

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA

ANA PAULA PALUDO BARRETO HOFFMANN

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO TÊXTIL DA  
RECICLAGEM DE PNEUS PARA UTILIZAÇÃO EM COMPOSTOS  
ELASTOMÉRICOS PARA BANDAS DE RODAGEM**

Porto Alegre

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE QUÍMICA

ANA PAULA PALUDO BARRETO HOFFMANN

**CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO TÊXTIL DA  
RECICLAGEM DE PNEUS PARA UTILIZAÇÃO EM COMPOSTOS  
ELASTOMÉRICOS PARA BANDAS DE RODAGEM**

Trabalho de conclusão apresentado junto à  
atividade de ensino “Projeto Tecnológico”  
do Curso de Química Industrial, como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Química Industrial.

Prof. Dr. Cesar Liberato Petzhold  
Orientador

Dr. Eleno Rodrigues Vieira  
Coorientador

Porto Alegre

2022

#### CIP - Catalogação na Publicação

Hoffmann, Ana Paula Paludo Barreto  
Caracterização e avaliação do uso de resíduo têxtil  
da reciclagem de pneus para utilização em compostos  
elastoméricos para bandas de rodagem / Ana Paula  
Paludo Barreto Hoffmann. -- 2022.  
57 f.  
Orientador: Cesar Liberato Petzhold.

Coorientador: Eleno Rodrigues Vieira.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Química, Curso de Química Industrial, Porto Alegre,  
BR-RS, 2022.

1. Reciclagem de pneus. 2. Fibra têxtil. 3. PET. 4.  
Nylon 6,6. 5. Compostos elastoméricos para bandas de  
rodagem. I. Petzhold, Cesar Liberato, orient. II.  
Vieira, Eleno Rodrigues, coorient. III. Título.

Dedico este trabalho ao meu avô Vicencio Paludo (*in memoriam*),  
que sempre acreditou no estudo e conhecimento como o melhor caminho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Instituto de Química, e todos os professores da graduação com quem convivi e que me propiciaram imenso aprendizado e amadurecimento pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Cesar Liberato Petzhold, pela disponibilidade em me orientar, pela atenção e auxílio nas discussões e na elaboração desse trabalho, agregando conhecimento e ampliando as minhas perspectivas.

À empresa Borrachas Vipal, pela oportunidade e disponibilização dos recursos necessários para a realização do estágio supervisionado e do trabalho de conclusão de curso, tornando possível desenvolver habilidades e adquirir experiências na área da tecnologia da borracha.

Agradeço também ao meu coorientador Dr. Eleno Rodrigues Vieira pela atenção, pelos conhecimentos transmitidos e por ter estado sempre disponível para auxiliar nas minhas dúvidas.

Aos colegas de laboratório do Centro de Pesquisa e Tecnologia da Borrachas Vipal, Karina, Lisandra, Daiane e Fabiano, por todo o auxílio, aprendizado e pelos momentos de distração compartilhados.

Às amigas que fiz durante a graduação, em especial a Ana Júlia, que desde o primeiro semestre de graduação esteve ao meu lado, a Gabriela, por ter sido minha maior companheira durante todos os dias de ensino remoto e a Camila, Lilian e Taís, pelo companheirismo e pelos momentos vividos nos intervalos das aulas no Campus do Vale.

Agradeço aos meus pais, Gilson e Nair Ana, que me apoiaram em todos os momentos e me incentivaram incansavelmente. Em particular à minha mãe, que foi a minha maior inspiração em cursar Química.

Ao Rodrigo por todo carinho, compreensão e paciência nos momentos de ansiedade e por ter acompanhado de perto todos os meus medos, avanços e superações.

À minha dinda Ilda, por ter estado presente em todos os momentos, desde a minha matrícula na graduação.

À minha avó Soely, pela preocupação afetiva com a escrita do trabalho e com meu desenvolvimento na graduação e pelo conforto de um abraço e café nos dias de retorno do estágio e nos fins de semana.

## RESUMO

A problemática de destinação de pneus inservíveis é uma causa atual e relevante do ponto de vista do cenário ambiental e econômico. Por meio da abordagem da economia circular, esse trabalho visa estudar a utilização do resíduo têxtil da reciclagem de pneus em compostos elastoméricos para uso em bandas de rodagem, em substituição parcial ao negro de fumo, comumente utilizado como carga, que é proveniente de fontes não renováveis, retornando assim os recursos para o mesmo setor produtivo. Realizou-se a caracterização do material por meio de técnicas de análise instrumental e a incorporação do resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, da fibra têxtil e do pó de borracha, como carga em compostos elastoméricos a base de borracha natural (NR), copolímero de estireno e butadieno (SBR) e polibutadieno (BR). As propriedades físico-mecânicas e dinâmico-mecânicas foram avaliadas e realizou-se também um comparativo com compostos contendo negro de fumo N339, com propriedade reforçante, e N550, com propriedade semi reforçante. Os resultados demonstraram que o resíduo de fibra têxtil com pó de borracha na quantidade de 5 phr pode ser utilizado em substituição ao negro de fumo N339 em compostos para bandas de rodagem, sem redução nas propriedades. O uso do resíduo de fibra têxtil com pó de borracha na quantidade de 20 phr pode ser utilizada em substituição ao negro de fumo N550 em compostos que exigem propriedades semi reforçantes.

**Palavras chave:** Reciclagem de pneus, fibra têxtil, PET, Nylon 6,6, pó de borracha, compostos elastoméricos para bandas de rodagem.

## ABSTRACT

The problem of disposal of waste tires is a current and relevant cause from the point of view of the environmental and economic scenario. Through the circular economy approach, this work aims to study the use of textile waste from tire recycling in elastomeric compounds for use in treads, partially replacing carbon black, commonly used as a filler, from non-renewable sources, returning the resources for the same productive sector. The characterization of the material was performed using instrumental analysis techniques and the textile fiber residue with rubber powder, textile fiber and rubber powder, was incorporated as a filler in elastomeric compounds based on natural rubber (NR), styrene and butadiene rubber (SBR) and polybutadiene (BR). The physical-mechanical and dynamic-mechanical properties were evaluated and compared with compounds containing carbon black N339, with reinforcing property, and N550, with semi reinforcing property. The results showed that textile fiber residue with rubber powder in the amount of 5 phr can be used to replace carbon black N339 in tread compounds, without reducing the properties. The use of textile fiber residue with rubber powder in the amount of 20 phr can be used to replace carbon black N550 in compounds that require semi reinforcing properties.

**Keywords:** Tire recycling, textile fiber, PET, Nylon 6.6, rubber powder, elastomeric compounds for treads.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Seção transversal de um pneu sem câmara de ar. ....	14
<b>Figura 2</b> - Fluxograma do processo de reciclagem de pneus inservíveis. ....	18
<b>Figura 3</b> - Número de patentes publicadas nos últimos quinze anos com tópico “Tire/Tyre Recycling”. ....	20
<b>Figura 4</b> – Resíduo de fibra têxtil com pó de borracha da reciclagem de pneus. ....	23
<b>Figura 5</b> – Resíduo têxtil separado em fibra têxtil (à esquerda) e pó de borracha (à direita)..	24
<b>Figura 6</b> – Espectro de FTIR-ATR da fibra têxtil. ....	30
<b>Figura 7</b> – Curva de DSC da fibra têxtil referente ao primeiro ciclo de resfriamento, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio. ....	31
<b>Figura 8</b> – Curva de DSC da fibra têxtil referente ao segundo ciclo de aquecimento, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio. ....	32
<b>Figura 9</b> – Curva de aquecimento para determinação da $T_g$ do pó de borracha, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio. ....	32
<b>Figura 10</b> – Análise Termogravimétrica da fibra têxtil sob aquecimento de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio. Gráfico inset realizado nas mesmas condições, com mudança para atmosfera de ar sintético em 800°C. ....	33
<b>Figura 11</b> – Análise termogravimétrica (TGA) do pó de borracha sob aquecimento de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio até 550 °C e com troca para ar sintético em 300 °C. ....	34
<b>Figura 12</b> – Curvas reométricas relativas ao composto padrão e aos compostos em análise..	36
<b>Figura 13</b> – Valores de torque máximo (MH) e torque mínimo (ML) dos compostos avaliados. ....	37
<b>Figura 14</b> – Valores de $t_{s2}$ , $t_{10}$ e $t_{90}$ dos compostos. ....	38
<b>Figura 15</b> – Valores obtidos para a Viscosidade Mooney dos compostos. ....	39
<b>Figura 16</b> – Logaritmo do módulo de armazenamento em função da temperatura para os compostos analisados. ....	40
<b>Figura 17</b> – Sobreposição das curvas de $\tan \delta$ obtidas por DMA para os compostos. ....	41
<b>Figura 18</b> – Imagens dos compostos, obtidas no equipamento Dispergrader com 100X de aumento. ....	43
<b>Figura 19</b> – Valores de densidade e dureza dos compostos. ....	44
<b>Figura 20</b> – Resiliência dos compostos avaliados. ....	45
<b>Figura 21</b> – Desgaste por abrasão ( $\text{mm}^3$ ) dos compostos. ....	46
<b>Figura 22</b> – Valores de tensão na ruptura dos compostos. ....	47
<b>Figura 23</b> – Alongamento na ruptura dos compostos. ....	48
<b>Figura 24</b> – Módulo dos compostos a 100 %, 200 % e 300 % de alongamento. ....	49
<b>Figura 25</b> – Resistência ao rasgamento dos compostos. ....	50
<b>Figura 26</b> – Deformação permanente à compressão (DPC) dos compostos. ....	51

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Denominação dos compostos elastoméricos. ....	25
<b>Tabela 2</b> – Formulação dos compostos elastoméricos analisados. ....	26
<b>Tabela 3</b> – Análise elementar por MEV/EDS do resíduo da análise termogravimétrica do pó de borracha. ....	35
<b>Tabela 4</b> – Valores de $T_g$ e $\tan \delta$ obtidos por DMA para os compostos. ....	42
<b>Tabela 5</b> – Percentuais de Dispersão dos compostos avaliados. ....	43
<b>Tabela 6</b> – Dados relativos aos custos das cargas nos compostos elastoméricos. ....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- 6PPD – N-(1,3-dimetil-butil)-N'-fenil-p-fenilenodiamina
- ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
- ASTM – American Society for Testing and Materials
- ATR – Reflectância Total Atenuada
- BR – Polibutadieno
- CZ – N-ciclohexil-2-benzotiazol Sulfenamida
- DIN – Deutsches Institut für Normung
- DPC – Deformação Permanente à Compressão
- DPG – Difetilguanidina
- DSC – Calorimetria Exploratória Diferencial
- EDS – Energia Dispersiva de Raios-X
- FTIR – Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
- Ibama – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MH – Binário Máximo ou Torque Máximo
- ML – Binário Mínimo ou Torque Mínimo
- NR – Borracha Natural
- PET – Poli(tereftalato de etileno)
- Phr – Partes por cem de borracha
- SBR – Copolímero de Estireno e Butadieno
- t<sub>10</sub> – tempo para atingir 10 % do torque máximo
- t<sub>90</sub> – Tempo ótimo de vulcanização
- T<sub>g</sub> – Temperatura de Transição Vítrea
- t<sub>s2</sub> – Tempo de *scorch*
- TGA – Análise Termogravimétrica
- TMQ – 2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinolina
- TMTD – Dissulfeto de Tetrametiltiuram

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 O Pneu.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Indústria de Pneus .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Reciclagem de Pneus.....</b>	<b>16</b>
<b>3 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>20</b>
<b>4 OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>22</b>
<b>5 METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 Materiais .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 Métodos.....</b>	<b>23</b>
5.2.1 Preparação do Resíduo Têxtil .....	23
5.2.2 Caracterização do Resíduo Têxtil .....	24
5.2.2.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR).....	24
5.2.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	24
5.2.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA) .....	24
5.2.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	25
5.2.3 Preparação dos Compostos Elastoméricos.....	25
5.2.4 Propriedades dos Compostos Elastoméricos.....	27
5.2.4.1 Reometria .....	27
5.2.4.2 Viscosidade Mooney .....	27
5.2.4.3 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) .....	28
5.2.4.4 Densidade .....	28
5.2.4.5 Dureza.....	28
5.2.4.6 Resiliência .....	28
5.2.4.7 Desgaste por abrasão .....	28
5.2.4.8 Análise de dispersão .....	29
5.2.4.9 Resistência à tração .....	29
5.2.4.10 Resistência ao rasgamento.....	29
5.2.4.11 Deformação Permanente à Compressão (DPC) .....	29
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>6.1 Caracterização do Resíduo Têxtil .....</b>	<b>30</b>
6.1.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) .....	30
6.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	31
6.1.3 Análise Termogravimétrica (TGA).....	33
6.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	35
<b>6.2 Propriedades dos Compostos Elastoméricos .....</b>	<b>35</b>

6.2.1 Propriedades Reométricas .....	35
6.2.2 Viscosidade Mooney .....	39
6.2.3 Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMA).....	40
6.2.4 Análise de Dispersão .....	42
6.2.5 Densidade e dureza.....	44
6.2.6 Resiliência .....	45
6.2.7 Desgaste por abrasão .....	46
6.2.8 Resistência à tração .....	47
6.2.9 Resistência ao Rasgamento .....	49
6.2.10 Deformação Permanente à Compressão (DPC) .....	50
<b>5 ANÁLISE DE CUSTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de pneumáticos é de fundamental importância para a mobilidade humana e transporte de cargas, possuindo forte impacto na economia mundial. Entretanto, o descarte de pneus é uma problemática, devido à difícil degradação dos compostos de borracha vulcanizados, que possuem tempos de decomposição inestimados.<sup>1</sup>

Através da abordagem da economia circular, quando o produto atinge o fim de sua vida útil e retorna ao ciclo produtivo, gerando valor novamente, busca-se minimizar o impacto ambiental e favorecer a produtividade do setor através do uso dos mesmos recursos.<sup>2</sup>

No processo de reciclagem de pneus são obtidas lascas ou granulados de borracha, aço e fibras têxteis, sendo que essas representam cerca de 10% em peso dos pneus.<sup>1</sup>

Algumas das possíveis aplicações para as fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus são como materiais reforçantes em asfaltos modificados e em compósitos de plásticos.<sup>1</sup>

Outros usos para o material estão sendo pesquisados, entretanto, não foram encontrados estudos a respeito da aplicação desse material em compostos elastoméricos, de forma a retornar o material ao setor de pneumáticos, com possível uso em bandas de rodagem para reforma de pneus.

Dessa forma, este trabalho busca caracterizar e avaliar o uso do resíduo de fibras têxteis provenientes do processo de reciclagem de pneus em formulações de compostos elastoméricos, em substituição parcial às usuais cargas utilizadas, as quais são provenientes de fontes não renováveis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Pneu

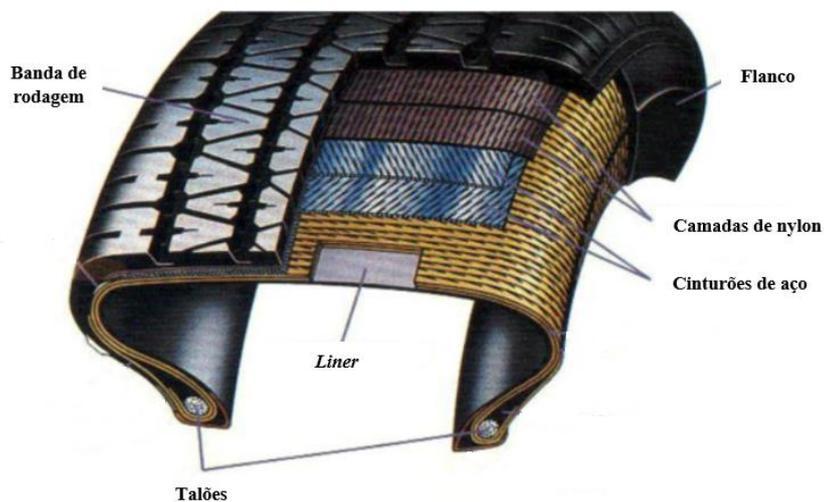
O pneu é o componente do veículo que realiza o contato deste com o solo, motivo pelo qual é essencial para o funcionamento dos veículos. A roda era feita de madeira até meados de 1830, quando foi descoberta a vulcanização por Charles Goodyear, e a borracha passou a ser utilizada como revestimento do aro dos pneus, gerando melhorias na segurança e nas trepidações dos automóveis. O primeiro pneu, produzido para uma bicicleta, foi inventado pelo inglês John Boyd Dunlop no ano de 1888. O pneu produzido por Dunlop possuía câmara de ar, sendo este tipo de pneu utilizado atualmente apenas em algumas aplicações.<sup>3</sup>

No ano de 1895, foi patenteado o primeiro pneu para automóvel, pelos irmãos Michelin. No século 20, a empresa Michelin lançou o conceito de pneu radial, impactando significativamente o mercado e as técnicas de fabricação que eram anteriormente utilizadas.<sup>3;4</sup>

De acordo com o tipo de veículo e função para a qual um pneu será designado, o mesmo é projetado avaliando-se as melhores características para obter o desempenho desejado, com durabilidade e atendendo as condições de carga que se destina.<sup>4</sup>

O pneu sem câmara de ar possui estrutura conforme demonstrado na Figura 1.

