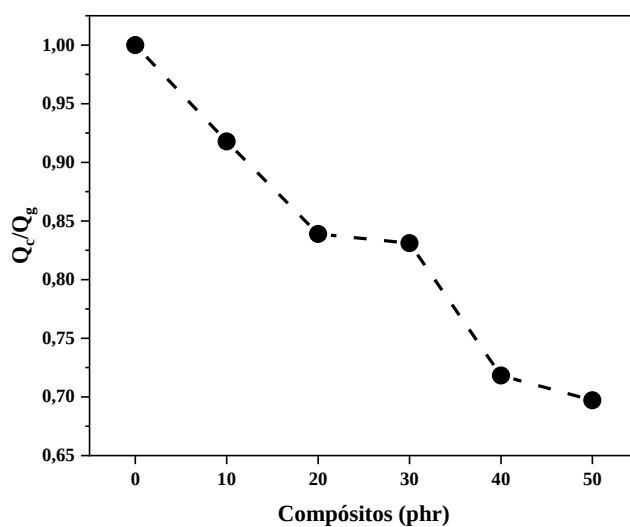
Figura 14 - Variação de Q_c/Q_g vs e^{-Z} dos compósitos SBR/RLO e goma como referência.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 15, é evidenciada a diminuição nos valores de $\frac{Q_c}{Q_g}$ à medida que a quantidade de RLO inserida aumenta, o que corrobora a eficaz interação entre a carga e a matriz.

Figura 15 - Efeito da carga de enchimento em Q_c/Q_g de compósitos SBR/RLO e goma como referência.



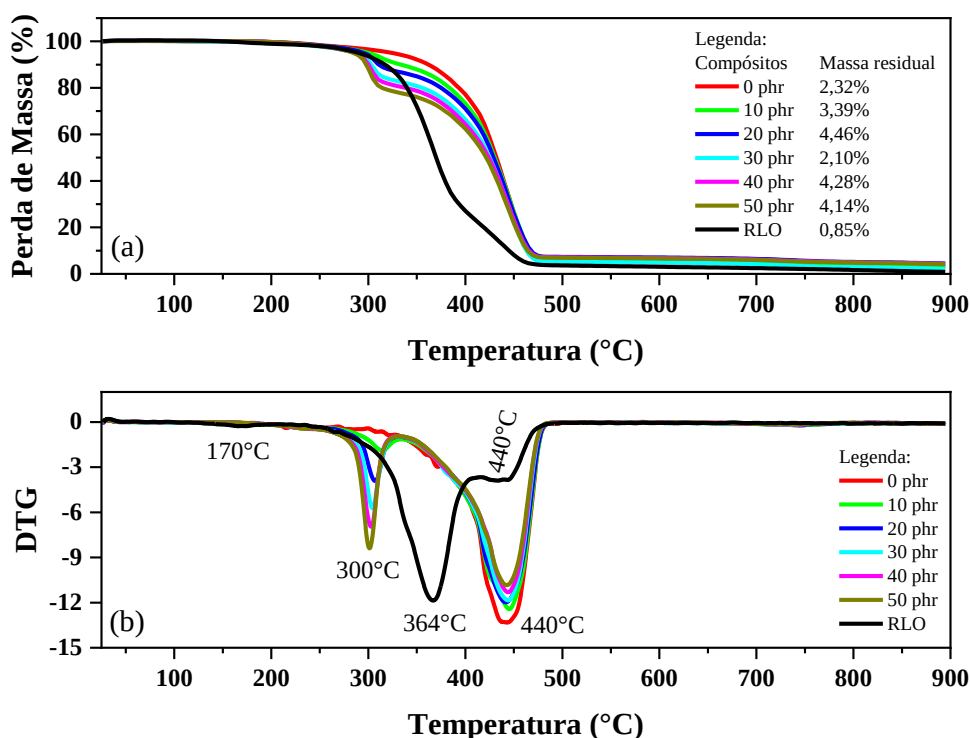
Fonte: Autoria própria.

