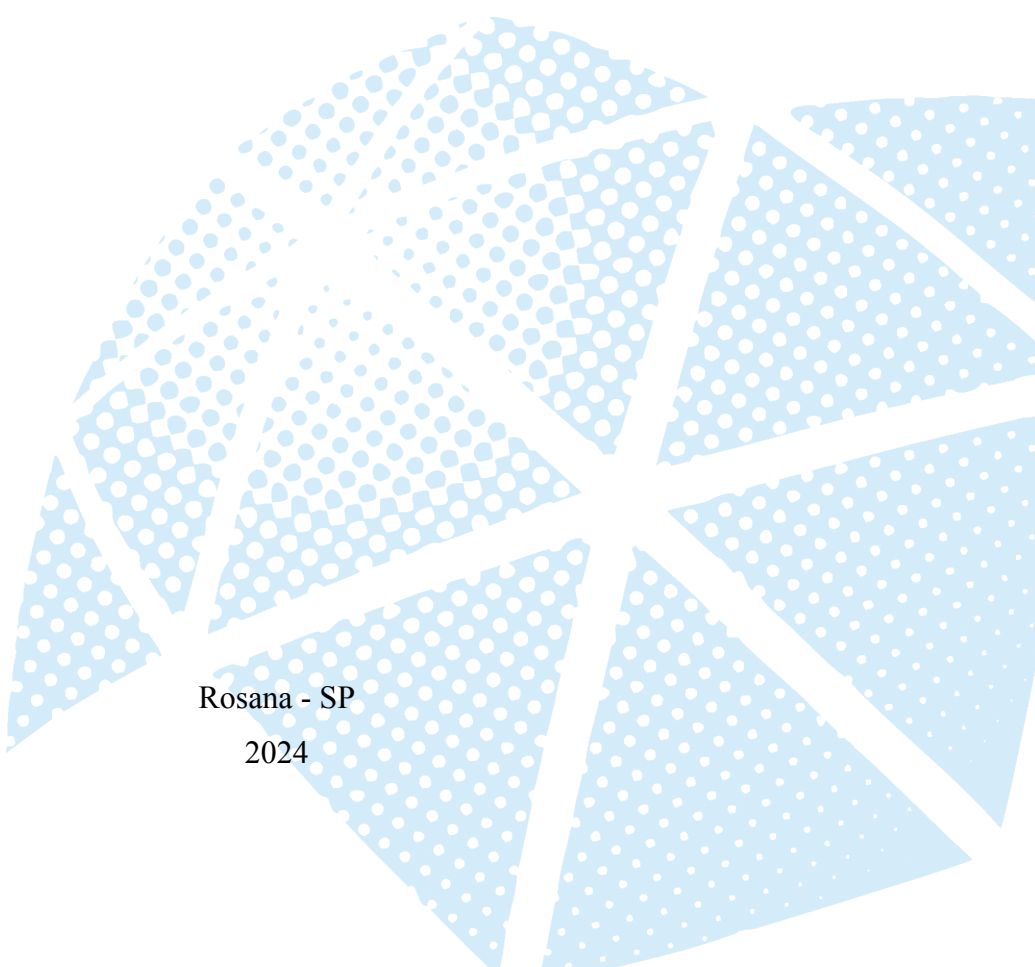


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Rosana

LUCAS MATEUS ALMEIDA DAMIÃO

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA, TÉRMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITO DE
BORRACHA NATURAL VULCANIZADA COM PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Rosana - SP
2024



LUCAS MATEUS ALMEIDA DAMIÃO

**CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA, TÉRMICA E MECÂNICA DE COMPÓSITO DE
BORRACHA NATURAL VULCANIZADA COM PARTÍCULAS MAGNÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de
Engenharia e Ciências, Rosana, para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientador(a): Michael Jones da Silva

Rosana - SP

2024

D158c	Damião, Lucas Mateus Almeida Caracterização reológica, térmica e mecânica de compósito de borracha natural vulcanizada com partículas magnéticas. / Lucas Mateus Almeida Damião. -- Rosana, 2024 62 p. : il., tabs., fotos Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Energia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana Orientador: Michael Jones da Silva 1. Compósitos. 2. Látex. 3. Engenharia. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

RESUMO

Compósitos são formados por dois ou mais materiais, com a intenção de combinar as propriedades únicas de cada um visando obter um novo material. Devido à demanda de vários setores industriais e tecnológicos, os materiais compósitos têm ganhado destaque, pois podem ser customizados para atender aplicações específicas e propriedades desejadas. Nesse sentido, esse estudo teve como objetivo criar um compósito flexível de borracha natural vulcanizada (BNV) reforçado com partículas magnéticas (PM). Os compósitos bifásicos BNV/PM foram produzidos utilizando um misturador aberto de rolos paralelos, no qual as quantidades de BNV, aceleradores e agente reticulador foram mantidas constantes, enquanto a quantidade de PM foi variada em 10, 20 e 30 phr. As propriedades reométricas, térmicas, mecânicas, elétricas e dielétricas das amostras de compósitos bifásicos BNV/PM foram analisadas para avaliar a interação entre as fases e seu impacto nas propriedades finais dos compósitos. As análises reométricas permitiram determinar o tempo ideal de vulcanização (t_{90}), que variou entre 4 e 5 minutos, indicando que a dispersão de PM tem influência nos parâmetros de vulcanização da matriz BNV. Também foi observado que o torque máximo aumenta com o acréscimo na concentração de PM. A análise térmica de TG/DTG mostrou que as amostras do compósito bifásico BNV/PM, com diferentes concentrações de PM, apresentaram um perfil térmico semelhante ao da BNV pura, com um único evento de perda de massa entre 300-450°C devido à degradação estrutural da BNV. Os testes mecânicos de tração indicaram que a variação de PM na matriz BNV aumentaram a tensão na ruptura enquanto diminuíram a deformação na ruptura. As análises de impedância demonstraram que o comportamento da parte real da condutividade elétrica ($\sigma'(f)$) de todas as amostras é característico de materiais desordenados, variando conforme a frequência do campo elétrico alternado. Além disso, a permissividade elétrica variou com a frequência para todas as amostras estudadas, diminuindo à medida que a frequência aumentava. Finalmente, devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas e mecânicas, as amostras dos compósitos bifásicos BNV/PM têm potencial para aplicações como sensores, dispositivos de blindagem contra radiação eletromagnética e dissipadores eletrostáticos.

Palavras-chave: Compósito bifásico, Borracha Natural, Partículas Magnéticas, Avaliação das Propriedades.

ABSTRACT

The term "composites" refers to materials formed from the combination of two or more materials, with the purpose of combining the individual properties of each material to create a new material. Composite materials have gained prominence due to their ability to be customized to meet specific applications and desired properties in a variety of industries. This study aims to create a flexible composite of vulcanized natural rubber (VNR) reinforced with magnetic particles (MP). A two-phase VNR/PM composite was prepared using an open parallel-roll mixer, in which VNR, accelerators, and crosslinking agent amounts were maintained constant while MP amounts were varied at 10, 20, and 30 percent per hour. VNR/MP two-phase composite samples were analyzed for their rheometric, thermal, mechanical, electrical, and dielectric properties to determine how the phases interact and the impact they have on the final properties. By using rheometric analyses, it was possible to determine the ideal vulcanization time (t_{90}), which varied between 4 and 5 minutes, indicating that the MP dispersion has a significant influence on the vulcanization parameters of VNR matrix. The maximum torque was also observed to increase as MP concentration increased. According to TG/DTG thermal analysis, the VNR/MP biphasic composite samples, with different MP concentrations, presented a thermal profile similar to that of pure VNR, with a mass loss event occurring between 300-450°C due to VNR structural degradation. Mechanical tensile tests indicated that MP variation in the VNR matrix increased the stress at break while decreasing the deformation at break. Impedance analysis indicated that all samples demonstrated behavior characteristic of disordered materials, varying according to the frequency of the alternating electric field. In addition, the dielectrical permittivity of all the studied samples decreased with increasing frequency. Furthermore, due to their excellent electrical, thermal, and mechanical properties, the VNR/MP biphasic composite samples have the potential to be used as magnetic sensors and electromagnetic radiation shielding devices.