**Figura 1** - Seção transversal de um pneu sem câmara de ar.



Fonte: Adaptado de <sup>5</sup>

A carcaça fornece estrutura ao pneu, e consiste de camadas de lonas sobrepostas formadas por cinturões de aço emborrachadas pelo processo de calandragem. O número de camadas é definido por características como tipo e tamanho do pneu, pressão de enchimento e carga a que se destina em serviço.<sup>6</sup>

São também adicionadas camadas de malhas de fibras têxteis ou aço emborrachadas, as quais são posicionadas abaixo da banda de rodagem, com o objetivo de aumentar a resistência contra deformações na carcaça e proporcionar maior rigidez.<sup>5;6</sup>

As camadas podem ser posicionadas em angulação na carcaça do pneu, em relação à direção de deslocamento (pneu diagonal) ou na direção do raio (pneu radial). Essa última configuração proporciona maior conforto na condução do veículo, devido a maior flexibilidade vertical e maior interação entre o veículo e a estrada, impactando em economia de combustível, pela menor resistência ao rolamento.<sup>5</sup>

Algumas das fibras têxteis utilizadas para reforço de pneus são as poliamidas (Nylon 6,6 e Nylon 6) e o poliéster, sendo o poli(tereftalato de etileno) (PET) o mais importante.<sup>5</sup>

Os talões são feitos de aço resistente e servem de ancoragem para as camadas da carcaça, além de prender o conjunto no aro da roda, evitando que o pneu se movimente.<sup>5;6</sup>

Os flancos formam a lateral do pneu, auxiliando assim na proteção dessa região da carcaça e no suporte da banda de rodagem.<sup>5;6</sup>

O *liner* é um componente presente em pneus sem câmara de ar, o qual realiza a função de reduzir a permeabilidade, evitando a perda de ar do pneu. Para essa função, são utilizadas borrachas com baixa permeabilidade, como as borrachas butílicas halogenadas.<sup>5;6</sup>

A banda de rodagem é o componente do pneu responsável por realizar o contato deste com o solo. Desta forma, realiza a proteção da carcaça e fornece o contato de fricção necessário para condução, frenagem e execução de curvas. O desenho de sua superfície externa varia dependendo da aplicação que se destina.<sup>6</sup>

O composto elastomérico utilizado na fabricação da banda de rodagem é formulado em função das propriedades físico-mecânicas, dinâmicas e químicas que se deseja obter no produto final. Os principais ingredientes que compõe uma formulação são: elastômeros, agentes de vulcanização, aceleradores, ativadores e retardadores, agentes de proteção, auxiliares de processo, cargas, plastificantes, pigmentos, além de outros aditivos especiais de acordo com a aplicação.<sup>7</sup>

As cargas mais utilizadas em compostos de borracha são o negro de fumo e a sílica, escolhidas dependendo das propriedades que se deseja obter no composto. Há inúmeros tipos de negro de fumo, os quais caracterizam-se pelo tamanho de partícula e sua distribuição, estrutura e atividade superficial.<sup>5</sup>

Algumas das propriedades mecânicas que um pneu deve apresentar são tração, aderência ao piso seco e molhado e baixa resistência ao rolamento, a qual afeta diretamente na economia de combustível.<sup>5</sup>

## 2.2 Indústria de pneus

A indústria de pneumáticos é um dos setores de grande relevância no mercado mundial, devido a sua importância na mobilidade humana e no transporte de cargas, estando assim relacionada à diversas outras áreas.

No momento atual, as indústrias relacionadas à fabricação de pneus sofrem instabilidades relacionadas às matérias-primas e preços. Além disso, os tradicionais fabricantes do setor enfrentam uma concorrência vinda de países do continente asiático, tendo como destaque a China.<sup>8</sup> No ano de 2018, a produção mundial de pneus foi estimada em 17,1 milhões de toneladas, sendo 67% dessa quantia produzida nos continentes Ásia e Oceania, 18% na Europa, Oriente Médio e África e 15% na América do Sul, América Central e América do Norte.<sup>2</sup>

Segundo dados do Infográfico 2021 da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), o Brasil possui atualmente 20 plantas industriais de fabricação de pneus, localizadas nos estados de São Paulo, Bahia, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Amazonas, sendo a maioria de multinacionais sediadas no país.<sup>9</sup>

No ano de 2021, foram comercializados no Brasil 56.749,509 unidades de pneus, representando uma alta de 9,6 % em relação ao ano de 2020. O maior volume de vendas destinou-se para reposição, seguido de vendas para montadoras e por fim, para exportação.<sup>10</sup>

## 2.3 Reciclagem de Pneus

Os pneus são ditos inservíveis quando atingem o fim de sua vida útil, apresentando danos irreversíveis na estrutura e não podendo mais ser utilizados em veículos.<sup>2</sup> Assim, sabendo-se que o tempo de decomposição de um pneu na natureza é inestimável, busca-se cada vez mais encontrar novas aplicações para eles, minimizando os prejuízos gerados ao meio ambiente.

O modelo de economia circular objetiva a mudança do conceito do uso e descarte de bens por um sistema contínuo de reutilização de recursos que atingiram o fim de sua vida útil, gerando valor novamente e reduzindo o impacto ambiental.<sup>2</sup>

Esse modelo fundamenta-se na aplicação dos 7Rs: Reduzir, Reutilizar, Reciclar, Redesenhar, Renovar, Reparar e Recuperar. No contexto da indústria de pneus, reduzir consiste em otimizar o uso das matérias primas utilizadas na formulação de compostos. Reutilizar é prolongar a vida útil do pneu, através do processo de reforma, que inclui a substituição da banda de rodagem, componente que mais sofre com o desgaste ocasionado pelo uso. Renovar é utilizar

matérias primas de fontes renováveis na produção de pneus, em substituição às derivadas de combustíveis fósseis. Recuperar baseia-se na recuperação energética e de material, de forma a aplicar tecnologias de conversão termoquímica, transformando pneus descartados em produtos como combustíveis.<sup>2</sup>

No Brasil, compete ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) estabelecer procedimentos para verificação do cumprimento da Resolução Conama nº 416/09, a qual resolve que é de responsabilidade de fabricantes e importadores de pneus novos, a coleta de pneus inservíveis existentes no país, sendo que para cada pneu novo comercializado para reposição, deve-se dar a destinação adequada para um pneu inservível.<sup>11</sup>

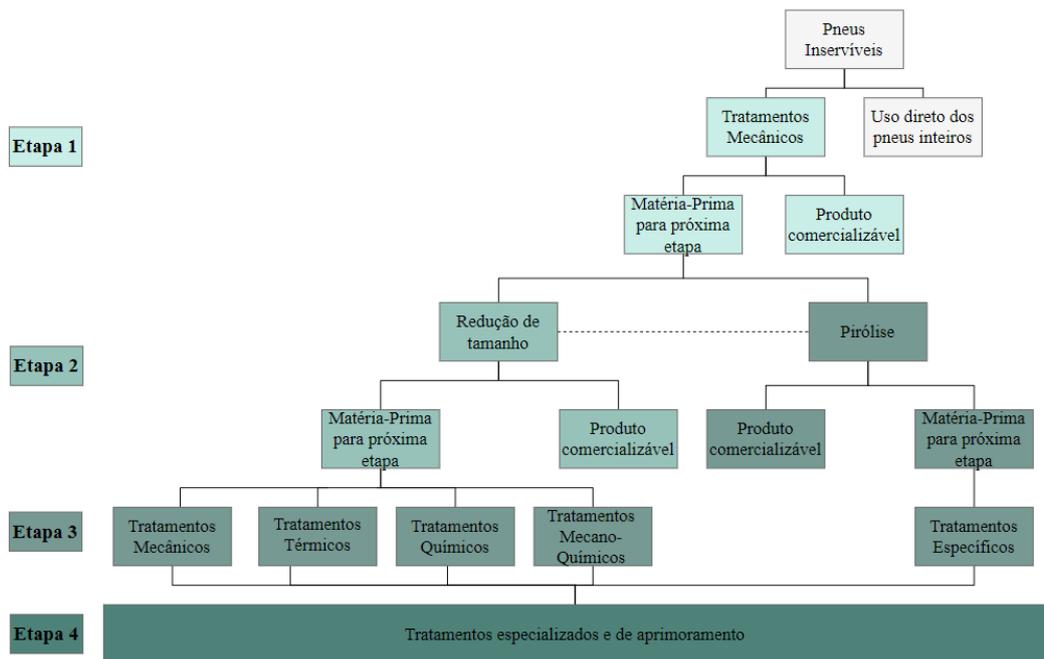
Segundo informações do Relatório de Pneumáticos de 2020 do Ibama, com base no ano de 2019, foram destinados no Brasil 585.391,08 toneladas de pneus inservíveis, sendo 62,55% para coprocessamento, 18,94% para granulação, 16,36% para pirólise e 2,14% para laminação.<sup>12</sup>

No coprocessamento, realizado em fornos de clínquer, os pneus inservíveis substituem parcialmente os combustíveis e servem também como fontes de elementos metálicos. Pelos processos de laminação e granulação, é obtida borracha laminada ou granulada, com separação do aço presente na estrutura do pneu. Já no processo de pirólise, a borracha passa por decomposição térmica, sob condições de ausência de oxigênio, gerando óleos, aço e negro de fumo.<sup>12</sup>

Pelo processo de reciclagem de pneus, são obtidos materiais que podem reintegrar produtos e serem aplicados novamente ao ciclo produtivo dos produtos originais ou de outros. O processo completo é composto de quatro etapas, sendo que as duas primeiras etapas produzem cerca de 75% dos materiais provenientes de pneus reciclados utilizados atualmente.<sup>4</sup>

Na figura 2 está representado o fluxograma do processo de reciclagem de pneus.

**Figura 2** - Fluxograma do processo de reciclagem de pneus inservíveis.



Fonte: Adaptado de <sup>4</sup>

Inicialmente é realizada a limpeza dos pneus coletados, a fim de remover resíduos, como pedaços de vidro e pedras.<sup>4</sup>

Na primeira etapa, realizam-se processos mecânicos, onde o pneu inteiro passa por compressão, enfardamento ou corte. Podem ser retirados os fios de aço dos talões, os flancos e a banda de rodagem, utilizada diretamente em produtos ou como matéria prima na fase posterior do processo de reciclagem.<sup>4</sup>

Na segunda etapa, os pneus inservíveis inteiros ou os materiais provenientes da primeira etapa são fragmentados e separados em borracha, metais e fibras têxteis. Como tratamentos preliminares, os pneus são triturados, obtendo-se material irregular de granulometria entre 50 e 300 mm, podendo passar por processamento posterior para produzir lascas de 10 a 50 mm, as quais são geralmente destinadas à aplicações em engenharia civil, como enchimento em concreto leve, por exemplo.<sup>4</sup>

A redução de tamanho pode ser realizada de diversos métodos, como redução criogênica, em temperatura ambiente ou com jato de água.<sup>4</sup>

No processo à temperatura ambiente, os pneus inteiros, grânulos, lascas, flancos ou bandas de rodagem são moídos em sistema de facas. Os metais são separados por meio de ímãs, o material é peneirado para uniformização do tamanho e remoção de impurezas e os resíduos têxteis são removidos por separadores de ar.<sup>4</sup>

No processamento criogênico, os pneus já processados em temperatura ambiente, que estão na forma de granulados ou lascas, são separados e moídos em condições de temperatura baixa, utilizando-se nitrogênio líquido e obtendo granulados de forma regular. As fibras e metais presentes são separados em um moinho de martelos e o granulado de borracha passa ainda por telas magnéticas e peneiramento para remover impurezas restantes.<sup>4</sup>

O processamento à temperatura ambiente e o criogênico são muitas vezes utilizados combinados, possibilitando unir as características de cada um. Os produtos obtidos nessa fase, borracha granulada, aço e fibras têxteis, podem ser utilizados diretamente em produtos ou seguir para a etapa seguinte.<sup>4</sup>

Na terceira etapa, os materiais obtidos das fases anteriores são processados mecanicamente, termicamente ou quimicamente, por exemplo, a fim de modificar características para utilizações específicas.<sup>4</sup>

A recuperação é um exemplo de tratamento dessa etapa, em que o material primeiramente é decomposto termicamente com agentes químicos e óleos e após, passa por processo mecânico e é extrudado. A pirólise é a decomposição térmica da borracha, realizada na ausência de oxigênio, através da qual obtém-se produtos comercializáveis como aço, óleos e produtos à base de carbono, sendo esse último utilizado em substituição ao negro de fumo em tintas ou até em pneus. Pela desvulcanização, as ligações cruzadas formadas durante o processo de vulcanização são revertidas, possibilitando o reprocessamento do material e posterior revulcanização. Os produtos gerados destinam-se para aplicações diretas ou servem de matéria prima para a quarta etapa.<sup>4</sup>

Os tratamentos realizados na quarta etapa tem por objetivo aprimorar ainda mais as propriedades do material. Tratamentos posteriores realizados no carbono pirolítico são um exemplo, em que se obtém características semelhantes às dos negros de fumo comumente utilizados na indústria, por meio da redução de tamanho e separação de impurezas residuais.<sup>4</sup>

Os materiais obtidos nas quatro etapas do processo são classificados em cortes, fragmentos, lascas, granulados, pós e pós finos de borracha, aço e fibras têxteis.<sup>4</sup>

Há diversos mercados que utilizam os materiais produzidos nas quatro etapas do processo de reciclagem de pneus e, com o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento mais eficiente, aumentam cada vez mais as aplicações para esses produtos.<sup>4</sup>

A área de engenharia civil utiliza pneus inservíveis inteiros, fardos, fragmentos e lascas em soluções para problemas de erosão, engenharia de aterros e bases de construção de estradas. O setor de construção civil utiliza fragmentos e lascas para preenchimento e granulados para fabricação de chapas para isolamento acústico, vibração e pisos. O aço é utilizado

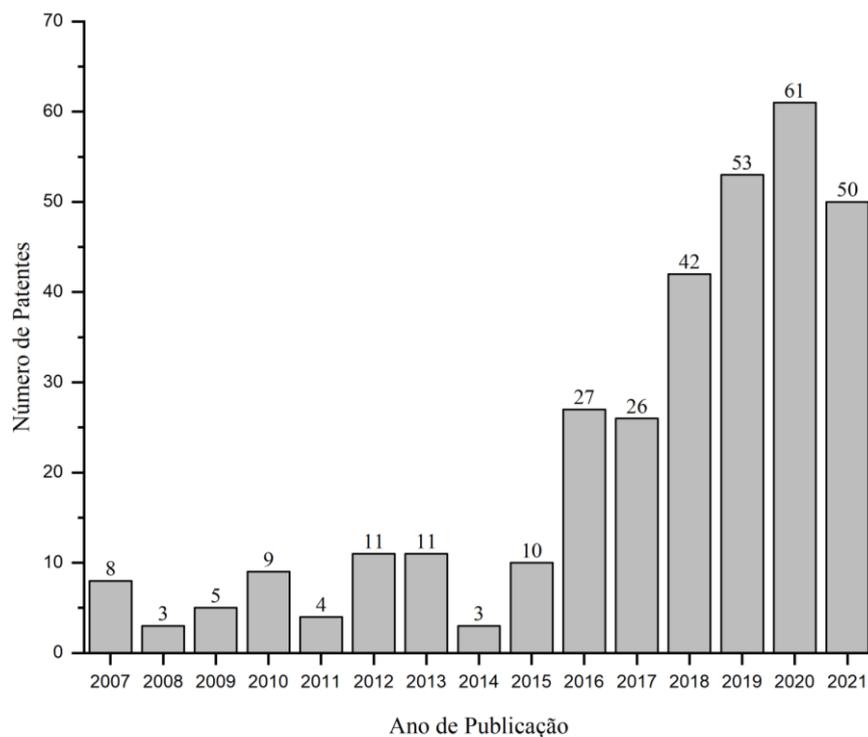
principalmente para metalurgia e siderurgia, mas, juntamente com as fibras têxteis, também possui aplicação como aditivos reforçante na indústria do cimento. A área de infraestrutura de esportes e lazer utiliza os granulados de borracha para fabricação de pisos em áreas esportivas e parques infantis. O pó e os granulados de borracha também são utilizados em produtos como rodas maciças e solados de calçados, assim como em mangueiras, tapetes e conectores para o setor automotivo. Em rodovias e ferrovias são utilizados fragmentos, cavacos, granulados e pó como auxiliares na redução de ruídos e vibrações.<sup>4</sup>

### 3 ESTADO DA ARTE

Para conhecimento do estado da arte do tema discutido neste trabalho, foi realizada uma busca de patentes na base de dados *Derwent Innovations Index<sup>SM</sup>* (*Web of Science/Clarivate Analytics*).<sup>13</sup>

Pesquisou-se primeiramente o termo “*Tire/Tyre Recycling*” como tópico e foi encontrado o registro de 378 patentes ao total. Os dados do número de patentes por ano de publicação referente aos últimos quinze anos estão apresentados na Figura 3.

**Figura 3** - Número de patentes publicadas nos últimos quinze anos com tópico “*Tire/Tyre Recycling*”.



Fonte: Pesquisa na base de dados *Derwent Innovations Index<sup>SM</sup>* (*Web of Science/Clarivate Analytics*)<sup>13</sup>

Como pode-se observar, houve um crescimento no número de patentes publicadas contendo o tema de reciclagem de pneus nos últimos anos, principalmente a partir do ano de 2016, demonstrando que o tema é atual e continua sendo estudado.

A maioria das patentes registradas nos últimos anos referem-se a inovações nos sistemas e dispositivos para reciclagem de pneus. A patente NL2019625-B1<sup>14</sup>, por exemplo, descreve um dispositivo para limpeza de partículas têxteis contaminadas com borracha da reciclagem de pneus de automóveis. Há também aplicações que utilizam a borracha reciclada. A patente CN105885146-A<sup>15</sup> refere-se à utilização do resíduo da reciclagem de pneus, adicionado de adesivo de poliuretano e pigmento em tijolos ou em ladrilhos de pavimentos. A patente CN105111798-A<sup>16</sup> utiliza resíduos de pneus reciclados na composição de uma tinta com propriedades acústicas e resistente à intempéries.

A fim de relacionar os resíduos de fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus, objeto de estudo deste trabalho, foi acrescentado à pesquisa o termo “Nylon”, tendo sido encontradas três patentes.