6.5 Análise Térmica

6.5.1 Análise termogravimétrica (TG) dos compósitos

A estabilidade térmica dos compósitos foi investigada por meio de análises termogravimétricas. Na Figura 16 (a), é apresentada a curva de perda de massa do RLO (representada pela linha preta). Observa-se que a degradação desse material ocorre em três estágios distintos. O primeiro estágio ocorre em torno de 170°C, com uma perda de massa de 0,85%, atribuída à despolimerização das ligações H-H fracas do PMMA. O segundo estágio, com maior intensidade, ocorre a 364°C, resultando em uma perda de massa de 77,62%, sendo atribuído à despolimerização do grupo vinil [56]. O terceiro estágio, evidenciado a 440°C, resulta em uma perda de massa de 20,68%, correspondente à degradação do oligômero [57]. A massa residual do RLO é de aproximadamente 0,85%, atribuída a materiais inorgânicos presentes na amostra.

Figura 16 - Curvas de (a) TG do resíduo de lente oftálmico e dos compósitos de SBR/RLO e (b) DTG do resíduo de lente oftálmico e dos compósitos de SBR/RLO.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 16 (a), o termograma do compósito sem carga (representado pela linha vermelha) revela um único evento de maior intensidade, ocorrendo a 440°C. Este evento corresponde à degradação dos compostos orgânicos presentes na borracha SBR, deixando um resíduo de 2,32% de material inorgânico [58]. É possível notar que à medida que mais carga são adicionadas, ocorre um deslocamento das temperaturas de degradação dos compósitos para valores mais baixos.

A Figura 16 (b) mostra as curvas da primeira derivada da perda de massa (DTG), na qual é possível identificar, com clareza, as temperaturas de degradação de cada compósito. Nos compósitos com carga (10-50 phr) observa-se a existência de dois eventos relacionados às temperaturas de degradação, o primeiro evento ocorre por volta dos 300 °C referente a degradação do grupo vinil do RLO e o segundo evento por volta de 440 °C atribuída a degradação dos oligômeros do RLO e da matéria orgânica da borracha SBR.

7. APLICAÇÃO DO COMPÓSITO

A Figura 17 apresenta os protótipos de solas de chinelos produzidos a partir da formulação de borracha SBR com 10 phr de resíduo de lente oftálmico.

Figura 17 - Protótipos de compósitos de SBR/RLO, representando respectivamente (a) bloco com vista da área superior lisa, (b) pares de solas de chinelos com vistas da área superior lisa e área inferior com ranhuras e, (c) pares de solas de chinelos com vista da área inferior com ranhuras.



Fonte: Autoria própria.

8. CONCLUSÃO

A pesquisa em questão investigou a viabilidade de incorporar resíduos de lentes oculares (RLO) em compósitos poliméricos, buscando desenvolver soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis. Um dos principais aspectos analisados foi o impacto da adição de RLO nos parâmetros de vulcanização da borracha estireno butadieno (SBR). Os resultados indicaram que a presença dessa carga não alterou significativamente o tempo de vulcanização, o que representa uma vantagem em termos de economia energética no processo de fabricação. Além disso, a incorporação de RLO promoveu um aumento na densidade de ligações cruzadas da matriz polimérica, conforme determinado pelos métodos de Flory-Rehner e Mooney-Rivlin. Esse comportamento sugere a existência de interação entre a carga e a borracha SBR, embora essa interação não tenha sido suficiente para melhorar significativamente o reforço mecânico do compósito, atuando principalmente como uma carga de enchimento. A análise da interação matriz-carga, utilizando o modelo de Lorenz-Parks, corroborou a observação de uma interação entre os RLO e a borracha SBR. No entanto, essa interação não foi capaz de promover um aumento expressivo nas propriedades mecânicas do material.

Nos ensaios termogravimétricos, os compósitos contendo RLO apresentaram boa estabilidade térmica, o que é uma característica desejável para diversas aplicações. Além disso, a espectroscopia de infravermelho não detectou interações químicas significativas entre a carga e a matriz polimérica. Com base nos resultados obtidos, foi possível identificar que as melhores composições de RLO estão na faixa de 10 a 20 phr (partes por cem de borracha). Essa informação permitiu a produção de um protótipo de sola de chinelo, demonstrando a viabilidade de aplicação desses compósitos.

Em conclusão, o uso de resíduos de lentes oculares como carga de enchimento em compósitos de borracha SBR vulcanizada representa uma alternativa promissora na busca por soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis. Esse estudo contribui para o avanço do

conhecimento sobre a reutilização de resíduos industriais na indústria de polímeros, promovendo práticas mais eficientes e ecologicamente responsáveis.