Keywords: Two-phase Composite, Natural Rubber, Magnetic Particles, Evaluation of properties

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. Látex	11
2.2. Borracha Natural	12
2.2.1. <i>Um breve histórico</i>	12
2.2.2. <i>Propriedades da BN</i>	13
2.2.3. <i>Crepe Claro Brasileiro</i>	14
2.2.4. <i>Processo de Vulcanização</i>	14
2.3. Cargas	16
2.4. Partículas magnéticas	17
2.4.1. <i>Supermagna BW 333</i>	18
2.5. Conectividade	19
2.6. Compósitos	21
2.6.1. <i>Compósito Polimérico</i>	22
2.7. Impedância elétrica	23
3. OBJETIVOS	28
3.1. Objetivo Geral	28
3.2. Objetivos Específicos	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Materiais Utilizados	29
4.1.1. <i>Borracha Natural</i>	29
4.1.2. <i>Reagentes</i>	29
4.1.4. <i>Partícula Magnética</i>	30
4.2. Preparo do Nanocompósito BNV/PM	30
4.3. Métodos de Caracterização	32
4.3.1. <i>Reometria</i>	32
4.3.2. <i>Determinação das ligações cruzadas pelo método do inchamento em solvente orgânico (Flory-Rehner)</i>	33
4.3.3. <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	35
4.3.4. <i>Análise mecânica</i>	35
4.3.5. <i>Propriedades Elétricas e Dielétricas</i>	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Comportamento Reológico	37
5.1.1. <i>Reometria</i>	37
5.1.2. <i>Determinação da densidade de ligações cruzadas dos espécimes.</i>	39
5.2 Comportamento Térmico	40
5.2.1 <i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	40
5.3. Análise das propriedades mecânicas	43
5.4. Análise elétrica e dielétrica	45
5.4.1. <i>Análise de Condutividade</i>	45
5.4.2. <i>Análise da permissividade complexa</i>	49
6. CONCLUSÃO	53

7. REFERÊNCIA

Lista de Figuras

Figura 1: Estrutura Química do poli (cis-1,4-isopreno)	11
Figura 2: Esquema da borracha natural não-vulcanizada e vulcanizada	15
Figura 3: Conectividades de compósito bifásico	20
Figura 4: Representação do vetor de impedância Z	25
Figura 5: Misturador aberto de rolos com (a) BNV pura	29
Figura 6: Curva reométrica	31
Figura 7: Curvas reométricas dos compósitos magnéticos BNV/PM	35
Figura 8: Análise termogravimétrica dos espécimes de BNV pura e dos compósitos BNV/PM com diferentes concentrações de partículas de PM	39
Figura 9: Análise da DTG da amostra BNV e das amostras dos compósitos BNV/PM com diferentes concentrações de PM	40
Figura 10: Curva de tensão-deformação para os espécimes do compósito BNV/PM com diferentes concentrações em phr de partículas de PM	42
Figura 11: Condutividade elétrica dc em função da quantidade em phr de PM para os espécimes do compósito BNV/PM	44
Figura 12: Análise da condutividade elétrica real em função da frequência para os espécimes do compósito BNV/PM e da BNV pura em temperatura ambiente	45
Figura 13: Análise da condutividade elétrica imaginária em função da frequência para as amostras do compósito BNV/PM em temperatura ambiente	46
Figura 14: Curvas da permissividade dielétrica real em função da frequência	48
Figura 15: Curvas da permissividade dielétrica imaginária em função da frequência	49

Lista de Tabelas

Tabela 1: Diferença entre termoplásticos e termorrígidos	23
Tabela 2: Relação das funções elétricas: impedância, admitância, permissividade e módulo	26
Tabela 3: Propriedades físicas e químicas dos reagentes	28
Tabela 4: Materiais utilizados para obtenção do nanocompósito em phr	30
Tabela 5: Parâmetros reométricos da BNV pura e dos espécimes do compósito BNV com diferentes concentrações em phr de partículas de PM	36
Tabela 6: Densidades de ligações cruzadas determinadas por inchamento (Flory-Rehner)	37
Tabela 7: Parâmetros térmicos de TG/DTG	41
Tabela 8: Parâmetros mecânicos da tensão quando a deformação atinge 100% ($\sigma_{100\%}$), 300% ($\sigma_{300\%}$), e 500% ($\sigma_{500\%}$) e, valores da $\sigma_{ruptura}$ e da $\varepsilon_{ruptura}$ para os espécimes BNV pura e dos compósitos BNV/PM	43

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, a humanidade tem se esforçado para melhorar a qualidade de vida e obter uma melhor qualidade de vida. Dessa forma, os seres humanos, ao longo da história, têm buscado na natureza recursos naturais para criar ferramentas que tornaram tarefas diárias mais fáceis, como cozinhar e cultivar, mais fáceis. Nesse sentido, o desenvolvimento da sociedade, desde a idade da pedra até a revolução industrial, está intimamente relacionado ao progresso dos materiais. A exploração, inovação e o domínio de diferentes materiais foram essenciais para o avanço da sociedade moderna, influenciando diversos aspectos socioeconômicos, geográficos, culturais, ambientais e demográficos (ZARBIN, 2007).

O uso e a inovação de variados materiais têm um impacto profundo no progresso social. Entre a vasta gama de materiais naturais e sintéticos, os polímeros são particularmente notáveis (ZARBIN, 2007; BARASUOL, F.; ZÜGE, G.; JAURIS, C. F. D. M., 2020).

Muitos desses materiais que podem modificar significativamente suas propriedades físicas (como mecânicas, térmicas, ópticas ou elétricas) e/ou químicas em resposta a estímulos externos são denominados inteligentes (BARASUOL, F.; ZÜGE, G.; JAURIS, C. F. D. M., 2020). Esses materiais têm atraído grande interesse em várias áreas, como engenharia, medicina e biologia. Materiais que respondem a estímulos externos com alterações em suas propriedades físicas e/ou químicas são altamente valorizados por suas características e potenciais aplicações (BARASUOL, F.; ZÜGE, G.; JAURIS, C. F. D. M., 2020).

Entre os polímeros que podem se enquadrar nessa classe, destacam-se os polímeros naturais, com destaque a borracha natural (BN). A BN, se destaca por seu alto peso molecular (~200.000), bem como de sua estrutura que é composta por longas cadeias de unidades repetitivas de isopreno (C_5H_8) (JOSEPH; JACOB; THOMAS, 2005). O poli-isopreno pode ser encontrado em duas formas: cis 1,4-poli-isopreno, que é a estrutura da BN, e trans 1,4-poliisopreno, que compõe o polímero conhecido como *gutta-percha*. Porém, a BN extraída da seringueira é encontrada exclusivamente como cis-1,4-poli-isopreno (JOSEPH; JACOB; THOMAS, 2005). É crucial observar que esses dois isômeros possuem propriedades distintas: o isômero cis é elástico devido à sua estrutura em espiral não linear, enquanto o isômero trans tem uma estrutura linear, atuando como um material termoplástico rígido (CTBORRACHA, 2023).

Além disso, devido ao fato de a BN ser proveniente de fonte natural, ela é um polímero de fonte renovável com características únicas, como elasticidade, resiliência, leveza

e resistência à abrasão, tornando-a valiosa para diversas indústrias, incluindo automotiva, de pneus, aeronáutica e dispositivos médicos (MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017; BARASUOL; ZÜGE; JAURIS C, 2020). No entanto, a BN no estado natural e não vulcanizado possui limitações, especialmente em suas propriedades mecânicas, que são relativamente baixas. Para superar essas limitações, o processo de vulcanização tem sido uma das alternativas, utilizando como principal agente reticulador o enxofre. Além do enxofre, a indústria da BN incorpora outros reagentes durante o processo de vulcanização, tais como: ativadores de vulcanização, agentes de reticulação, aceleradores, plastificantes, óleo de processamento, antioxidantes e outros aditivos para melhorar o processo, reduzir o tempo de processamento e aumentar a resistência à degradação por ozônio (BARASUOL; ZÜGE; JAURIS C, 2020). Uma estratégia adicional para melhorar as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas da BN é a incorporação de partículas e nanopartículas, criando compósitos ou nanocompósitos.