As patentes encontradas referem-se à processos de separação dos resíduos da reciclagem de pneus, não tendo sido encontradas patentes da utilização da fibra de Nylon para aplicação em produtos. A patente WO2007/091876-A2<sup>17</sup> relata um processo que envolve a recuperação da borracha, fibra de Nylon ou poliéster e malha de aço. Por meio de congelamento criogênico e um sistema de rolos, moinho de bolas ou barras, os componentes são fragmentados e posteriormente separados dependendo do material. As fibras de Nylon ou poliéster são separadas da borracha e do aço em tanque de água. A patente WO2010/023548-A2<sup>18</sup> utiliza um jato de água sob alta pressão para desintegrar os pneus dados como inservíveis. A separação das partículas têxteis é realizada em tanque de água e os resíduos metálicos da malha de aço são removidos por atração magnética.

Realizou-se também pesquisa de artigos científicos na base de dados do *Web of Science/Clarivate Analytics*, utilizando-se como palavras-chave “*end of life tires*” e “*textile*” em todos os campos de busca. Foram encontrados 18 resultados, publicados no período de 2010 a 2022. São relatados estudos de aplicações da fibra têxtil proveniente da reciclagem de pneus em solos<sup>19</sup>, como material reforçante, em tratamento acústico<sup>20</sup>, por possuir propriedades de absorção de som, em materiais betuminosos, como o asfalto<sup>21</sup>, e adicionado a compostos plásticos<sup>22</sup>.

Dessa forma, observa-se que não foram encontradas patentes registradas nem artigos científicos que relatem a aplicação do resíduo têxtil obtido na reciclagem de pneus em compostos elastoméricos, que é o foco deste trabalho, tornando este estudo relevante.

## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 Objetivo Geral**

Avaliar a possibilidade de incorporação de resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus em formulações de compostos elastoméricos para bandas de rodagem, em substituição às cargas reforçantes e semi reforçantes usualmente empregadas, de forma a favorecer a economia circular.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- I. Caracterizar o resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus por meio de técnicas instrumentais de análise, como Espectroscopia no Infravermelho (FTIR), técnicas de microscopia e análises térmicas como Análise Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC);
- II. Incorporar o resíduo de fibra têxtil em formulações de compostos elastoméricos, variando-se a quantidade e forma de preparo do material adicionado;
- III. Avaliar as propriedades físico-mecânicas obtidas nos compostos elastoméricos produzidos.
- IV. Analisar a viabilidade do uso do resíduo têxtil para aplicação como carga em compostos para bandas de rodagem.

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 Materiais**

As matérias-primas utilizadas na realização desse trabalho foram cedidas pela empresa Borrachas Vipal S.A.

Na formulação do composto de borracha foram utilizados os elastômeros copolímero de estireno butadieno (SBR), Polibutadieno (BR) e Borracha Natural (NR). Como aditivos, os ativadores óxido de zinco (ZnO) e ácido esteárico, auxiliar de processo, antioxidantes N-(1,3-dimetil-butil)-N'-fenil-p-fenilenodiamina (6PPD) e 2,2,4-trimetil-1,2-dihidroquinolina (TMQ), óleo aromático, agente de vulcanização enxofre 70%, e aceleradores dissulfeto de tetrametiluram 50% (TMTD), N-ciclohexil-2-benzotiazol sulfenamida 50% (CZ) e difenilguanidina 50% (DPG).

Como cargas, foram utilizados negro de fumo reforçante N339, único utilizado no composto padrão, resíduo têxtil avaliado nesse trabalho, e negro de fumo N550, semi reforçante, para comparativo das propriedades.

O material em análise é um resíduo de fibras têxteis proveniente do processo de reciclagem de pneus (Figura 4), o qual contém resíduos de pó de borracha aderido às fibras.

**Figura 4** – Resíduo de fibra têxtil com pó de borracha da reciclagem de pneus.



Fonte: A autora.

A quantificação do pó de borracha incorporado na fibra têxtil foi realizada mediante peneiramento em triplicata, concluindo-se que no resíduo têxtil há aproximadamente 60% de pó de borracha e 40% de fibra têxtil.

## 5.2 Métodos

O procedimento experimental desse trabalho foi realizado nos laboratórios do Centro de Pesquisa e Tecnologia (CPT) da empresa Borrachas Vipal S.A, e as metodologias utilizadas estão descritas nessa seção.

### 5.2.1 Preparação do Resíduo Têxtil

Foi realizado um processo adicional de separação física do resíduo têxtil, por meio de peneiramento com tela de 80 *mesh*, obtendo-se os materiais que posteriormente também foram utilizados na caracterização e na preparação dos compostos elastoméricos: Fibra têxtil e pó de borracha (Figura 5).

**Figura 5** – Resíduo têxtil separado em fibra têxtil (à esquerda) e pó de borracha (à direita).



Fonte: A autora.

## **5.2.2 Caracterização do Resíduo Têxtil**

### **5.2.2.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)**

A análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) no modo de reflectância total atenuada (ATR) foi realizada utilizando-se equipamento Spectrum 100 da marca Perkin Elmer, com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$ , comprimento de onda entre  $4000$  a  $667\text{ cm}^{-1}$  e 4 varreduras.

### **5.2.2.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)**

A análise de DSC da fibra têxtil foi realizada para avaliar as temperaturas de fusão e cristalização da fibra têxtil, utilizando-se um calorímetro diferencial de varredura Q2000 da marca TA Instruments. Utilizou-se aproximadamente  $2,50\text{ mg}$  de amostra e a análise foi realizada em atmosfera de nitrogênio com rampa de aquecimento/resfriamento de  $20\text{ °C/min}$ , de  $30\text{ °C}$  até  $300\text{ °C}$ , sendo as medidas realizadas no primeiro ciclo de resfriamento e no segundo de aquecimento.

Realizou-se também ensaio para determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) do pó de borracha, com amostra de cerca de  $10\text{ mg}$  e rampa de aquecimento de  $20\text{ °C/min}$ , com primeiro ciclo de aquecimento de  $30\text{ °C}$  até  $150\text{ °C}$  (isoterma por  $5\text{ min}$ ), resfriamento até  $-90\text{ °C}$  (isoterma por  $5\text{ min}$ ) e aquecimento até  $150\text{ °C}$ .

### **5.2.2.3 Análise Termogravimétrica (TGA)**

A análise de TGA da fibra têxtil foi realizada em equipamento Q5000 da marca TA Instruments, em atmosfera de nitrogênio e rampa de aquecimento de  $20\text{ °C/min}$ , de  $50\text{ °C}$  até

900 °C. Também foi realizada análise da fibra com nitrogênio até 800 °C e após, em atmosfera oxidante até 1000 °C.

A análise termogravimétrica do pó de borracha foi realizada em rampa de aquecimento de 20 °C/min de 50 °C a 550 °C, em atmosfera de nitrogênio. Após, resfriou-se até 300 °C, com troca de atmosfera para ar sintético, e aqueceu-se novamente até 800 °C.

#### 5.2.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O resíduo resultante da degradação térmica do pó de borracha por TGA, em atmosfera de nitrogênio e ar sintético, foi analisado por MEV com equipamento modelo TM3000 da marca Hitachi acoplado a energia dispersiva de raios-X (EDS), para análise elementar superficial.

#### 5.2.3 Preparação dos Compostos Elastoméricos

Foram produzidos oito compostos elastoméricos contendo resíduo de fibra têxtil, fibra têxtil e pó de borracha como carga, os quais foram denominados conforme tabela 1. O composto padrão contém 70 phr de negro de fumo N339, e nos outros compostos substituiu-se essa carga pelas quantidades descritas dos demais materiais em análise.

**Tabela 1** – Denominação dos compostos elastoméricos em função da carga adicionada.

<b>Composto</b>	<b>Descrição</b>
Padrão	70 phr N339
R5	65 phr N339 + 5 phr Resíduo Têxtil
R10	60 phr N339 + 10 phr Resíduo Têxtil
R20	50 phr N339 + 20 phr Resíduo Têxtil
R40	30 phr N339 + 40 phr Resíduo Têxtil
F40	30 phr N339 + 40 phr Fibra
B40	30 phr N339 + 40 phr Pó de Borracha
N40	30 phr N339 + 40 phr N550

Fonte: A autora.

A formulação dos compostos utilizados está apresentada na tabela 2, com quantidades em phr (partes por cem de borracha, em inglês, *parts for hundred of rubber*).

Tabela 2 – Formulação dos compostos elastoméricos analisados.

Componente	Quantidade (phr)							
	Padrão	R5	R10	R20	R40	F40	B40	N40
SBR	40	40	40	40	40	40	40	40
BR	10	10	10	10	10	10	10	10
NR	50	50	50	50	50	50	50	50
N339	70	65	60	50	30	30	30	30
N550	0	0	0	0	0	0	0	40
Fibra têxtil com pó de borracha	0	5	10	20	40	0	0	0
Fibra têxtil	0	0	0	0	0	40	0	0
Pó de borracha	0	0	0	0	0	0	40	0
Óxido de Zinco	3	3	3	3	3	3	3	3
Ácido esteárico	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Auxiliar de Processo	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
6PPD	1	1	1	1	1	1	1	1
TMQ	1	1	1	1	1	1	1	1
Óleo	24	24	24	24	24	24	24	24
Enxofre 70%	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
TMTD 50%	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
CZ 50%	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
DPG 50%	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Fonte: A autora.

O processo de preparação dos compostos elastoméricos foi realizado inicialmente em misturador fechado de laboratório (Banbury) da marca Copé, com capacidade para 1,15 kg e velocidade dos rotores de 500 rpm. Primeiramente, adicionou-se os elastômeros, seguido da adição dos aditivos (ativadores de vulcanização, auxiliares de processo e antioxidantes) e das cargas (negro de fumo e fibra têxtil, dependendo do composto), os quais ficaram 20 s em processo de mistura. Após, foram realizadas duas etapas de limpeza, em que o pilão sobe e desce, fazendo com que o material fique concentrado na câmara de mistura, minimizando perdas de material. O óleo foi então adicionado e realizou-se mais um ciclo de mistura de 20 s. Foram realizadas mais duas etapas de limpeza e o material foi descarregado ao atingir 150 °C na câmara interna do Banbury.

Na sequência, o material foi homogeneizado por 12 vezes em misturador aberto de laboratório (cilindro) da marca Copé, em temperatura de 60 °C e razão de fricção entre os cilindros de 1:1,25.

O *masterbatch*, produzido com elastômeros, cargas, aditivos e óleo, permaneceu cerca de 16 h em repouso e retornou ao Banbury para melhor dispersão da fibra têxtil na matriz polimérica, com descarga em 130 °C. A adição do agente de vulcanização e dos aceleradores ocorreu no cilindro, com os mesmos parâmetros utilizados anteriormente.

Os corpos de prova para a realização dos ensaio físico-mecânicos foram vulcanizados em prensa de laboratório a 150 °C, utilizando moldes de acordo com o ensaio físico-mecânico a ser realizado.

## **5.2.4 Propriedades dos Compostos Elastoméricos**

Os oito compostos elastoméricos produzidos foram avaliados de acordo com suas propriedades reológicas e físico-mecânicas. As metodologias utilizadas nos ensaios estão descritas nessa seção.

### **5.2.4.1 Reometria**

O ensaio de reometria foi realizado utilizando-se um reômetro de cavidade oscilante MDR 2000 da marca Alpha Technologies, com massa do composto de aproximadamente 6 g e segundo norma ASTM D 5289.<sup>23</sup>

A análise de todos os compostos foi realizada a 150 °C por 20 min, e a curva reométrica fornece os parâmetros de torque máximo (MH), torque mínimo (ML), tempo de segurança ou *scorch* (ts2), que corresponde ao ML somado de 2 lbf.in para o arco de 1°, tempo para atingir 10 % do torque máximo (t10) e tempo ótimo de vulcanização (t90) do composto elastomérico.

### **5.2.4.2 Viscosidade Mooney**

A determinação da viscosidade Mooney ocorre em função da resistência do composto ao cisalhamento.<sup>7</sup> A medida foi realizada segundo norma ASTM D 1646<sup>24</sup> em Viscosímetro Mooney MV 2000 da marca Alpha Technologies a 100 °C, utilizando-se rotor grande durante 5 minutos (1 min de aquecimento e 4 min de ensaio).

#### **5.2.4.3 Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**

As análises de DMA foram realizadas no equipamento DMA Q800 da marca TA Instruments, para análise do módulo de armazenamento dos compostos, determinação da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e da  $\tan \delta$  a 0 °C e 60 °C, com objetivo de avaliar as propriedades de resistência ao rolamento e aderência ao molhado dos compostos para uso em bandas de rodagem. Os ensaios foram realizados no modo de tensão sob deformação de 0,06 %, frequência de 10 Hz e rampa de aquecimento de 2 °C/min de -100 °C a 100 °C.

#### **5.2.4.4 Densidade**

A determinação da densidade dos compostos de borracha vulcanizados foi realizada através do método hidrostático, utilizando-se balança de densidade MD3005 da marca Alfa Mirage, segundo norma ASTM D 297.<sup>25</sup>

#### **5.2.4.5 Dureza**

A dureza dos compostos é definida como a resistência que os mesmos oferecem à penetração de um instrumento de forma e carga determinadas.<sup>7</sup> Utilizou-se um durômetro Shore A da marca Bareiss, com suporte para as medidas, que foram realizadas em três pontos do corpo de prova, de acordo com a norma ASTM D 2240.<sup>26</sup>

#### **5.2.4.6 Resiliência**

A resiliência de um composto é a razão entre a energia consumida pelo material para recuperar-se após deformação e a energia necessária para produzir a deformação.<sup>7</sup> O ensaio foi realizado pelo método por impacto, segundo norma DIN 53512<sup>27</sup>, através da queda de um peso sobre o corpo de prova e determinação da porcentagem de retorno do mesmo. O resultado é a média entre dois corpos de prova do composto vulcanizado, expresso em porcentagem.

#### **5.2.4.7 Desgaste por abrasão**

No ensaio de desgaste por abrasão, avalia-se a perda de volume do composto elastomérico, quando o corpo de prova é friccionado em uma lixa giratória com abrasividade definida que percorre o caminho de 40 metros. É realizado segundo a norma DIN ISO 4649<sup>28</sup> e o resultado é a média entre três corpos de prova.

#### **5.2.4.8 Análise de dispersão**

A análise de dispersão da carga no composto de borracha foi realizada utilizando-se o equipamento Dispergrader+ da marca Dynisco/Alpha Technologies, segundo a norma ISO 11345.<sup>29</sup> Foram avaliados três pontos da amostra com 100 vezes de aumento.

#### **5.2.4.9 Resistência à tração**

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D 412<sup>30</sup>, em um equipamento Instron 4467, com célula de carga de 1 kN e velocidade de afastamento de 500 mm/min. O resultado é a mediana das cinco medidas realizadas em corpos de prova em formato de halteres tipo C.

A tensão na ruptura é a razão entre a força necessária para romper o corpo de prova e a área da sua seção original. O alongamento na ruptura é expresso em percentual e refere-se à distância entre os dois pontos marcados ao início do teste no momento da ruptura. Os módulos de 100 %, 200 % e 300 % são a força por unidade de área da seção original necessária para obter tal alongamento.<sup>7</sup>

#### **5.2.4.10 Resistência ao rasgamento**

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D 624<sup>31</sup>, em equipamento Instron 4467, com célula de carga de 1 kN e velocidade de afastamento de 500 mm/min. O resultado é a mediana do ensaio realizado em cinco corpos de prova tipo C, e refere-se à força por unidade de espessura necessária para iniciar um rasgo na direção perpendicular à força aplicada.<sup>7</sup>

#### **5.2.4.11 Deformação Permanente à Compressão (DPC)**

Realizou-se o ensaio de DPC segundo norma ASTM D 395<sup>32</sup>, em que os corpos de prova foram comprimidos por 22 h a 70 °C sob deformação de 25 %, sendo medida a espessura antes e após 30 min de repouso depois da compressão. O teste possibilita avaliar a propriedade do composto de manter as propriedades elásticas após longos períodos de compressão.<sup>7</sup>

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

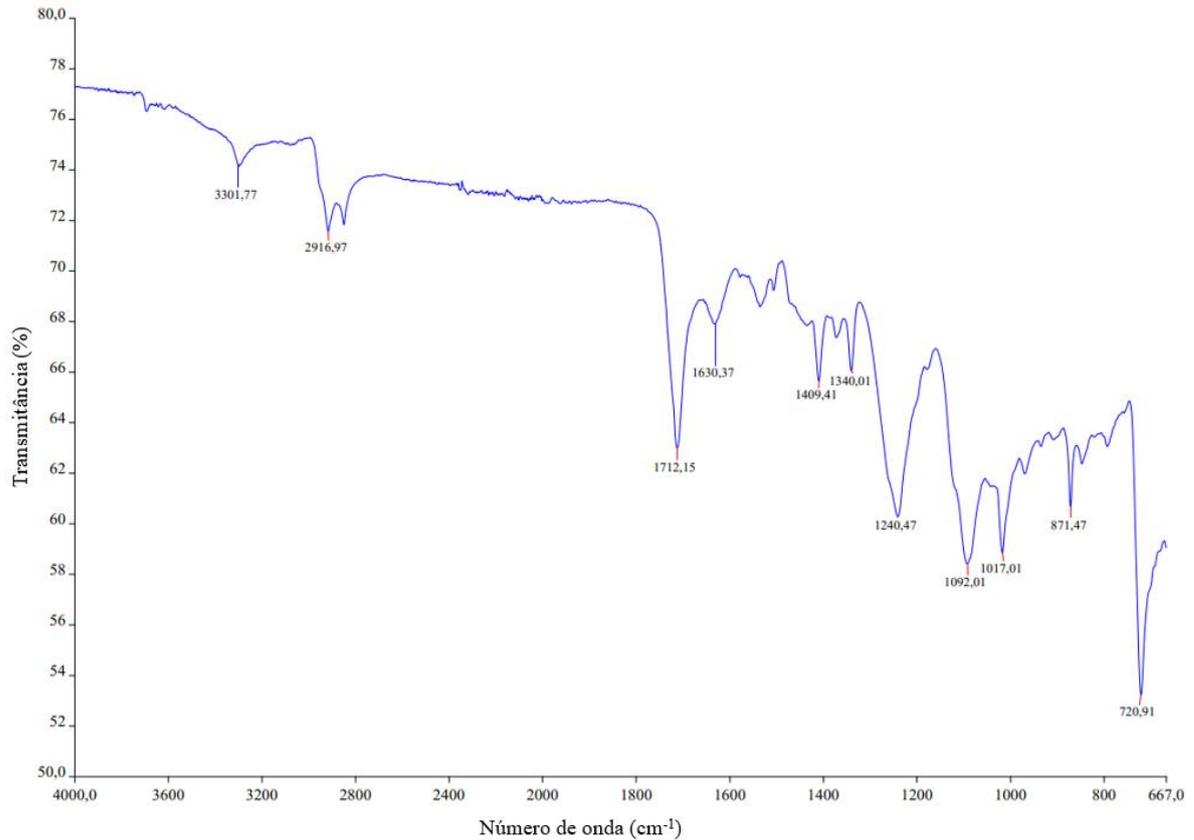
Nessa seção estão escritos os resultados e discussões referentes à caracterização do resíduo têxtil da reciclagem de pneus e avaliação das propriedades dos compostos elastoméricos produzidos utilizando o resíduo como carga.