9. PRÓXIMAS ETAPAS

Como próximas etapas do trabalho, sugere-se a realização de outras análises para aprofundar o estudo dos resíduos de lentes oftálmicas e dos compósitos vulcanizados. Por exemplo, a fluorescência de raios-X (XRF) pode ser utilizada para determinar quais elementos químicos inorgânicos estão presentes no resíduo de lente ocular. Esta técnica permitirá identificar e quantificar os elementos, fornecendo informações essenciais sobre a composição do resíduo.

Outra análise sugerida é a calorimetria diferencial de varredura (DSC). Esta técnica permitirá avaliar as transições térmicas do material, como temperaturas de fusão, cristalização e transições vítreas. A DSC fornecerá dados sobre o comportamento térmico dos compósitos vulcanizados, complementando as informações obtidas na análise termogravimétrica.

Adicionalmente, recomenda-se a análise dinâmico-mecânica (DMA) para investigar as propriedades viscoelásticas dos compósitos. A DMA permitirá determinar parâmetros como o módulo de armazenamento, o módulo de perda e a tan delta em função da temperatura e da frequência.

10. ATIVIDADES EXERCIDAS DURANTE A FASE DE EXECUÇÃO DO PÓS-DOUTORADO

➤ *Artigo Publicado como Autor Principal*

1) **Hiranobe, C. T.**, Gomes, A. S., Paiva, F. F., Tolosa, G. R., Paim, L. L., Dognani, G., ... & Cabrera, F. C. (2024). Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling. *Clean Technologies*, 6(2), 662-699. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6020035>.

➤ *Artigo Publicado como Co-autor*

1) Costa, N. L., **Hiranobe, C. T.**, Cardim, H. P., Dognani, G., Sanchez, J. C., Carvalho, J. A. J., ... & Silva, M. J. (2024). A Review of EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) Rubber-Based Nanocomposites: Properties and Progress. *Polymers*, 16(12), 1720. <https://doi.org/10.3390/polym16121720>.

2) Cruz, M. A. G., **Hiranobe, C. T.**, Cardim, G. P., Cabrera, F. C., Ribeiro, G. D., Tolosa, G. R., ... & dos Santos, R. J. Artificial neural network modeling for predicting the carbon black content derived from unserviceable tires for elastomeric composite production. *Journal of Applied Polymer Science*, e55951. <https://doi.org/10.1002/app.55951>.

3) De Carvalho, A. P., Dos Santos, H. F., Ribeiro, G. D., **Hiranobe, C. T.**, Goveia, D., Gennaro, E. M., ... & Dos Santos, R. J. (2024). Sustainable composites: analysis of filler–rubber interaction in natural rubber–styrene–butadiene rubber/polyurethane composites using the Lorenz–Park method and scanning electron microscopy. *Polymers*, 16(4), 471. <https://doi.org/10.3390/polym16040471>.

4) Ribeiro, G. D., **Hiranobe, C. T.**, da Silva Araújo, S., da Silva Filgueira, M., Rocha, J. A., Mukuno, J. S., ... & dos Santos, R. J. (2024). Sustainable construction materials for low-cost housing: Thermal insulation potential of expanded SBR composites with leather waste. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 5590-5604. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.234>.

5) Rocha, J. A., **Hiranobe, C. T.**, Hiranobe, M. F., Araújo, S. S., Filgueira, M. S., Ribeiro, G. D., Cardim, H. P., Mukuno, J. S., Silva, J. F. R., Andolfato, R. P., Camacho, J. S., & dos Santos, R. J. (2024). Strategic diagnosis for improvements in the execution of structural masonry. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174132429043>.

6) Integrating CLSP and GLSP Models for Optimizing Production Batch Sizes in Vulcanized Component Manufacturing. Paula Renata Monteiro Bigoloti, Tamara Angélica Baldo, Elmer Mateus Gennaro, Henrique Pina Cardim, Jeferson Shiguemi Mukuno, **Carlos Toshiyuki Hiranobe**, Guilherme Pina Cardim, Erivaldo Antônio da Silva, Leandro Ferreira Pinto and Renivaldo José dos Santos.