Os nanocompósitos podem ser definidos como materiais onde pelo menos uma das fases tem uma das dimensões inferiores a 100 nm, como definido por Bellucci et al. (2013) e Zenatti et al. (2015). Esses materiais têm aplicações amplas, desde a liberação de fármacos e filtragem de água até supercapacitores e sensores (BOJNOURD, 2018; GHANDFOROUSHAN, 2022; BESHIKAR, 2020; NIKOLAIDIS, 2019; ZHANG, 2019; TAJIK, 2021; SAADI, 2019; LIU, 2019; TAORMINA, 2020). Dentro da classe dos nanocompósitos poliméricos, destaque-se aqueles que utilizam como segunda fase nanopartículas a base de carbono devido a sua acessibilidade e capacidade de aprimorar as propriedades mecânicas e térmicas das matrizes poliméricas (ANADÃO, WIEBECK E VALENZUELA-DÍAZ, 2011; GUTIÉRREZ ET AL., 2014; DAMASIO, 2015).

Por outro lado, com o intuito de aprimorar propriedades como as magnéticas de um compósito, torna-se necessário a utilização de matérias que possuem essas propriedades, tais como partículas a base de ferro e níquel. Essas partículas têm a capacidade de interagir com campos magnéticos, tornando a matriz polimérica reforçada com elas valiosa para aplicações de detecção de danos estruturais, como sensores magnéticos de deformação e blindagem de onda eletromagnéticas (YOON, Jeong-Hwan et al., 2021; BERNAL-ORTEGA, Pilar et al., 2020). O recente progresso no desenvolvimento de sensores magnéticos de alto desempenho foi estimulado pela descoberta do fenômeno de magnetoimpedância gigante (GMI), que resulta em uma significativa variação na impedância de um condutor magnético quando exposto a um campo magnético aplicado, particularmente em ligas metálicas amorfas (PANINA; MOHRI, 1994; PANINA et al., 1995). Pesquisas indicam que sensores magnéticos

baseados no efeito GMI oferecem vantagens notáveis, como alta sensibilidade (PHAN; PENG, 2008). Enquanto sensores GMR têm uma sensibilidade de cerca de 1% por Oe, os sensores GMI podem alcançar sensibilidades de até 500% por Oe (RIPKA, 2001).

Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo principal produzir compósitos de BN reforçados com partículas magnéticas, por meio de um método simples e de fácil reprodução. Para avaliar a sinergia entre as fases nos compósitos bifásicos BN/PM, foram analisadas suas propriedades reométricas, térmicas, mecânicas, elétricas e dielétricas. A inclusão de partículas magnéticas, os compósitos bifásicos BN/PM exibiram excelentes propriedades mecânicas, boa estabilidade térmica e propriedades elétricas adequadas. Essas características tornam esses compósitos promissores para aplicações como mantas de blindagem de radiação eletromagnética e dissipação eletrostática.

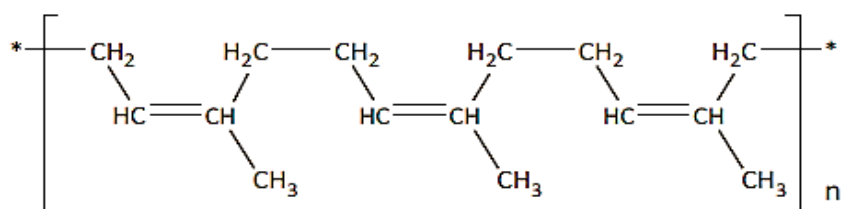
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Látex

O látex obtido da seringueira (*Hevea brasiliensis*) é uma suspensão coloidal composta por partículas de borracha e não borracha e, sua composição consiste principalmente de água (50-60%), partículas de borracha natural (40-45%) e uma pequena quantidade de materiais não borracha (menos de 5%) (Ramos et al., 2018; Santos, 2014). A borracha natural (BN) é um polímero natural composto por unidades de isopreno na forma cis-poli(1,4-isopreno), conforme ilustrado na Figura 1. Os componentes não borracha no látex incluem carboidratos, aminoácidos, fósforo, ácidos orgânicos diversos, proteínas e lipídeos (MATOS, GALEMBECK; ZARBIN, 2017; PAIVA, 2019).

Atualmente, mais de 2.000 espécies de plantas conhecidas produzem látex, no entanto, o produzido pela *Hevea Brasiliensis* (seringueira), nativa da Amazônia é que mais tem se destacado – devido maior viabilidade econômica comercial e melhor qualidade das partículas de borracha natural (RIPPEL; GALEMBECK, 2009; ZENATTI et al., 2015).

Figura 1: Estrutura Química do poli (cis-1,4-isopreno)



Fonte: Matos; Galembeck; Zarbin (2017).

O processo de coleta de látex da árvore de seringueira envolve a técnica conhecida como "sangria", realizada com uma faca específica, denominada de Huber. Essa técnica consiste em fazer cortes superficiais no tronco da árvore, com aproximadamente 30° de inclinação e 1 mm de profundidade no câmbio, permitindo a exsudação do látex (SANTOS, 2014).

Após a sangria, o látex pode ser coletado na forma líquida ou sólida, dependendo da aplicação final desejada. Para evitar a coagulação espontânea do látex, é comum adicionar uma solução de amônia 1 molar. Essa solução não apenas impede a ação de micro-organismos

que podem causar a coagulação, mas também auxilia na preservação da fluidez do látex durante o processo de coleta (SANTOS, 2014).

2.2. Borracha Natural

2.2.1. Um breve histórico

A história da borracha natural, derivada das árvores de seringueira como *Hevea brasiliensis*, remonta a milênios. Os primeiros registros de seu uso datam do período entre 400-1500 a.C., na Mesoamérica pré-colombiana, onde indígenas exploravam suas propriedades para impermeabilização de calçados, confecção de roupas e até preparação de medicamentos contra hemorragias (MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017). No Brasil, já em 1550, indígenas utilizavam bolas feitas de borracha natural em suas atividades cotidianas (RIPPEL; GALEMBECK, 2009).

A borracha natural ganhou fama na Europa no século XVIII, quando o naturalista francês Charles de la Condamine trouxe amostras da América do Sul. A palavra "borracha" tem origem no termo "caucho", utilizado pelos povos indígenas locais. No século XIX, a borracha natural se tornou um dos produtos mais valorizados globalmente devido às suas propriedades elásticas e impermeáveis. Esse fenômeno impulsionou a "febre do látex", com a seringueira sendo cultivada extensivamente no Sudeste Asiático, Índia e África (JACKSON, 2013).

Um evento significativo que afetou a produção brasileira foi o contrabando de 70 mil sementes de *Hevea brasiliensis* em 1876. Henry Wickham, responsável por essa ação, levou as sementes para Londres e posteriormente para colônias britânicas na Ásia, especialmente na Malásia. Esse episódio marcou o início do declínio da indústria de borracha natural no Brasil (HAAG, 2009; CLAUDIO, 2011).

No auge da produção entre 1879 e 1912, o Brasil se destacou como principal produtor e exportador de látex, um período marcante na história do país (MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017). Durante a Segunda Guerra Mundial (1942-1945), o Brasil testemunhou um breve ressurgimento na produção de látex devido à interrupção da produção asiática devido à invasão japonesa. Isso consolidou ainda mais a importância do país na indústria global da borracha (RIPPEL; GALEMBECK, 2009).

No entanto, por volta de 1912, o Brasil viu seu papel na produção de borracha natural declinar drasticamente, representando apenas 1% da produção mundial (HAAG, 2009; CLAUDIO, 2011). Desde então, o país se tornou um importador de borracha, enquanto os maiores produtores globais se concentraram na Ásia, como Indonésia, Tailândia, Malásia e outros (SANTOS, 2014; MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017).

2.2.2. Propriedades da BN

A borracha natural não apenas possui uma história intrigante, marcada pelo contrabando das sementes da *Hevea brasiliensis*, mas também apresenta propriedades únicas que a colocam em posição de destaque frente aos polímeros sintéticos. Essas propriedades incluem interações complexas com íons Ca^{2+} e a presença de nanopartículas de $CaSO_4$ e outros minerais, que se combinam através de componentes proteico-fosfolipídicos (RIPPEL, 2005; AGREBI et al., 2017). Além dessas características intrínsecas, a borracha natural se sobressai pela sua flexibilidade, impermeabilidade, resistência à abrasão e corrosão (MATOS; GALEMBECK; ZARBIN, 2017).