## 6.1 Caracterização do Resíduo Têxtil

### 6.1.1 Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)

Os espectros de infravermelho por ATR da fibra têxtil foram obtidos para três pontos da amostra, e revelaram similaridade, estando um deles apresentado na figura 6.

**Figura 6** – Espectro de FTIR-ATR da fibra têxtil.



Fonte: A autora.

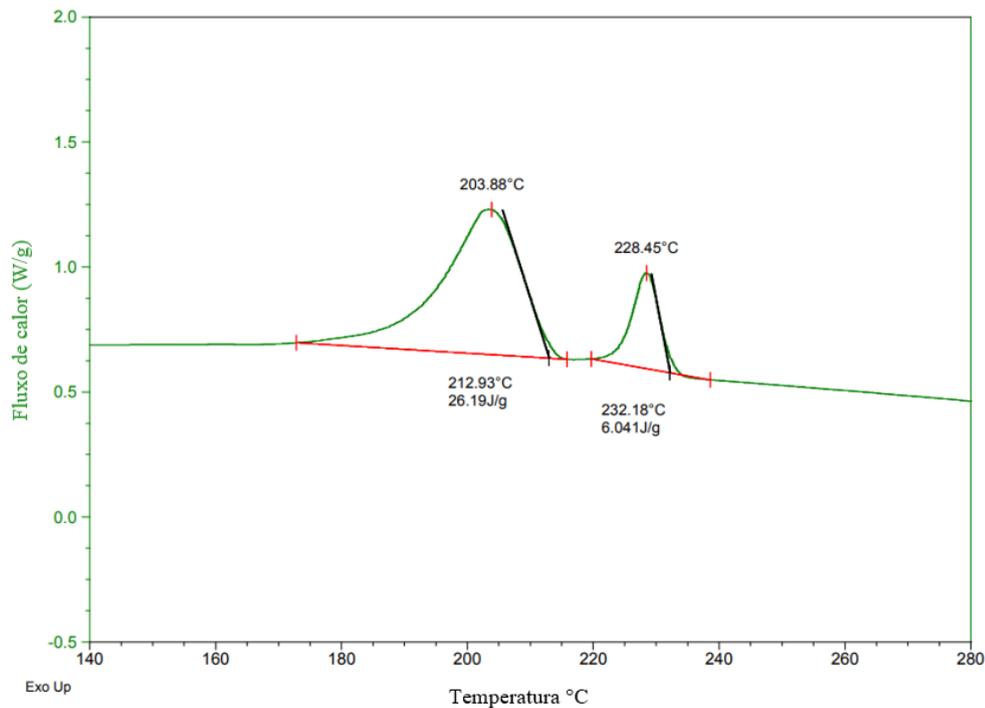
Observa-se a presença de banda de absorção em  $1715\text{ cm}^{-1}$ , referente à conjugação da carbonila de ésteres com fenila, e absorções na faixa de  $1400\text{ a }1600\text{ cm}^{-1}$  de estiramento C=C de anel aromático, as quais indicam que o material que se encontra em maior quantidade no resíduo têxtil da reciclagem de pneus é poliéster, provavelmente poli(tereftalato de etileno).<sup>33</sup>

Entretanto, também podem ser observadas bandas de absorção de menor intensidade condizentes com presença de pequena quantidade de poliamida 6,6, como banda de absorção em  $3200\text{ cm}^{-1}$ , referente ao estiramento N-H de amidas secundárias e banda em  $1630\text{ cm}^{-1}$ , referente à sobreposição do estiramento C=O e dobramento N-H.<sup>33</sup>

### 6.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As curvas de DSC obtidas para os três pontos da amostra de fibra têxtil mostraram-se idênticas, e a curva referente ao resfriamento da amostra está apresentada na figura 7.

**Figura 7** – Curva de DSC da fibra têxtil referente ao primeiro ciclo de resfriamento, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio.



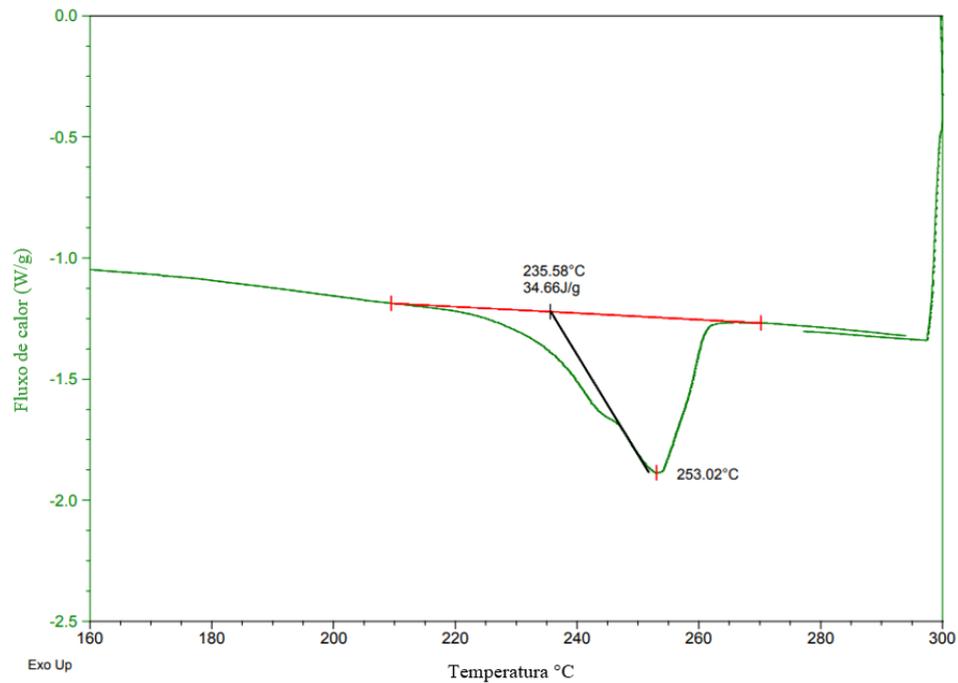
Fonte: A autora.

No resfriamento do composto, observa-se a presença de dois eventos exotérmicos, indicando duas temperaturas iniciais de cristalização em 232,18 °C e 212,93 °C. Na literatura, a temperatura de cristalização do nylon 6,6 é 230 °C e do poliéster PET é de 194 °C, valores condizentes aos dois sinais observados.<sup>34; 35</sup>

Pela entalpia de cristalização ( $\Delta H_c$ ), pode-se realizar uma estimativa do percentual de cada polímero no resíduo da reciclagem de pneus, obtendo-se o valor de 18,74 % para o nylon 6,6 e de 81,26 % para o PET.

Conforme pode ser visualizado na figura 8, no segundo ciclo de aquecimento, observa-se um pico de fusão bimodal com um ombro a 245 °C e uma temperatura máxima de fusão em 253 °C, indicando a presença de diferentes tipos de polímeros. Segundo a literatura, a temperatura de fusão do PET ocorre em 251 °C, enquanto o nylon 6,6 apresenta dois picos de fusão em 243 °C e 256 °C, demonstrando que provavelmente há uma mistura dos polímeros no resíduo de fibra têxtil em análise.<sup>35; 36</sup>

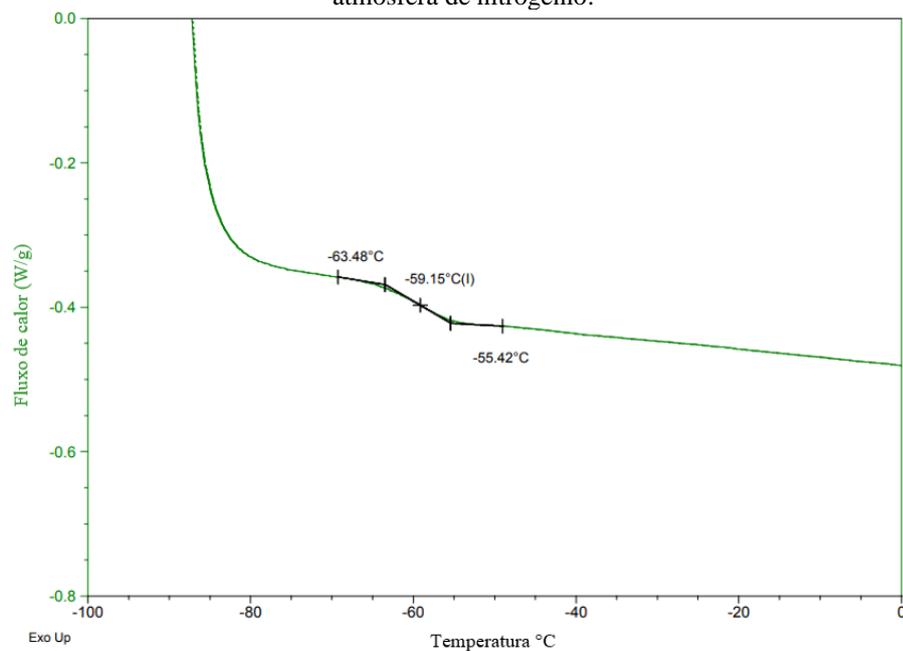
**Figura 8** – Curva de DSC da fibra têxtil referente ao segundo ciclo de aquecimento, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio.



Fonte: A autora.

Também foi realizada análise de DSC para determinação da temperatura de transição vítrea (T<sub>g</sub>) do pó de borracha, conforme apresentado na figura 9.

**Figura 9** – Curva de aquecimento para determinação da T<sub>g</sub> do pó de borracha, sob taxa de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio.



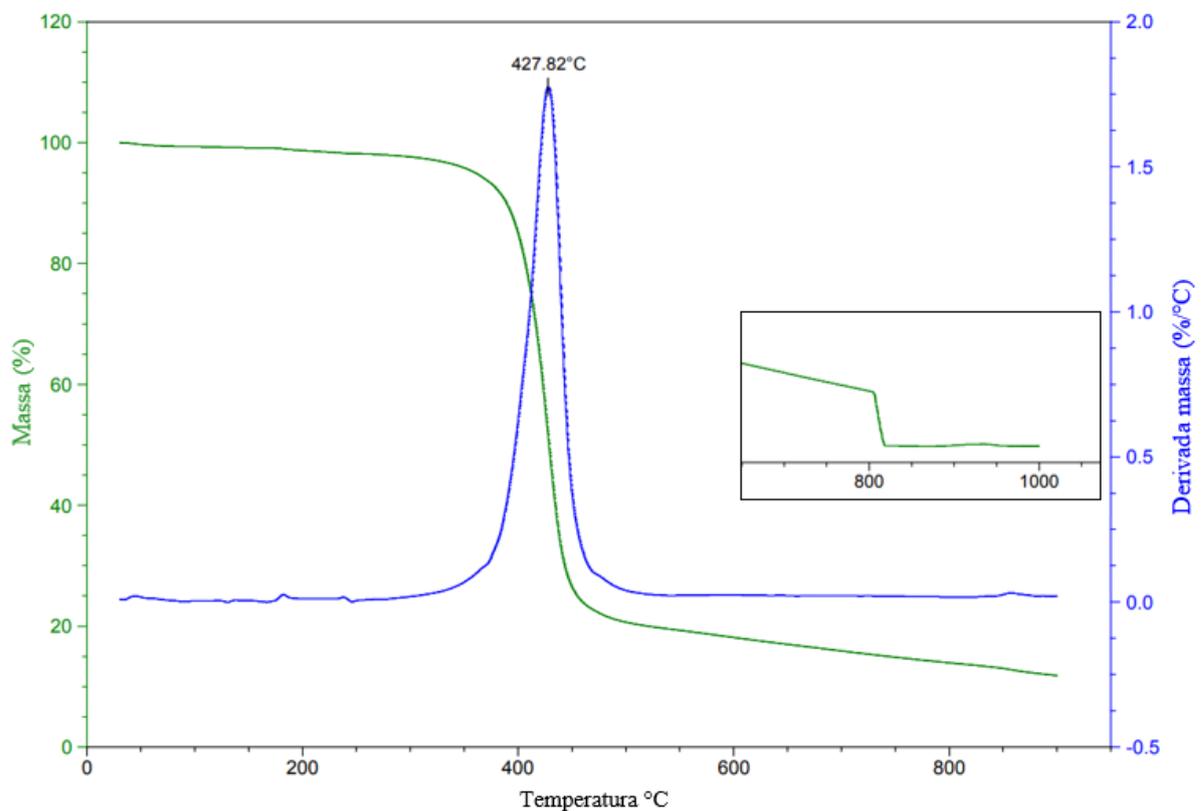
Fonte: A autora.

O valor obtido para a  $T_g$  do pó de borracha foi de  $-59,15\text{ }^\circ\text{C}$ . De acordo com a literatura, valores de  $T_g$  na faixa de  $-61\text{ }^\circ\text{C}$  a  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  são típicos de compostos vulcanizados contendo borracha natural (NR) com diferentes graus de reticulação.<sup>37</sup>

### 6.1.3 Análise Termogravimétrica (TGA)

O termograma da fibra têxtil em atmosfera inerte de nitrogênio mostrou-se similar para as três amostras, estando um deles apresentado na figura 10.

**Figura 10** – Análise Termogravimétrica da fibra têxtil sob aquecimento de  $20\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  em atmosfera de nitrogênio. Gráfico *inset* realizado nas mesmas condições, com mudança para atmosfera de ar sintético em  $800\text{ }^\circ\text{C}$ .



Fonte: A autora.

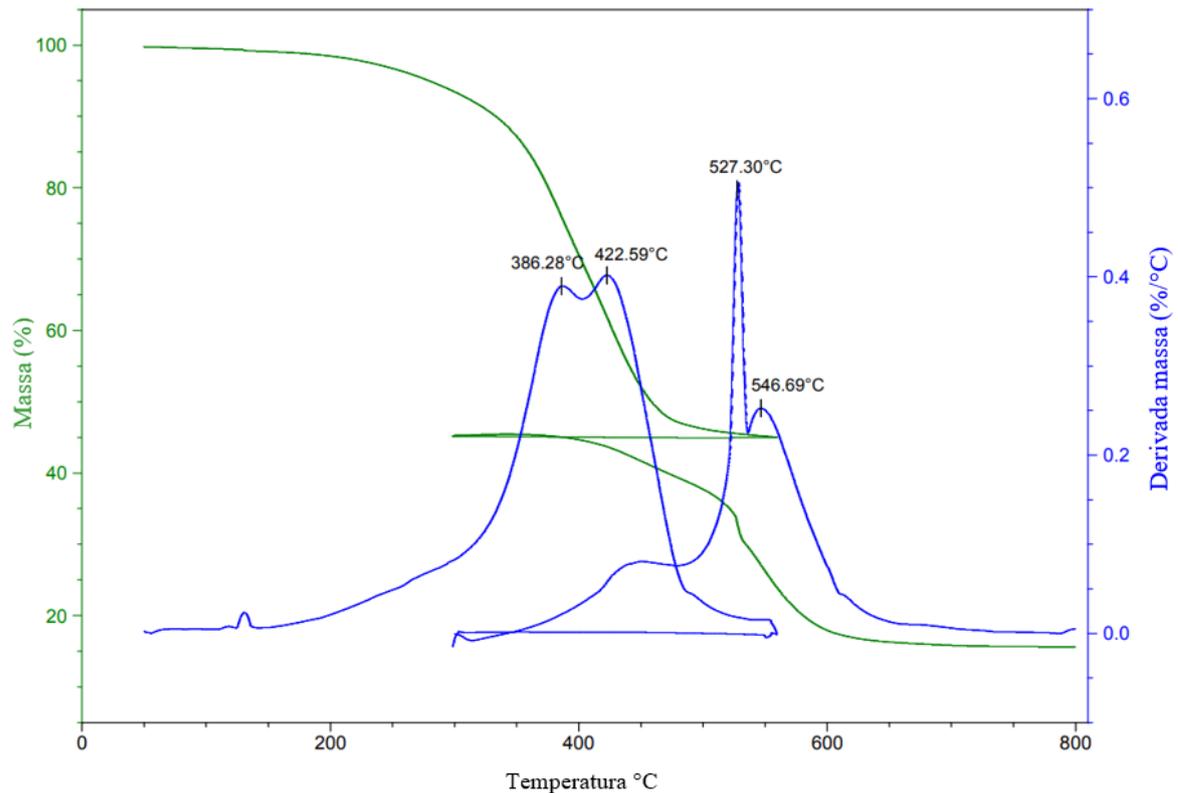
De acordo com a literatura, o PET apresenta a primeira perda de massa entre  $350\text{ }^\circ\text{C}$  e  $510\text{ }^\circ\text{C}$ , representando 88% da massa inicial e gerando um resíduo carbonizado de 12%, que é completamente queimado ao ocorrer a troca para atmosfera oxidante entre  $800\text{ }^\circ\text{C}$  e  $840\text{ }^\circ\text{C}$ .<sup>38</sup>

O perfil de degradação obtido para a fibra têxtil apresenta similaridade ao PET, com a primeira perda de massa de cerca de 87%, e a segunda de 10%, após troca para atmosfera de ar sintético em  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Dessa forma, relacionando-se com os dados da literatura, pode-se estimar

a quantidade de PET presente na amostra de fibra têxtil como sendo 83%, corroborando com o observado na análise por DSC.