7) Melo, D. S., **Hiranobe, C. T.**, Tolosa, G. R., Malmonge, J. A., Cena, C. R., Job, A. E., Santos, R. J. & Silva, M. J. (2024). Analyzing the Reinforcement of Multiwalled Carbon Nanotubes in Vulcanized Natural Rubber Nanocomposites Using the Lorenz–Park Method. *Applied Sciences*, 14(19), 8973. <https://doi.org/10.3390/app14198973>.

➤ ***Artigo Submetido como Autor Principal***

1) Materials Research: Eco-Efficient Composites: Utilization of Ophthalmic Lens Waste as Filler in Styrene-Butadiene Rubber. **Carlos Toshiyuki Hiranobe**, Dener da Silva Souza, Samara da Silva Araújo, Márcia Ferreira Hiranobe, Gabriel Deltrejo Ribeiro, Leandra Oliveira Salmazo, Miguel Angel Rodríguez Pérez, Alberto Lopez Gil, Renivaldo José dos Santos and Aldo Eloizo Job.

2) Iranian Polymer Journal: Influence of Ophthalmic Lens Waste in Natural Rubber and SBR Composites: A Sustainable Approach with Powder and Fibers. **Carlos Toshiyuki Hiranobe**, Gabriel Deltrejo Ribeiro, Samara Araújo Kawall, Márcia Ferreira Hiranobe, Dener da Silva Souza, Guilherme Henrique Barros de Souza, Elmer Mateus Gennaro, Michael Jones da Silva, Leandro Ferreira Pinto, Aldo Eloizo Job e Renivaldo José dos Santos.

➤ ***Artigos para Submissão como Co-autor***

1) Processes: Fluid Phase Behavior of the Licuri (*Syagrus coronata*) Fatty Acid Ethyl Ester + Glycerol + Ethanol Mixtures at Different Temper-atures. Experimental and Thermodynamic Modeling. Iza Estevam Pedrosa Toledo, Dayana Coêlho, Lucas Meili, Carlos Toshiyuki Hiranobe, Marcos Lúcio Corazza, Pedro Arce, Erivaldo Antônio da Silva, Sandra Helena de Carvalho, Renivaldo José dos Santos, João Soletti and Leandro Ferreira-Pinto.

2) Journal of Elastomers & Plastics: Incorporating Waste from Ophthalmic Lenses into Natural Rubber Composites. José Afonso Rocha, **Carlos Toshiyuki Hiranobe**, Samara da Silva Araújo, Márcia Ferreira Hiranobe, José Francisco Resende da Silva, Guilherme Henrique Barros de Souza, Elmer Mateus Gennaro, Flávio Camargo Cabrera, Guilherme Pina Cardim e Renivaldo José dos Santos.

3) Comparative Evaluation of the Antioxidant Properties of Black Acacia (*Acacia mearnsii*) Tannin in Vulcanized Natural Rubber Using Different Vulcanization Systems. Matheus da Silva Filgueira, Amanda de Sousa Martinez de Freitas, Jéssica de Souza Rodrigues, André Luis de Oliveira, Marystela Ferreira, **Carlos Toshiyuki Hiranobe** e Renivaldo José dos Santos.

➤ ***Apresentação em Congressos e Eventos Científicos***

1) 1º Encontro do Programa de Pós-Doutorado da Unesp (abril/2024).

2) IV WEB Encontro Nacional de Engenharia Química (IV Wendeq) – apresentação online na forma de pôster do trabalho intitulado: Visão Sustentável: Compósitos de Borracha Natural e Sintética com Resíduo de Lente Oftálmica (08 a 12 julho/2024).

3) V Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (V COBICET) - apresentação online na forma de pôster do trabalho intitulado: Compósito de Borracha SBR e Resíduo de Lente Oftálmica: Investigando Propriedades Mecânicas para Aplicações Sustentáveis (26 a 30 agosto/2024).

➤ ***Trabalho Submetido e Aprovado para Apresentação***

1) 25º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (25º CBECiMat) – apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Análise Reométrica e Estabilidade Térmica de Compósitos de SBR com Resíduos de Lentes Oftálmicas (24 a 28 novembro/2024).

2) 25º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (25º CBECiMat) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Compósitos de Borracha Natural e Resíduo de Lente Oftálmica: Investigando Propriedades Mecânicas e Reométricas para Aplicações Sustentáveis (24 a 28 novembro/2024).