Essas qualidades físico-químicas fazem da borracha natural um dos biopolímeros mais valorizados no mercado, amplamente empregado na fabricação de uma ampla gama de produtos. Conforme observado por Rippel e Galembeck (2009), mais de 50 mil produtos derivados ou contendo borracha em sua composição são conhecidos. Isso abrange desde aplicações na construção civil e impermeabilização de tecidos até a produção de preservativos, adesivos, vestuário, pneus e uma variedade de dispositivos médicos como tubos intravenosos, luvas, estetoscópios, seringas, esparadrapos e cateteres.

Um exemplo clássico da importância da borracha natural é sua indispensabilidade na fabricação de pneus, onde substituí-la por borracha sintética resultaria na perda significativa de suas propriedades essenciais. Além disso, a borracha natural desempenha um papel fundamental na evolução de nanocompósitos poliméricos multifuncionais, explorando plenamente seu potencial único (RIPPEL; GALEMBECK, 2009).

2.2.3. Crepe Claro Brasileiro

A indústria da borracha natural no Brasil destaca-se pela diversidade de tipos, incluindo a acessível Borracha Granulada Escura Brasileira (GEB) e o Crepe Claro Brasileiro (CCB), reconhecido por sua qualidade superior. O CCB exemplifica a busca pela excelência na produção de borracha natural, distinguindo-se pela sua pureza, alcançada através de um processo meticuloso que minimiza impurezas e produtos químicos lixiviáveis, como proteínas comuns em borrachas (HIRANOBE, 2020).

A produção do CCB é meticulosa, passando por várias etapas essenciais para assegurar sua qualidade excepcional. Começa com a calandragem da borracha para alcançar uma espessura uniforme e remover o excesso de água. Em seguida, segue-se a crepagem, onde a borracha é transformada em uma manta que é posteriormente laminada para afinar ainda mais antes da secagem (HIRANOBE, 2020). A secagem do CCB é uma etapa crítica e delicada do processo de produção. Antes de entrar na estufa de pré-secagem, a manta de borracha deve ter o menor teor de umidade possível. Para alcançar isso, são utilizados jatos de ar produzidos por ventiladores, um procedimento essencial para garantir uma secagem eficiente na estufa, sem sobrecarregá-la. Finalmente, a manta de CCB é exposta a temperaturas controladas, geralmente entre 50 e 70 °C, por aproximadamente 72 horas (ALVES, 2004; HIRANOBE, 2020).

É essencial mencionar que o processo de produção do CCB adota medidas rigorosas para evitar contaminações que possam comprometer sua qualidade, assegurando que o produto mantenha suas características de pureza e clareza (DALL'ANTONIA, A. C. et al., 2009; HIRANOBE, 2020).

O Crepe Claro Brasileiro é um verdadeiro exemplo do compromisso do Brasil com a produção de borracha natural de alta qualidade. Sua pureza e atributos únicos fazem dele um produto muito valorizado no mercado, sendo utilizado em diversas aplicações que demandam materiais de alto desempenho e confiabilidade. No cenário diversificado da indústria de borracha natural, o CCB se mantém como a escolha de destaque entre empresas e setores que buscam sempre o melhor para seus produtos.

2.2.4. Processo de Vulcanização

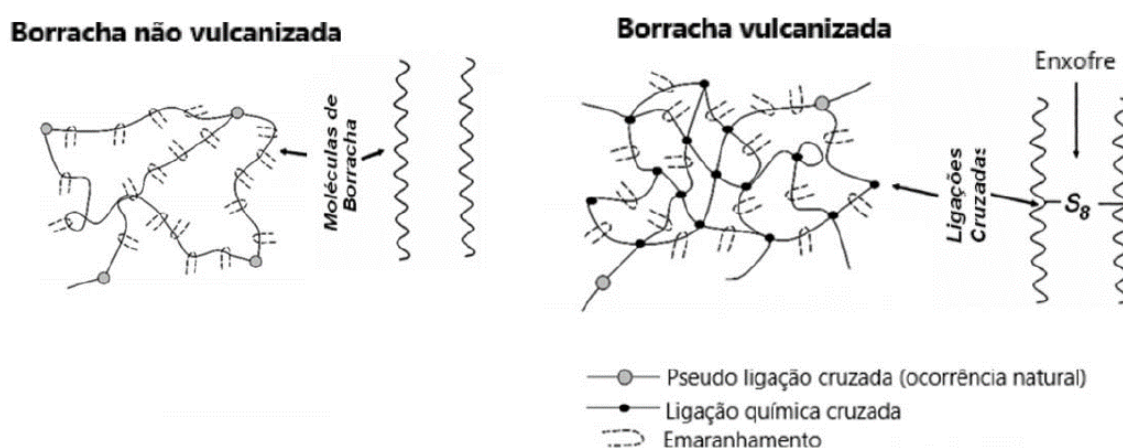
A borracha natural é reconhecida por sua flexibilidade e resistência, características que a tornam um material notável na indústria. Para aprimorar suas propriedades, a vulcanização desempenha um papel crucial. A descoberta acidental da vulcanização por Charles Goodyear em 1839, utilizando enxofre, foi um marco na ciência dos materiais (CARNEIRO, 2022; DA SILVA, 2021).

A vulcanização transforma as macromoléculas da borracha em uma estrutura tridimensional através da formação de ligações químicas cruzadas. Essas ligações covalentes criam uma rede que aumenta a resistência à tração e a elasticidade, além de reduzir a sensibilidade ao calor e ao frio, conferindo durabilidade e resistência à deformação permanente (PAIVA, 2018).

Após o processo de vulcanização, a borracha adquire uma matriz mais rígida devido às ligações químicas cruzadas nas cadeias poliméricas. Isso transforma as longas cadeias em uma rede elástica tridimensional, restaurando ou melhorando suas propriedades elásticas, mesmo em condições variadas de temperatura (GOMES, SANCHES, MALMONGE, 2012).

Além disso, é ilustrativo observar como a borracha se comporta antes e depois da vulcanização. A Figura 2 mostra um esquema comparativo entre a estrutura da borracha não vulcanizada e vulcanizada, destacando as diferenças na organização molecular que conferem às propriedades mecânicas melhoradas após o processo de vulcanização.

Figura 2: Esquema da borracha natural não-vulcanizada e vulcanizada



Fonte: Martins; Filho (2019).

Enquanto o enxofre é amplamente utilizado como agente de vulcanização, outros elementos como selênio (Se), telúrio (Te), monocloreto de enxofre e dissulfeto de tiuram

também podem ser utilizados (SANCHES, 2012). A formação das ligações cruzadas durante a vulcanização varia conforme o sistema utilizado, o tempo e a temperatura empregados. A proporção de acelerador/enxofre na formulação define os sistemas como convencional (CONV), eficiente (EV) e semi-eficiente (SEV), cada um produzindo diferentes proporções de ligações sulfídricas que impactam nas propriedades finais.

O sistema convencional, com baixa razão de acelerador-enxofre, favorece a formação de ligações polissulfídricas. Por outro lado, o EV apresenta alta razão de acelerador-enxofre, enquanto o SEV mantém um valor intermediário. Essa relação influencia diretamente a proporção de ligações mono e dissulfídicas (OLIVEIRA; SOARES, 2002). Vulcanizados que predominam em ligações monossulfídicas exibem melhor resistência ao calor e à reversão devido à estabilidade da ligação C-S. Já aqueles com maior presença de ligações polissulfídicas tendem a ter maior resistência à tração e fadiga, pois as ligações S-S podem se romper e reorganizar, aliviando tensões antes da falha no material.

A vulcanização desempenha um papel crucial na otimização das propriedades da borracha natural. A seleção adequada do agente de vulcanização, do sistema aplicado, assim como o controle preciso do tempo e da temperatura durante o processo, são fundamentais para aprimorar significativamente o desempenho e as características finais do produto. Dominar esses aspectos é essencial para ampliar a aplicação da borracha natural em diversos setores industriais, realçando sua versatilidade e durabilidade comprovada ao longo do tempo.

2.3. Cargas

As cargas desempenham um papel essencial na formulação de compósitos, impactando tanto o processo de produção quanto às propriedades finais do material. Tecnicamente, elas facilitam a elaboração e manipulação dos compósitos, tornando procedimentos como calandragem e extrusão mais eficientes e econômicos em termos de consumo de energia (BOONSTRA, 1979). Além de melhorar o módulo, alongamento na ruptura, tensão de ruptura, resistência ao desgaste e ao rasgo, a adição de cargas pode conferir novas qualidades ao produto final. A escolha das cargas depende das propriedades desejadas para o compósito e seu custo variável em relação às matrizes poliméricas justifica-se pelo potencial de proporcionar características únicas e especiais, com propriedades físicas e mecânicas comparáveis ou superiores às dos materiais constituintes.