As análises termogravimétricas realizadas para as três amostras do pó de borracha seguiram padrão de degradação térmica similar ao apresentado na figura 11.

**Figura 11** – Análise termogravimétrica (TGA) do pó de borracha sob aquecimento de 20 °C/min em atmosfera de nitrogênio até 550 °C e com troca para ar sintético em 300 °C.



Fonte: A autora.

Em atmosfera inerte, na faixa de temperatura de 50 a 250°C, observa-se primeiramente a perda de massa referente aos compostos voláteis, como óleos, auxiliares de processo e aceleradores. Após, são observados dois processos de perda de massa, referentes à degradação de elastômeros, que resultam em duas temperaturas de máximo de perda a 386 °C e 422 °C, indicando a presença de uma mistura de borrachas. De acordo com a literatura, a NR e a SBR apresentam um máximo de perda a 378 °C e 458 °C, quando analisadas a uma taxa de 10 °C min<sup>-1</sup>.<sup>39</sup>

Após resfriamento até 300 °C, ocorre a mudança para atmosfera oxidante, na faixa de 300 a 790 °C, onde observa-se dois processos de perda de massa, entre 500 e 650 °C, referentes à degradação de diferentes tipos de negro de fumo com máximos de perda de massa em 527 °C e 546 °C.

O percentual de resíduo restante em atmosfera oxidante foi de 15,63 %, sendo este um valor elevado. Dessa forma, foi realizada análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplado a espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS) desse resíduo, para avaliar a composição elementar superficial.

#### 6.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na tabela 3 estão apresentados os resultados da composição elementar superficial, obtidos por MEV/EDS, do resíduo da análise termogravimétrica do pó de borracha, realizada em atmosfera de nitrogênio e ar sintético.

**Tabela 3** – Análise elementar por MEV/EDS do resíduo da análise termogravimétrica do pó de borracha.

<b>Elemento</b>	<b>Peso (%)</b>
Alumínio	4,12
Silício	12,84
Enxofre	1,39
Cálcio	2,68
Ferro	27,79
Zinco	17,50
Oxigênio	33,68

Fonte: A autora.

A presença de óxidos metálicos no pó de borracha incorporado ao resíduo de fibra têxtil pode ser justificada pelo fato de que, no processo de reciclagem, os pneus são fragmentados juntamente com os cinturões de aço presentes na estrutura, que são posteriormente removidos por atração magnética. Assim, restam no pó de borracha resíduos de óxidos inorgânicos presentes nas ligas de aço, como o ferro e alumínio. O silício encontrado é proveniente da utilização de sílica como carga em compostos para bandas de rodagem de pneus, enquanto o enxofre e o zinco são identificados devido à adição do agente e ativador de vulcanização adicionados aos compostos elastoméricos.

## 6.2 Propriedades dos Compostos Elastoméricos

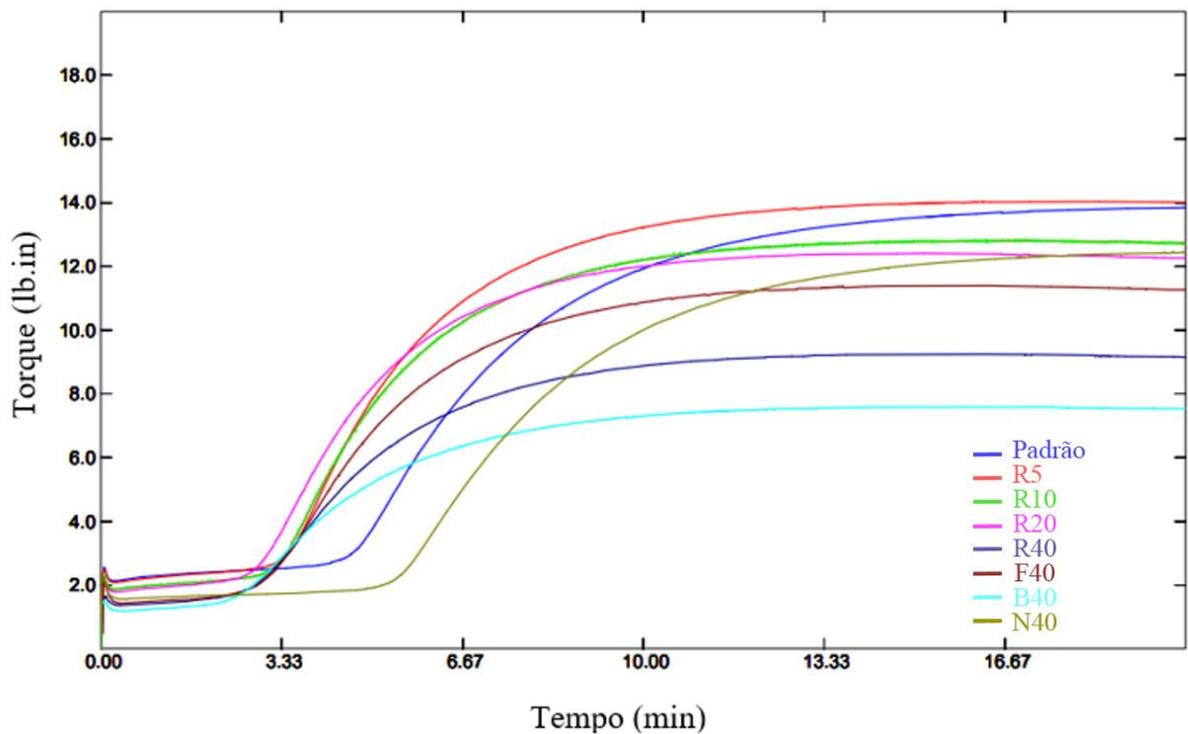
### 6.2.1 Propriedades Reométricas

A curva reométrica fornece informações a respeito das características de processamento e vulcanização do composto elastomérico, por meio de um gráfico de torque em função do

tempo.<sup>7</sup> Assim, é uma análise importante em estudos de desenvolvimento de novos compostos, como no caso desse trabalho, na substituição de cargas na formulação. Possibilita avaliar como será o comportamento do material em estudo durante o processo fabril, como nas etapas de extrusão e calandragem, quando aplicadas. Também avalia a possibilidade de pré vulcanização do composto durante o processamento e o tempo ótimo necessário para a vulcanização.

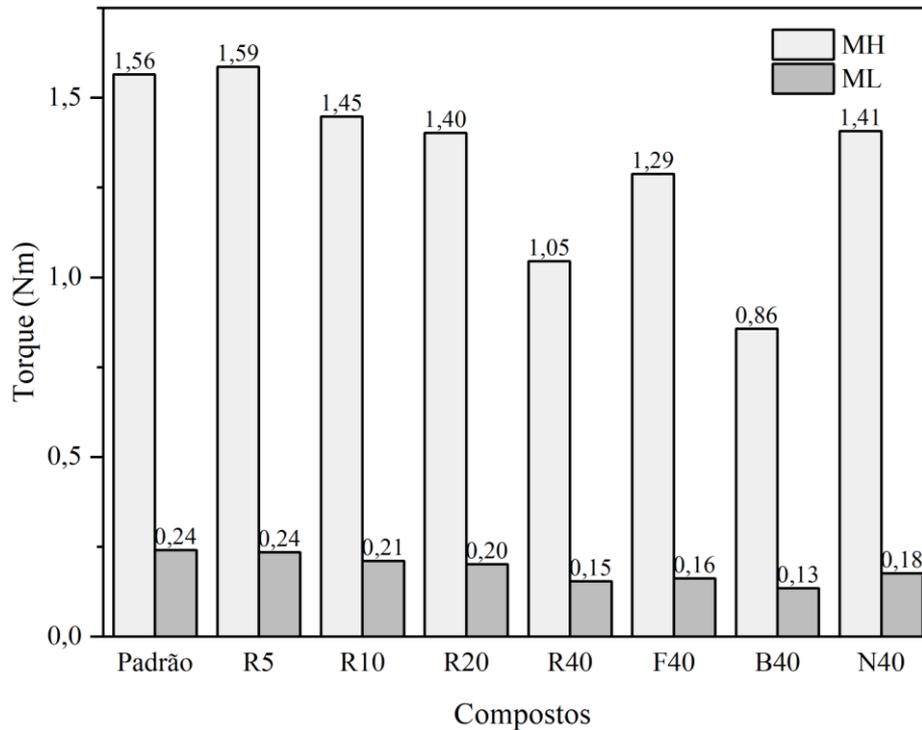
Na figura 12 podem ser visualizadas as curvas reométricas obtidas para os oito compostos analisados, nas quais observa-se claramente que todas as formulações com adição de resíduo de fibra têxtil como carga apresentaram um processo acelerado de cura.

**Figura 12** – Curvas reométricas relativas ao composto padrão e aos compostos em análise.



Fonte: A autora.

Na figura 13 estão apresentados os valores de torque máximo (MH) e torque mínimo (ML) para cada um dos compostos avaliados.

**Figura 13** – Valores de torque máximo (MH) e torque mínimo (ML) dos compostos avaliados.

Fonte: A autora.

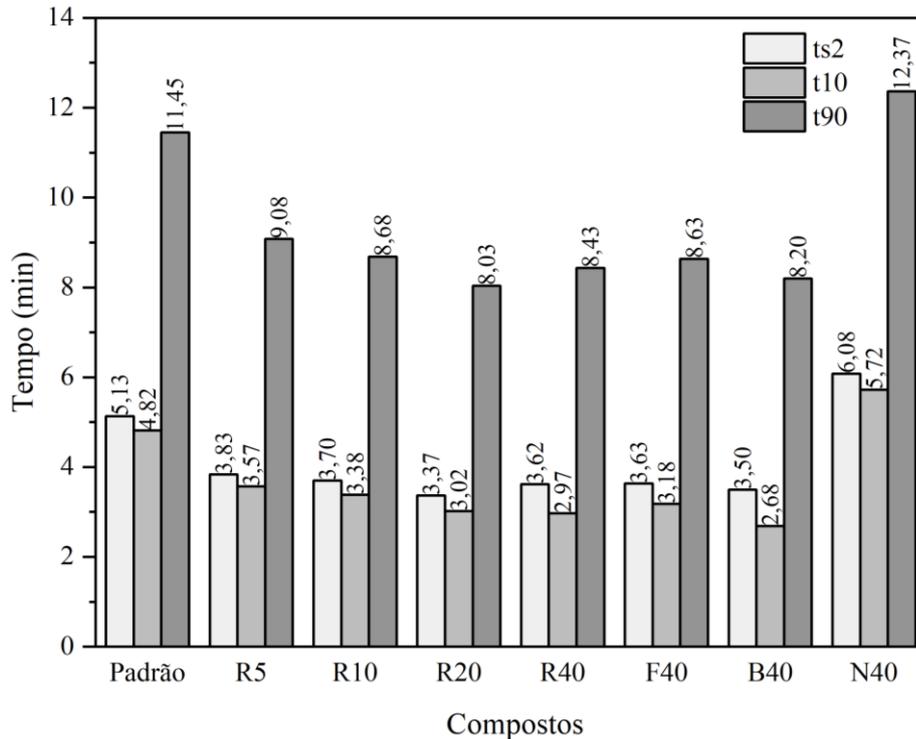
O torque máximo (MH) relaciona-se com o módulo ou rigidez do composto vulcanizado, podendo-se através desse estimar indiretamente a densidade de ligações cruzadas formadas.<sup>7; 40</sup>

O composto R5, com adição de 5 phr de resíduo de fibra têxtil, não apresentou alteração significativa no valor do torque máximo (MH) em relação ao composto padrão. Os compostos R10 e R20 demonstraram tendência de diminuição pela adição da carga, devido à redução da rigidez do composto vulcanizado. O composto R40 apresentou valor ainda menor de MH, por possuir maior quantidade de resíduo de fibra têxtil adicionado. O composto B40 foi o que apresentou menor valor de torque máximo, enquanto o composto F40 apresentou valor superior à este, mas inferior ao R20. Isso ocorre pelo fato de que as cargas possuem rigidez diferente, proporcionando grau de reforço distinto, sendo que a adição de fibra têxtil propicia maior rigidez ao composto, enquanto a mesma é diminuída com a adição do pó de borracha. O resíduo de fibra têxtil, por conter pó de borracha na quantidade de 60% e fibra têxtil de 40% resulta em uma redução gradual da rigidez, pela presença da fibra têxtil, que auxilia em manter a rigidez do composto. O composto N40, ao qual foi adicionado 40 phr de negro de fumo com propriedade semi reforçante, apresentou torque máximo similar ao composto R20, com 20 phr de resíduo de fibra têxtil.

O torque mínimo (ML) reflete de forma aproximada a viscosidade do composto na temperatura de vulcanização analisada.<sup>7</sup> Os compostos apresentaram valores semelhantes de torque mínimo, com exceção dos compostos R40 (40 phr fibra com pó de borracha), F40 (40 phr fibra) e B40 (40 phr pó de borracha), que apresentaram valores menores.

Na figura 14 estão apresentados os tempos de scorch ( $t_{s2}$ ),  $t_{10}$  e  $t_{90}$  dos oito compostos.

**Figura 14** – Valores de  $t_{s2}$ ,  $t_{10}$  e  $t_{90}$  dos compostos.



Fonte: A autora.

Pela análise do tempo de pré vulcanização ( $t_{s2}$ ) obtido para os compostos, pode-se verificar a redução no tempo de segurança do processo com a adição da carga proveniente da reciclagem de pneus, o que pode ser visualizado no composto R5 em relação ao padrão, sendo que os demais compostos mantêm comportamento similar a este. O composto N40, com adição de negro de fumo semi reforçante, apresentou valor de  $t_{s2}$  maior que o padrão.

O tempo ótimo de vulcanização ( $t_{90}$ ) dos compostos seguiu o mesmo comportamento, apresentando maior aceleração com a adição de 5 phr de resíduo de fibra têxtil (R5), e não havendo alterações significativas entre os demais compostos. O composto N40 apresentou valor maior que o padrão.

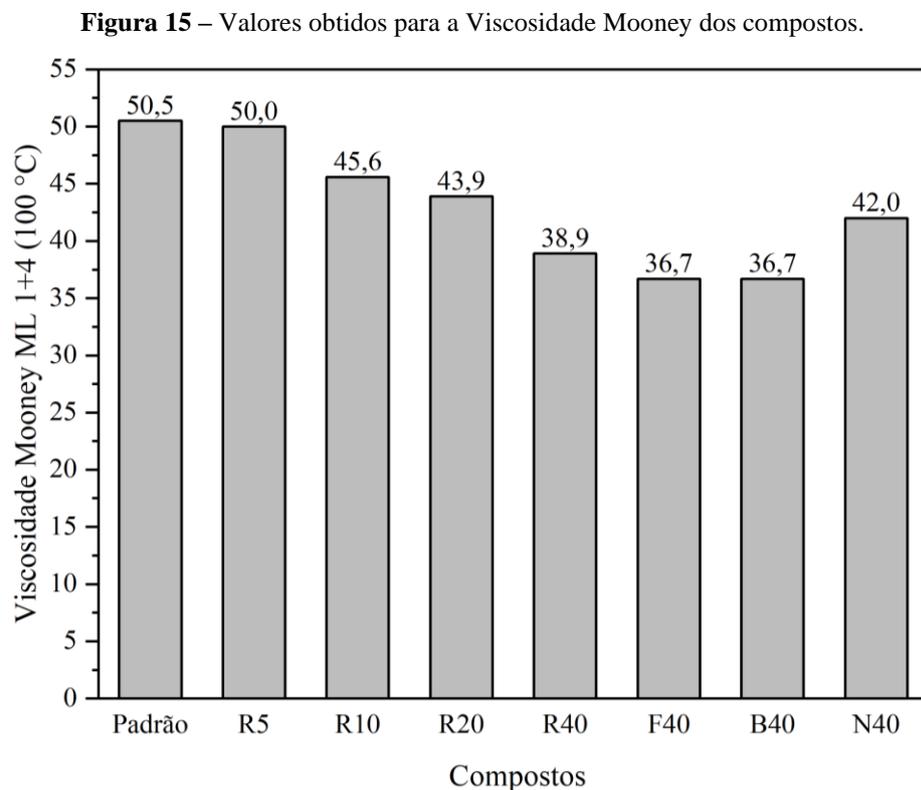
A aceleração do processo de cura com a adição do resíduo de fibra têxtil, independente da forma de preparo do material, visualizada na redução no tempo de *scorch* e no  $t_{90}$ , possivelmente decorre da adição de óxidos inorgânicos ativadores de vulcanização, como o

ZnO, e agente de vulcanização (S), presentes no pó de borracha, conforme observado na análise por EDS.