- 3) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Analysis of dc conductivity, a study using the impedance spectroscopy technique and theoretical experimental simulation, using the EIS Sectrum Analyzer program, in BNV/MWCNT nanocomposites (29/09 a 03/10/2024).
- 4) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: ZIF-8, MoS₂ and FMWCNT-based nanocomposites applied for electrochemical hydrogen storage (29/09 a 03/10/2024).
- 5) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Production and characterization of sustainable composites from natural rubber and snake plant fibers (29/09 a 03/10/2024).
- 6) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Rheometric and mechanical characterization of polybutadiene and unusable truck tires recovered carbon black composites (29/09 a 03/10/2024).
- 7) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Sugar Cane Waste: A Renewable Resource for Energy Production and Storage (29/09 a 03/10/2024).
- 8) XXII Brazilian Materials Research Society (XXII B-MRS Meeting) – co-autor da apresentação presencial na forma de pôster do trabalho intitulado: Study of the filler-matrix interaction of natural rubber/SBR composites with PU waste (29/09 a 03/10/2024).

➤ ***Coorientações***

- 1) Matheus da Silva Filgueira – aluno de mestrado da POSMAT/UNESP (bolsista Capes). Projeto: Avaliação da Resistência à Termodegradação de Compósitos de Borracha de Silicone (VMQ) com Óxido de Magnésio para Aplicação em Folhas Traseiras de Painéis Fotovoltaicos. (agosto/2022 - Em andamento).
- 2) Jeferson Shiguemi Mukuno – aluno de mestrado da POSMAT/UNESP. Projeto: Aplicação das redes neurais artificiais no estudo de reforço mecânico gerado pelo negro de carbono

recuperado de pneus inservíveis em compósitos de polibutadieno. (agosto/2023 - Em andamento).

➤ ***Participações em Bancas***

1) Gabriel Deltrejo Ribeiro – Exame de Qualificação de Doutorado da POSMAT/UNESP. Projeto: revestimento térmico para habitações populares com compósitos expandidos de borracha de estireno butadieno (SBR) com resíduo industrial couro. (março/2024).

2) Lucas Mateus Almeida Damião – Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Energia da UNESP. Projeto: Efeito da dispersão de partícula magnética nas propriedades elétricas, dielétricas e magnéticas do compósito baseado em borracha natural vulcanizada. (julho/2024).

➤ ***Patente em Análise***

1) Agência Unesp de Inovações - AUIN. Projeto: Desenvolvimento de compósitos eco-eficientes: Utilização de resíduos de lentes oculares como carga em matrizes elastoméricas (julho/2024 – Em análise).

➤ ***Demais Atividades***

1) Assistente de Suporte Acadêmico II, desde 2014, na Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Rosana da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

2) Assistente Editorial da Engineering & Technology Scientific Journal. ISSN online: 2764-5746. DOI: 10.55977.

3) Revisor de periódicos:

- 05 artigos revisados para Revista: Applied Chemical Engineering.
- 01 artigo revisado para Revista: Biomass Conversion and Biorefinery.
- 01 artigo revisado para Revista: Electrochimica Acta.
- 01 artigo revisado para Revista: Global Journal of Ecology.
- 01 artigo revisado para Revista: Insight Civil Engineering.
- 02 artigos revisados para Revista: Journal of Infrastructure, Policy and Development.
- 01 artigo revisado para Revista: Journal of Applied Polymer Science.
- 01 artigo revisado para Revista: Journal of Civil Engineering and Environmental Sciences.
- 01 artigo revisado para Revista: Journal of Polymer Science and Engineering.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). World report on vision. 2019. Disponível: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/publications/world-vision-report-accessible.pdf?sfvrsn=223f9bf7_2. Acesso 12/02/2024.
- [2] ZION MARKET RESEARCH. Single vision lenses market. 2022. Disponível: <https://www.zionmarketresearch.com/report/single-vision-lenses-market>. Acesso 12/02/2024.
- [3] TECH NAVIO. Ophthalmic lens market by end-user, product and geography – forecast and analysis 2023 – 2027. Disponível: <https://www.technavio.com/report/ophthalmic-lens-market-industry-analysis>. Acesso 02/03/2024.
- [4] SCHIRMEISTER, Carl G.; MÜLHAUPT, Rolf. Closing the carbon loop in the circular plastics economy. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 43, n. 13, p. 2200247, 2022. <https://doi.org/10.1002/marc.202200247>.
- [5] FELDMAN, D. (Ed.). (1989). *Polymeric Building Materials* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203497937>.
- [6] BROOKS, Clifford W. *Essentials of ophthalmic lens finishing*. Elsevier Health Sciences, 2003. ISBN: 0702038563, ISBN: 9780702038563.
- [7] PÉREZ, Xavier; GERTMANN, Dirk; KUHR, Niels. Strategies to meet sustainability in the ophthalmic industry: Precision, process efficiency and recycling of process materials. *Vakuum in Forschung und Praxis*, v. 33, n. 2, p. 24-27, 2021. <https://doi.org/10.1002/vipr.202100757>.
- [8] PILLAY, Rayishnee; HANSRAJ, Rekha; RAMPERSAD, Nishanee. Spectacle lens and contact lens recycling in South Africa. *African Vision and Eye Health*, v. 82, n. 1, p. 8, 2023. <https://doi.org/10.4102/aveh.v82i1.777>.
- [9] 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. <https://doi.org/10.3390/ma17010075>.
- [10] 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. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7455>.
- [11] BRYDSON, J. A. Styrene—Butadiene Rubber. In: *Developments in Rubber Technology—2: Synthetic Rubbers*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1981. p. 21-49.
- [12] TATARA, Ryoichi et al. Effect of Substituted Styrene-Butadiene Rubber Binders on the Stability of 4.5 V-Charged LiCoO₂ Electrode. *ChemElectroChem*, v. 8, n. 22, p. 4345-4352, 2021. <https://doi.org/10.1002/celc.202101333>.
- [13] OMNEXUS The Material Selection Platform – Styrene Butadiene Rubber: A Complete Technical Guide. Disponível: <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/styrene-butadiene-rubber-sbr-guide>>. Acesso: 01/08/2024.
- [14] DE, Sadhan K.; WHITE, Jim R. (Ed.). *Rubber technologist's handbook*. iSmithers Rapra Publishing, 2001. ISBN: 1-85957-262-6.
- [15] CYA Plataforma de soluções para transformação de polímeros. Disponível: <<https://www.cya.com.br/produtos>>. Acesso: 01/08/2024.

- [16] RAMESH, Manickam et al. Influence of filler material on properties of fiber-reinforced polymer composites: a review. *e-Polymers*, v. 22, n. 1, p. 898-916, 2022. <https://doi.org/10.1515/epoly-2022-0080>.
- [17] KUAN, Hoo Tien Nicholas et al. Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review. *Composites and Advanced Materials*, v. 30, p. 26349833211007502, 2021. <https://doi.org/10.1177/26349833211007502>.
- [18] FANNIN, Troy E.; GROSVENOR, Theodore. *Clinical optics*. Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN: 0750696702, 9780750696708.
- [19] PILLAY, Rayishnee; HANSRAJ, Rekha; RAMPERSAD, Nishanee. Spectacle lens and contact lens recycling in South Africa. *African Vision and Eye Health*, v. 82, n. 1, p. 8, 2023. <https://doi.org/10.4102/aveh.v82i1.777>.
- [20] PILLAY, Rayishnee et al. Environmental impact and end-of-life options of disposed polymeric spectacle and contact lenses. *African Vision and Eye Health*, v. 82, n. 1, p. 10, 2023. <https://doi.org/10.4102/aveh.v82i1.775>.
- [21] KYRIAKOPOULOS, Grigorios L.; ZAMPARAS, Miltiadis G.; KAPSALIS, Vasileios C. Investigating the human impacts and the environmental consequences of microplastics disposal into water resources. *Sustainability*, v. 14, n. 2, p. 828, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14020828>.
- [22] LOW, Darren Yi Sern et al. Recent developments in nanocellulose-reinforced rubber matrix composites: A review. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 550, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13040550>.
- [23] GUISE-RICHARDSON, Cai. Redefining Vulcanization: Charles Goodyear, patents, and industrial control, 1834-1865. *Technology and Culture*, v. 51, n. 2, p. 357-387, 2010. <https://www.jstor.org/stable/40647103>.
- [24] VIJAYARAM, Thoguluva Raghavan. A technical review on rubber. *International Journal on Design and Manufacturing Technologies*, v. 3, n. 1, p. 25-37, 2009. <http://dx.doi.org/10.18000/ijodam.70043>.
- [25] SANTOS, Renivaldo José dos. Obtenção de compósitos de borracha natural com resíduo industrial de couro reticulados com diferentes peróxidos. 2014. 101 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2014. Disponível: <<http://hdl.handle.net/11449/115765>>. acesso 01/08/2024.
- [26] KRUŽELÁK, J.; SÝKORA, R.; HUDEC, I. Vulcanization of rubber compounds with peroxide curing systems. *Rubber chemistry and technology*, v. 90, n. 1, p. 60-88, 2017. <https://doi.org/10.5254/rct.16.83758>.
- [27] DALL'ANTONIA, A. C.; et al. Caracterização mecânica e térmica da borracha natural formulada e vulcanizada dos clones: GT 1, IAN 873, PB 235 e RRIM 600. *Polímeros*, p. 63-71, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100015>.
- [28] NORMA, ASTM D3182-21a Prática padrão para borracha - materiais, equipamentos e procedimentos para misturar compostos padrão e preparar folhas vulcanizadas padrão, ASTM American Society for Testing and Materials, 2021.
- [29] NORMA, ASTM D2084-19a Método de Teste Padrão para Propriedade de Borracha - Vulcanização Usando Medidor de Cura de Disco Oscilante, ASTM American Society for Testing and Materials, 2019.
- [30] NORMA, ASTM D3616-95. Método de teste padrão para borracha — Determinação do gel, índice de inchaço e viscosidade da solução diluída. ASTM American Society for Testing and Materials, 2019.
- [31] 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. <https://doi.org/10.1063/1.1723791>.