Existem diferentes formas de classificar as cargas, considerando suas interações com o meio ambiente (inertes ou reativas), cor e capacidade de reforço. Alguns exemplos dentre as categorias são:

Cargas de Reforço:

- Brancas: Carbonato de cálcio precipitado e nanocristalino, dióxido de titânio e nanotubos de carbono.
- Pretas: Negro de fumo grafênico;
- Poliméricas: Polímeros de alta performance como PEEK (poli-éter-éter-cetona), PPS (sulfeto de polifenileno) e PEI (poliéterimida).

Cargas Inertes:

- Brancas: Talco micronizado, óxido de zinco e sílica precipitada.
- Pretas: Carbono coloidal e negro de fumo tratado.
- Diversas: Fibra de vidro, microesferas de vidro e cerâmicas avançadas.

Esses exemplos destacam a diversidade e a especificidade das cargas utilizadas na formulação de compósitos, cada uma contribuindo de maneira única para as propriedades finais do material.

As cargas desempenham um papel crucial na fabricação e nas propriedades dos compósitos, influenciando diretamente o reforço mecânico do material. O tamanho das partículas é um fator determinante nesse processo: partículas menores que 100 nm, como o negro de fumo, são altamente eficazes no reforço, enquanto partículas entre 100 nm e 1 μ m são consideradas semireforço (KRUZELAK; HUDEC, 2016). A seleção criteriosa das cargas, com base em suas propriedades e dimensões, é crucial para otimizar o desempenho dos compósitos em diversas aplicações, contribuindo para o avanço contínuo de materiais compósitos mais eficientes e versáteis (MOSTAFA et al., 2012; SANTOS, 2014).

2.4. Partículas magnéticas

Os princípios do magnetismo têm sido estudados desde tempos antigos, remontando a pelo menos 600 anos a.C., quando o conhecimento sobre eletricidade estática foi documentado (BUCK E HAYT, 2006). O campo magnético terrestre, formado há aproximadamente 3,45 bilhões de anos, desempenha um papel crucial na proteção do planeta contra a radiação solar, o que foi fundamental para o desenvolvimento da vida na Terra

(TARDUNO et al., 2010). A intensidade desse campo varia entre 0,4 e 0,6 Gauss, dependendo da latitude onde é medido (ÁLVAREZ, 2011).

Os campos magnéticos têm influência significativa em organismos vivos e são objeto de estudo global. A magnetorecepção, associada à orientação animal, foi identificada em várias espécies, como em certas algas, bactérias e até em animais superiores como as abelhas (BLAKEMORE, 1975). Estudos sobre a migração de peixes, como o atum albacora, demonstraram respostas comportamentais influenciadas pelo campo magnético terrestre (TAGÜEÑA E MARTINA, 1997). Acredita-se que a magnetorecepção tenha sido um dos primeiros sistemas sensoriais a evoluir no reino animal (KIRSCHVINK E WALKER, 2001), influenciando também o design de dispositivos na área de robótica (MOURITSEN, 2001).

Os materiais ferromagnéticos, como diferentes tipos de aço, são capazes de intensificar consideravelmente o fluxo magnético quando magnetizados, em comparação com materiais não magnéticos (VILLACIS SORIA, 2011). Esse fenômeno permite a detecção de defeitos superficiais e subsuperficiais através da identificação do campo de fuga, que ocorre quando há um defeito próximo à superfície da peça. A visualização desses campos de fuga geralmente é realizada utilizando partículas magnetizáveis e, em alguns casos, sensores magnéticos como geradores ou fitas magnéticas, dependendo das características do defeito e da peça (ENCHEVARRIA, 2001).

Avanços na tecnologia moderna têm aumentado a importância dos sensores magnéticos em diversas indústrias, incluindo gravação magnética de alta densidade, navegação, segurança, detecção de objetos, sistemas antifurto, testes não destrutivos, marcação magnética, medições geomagnéticas, pesquisa espacial e medições de campos magnéticos no corpo humano (LENZ, 1990; RIPKA, 2001). A gama de sensores disponíveis incluem desde sensores de indução e fluxgate até sensores de efeito Hall, magneto-ópticos, GMR (*Giant Magnetoresistance*), magnetômetros de ressonância e dispositivos SQUID gradiômetros, cada um com sua sensibilidade e aplicação específica (PHAN; PENG, 2008).

2.4.1. Supermagna BW 333

A Supermagna BW 333 é uma liga metálica avançada desenvolvida pela Metal-Chek, composta principalmente por níquel e enriquecida com molibdênio, cromo e tungstênio para garantir alta resistência à corrosão e ao desgaste em ambientes severos como instalações offshore, petroquímicas e de geração de energia (METAL-CHEK, 2023). Projetada para

operar em condições extremas, essa liga mantém sua robustez tanto em temperaturas elevadas quanto criogênicas, destacando-se também por sua tenacidade, resistência à fadiga e excelente capacidade de soldagem (METAL-CHEK, 2023).

Além de suas propriedades mecânicas superiores, a Supermagna BW 333 é não magnética, o que a torna ideal para aplicações sensíveis à interferência magnética, como em equipamentos eletrônicos delicados. Disponível em diversas formas, como chapas, barras, tubos e fios, essa liga é adaptável para uma ampla variedade de necessidades industriais, garantindo força, durabilidade e confiabilidade em ambientes desafiadores (METAL-CHEK, 2023).

2.5. Conectividade

A conectividade é crucial no desenvolvimento das propriedades de sólidos multifásicos, influenciando como diferentes fases estão interligadas e afetam o comportamento do material (BACKES, 2016). Em materiais compósitos, essa interligação pode ocorrer em diversas dimensões espaciais, de zero a três, sendo essencial para entender suas propriedades. O índice de conectividade indica o grau de interligação das fases: um índice de 0 indica ausência de conexão em qualquer direção (x, y ou z), enquanto índices maiores indicam conexões em uma, duas ou até três direções distintas (BACKES, 2016). Essa conectividade é fundamental para o comportamento mecânico e outras propriedades dos compósitos.

A conectividade também pode ser determinada pelo número de fases envolvidas no compósito e por características como a fração volumétrica de cada fase, compatibilidade química e miscibilidade (SANCHES, 2012). Segundo as ideias de Newnham et al. (1970 APUD LIU ET AL., 2019), uma fase pode estar conectada em até três direções, representando as direções "x", "y" e "z" no sistema cartesiano. Um índice de conectividade igual a 0 indica que a fase não está conectada em nenhuma direção.