Entretanto, podem ser realizados ajustes mediante alterações no sistema de vulcanização do composto, a fim de que os compostos com adição do resíduo de fibra têxtil, fibra têxtil e pó de borracha se assemelhem mais ao composto padrão, em relação aos parâmetros de  $t_{s2}$  e  $t_{90}$ .

### 6.2.2 Viscosidade Mooney

Na figura 15 estão apresentados os valores de Viscosidade Mooney encontrados para os compostos.



Fonte: A autora.

A Viscosidade Mooney é a medida da resistência ao cisalhamento de compostos de borracha não vulcanizados, sendo assim um indicativo da processabilidade dos mesmos quando sujeitos a processos de extrusão, por exemplo.<sup>7</sup>

O composto R5, com adição de 5 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, não apresentou alteração na viscosidade, em comparação ao composto padrão. A partir da adição de 10 phr de resíduo de fibra têxtil, observa-se uma tendência de diminuição da viscosidade.

Os compostos R40, F40 e B40 apresentaram as menores viscosidades, sendo também semelhantes entre si, o que corrobora com o observado nos valores de torque mínimo. Assim,

observa-se que a adição de 40 phr da carga, independentemente de ser resíduo de fibra têxtil, fibra têxtil ou pó de borracha, resulta na diminuição da viscosidade, devido à menor resistência ao fluxo e assim, maior fluidez do composto.

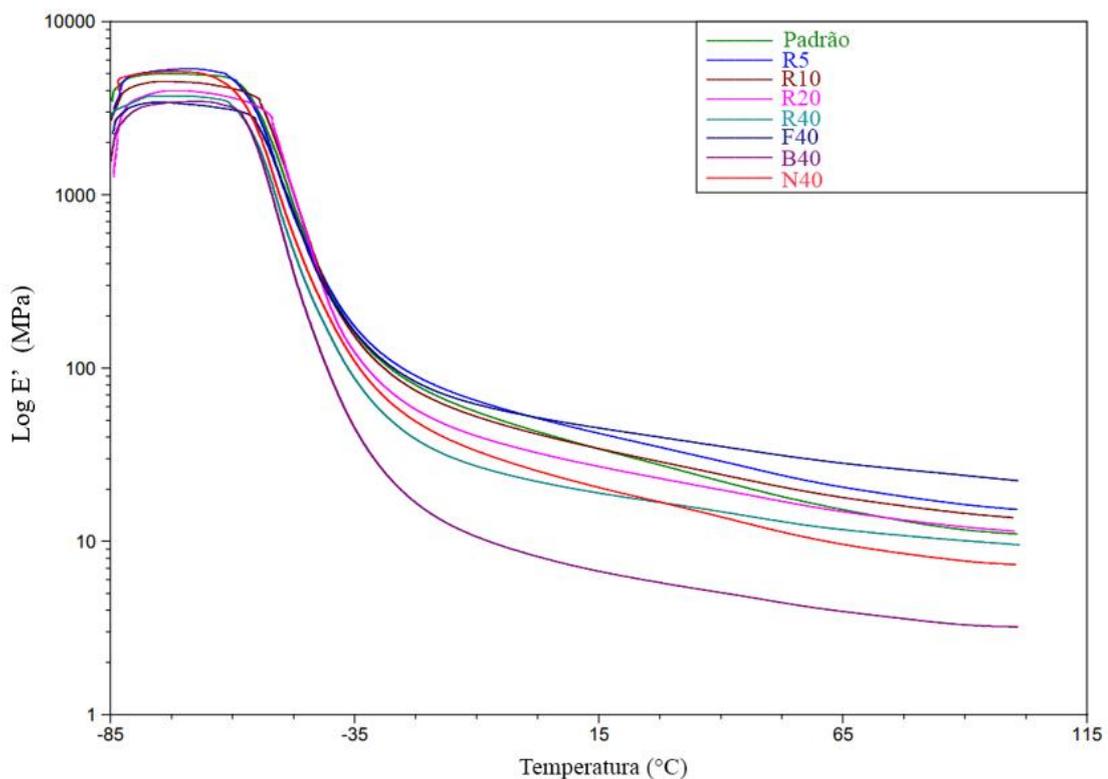
O composto N40 com adição de 40 phr de negro de fumo N550 com propriedade semi reforçante apresentou valor de viscosidade semelhante ao composto R20, com adição de 20 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha.

### 6.2.3 Análise Térmica Dinâmico-Mecânica (DMA)

A análise de DMA fornece informações a respeito do módulo de armazenamento ( $E'$ ), do módulo de perda ( $E''$ ) e do amortecimento mecânico ou atrito interno ( $\tan \delta = E''/E'$ ) de um material, quando sujeito a uma solitação dinâmica.<sup>41</sup>

Na figura 16 estão apresentados os gráficos do logaritmo do módulo elástico ( $E'$ ) em função da temperatura.

**Figura 16** – Logaritmo do módulo de armazenamento em função da temperatura para os compostos analisados.



Fonte: A autora.

A análise do módulo de armazenamento auxilia na determinação do grau de reticulação de um composto elastomérico, com base na região do platô elástico, que ocorre em temperaturas

acima da  $T_g$  dos compostos. O módulo no platô elástico é diretamente proporcional à densidade de reticulações, para compostos elastoméricos não carregados.<sup>42</sup>

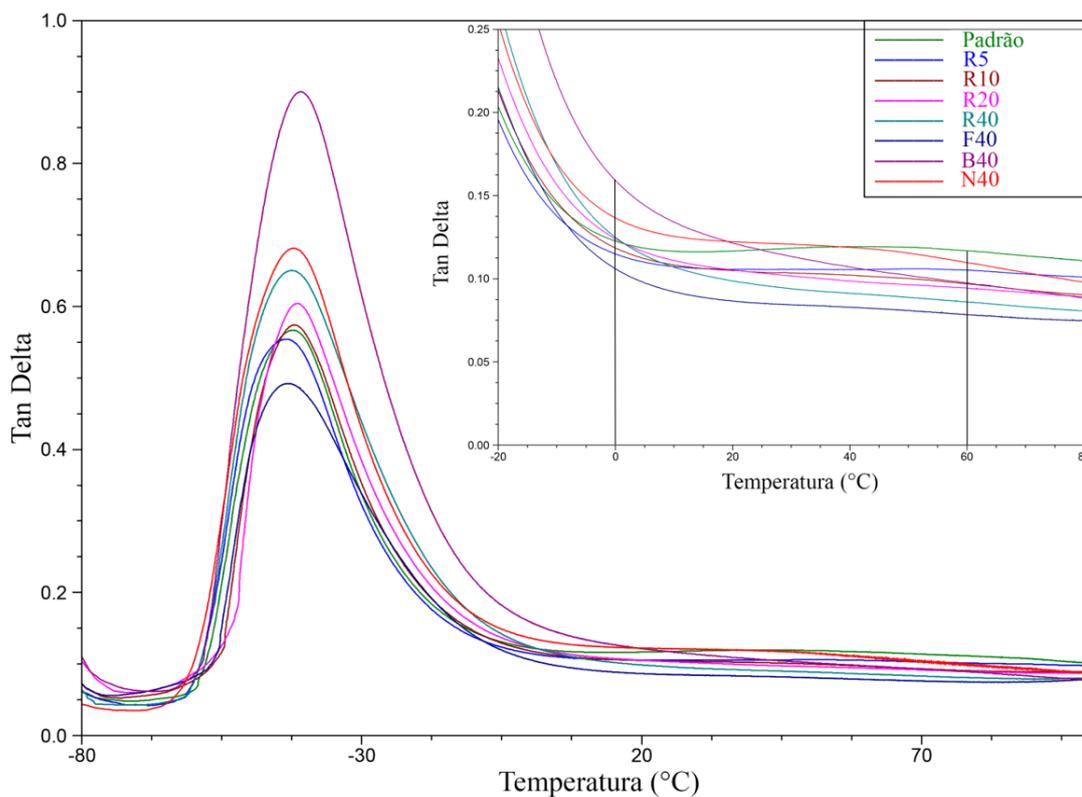
No caso de compostos elastoméricos com carga, esta também irá influenciar no valor de módulo de armazenamento no platô elástico. O composto B40 apresentou o menor platô elástico, indicando menor resistência à deformação, enquanto o composto F40 apresentou o maior platô elástico e assim, maior rigidez.

Com o aumento das quantidades de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha adicionado aos compostos, observa-se menor platô elástico e assim, menor rigidez e/ou densidade de ligações cruzadas.

A análise por DMA também é um indicativo de algumas características do desempenho dos compostos para que sejam utilizados em bandas de rodagem. Para que determinado composto apresente maior aderência ao molhado, deve apresentar maior valor da  $\tan \delta$  em temperaturas de  $-20^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ . Já o valor de  $\tan \delta$  na faixa de  $50^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$ , relaciona-se com a resistência ao rolamento, sendo que menores valores são desejáveis para resultar em economia de combustível.<sup>43; 44</sup>

A figura 17 apresenta as curvas sobrepostas de  $\tan \delta$  de todos os compostos avaliados.

**Figura 17** – Sobreposição das curvas de  $\tan \delta$  obtidas por DMA para os compostos.



Fonte: A autora.

Na tabela 4 estão apresentados os resultados de  $T_g$  e  $\tan \delta$  a 0 °C e a 60 °C para os compostos avaliados, obtidos pela análise de DMA.

**Tabela 4** – Valores de  $T_g$  e  $\tan \delta$  obtidos por DMA para os compostos.

Composto	$T_g$ (°C)	$\tan \delta$ a 0 °C	$\tan \delta$ a 60 °C
Padrão	-42,21	0,1227	0,1168
R5	-43,51	0,1149	0,1051
R10	-42,08	0,1185	0,0969
R20	-41,52	0,1240	0,0943
R40	-42,58	0,1249	0,0860
F40	-43,02	0,1060	0,0782
B40	-40,88	0,1591	0,0975
N40	-42,05	0,1365	0,1089

Fonte: A autora.

Todos os compostos apresentaram valores de  $\tan \delta$  a 60 °C menores que o composto padrão, sendo que o composto F40 foi o que apresentou o menor valor, indicando melhores resultados para a resistência ao rolamento.

A aderência ao molhado é mais adequada quanto maior forem os valores de  $\tan \delta$  a 0 °C. Os compostos R5, R10 e F40 apresentaram resultados inferiores ao composto padrão, e os compostos R20, R40, B40 e N40 apresentaram valores similares ou superiores. O composto B40, com 40 phr de pó de borracha, foi o que apresentou maior valor.

As temperaturas de transição vítrea ( $T_g$ ) obtidas por DMA para os compostos foram similares, apresentando valores na faixa de -40,88 °C a -43,51 °C, o que é coerente visto que em todas as formulações foram utilizados os mesmos tipos de borracha e sistema de vulcanização.

#### 6.2.4 Análise de Dispersão

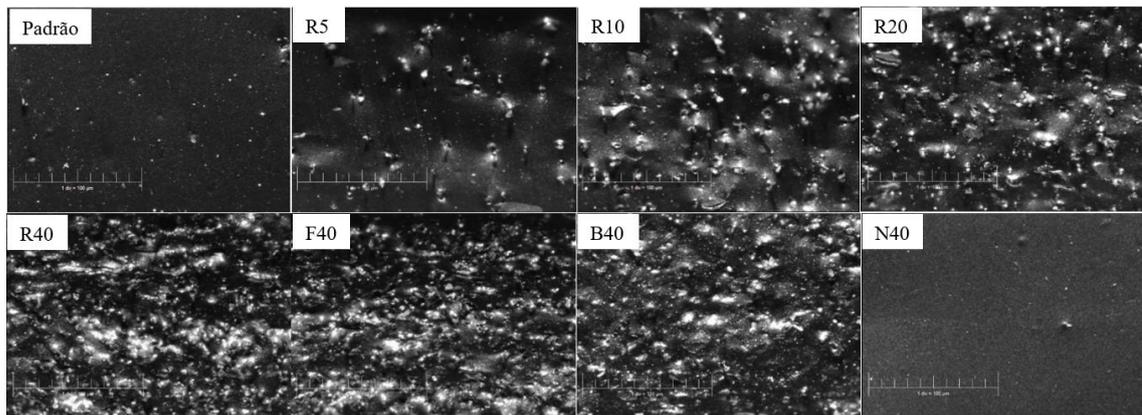
O composto elastomérico deve apresentar boa dispersão da carga adicionada, assim como dos demais componentes da formulação, a fim de que obtenha as propriedades físico-mecânicas desejadas e desempenhe adequadamente na aplicação que se destina.

O Dispergrader é um equipamento que fornece medidas qualitativas da dispersão de negros de fumo, por meio de microscopia de luz em campo escuro, possibilitando visualizar a

carga incorporada, através de pontos claros na imagem. Nesse trabalho, a técnica foi utilizada a fim de ter um indicativo da incorporação do resíduo de fibra têxtil na matriz polimérica.

Na figura 18 estão apresentadas as imagens obtidas no equipamento Dispergrader para todos os compostos em análise.

**Figura 18** – Imagens dos compostos, obtidas no equipamento Dispergrader com 100X de aumento.



Fonte: A autora.

Os percentuais de dispersão obtidos para os compostos estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5** – Percentuais de Dispersão dos compostos avaliados.

Composto	Dispersão (%)
Padrão	97,22
R5	85,90
R10	66,49
R20	51,17
R40	18,63
F40	20,23
B40	36,06
N40	99,22

Fonte: A autora.

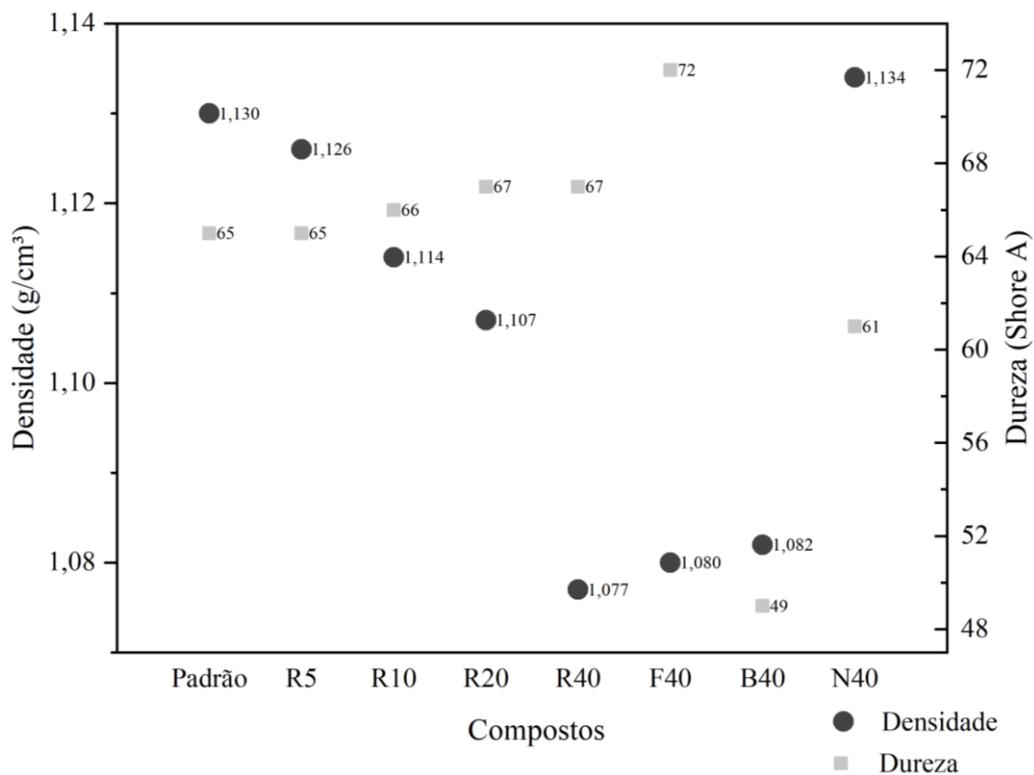
Como era esperado, os compostos contendo negro de fumo foram os que apresentaram maiores graus de dispersão. A adição do resíduo de fibra têxtil proveniente da reciclagem de pneus resulta em maior heterogeneidade e, conseqüentemente, diminuição do percentual de dispersão dos compostos, devido ao maior tamanho dessa carga em relação ao negro de fumo. Não ocorreram mudanças significativas entre a dispersão dos compostos com adição de 40 phr

de resíduo de fibra têxtil (R40) e de 40 phr da fibra têxtil (F40). O composto B40, com 40 phr de pó de borracha, apresentou valor superior aos compostos R40 e F40, demonstrando que a fibra têxtil possui maior influência na redução da dispersão. Entretanto, o pó de borracha vulcanizado não proporciona boa dispersão no composto, motivo pelo qual apresenta ainda baixo valor percentual.

### 6.2.5 Densidade e dureza

Os valores de densidade e dureza dos compostos estão apresentados na figura 19.

**Figura 19** – Valores de densidade e dureza dos compostos.



Fonte: A autora.

O valor da densidade dos compostos apresenta tendência a diminuir com o aumento da quantidade de carga adicionada, possivelmente em decorrência da menor densidade do resíduo de fibra têxtil utilizado em substituição ao negro de fumo. Os compostos R40, F40 e B40 apresentaram tendência a estabilizar, porém, o composto R40 apresentou menor densidade e o B40 maior valor, demonstrando de forma sutil a influência da fibra têxtil na redução da densidade do composto. O composto 8 apresentou densidade similar ao padrão.