- [32] MOONEY, Melvin. A theory of large elastic deformation. *Journal of applied physics*, v. 11, n. 9, p. 582-592, 1940. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>.
- [33] 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. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107239>.
- [34] 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. doi: 10.2306/scienceasia1513-1874.1998.24.199.
- [35] ASTM D412-16 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers—Tension, 2021.
- [36] SILVA, L. F. M. et al. Manufacturing of quality specimens. Disponível em <<https://download.e-bookshelf.de/download/0000/7534/37/L-X-0000753437-0001828949.XHTML/index.xhtml>> (Acesso 10/02/2020).
- [37] ASTM D624-00 Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers, 2020.
- [38] ASTM D5963-04 Standard Test Method for Rubber Property—Abrasion Resistance (Rotary Drum Abrader), 2019.
- [39] ASTM D2240-15 Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness, 2021.
- [40] 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. <https://doi.org/10.1002/pol.1961.1205015404>.
- [41] 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. <https://doi.org/10.1002/app.51880>.
- [42] ASTM D6370-99 Standard Test Method for Rubber—Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA), 2019.
- [43] 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>.
- [44] HIRANOBE, Carlos Toshiyuki et al. Cross-linked density determination of natural rubber compounds by different analytical techniques. *Materials Research*, v. 24, 2021. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0041>.
- [45] 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. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.06.007>.
- [46] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106050>.
- [47] 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. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.023>.

- [48] 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. <https://doi.org/10.1111/jopr.12969>.
- [49] 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. <https://doi.org/10.1177/08927057221115714>.
- [50] SINGH, Simranjit et al. FTIR and rheological studies of PMMA-based nano-dispersed gel polymer electrolytes incorporated with LiBF₄ and SiO₂. *Ionics*, v. 25, p. 1495-1503, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11581-018-2742-9>.
- [51] 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. <https://doi.org/10.21315/jes2019.15.1>.
- [52] 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106050>.
- [53] BAETA, D. A. et al. The use of styrene-butadiene rubber waste as a potential filler in nitrile rubber: order of addition and size of waste particles. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 26, p. 23-31, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000100003>.
- [54] LIN, Tengfei et al. Reactivity of sulfide-containing silane toward boehmite and in situ modified rubber/boehmite composites by the silane. *Applied surface science*, v. 280, p. 888-897, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.084>.
- [55] 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. <https://doi.org/10.1002/app.51880>.
- [56] 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. <https://doi.org/10.3390/polym10050491>.
- [57] 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.
- [58] ALI, Magdy AM et al. Thermal and mechanical behavior of SBR/devulcanized waste tire rubber blends using mechano–chemical and microwave methods. *Journal of Polymer Engineering*, v. 40, n. 10, p. 815-822, 2020. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2020-0116>.