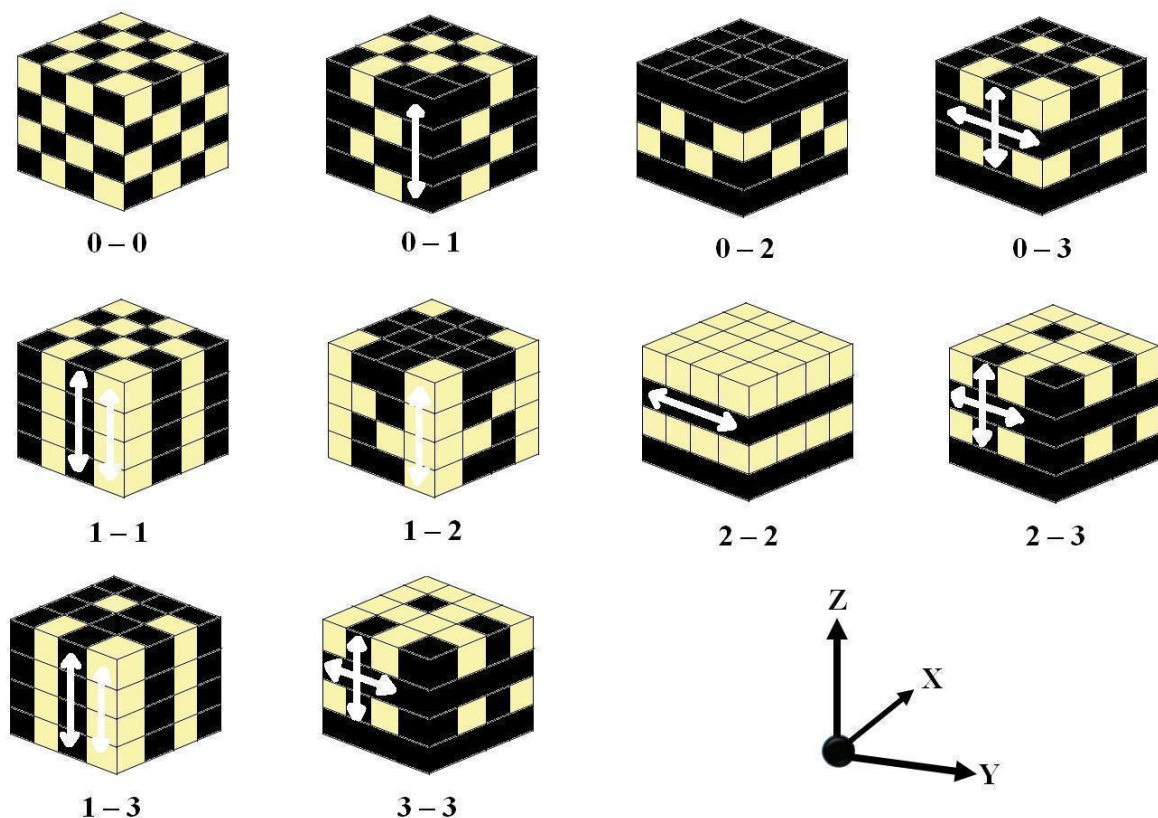
Compósitos bifásicos podem apresentar uma variedade de configurações de conectividade, como 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 2-3 e 3-3, que descrevem como as fases dispersa e matriz estão interconectadas, como apresentado na Figura 3 (LIU ET AL., 2019; SANCHES, 2012). Especialmente, os compósitos com conectividade 0-3 são amplamente explorados na indústria devido às suas propriedades distintas, como baixa

impedância acústica, alta flexibilidade mecânica e baixo fator de qualidade mecânica, adequando-se bem em aplicações eletromecânicas (FREITAS, 2012).

Uma técnica comum para fabricar compósitos com conectividade 0-3 envolve dissolver o polímero em um solvente adequado e dispersar a segunda fase na mistura. Após a homogeneização, a solução é aplicada e o solvente é evaporado para formar um filme compósito, podendo ser necessário prensagem a quente para assegurar uniformidade (GIMENES, 2005).

A conectividade é fundamental para entender o comportamento dos materiais compósitos, proporcionando insights valiosos sobre como as diferentes fases se relacionam e influenciam suas propriedades específicas. Os compósitos com conectividade 0-3 são particularmente valorizados devido às suas características únicas, obtidas por meio de processos de fabricação específicos (FREITAS, 2012; GIMENES, 2005).

Figura 3: Conectividades de compósito bifásico



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 3, é observável que os compósitos com conectividade 0-3 são destacados por serem relativamente fáceis de obter e apresentarem diversas vantagens, como baixa

impedância acústica, baixo fator de qualidade mecânica e alta flexibilidade mecânica. Esses compósitos são amplamente estudados na indústria devido às suas propriedades únicas e são frequentemente utilizados na construção de elementos eletromecânicos (FREITAS, 2012). Um método comum para produzir compósitos com conectividade 0-3 envolve dissolver um polímero em um solvente apropriado enquanto a segunda fase é dispersa na mistura. Após homogeneização, o composto é aplicado sobre um substrato e o solvente é evaporado para formar um filme compósito; em alguns casos, é aplicada prensagem a quente para garantir uma espessura uniforme (GIMENES, 2005).

2.6. Compósitos

A indústria moderna está cada vez mais exigente quanto à busca por novos materiais que possam satisfazer uma diversidade de aplicações, impulsionando o desenvolvimento dos materiais compósitos. Recentemente, houve um crescimento significativo nos estudos focados nas propriedades mecânicas desses materiais, visando amplificar suas características para atender às crescentes demandas industriais (MADRONA et al., 2021). Entre os materiais compósitos, os nanocompósitos se destacam ao combinar uma matriz polimérica com propriedades de materiais em nanoescala, utilizando insumos como nanopartículas, nanotubos de carbono e grafeno (ARNECKE et al., 2022).

Os compósitos são categorizados com base no tamanho das partículas, sendo macrocompósitos com partículas na ordem dos micrômetros e nanocompósitos contendo pelo menos uma fase com dimensões nanométricas, frequentemente homogeneizadas com outra matriz (JUNIOR; RETHWISCH, 2016). Esses materiais consistem em uma matriz contínua que envolve uma fase dispersa, cujas propriedades dependem da concentração, distribuição, tamanho, forma e orientação das partículas na fase dispersa (ARNECKE et al., 2022). As fibras desempenham um papel crucial como reforços na matriz, conferindo resistência mecânica ao compósito devido ao seu pequeno diâmetro, o que evita a fragilidade do material (ARNECKE et al., 2022).

Os materiais compósitos buscam integrar as propriedades das fases constituintes para otimizar o desempenho em relação a cada fase individualmente, permitindo o desenvolvimento de uma ampla gama de aplicações (TITTA et al., 2007). Classificados conforme a matriz (metal, cerâmica ou polímero), tipo de reforço e orientação das partículas, os compósitos oferecem uma flexibilidade significativa para atender às necessidades

industriais específicas (SHEIKH-AHMAD, 2009). Além das categorias tradicionais, os compósitos híbridos incorporam camadas diferentes com disposições variadas de fibras, proporcionando maior versatilidade na seleção do material ideal para aplicações específicas (DURIGAN NETO et al., 2018).

Com suas propriedades únicas e a capacidade de combinar diferentes características, os materiais compósitos desempenham um papel fundamental em diversas indústrias, moldando o futuro da tecnologia e da produção industrial. À medida que a pesquisa continua a avançar, novas composições e técnicas de fabricação continuam a expandir o potencial desses materiais versáteis.

2.6.1. Compósito Polimérico

Os materiais compósitos desempenham um papel crucial em diversas indústrias, especialmente os compósitos poliméricos, que combinam fibras de alta resistência envolvidas por uma matriz polimérica, geralmente uma resina (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008). Estes materiais são amplamente aplicados na indústria automotiva devido à capacidade de reduzir o peso dos componentes enquanto aumentam a resistência mecânica e química (ARAÚJO, 2010). Enquanto os microcompósitos tradicionais possuem reforços de dimensões micrométricas próximas da matriz polimérica (SUSIN, 2014), os nanocompósitos emergem como uma nova categoria, onde a fase dispersa consiste em nanopartículas integradas em uma matriz termoplástica ou termorrígida, frequentemente utilizando resinas epóxi pela sua versatilidade (ARAÚJO, 2010; SUSIN, 2014).

No entanto, uma nova categoria de materiais compósitos surgiu: os nanocompósitos. Nesses materiais, a fase dispersa consiste em nanopartículas, enquanto a fase contínua pode ser um termoplástico ou um termorrígido (ARAÚJO, 2010). Resinas epóxi são amplamente utilizadas devido à sua versatilidade na fabricação desses compósitos (SUSIN, 2014).

O conceito de materiais compósitos abrange qualquer material multifásico onde as fases componentes são distintas e combinadas, resultando em alterações significativas de propriedades (CALLISTER, 2008). Esses materiais são artificialmente criados e não ocorrem naturalmente, sendo mais complexos que materiais isotrópicos como os metálicos (LEVY NETO; PARDINI, 2018). As propriedades dos compósitos são influenciadas por uma variedade de fatores e variáveis, possibilitando ajustes na fabricação para atender requisitos específicos de projetos (LEVY NETO; PARDINI, 2018). Os polímeros são matrizes

amplamente utilizadas na fabricação de compósitos devido a características como maleabilidade, flexibilidade, leveza e custo acessível (SILVA, 2013). Classificados em termorrígidos e termoplásticos, estes compósitos apresentam comportamentos distintos durante o aquecimento, com termorrígidos mantendo ligações cruzadas que os tornam não fusíveis e termoplásticos permitindo reprocessamento, embora com perda de propriedades a cada ciclo (SILVA, 2014; GOUVEIA FILHO, 2015; HIRANOBE, 2020).