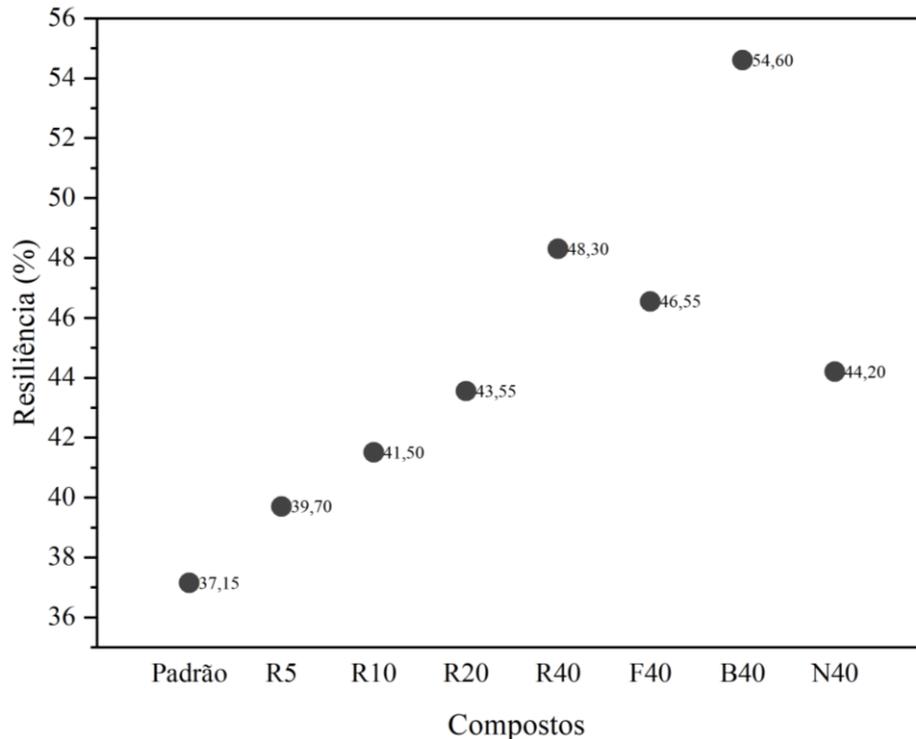
A dureza dos compostos apresentou pequena tendência de aumento mediante a adição do resíduo de fibra com pó de borracha. O composto F40, com 40 phr de fibra têxtil, foi o que apresentou maior valor de dureza, devido à grande quantidade de fibra adicionada e a respectiva

rigidez, enquanto o composto B40, com 40 phr de pó de borracha, apresentou o menor valor. A dureza do composto N40 foi similar ao padrão.

### 6.2.6 Resiliência

A figura 20 apresenta os resultados do ensaio de resiliência dos compostos.

**Figura 20** – Resiliência dos compostos avaliados.



Fonte: A autora.

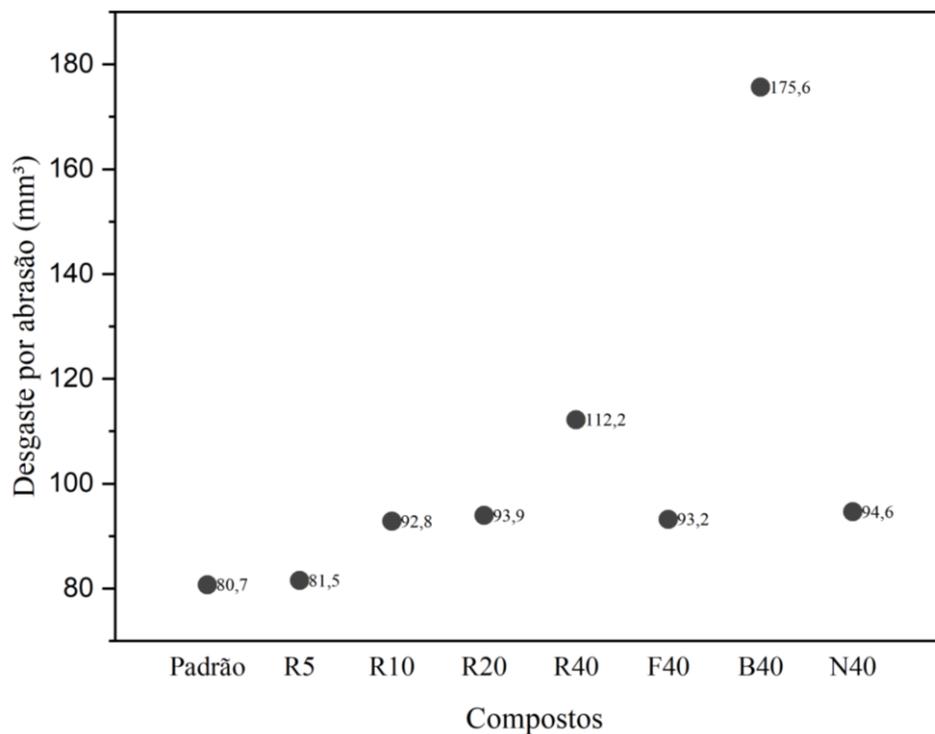
A resiliência dos compostos aumentou com a adição do resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, em relação ao padrão. O composto F40, com adição de 40 phr da fibra têxtil, apresentou valor inferior ao composto B40, com adição de 40 phr de pó de borracha, enquanto o composto R40, contendo resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, apresentou resiliência intermediária, mais próxima ao valor do composto F40. Assim, observa-se que tanto a adição da fibra têxtil quanto do pó de borracha possuem influência na resiliência do composto, mas o pó de borracha resulta em maior aumento. O composto N40 apresentou valor maior que o padrão, semelhante ao obtido para a adição de 20 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha (R20).

O aumento nos valores de resiliência dos compostos com a adição da fibra têxtil indica menor armazenamento de energia e assim, menor geração interna de calor, característica desejável em compostos para uso em bandas de rodagem.<sup>45</sup>

### 6.2.7 Desgaste por abrasão

Os resultados da resistência ao desgaste por abrasão dos compostos analisados estão apresentados na figura 21.

**Figura 21** – Desgaste por abrasão (mm<sup>3</sup>) dos compostos.



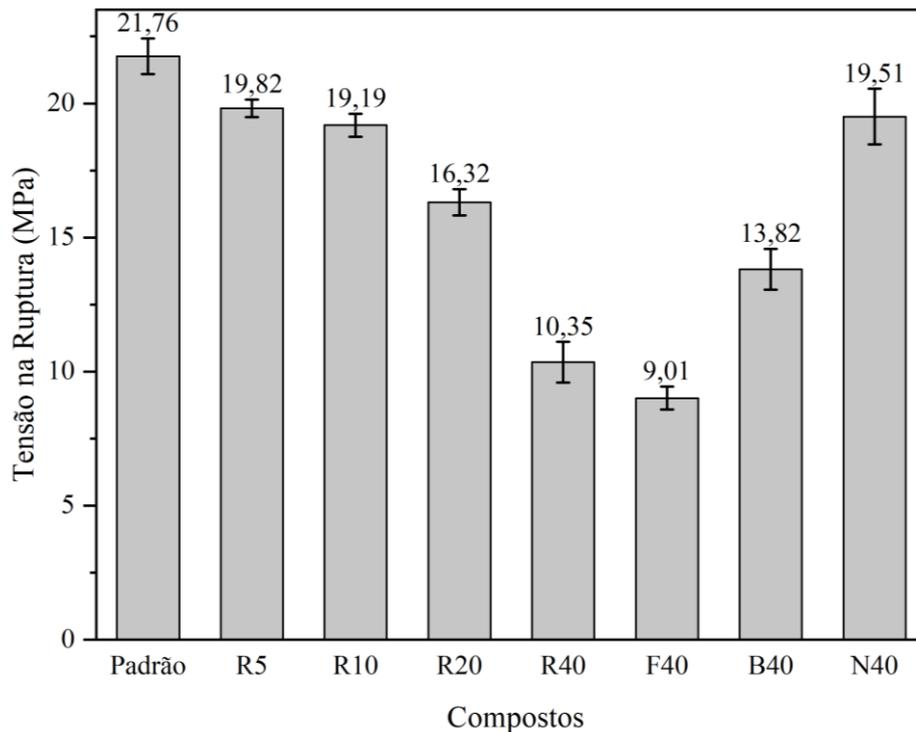
Fonte: A autora.

O desgaste por abrasão do composto R5, com adição de 5 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, apresentou tendência a estabilização, comparando-se ao padrão. O composto R10 apresentou maior valor de desgaste, em relação ao padrão, e o R20 apresentou tendência a conservação da propriedade do composto R10. O composto R40 apresentou maior valor que o F40, e o composto B40 foi o maior valor entre todos, demonstrando que a adição do pó de borracha resulta em maior aumento do desgaste, já que esse composto apresentou menor resistência à deformação (menor módulo de armazenamento no platô elástico). Como comparativo, os compostos R10, R20 e R40 apresentaram tendência de conservação de propriedades do composto com negro de fumo N550 (N40).

### 6.2.8 Resistência à tração

A figura 22 apresenta os valores de tensão de ruptura para todos os compostos em análise.

**Figura 22** – Valores de tensão na ruptura dos compostos.

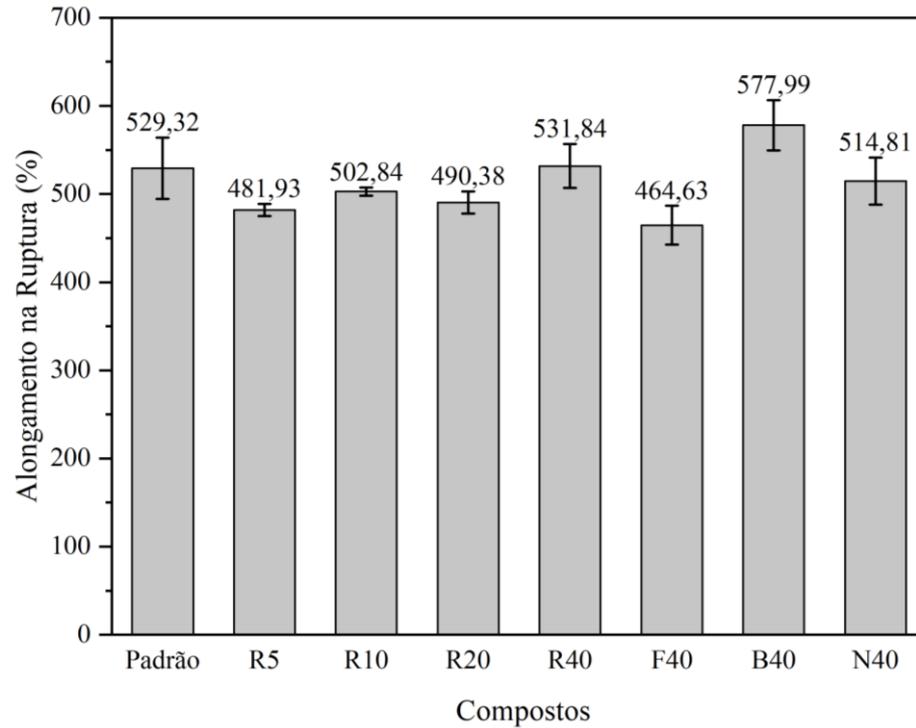


Fonte: A autora.

Pode-se observar o decréscimo da tensão na ruptura com o aumento da quantidade de carga adicionada ao composto, que ocorre de forma lenta até o composto R20, com adição de 20 phr de resíduo de fibra têxtil.

Verifica-se também a influência do pó de borracha na propriedade mecânica, visto que o composto F40, que não continha pó de borracha, foi o que apresentou menor valor de tensão de ruptura. O pó de borracha na ausência da fibra têxtil (composto B40) também apresentou baixo valor da propriedade, concluindo-se que o melhor resultado é obtido com a adição do resíduo de fibra têxtil, ou seja, com a fibra e pó de borracha incorporado, que fornecem a rigidez necessária para obter melhor propriedade de tensão de ruptura. O composto N40 apresentou propriedade similar ao compostos R5 e R10.

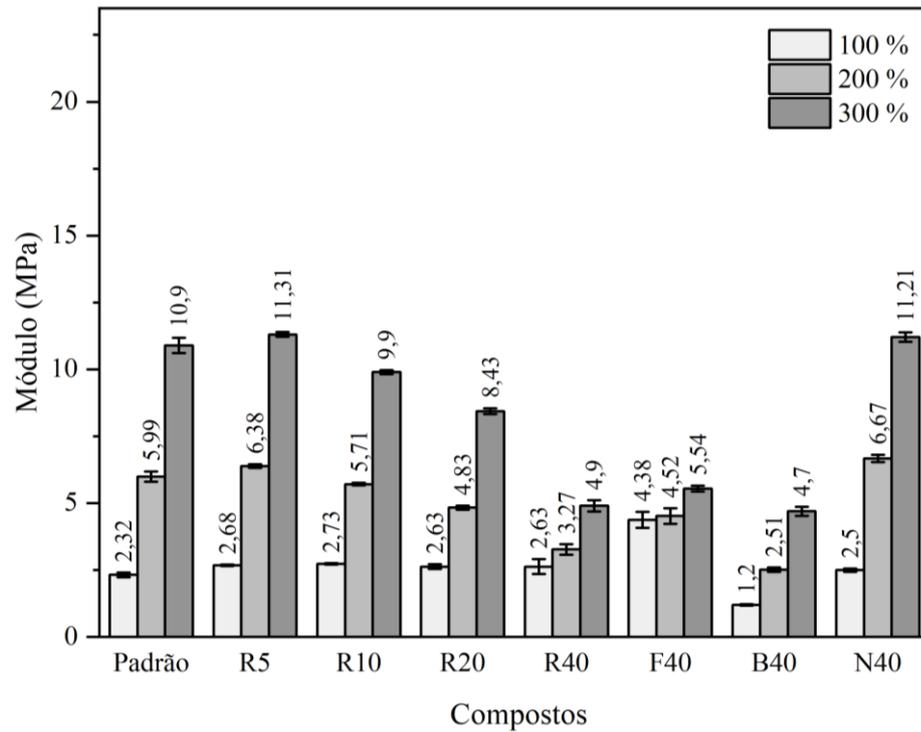
Em relação ao percentual de alongamento na ruptura, os compostos analisados apresentaram valores entre 464 e 577 %, conforme pode ser visualizado na figura 23.

**Figura 23** – Alongamento na ruptura dos compostos.

Fonte: A autora.

Os compostos apresentaram tendência a estabilização dos valores de alongamento na ruptura. O maior valor percentual de alongamento foi observado para o composto B40, que continha 40 phr de pó de borracha, e o menor foi para o composto F40, com 40 phr de fibra têxtil, demonstrando a importância do pó de borracha na conservação da propriedade de alongamento.

Na figura 24 estão apresentados os valores dos módulos dos compostos, para 100, 200 e 300 % de alongamento.

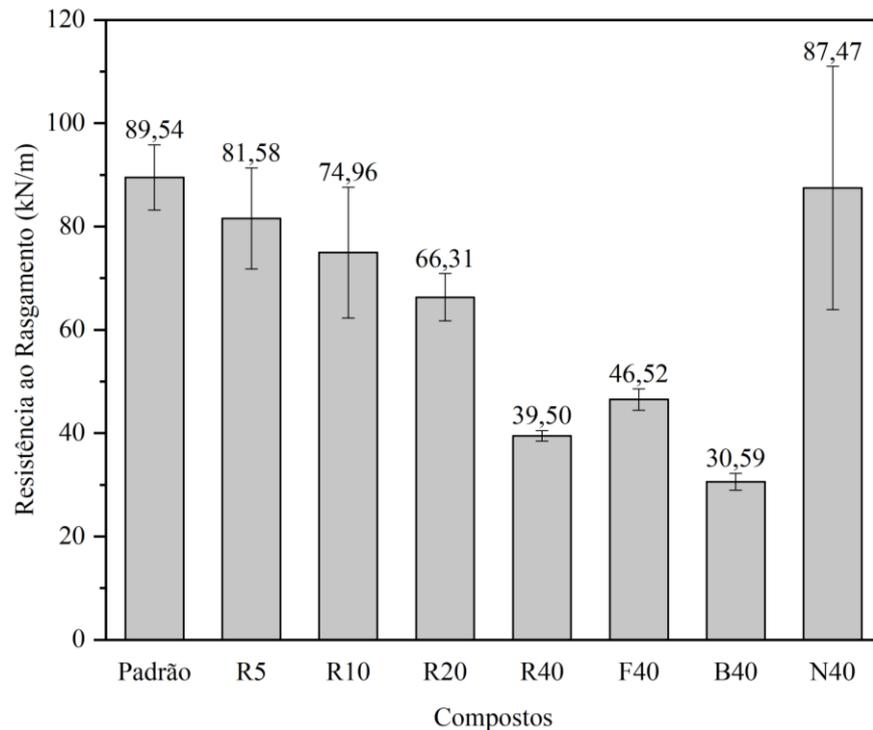
**Figura 24** – Módulo dos compostos a 100 %, 200 % e 300 % de alongamento.

Fonte: A autora.

Observa-se uma tendência à diminuição dos módulos com a adição do resíduo de fibra têxtil. Os compostos R5 e N40 apresentaram valores semelhantes ao padrão, e os compostos R40, F40 e B40 apresentaram redução considerável nos valores, possivelmente devido à maior heterogeneidade dos compostos em decorrência do baixo grau de dispersão da carga adicionada.

### 6.2.9 Resistência ao Rasgamento

Estão demonstrados na figura 25 os resultados para a resistência ao rasgamento dos compostos.