Os materiais compósitos poliméricos são amplamente utilizados em diversas indústrias devido à sua capacidade de combinar propriedades únicas das fases constituintes. Dentro desta categoria, destacam-se os compósitos reforçados com fibras, que podem ser classificados em dois principais tipos de matrizes poliméricas: termoplásticos e termorrígidos. A Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre essas duas classes de materiais, destacando suas características e comportamentos distintos.

Tabela 1: Diferença entre termoplásticos e termorrígidos

Termoplásticos	Termorrígidos
Reciclável mecanicamente	Não reciclável mecanicamente
Tempo ilimitado de armazenamento	Tempo limitado de armazenamento
Alta viscosidade quando fundido	Baixa viscosidade durante o processamento
Baixa resistência à fluência	Alta resistência à fluência
Temperatura de uso limitada à Tg e Tm. Baixa estabilidade térmica e dimensional	Alta resistência térmica e dimensional

Fonte: Silva (2014).

Os materiais compósitos poliméricos são essenciais em diversas aplicações industriais, oferecendo uma ampla variedade de opções para a fabricação de componentes que são leves, duráveis e versáteis. Compreender suas propriedades e classificações permite explorar melhor seu potencial em diversos setores.

2.7. Impedância elétrica

Diversos mecanismos de transporte de eletricidade pelos portadores de carga ocorrem em diferentes componentes quando expostos a um campo elétrico externo. Para avaliar esse fluxo, a técnica de espectroscopia de impedância destaca-se como uma ferramenta

altamente eficaz. Essa metodologia investiga a resistência ou o obstáculo que o material oferece à passagem de uma corrente alternada (CA), que surge quando um campo elétrico alternante é aplicado. Nessa configuração, a voltagem está constantemente à frente da corrente com um ângulo de fase θ (SILVA, 2009).

A impedância, segundo sua definição, é uma medida complexa onde a parte real está associada a fenômenos dissipativos, enquanto a parte imaginária está ligada a fenômenos puramente capacitivos e indutivos (HOWARD, 1987). Simplificando, a impedância pode ser caracterizada através de um circuito elétrico elementar que simula um determinado material, composto por um resistor e, quando necessário, um capacitor e/ou um indutor.

Quando uma tensão elétrica alternada é aplicada, o circuito oferece resistência à corrente elétrica alternada que se desenvolve no material. Portanto, a impedância elétrica desse sistema pode ser expressa pela equação 1 (SILVA, 2009):

$$Z = \frac{\hat{V}}{\hat{I}} \quad (1)$$

em que Z é a impedância (Ohm), $\hat{V}$ representa o fasor da tensão (Volts) e $\hat{I}$ o fasor da corrente (Ampère).

Quando uma tensão elétrica é aplicada por meio de uma fonte alternada, com uma amplitude V_m e frequência angular, o potencial $V(t)$ exibe um padrão de onda senoidal conforme descrito na equação (2):

$$V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

assim, encontra a corrente I :

$$I(t) = I_m \sin(\omega t - \theta), \quad (3)$$

em que I_m representa a amplitude da corrente e θ representa o ângulo de fase entre I e V . No caso de um comportamento exclusivamente resistivo, não há diferença de fase, ou seja, é nula. Por outro lado, quando o comportamento é puramente capacitivo, a diferença de fase entre essas duas grandezas é de 90° , o que significa que a corrente estará em adiantamento em relação à tensão.

Quando as grandezas I e V estão em sincronia de fase, isso indica um comportamento puramente resistivo, e a impedância é caracterizada da seguinte forma:

$$Z = R \quad (4)$$

Portanto, se I e V estão fora de fase ($\theta = 90^\circ$), o sistema exibe um comportamento puramente capacitivo, a impedância Z pode ser representada como a parte imaginária de um circuito RC , da seguinte forma:

$$Z = iX_C \quad (5)$$

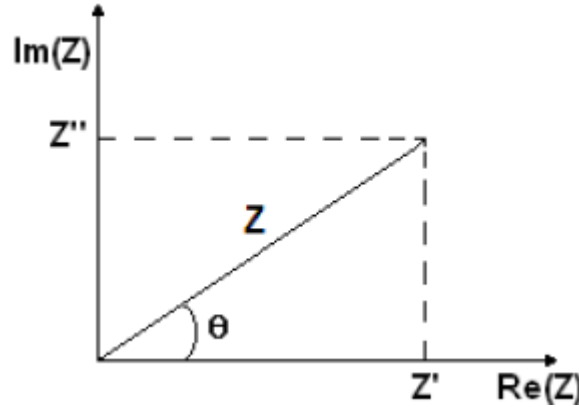
sendo que o X_C representa reatância capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (6)$$

Consequentemente, a representação da impedância de um sistema pode ser realizada mediante o uso da notação de números complexos, como segue: $S = a + ib$ (sendo i a unidade imaginária, $i = \sqrt{-1}$), em que S denota o vetor plano do sistema em relação aos eixos ortogonais. Enquanto isso, a e b correspondem às suas componentes cartesianas.

A Figura 4 ilustra a representação vetorial da impedância Z . Nessa figura, Z é dividido em sua componente real (Z') e sua componente imaginária (Z''), refletindo a complexidade da medida.

Figura 4: Representação do vetor de impedância Z



Fonte: Chinaglia; Gozzi, (2009); Howard (1987).

Dessa maneira, o vetor da impedância complexa Z^* pode ser traçado no plano complexo, utilizando um plano cartesiano para indicar suas partes, em que a parte real representa o comportamento resistivo (R) e a parte imaginária é representada por X_C . A representação gráfica do vetor Z^* e suas componentes no plano complexo são apresentadas na Figura 4.

$$Z = Z' + iZ'' = R + iX_C \quad Z = Z' + iZ'' = R + iX_C \quad (7)$$

O vetor impedância complexa é descrito como:

$$Z = Z' - jZ'' \quad (8)$$

Analisando o gráfico da impedância, obtemos as seguintes equações:

$$Re(Z) = Z \cos \theta, \quad (9)$$

$$Im(Z) = Z \sin \theta, \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad (11)$$

O módulo de impedância elétrica Z^* , é analisando pelo diagrama de Argand:

$$|Z^*| = [(Z')^2 + (Z'')^2]^{1/2} \quad (12)$$

Com base na impedância complexa, é possível obter diversas grandezas elétricas e dielétricas, tais como o módulo elétrico complexo, a condutividade elétrica complexa, a capacitância complexa, a admitância complexa, a permissividade dielétrica complexa, entre outras. Por exemplo, a admitância complexa de um sistema, que é o inverso da impedância complexa, é calculada pela equação (13):

$$Y = \frac{1}{Z} = G + iB \quad (13)$$

onde B representa a susceptância e G a condutância. Com a equação (12) no plano complexo temos as equações. (14) e (15):

$$G = \frac{Z'}{(Z'^2 + Z''^2)^{1/2}} \quad (14)$$

$$B = \frac{Z''}{(Z'^2 + Z''^2)^{1/2}} \quad (15)$$

Tabela 2: Relação das funções elétricas: impedância, admitância, permissividade e módulo

	M	Z	Y	ϵ
M	M	μZ	μY^{-1}	ϵ^{-1}
Z	$\mu^{-1} M$	Z	Y^{-1}	$\mu^{-1} \epsilon^{-1}$
Y	μM^{-1}	Z^{-1}	Y	$\mu \epsilon$
ϵ	M^{-1}	μZ^{-1}	μY^{-1}	ϵ

Fonte: Macdonald (2005)

Para fornecer uma visão abrangente das funções elétricas relacionadas, a Tabela 2 apresenta a relação entre impedância, admitância, permissividade e módulo. Essas grandezas

elétricas são fundamentais para a caracterização e análise dos materiais em resposta a campos elétricos alternados.

Da mesma forma, usando a impedância complexa, é viável determinar as demais grandezas, como ilustrado na Tabela 2, onde todas compartilham uma constante comum μ , $\mu = i\omega C_0$ (ω é a frequência angular e C_0 é a capacitância do vácuo).

No caso de materiais poliméricos, é apropriado utilizar a constante dielétrica complexa ϵ^* para investigar as respostas elétricas dos materiais dielétricos. No entanto, a representação e análise dos dados de impedância geralmente variam de acordo com o tipo de material que está sendo analisado.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Caracterização das propriedades reométrica, térmicas, mecânicas elétricas e dielétricas de compósitos de borracha natural vulcanizada reforçados com partículas magnéticas.