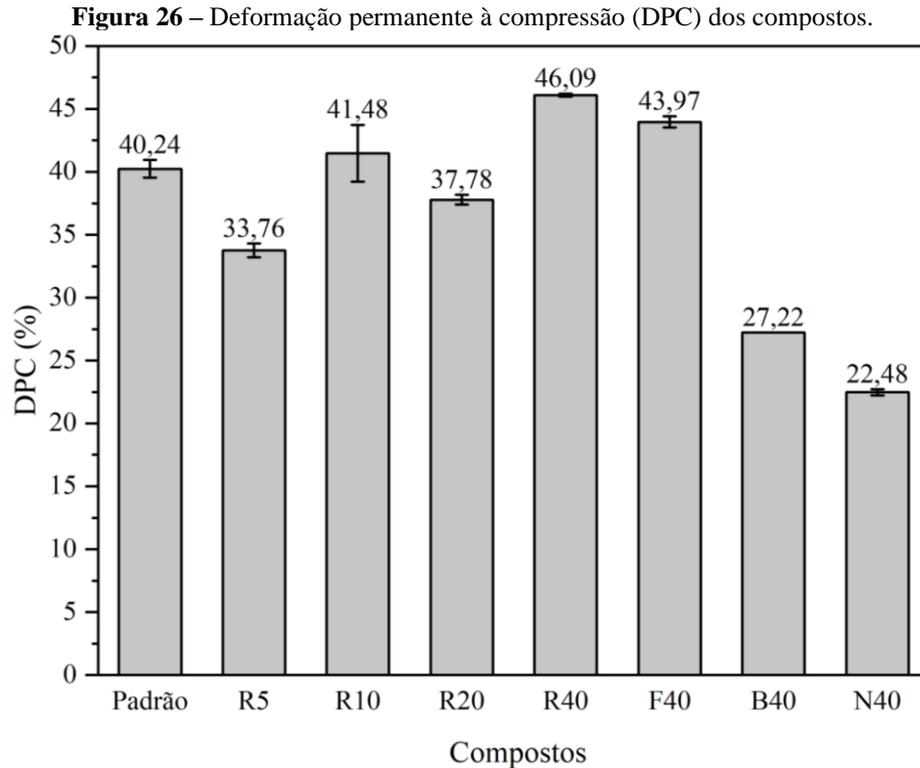
**Figura 25** – Resistência ao rasgamento dos compostos.

Fonte: A autora.

Observa-se comportamento semelhante ao da tensão de ruptura, em que há tendência a diminuição da resistência ao rasgamento à medida que se aumenta a quantidade de resíduo de fibra têxtil adicionado. Os resultados dos compostos R40, F40 e B40 corroboram com o observado para o torque máximo, visto que a fibra têxtil propicia maior rigidez ao composto, resultando em maior resistência ao rasgo do que o composto B40, com menor rigidez devido à adição do pó de borracha vulcanizado.

#### **6.2.10 Deformação Permanente à Compressão (DPC)**

Na figura 26 estão demonstrados os resultados do ensaio de deformação permanente à compressão sob deformação constante (DPC) dos compostos.



Fonte: A autora.

Um composto elastomérico para uso em bandas de rodagem não deve apresentar alto valor de DPC, pois o mesmo indica a capacidade do composto em manter as propriedades elásticas após compressão por longos períodos, semelhante a que o pneu sofre durante a rodagem. O ensaio de DPC pode ser utilizado para avaliação do grau de vulcanização do composto, sendo que quanto menor for o valor da DPC, maior é o grau de reticulação.<sup>7</sup>

Em comparação com o padrão, o composto com 10 % de resíduo de fibra têxtil (R10) apresentou valor semelhante, enquanto os com 5 e 20% foram levemente inferiores. No caso do R40 e F40, os valores foram superiores devido ao maior conteúdo de fibra têxtil.

Os compostos B40 e N40 foram os que apresentaram os menores valores. O composto B40, com pó de borracha vulcanizada, apresentou também menor valor de torque máximo, podendo-se justificar pela baixa rigidez do composto.

## 5 ANÁLISE DE CUSTOS

Para avaliação do impacto econômico desse estudo no processo produtivo de fabricação de bandas de rodagem, foram consultados os valores de mercado, fornecidos pela empresa Borrachas Vipal, referentes à aquisição do resíduo de fibra têxtil, assim como dos negros de fumo N339 e N550. As demais matérias primas da formulação não foram consideradas, pois não são alteradas nas misturas em estudo. Os elastômeros são o material utilizado em maior

quantidade nos compostos e assim, representam o maior valor no total da composição, seguido pelas cargas, que são o segundo maior custo.

O negro de fumo N339, com propriedade reforçante, é utilizado no composto padrão para bandas de rodagem na quantidade de 70 phr. Esse estudo mostrou que a substituição de 5 phr do N339 pelo resíduo têxtil é viável, sem a perda de propriedades.

O negro de fumo N550 apresenta propriedades semi reforçantes, podendo ser utilizado juntamente com o N339 em compostos para bandas de rodagem. A substituição de 20 phr do N550 pelo resíduo têxtil mostrou ser uma possibilidade interessante, pela avaliação das propriedades.

Os valores de mercado consultados para o resíduo de fibra têxtil, negro de fumo N339 e negro de fumo N550 são de R\$10,00/Kg, R\$14,00/Kg e R\$13,90/Kg, respectivamente.

Considerando-se um Banbury de fábrica para produção de uma mistura de 200 kg, foram calculados os custos de negro de fumo e do resíduo de fibra têxtil, na substituição de 5 phr de N339 e de 20 phr de N550. Os resultados estão apresentados na tabela 6.

**Tabela 6** – Dados relativos aos custos das cargas nos compostos elastoméricos.

Cargas	Composto			
	Padrão	5 phr	N40	20 phr
N339 (kg)	68,00	63,14	29,14	29,14
N550 (kg)	0,00	0,00	38,86	19,43
Resíduo Têxtil (kg)	0,00	4,86	0,00	19,43
<b>Custo (R\$)</b>	952,00	932,56	948,11	872,34

Fonte: A autora.

A análise dos resultados apresentados na tabela demonstra que há uma redução de 2,0% no custo do composto elastomérico substituindo-se 5 phr de N339 pelo resíduo de fibra têxtil, em relação à fórmula padrão. No composto N40, com 40 phr de negro de fumo N550, e considerando-se a substituição de 20 phr de resíduo de fibra têxtil, a redução seria de 8,0%, em relação ao composto N40.

Além disso, podem ser estudadas futuramente reduções nos custos do sistema de aceleração, visto que, conforme observado nos resultados, poderiam ser realizados ajustes para que os compostos com adição do resíduo de fibra têxtil, que aceleram as curvas reométricas, apresentem propriedades reológicas semelhantes às do composto padrão.

Dessa forma, além dos benefícios relativos à sustentabilidade da economia circular, são observados ganhos econômicos para a empresa com a utilização do resíduo de fibra têxtil da reciclagem de pneus.

## 6 CONCLUSÃO

A caracterização por técnicas instrumentais de análise demonstrou que o resíduo têxtil proveniente da reciclagem de pneus trata-se de uma mistura de polímeros, sendo eles, PET em maior quantidade e Nylon 6,6.

Nesse trabalho, foi possível produzir compostos elastoméricos com adição da fibra têxtil com borracha incorporada, fibra têxtil e pó de borracha como carga em diferentes quantidades, em substituição parcial do negro de fumo N339 utilizado no composto padrão. Também foi produzido composto utilizando-se negro de fumo N550, com propriedade semi reforçante, para comparação das propriedades do resíduo analisado.

As propriedades reológicas mostraram aceleração da vulcanização dos compostos com a adição do resíduo de fibra têxtil, visualizado nos valores de tempo ótimo de vulcanização e tempo de segurança.

A avaliação das propriedades físico-mecânicas permite observar que o composto R5, com adição de 5 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha incorporado, manteve as características do composto padrão. A partir da adição de 10 phr, percebe-se uma redução gradual das propriedades. De forma geral, o composto R20, com adição de 20 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha, mostrou propriedades semi reforçantes, semelhantes ao do negro de fumo N550.

As propriedades dinâmico-mecânicas dos compostos apresentaram resultados atrativos de resistência ao rolamento e aderência no molhado para uso em bandas de rodagem.

O estudo permitiu concluir que é possível a utilização do resíduo de fibra têxtil da reciclagem de pneus em substituição parcial ao negro de fumo N339 em bandas de rodagem, sem redução de propriedades físico-mecânicas, com a adição de 5 phr de fibra com pó de borracha. Entretanto, são necessários ajustes no sistema de vulcanização, a fim de aumentar o tempo de segurança dos compostos, em comparativo ao padrão.

O uso de 20 phr de resíduo de fibra têxtil com pó de borracha poderia ser utilizado em substituição parcial ao negro de fumo N550 em compostos que exigem menor propriedade de reforço.

Esse trabalho demonstrou a viabilidade do uso de resíduo têxtil da reciclagem de pneus em compostos elastoméricos, favorecendo a economia circular da indústria de borracha e assim, possibilitando o reuso dos materiais no mesmo setor produtivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 LANDI, D.; VITALI, S.; GERMANI, M. Environmental analysis of different end of life scenarios of tires textile fibers. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 508-513, 2016. ISSN 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.141>.
- 2 ARAUJO-MORERA, J. *et al.* Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. **Waste Management**, v. 126, p. 309-322, 2021. ISSN 0956-053X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.025>.
- 3 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **História do Pneu**. Disponível em: <https://www.anip.org.br/historia-e-fabricacao/>. Acesso em: 18 fev. 2022.
- 4 LETCHER, T. M.; SHULMAN, V. L.; SHULMAN, V. L. (ed.). **Tire Waste and Recycling**. 1ª ed. Cambridge, MA: Academic Press, 2021.
- 5 MARK, J. E.; EIRICH, F. R.; ERMAN, B. (ed.). **The Science and Technology of Rubber**. 4ª ed. Academic Press, 2013.
- 6 BHOWMICK, A. K.; HALL, M. M.; BENAREY, H. A. (ed.). **Rubber Products Manufacturing Technology**. USA: Marcel Dekker, Inc., 1994.
- 7 ROCHA, E. C. D.; LOVISON, V. M. H.; PIEROZAN, N. J. **Tecnologia de Transformação dos Elastômeros**. 2ª ed. São Leopoldo: Centro Tecnológico de Polímeros SENAI, 2003.
- 8 CHICU, N.; PRIOTEASA, A.; DEACONU, A. Current Trends and Perspectives in Tyre Industry. **Studia Universitatis "Vasile Goldis" Arad. Economics Series**, v. 30, n. 2, p. 36-56, 2020.
- 9 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Número de fábricas no Brasil**. Disponível em: <https://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2021/10/F%C3%A1bricas-OUT-21.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.
- 10 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **Infográfico Dezembro 2021**. Disponível em: [https://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2022/01/ANIP\\_infografico\\_DEZ21.pdf](https://www.anip.org.br/sitenovo/wp-content/uploads/2022/01/ANIP_infografico_DEZ21.pdf). Acesso em: 07 mar. 2022.
- 11 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: n. 188, Brasília, DF, 01 out. 2009, p. 64-65.
- 12 INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos 2020 (ano base 2019)**. Brasília: IBAMA, 2021. 87 p. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/2021-03-03-%20Ibama-Relatorio\\_Pneumaticos\\_2020\\_completo\\_com\\_capa\\_terceira\\_versao.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/pneus/relatoriopneumaticos/2021-03-03-%20Ibama-Relatorio_Pneumaticos_2020_completo_com_capa_terceira_versao.pdf). Acesso em: 10 mar. 2022.
- 13 CLARIVATE . **Derwent World Patents Index**. [S.l.]. Clarivate, 2022. Disponível em: <https://clarivate.com/derwent/>. Acesso em: 07 fev. 2022.

- 14 BARES, M. **Device for cleaning rubber-contaminated textile particles from car tire recycling device, has sieving device for mixing granulate, rubber powder and insufficiently cleaned textile from release device to sieve rubber granulate.** Depositante: GLOBAL PATENTS SA (GLOB-Non-standard). NL2019625-B1. Depósito: 25 set. 2017. Concessão: 1 abr. 2019.
- 15 WANG, J. **Waste tire recycling used for preparing brick or laying of pavement tiles, includes waste tire material, polyurethane adhesive and coloring pigment.** Depositante: WANG J(WANG-Individual). CN105885146-A. Depósito: 4 set. 2014. Concessão: 24 ago. 2016.
- 16 LIU, C. *et al.* **Weather-resistant broadband sound absorption paint useful as exterior wall and manufacturing concrete exterior wall hanging board, comprises cement, waste tire recycling rubber elastic particles, foaming agent, adhesive and water.** Depositante: SHANGHAI ACAD ENVIRONMENTAL SCI (SHAN-Non-standard). CN105111798-A. Depósito: 2 set. 2015. Concessão: 2 dez. 2015.
- 17 PEREDO LOPEZ, L.E.; LOPEZ L. E. P. **Tyre recycling process, comprises cryogenically freezing tyre pieces, grinding, separating polyester and nylon and screening to separate steel cords.** Depositante: PEREDO LOPEZ L E(LOPE-Individual) TIRE RECYCLE SYSTEM SAPI CV(TIRE-Non-standard). WO2007091876-A2. Depósito: 31 out. 2006. Concessão: 16 ago. 2007.
- 18 VERRI, R. **Tire recycling plant for recycling scrap tires has water jet device which is used to disintegrate tire by delivering high pressure fluid.** Depositante: VERRI R(VERR-Individual) GREENTECH INNOVATION SRL(GREE-Non-standard) GREAT INNOVATION CO LTD(GREA-Non-standard). WO2010023548-A2. Depósito: 31 ago. 2009. Concessão: 4 mar. 2010.
- 19 NARANI, S.S. *et al.* Sustainable reuse of Waste Tire Textile Fibers (WTTFs) as reinforcement materials for expansive soils: With a special focus on landfill liners/covers. **Journal of Cleaner Production**, v. 247, p.119151, 2020. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119151>.
- 20 MADERUELO-SANZ, R. *et al.* A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs). **Applied Acoustics**, v. 73, p. 402-408, 2012. ISSN 0003-682X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2011.12.001>.
- 21 BOCCI, E.; PROSPERI, E. Recycling of reclaimed fibers from end-of-life tires in hot mix asphalt. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 7, n. 5, p. 678-687, 2020. ISSN 2095-7564. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.09.006>.
- 22 MARCONI, M. *et al.* Reuse of tires textile fibers in plastic compounds: is this scenario environmentally sustainable? . **Procedia CIRP**, v. 69, p. 944-949, 2018. ISSN 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.074>.
- 23 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D5289**: Standard test method for rubber property vulcanization using rotorless cure meters, EUA, 2012.
- 24 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D1646** - Standard Test Methods for Rubber- Viscosity stress relaxation and pre-vulcanization characteristics (Mooney Viscometer). EUA, 2003.
- 25 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 297**: Standard test methods for rubber products – Chemical Analysis. EUA, 2006.

- 26 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 2240**: Standard test method for rubber property – durometer hardness. EUA 2005.
- 27 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 53512**. Testing of rubber – Determination of rebound resilience using the Schob pendulum. Alemanha, 2000.
- 28 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN ISO 4649**. Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of abrasion resistance using a rotating cylindrical drum device. Alemanha, 2010.
- 29 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO11345**: Rubber — Assessment of carbon black and carbon black/silica dispersion — Rapid comparative methods. Suíça, 2006.
- 30 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 412**: Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers-tension. EUA 2006.
- 31 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 624**: Standard test method for tear strength of conventional vulcanized rubber and thermoplastic elastomers. EUA 2000.
- 32 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 395**: Standard Test Methods for Rubber Property - Compression Set. EUA 2008.
- 33 PAVIA, D. L. *et al.* **Introdução à Espectroscopia**. 4<sup>a</sup> ed. EUA: Cengage Learning, 2010.
- 34 BESCO, S. *et al.* PA66/PA12/clay based nanocomposites: structure and thermal properties. **Polymers Advanced Technologies**, v. 22, n. 11, p. 1518-1528, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/pat.1640>.
- 35 TELI, M. D.; KALE, R. D. Polyester nanocomposite fibers with improved flame retardancy and thermal stability. **Polymer Engineering and Science**, v. 52, n. 5, p. 1148-1154, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.22179>.
- 36 SAEED, K. *et al.* Preparation, analyses and application of cobalt–manganese oxides/nylon 6,6 nanocomposites.. **Polymer Bulletin**, v. 75, p. 4657-4669, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2292-3>.
- 37 D'ESCAMARD, G.; ROSA, C. D.; AURIEMMA, F. Predicting the glass transition temperature as function of crosslink density and polymer interactions in rubber compounds. In: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4949751>.
- 38 BANNACH, G. *et al.* Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1825-1829, 2011.
- 39 SEIDELT, S.; MÜLLER-HAGEDORN, M.; BOCKHORN, H. Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 75, p. 11-18, 2006. ISSN 0165-2370. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.03.002>.
- 40 BIJARIMI, M.; ZULKAFI, H.; BEG, MDH. Mechanical Properties of Industrial Tyre Rubber Compounds. **Journal of Applied Sciences**, v. 10, n. 13, p. 1345-1348, 2010. ISSN: 1812-5654. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2010.1345.1348>.
- 41 CANEVAROLO, S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Artliber, 2004.

- 42 MUJTABA, A. *et al.* Mechanical Properties and Cross-Link Density of Styrene–Butadiene Model Composites Containing Fillers with Bimodal Particle Size Distribution. **Macromolecules**, v. 45, p. 6504-6515, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma300925p>.
- 43 RATTANASOM, N.; SAOWAPARK, T.; DEEPRASERTKUL, C. Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. **Polymer Testing**, v. 26, n. 3, p. 369-377, 2007. ISSN: 0142-9418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.12.003>.
- 44 YAN, H. *et al.* Effect of nitrile rubber on properties of silica-filled natural rubber compounds. **Polymer Testing**, v. 24, n. 1, p. 32-38, 2005. ISSN: 0142-9418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2004.07.011>.
- 45 CARDOSO, F. A. **Estudo do desempenho dos compostos de borracha utilizados na fabricação da banda de rodagem dos pneus automotivos em função dos pavimentos das rodovias.** 2010. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.