3.2. Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito das dispersões da PM nos parâmetros reométricos dos compósitos bifásicos.
- Realizar um estudo da influência da dispersão de PM nas propriedades térmicas e mecânicas da matriz BNV.
- Realizar um estudo das propriedades dielétricas e elétricas (em regime *dc* e *ac*) das amostras dos compósitos bifásicos por meio da técnica de espectroscopia de impedância e métodos de duas pontas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais Utilizados

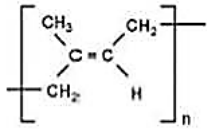
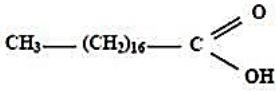
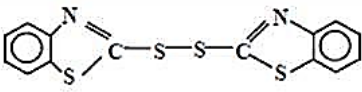
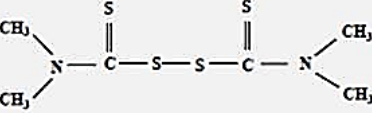
4.1.1. Borracha Natural

A borracha natural (BN) utilizada neste estudo foi do tipo crepe claro brasileiro, adquirido junto à DLP Indústria e Comércio de Borrachas e Artefatos Ltda, situada no município de Poloni, SP.

4.1.2. Reagentes

A Tabela 3 mostra as propriedades físico-químicas dos reagentes utilizados.

Tabela 3: Propriedades físicas e químicas dos reagentes

Compostos	Massa Molar (g mol ⁻¹)	Densidade Específica (g cm ⁻³)	Estrutura Química
Borracha Natural (cis-1,4 poli-isopreno)	(68,12) _a	0,93	
Óxido de zinco	81,41	5,57	Zn – O
Ácido esteárico	284,48	0,85	
Enxofre	256,52	2,07	
MBTS	332,47	1,53	
TMTD	240,43	1,42	

Fonte: Hiranobe (2020)

Os aceleradores de vulcanização MBTS e TMTD, com uma pureza de 99% foram fornecidos pela empresa MasterBor Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA, situada em Itaquaquecetuba, SP. Os demais materiais, incluindo enxofre, óxido de zinco e ácido esteárico, foram adquiridos comercialmente com 99% de pureza da Dinâmica Química Contemporânea Ltda. Todos os reagentes utilizados para a produção dos compósitos foram utilizados em sua forma como recebida.

4.1.4. Partícula Magnética

A partícula magnética (PM) utilizada foi a Supermagna BW 333 adquirida da METAL-CHEK LTDA. Composição básica: óxido de zinco. Veículo indicado: água + BC 502 ou óleo OMC-10. A partícula magnética foi adicionada na borracha natural e misturada sem veículo.

4.2. Preparo do Nanocompósito BNV/PM

A amostra de BN vulcanizada pura e o compósito BNV/PM foram preparados utilizando um misturador aberto de rolos paralelos da marca Makintec, conforme mostrado na Figura 5, com uma razão de fricção de 1:1,25, seguindo a norma ASTM D3182. As quantidades em phr (per hundred rubber) dos materiais utilizados para obter as amostras e as quantidades dos aditivos vulcanizantes em relação a 100 phr de BN, estão apresentados na Tabela 4.

Figura 5: Misturador aberto de rolos com (a) BNV pura



Fonte: Elaborado pelo autor.

A metodologia para obtenção das amostras de compósitos poliméricos condutores foi dividida nas seguintes etapas. Primeiro foram medidas as massas dos reagentes e materiais necessários para a elaboração dos compósitos. Em seguida a BN pura foi adicionada ao misturador de cilindros e devido ao torque dos cilindros sobre a BN, ocorreu o cisalhamento das suas cadeias quebrando-as formando uma manta em torno do cilindro dianteiro. O atrito entre a manta e o cilindro traseiro, girando a velocidades diferentes, aquece a amostra temporariamente reduzindo suas características elásticas e tornando-a plástica e de baixa viscosidade, o que facilita a incorporação dos reagentes.

O próximo passo foi a adição dos reagentes, tais como: o ácido esteárico e o óxido de zinco e, misturados por 20 minutos para garantir a homogeneização. Após a homogeneização, as amostras foram deixadas em repouso por 4 horas para potencializar o processo de ativação. Após esse tempo, a mistura de BN, ácido esteárico e óxido de zinco retornou ao misturador, onde os aceleradores MBTS e TMTD, além do enxofre, foram adicionados. O composto foi misturado por 10 minutos.

Por fim, as amostras foram retiradas do misturador e submetidas a ensaios reométricos para determinar o tempo ótimo de cura. Em seguida, as amostras foram termicamente prensadas a 150°C para a confecção dos corpos de prova.

Tabela 4: Materiais utilizados para obtenção do nanocompósito em phr

Amostras	BNV	BNV-PM10	BNV-PM20	BNV-PM30
BNV	100.00	100.00	100.00	100.00
Óxido de zinco	4.00	4.00	4.00	4.00
Ácido esteárico	2.00	2.00	2.00	2.00
Enxofre	2.50	2.50	2.50	2.50
MBTS	1.00	1.00	1.00	1.00
TMTD	0.50	0.50	0.50	0.50
PM	0.00	10.00	20.00	30.00

MBTS - dissulfeto de dibenzotiazol. TMTD – dissulfeto de tetrametiltiuram

Fonte: Elaborado pelo autor.

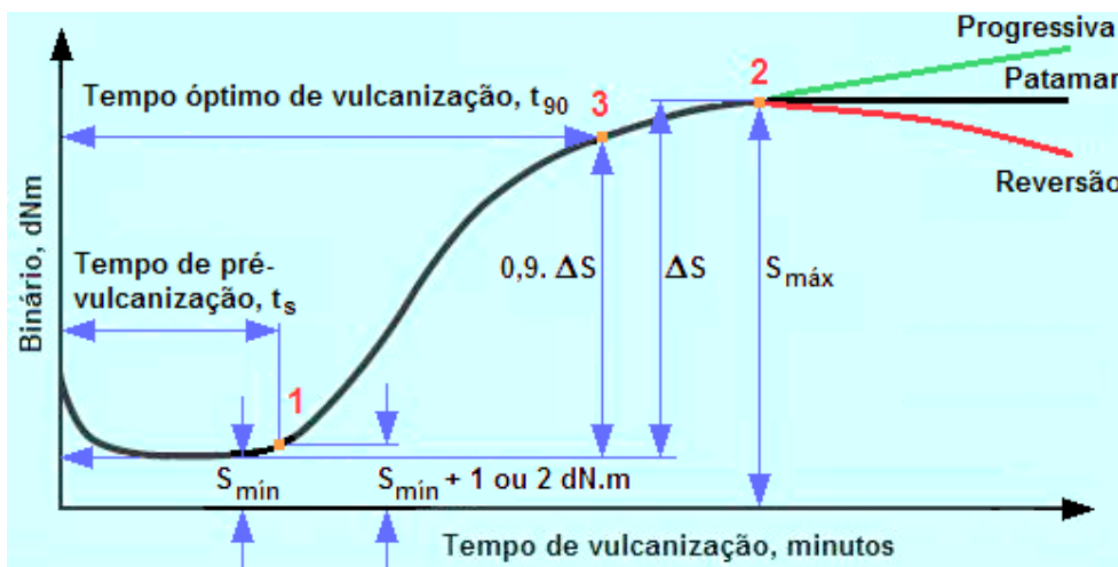
O preparo dos compósitos foi realizado no núcleo Morumbi do departamento de física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", campus de Presidente Prudente - SP.

4.3. Métodos de Caracterização

4.3.1. Reometria

A análise reométrica foi realizada conforme a norma ASTM D2084-17, amplamente utilizada para avaliar as propriedades de vulcanização de compósitos a base de borracha. Essa metodologia é crucial tanto para o controle de qualidade dos materiais quanto para o desenvolvimento de novos compostos (HIRANOBE, 2020). A técnica de reometria permite obter diversas características do compósito a partir da curva reométrica gerada, como mostrado na Figura 6. Entre essas características estão: velocidade de cura (CRI), torques máximos (M_H) e mínimo (M_L), tendência à reversão, tempo de pré-vulcanização (*scorch time*, t_{s1}) e o tempo ótimo de vulcanização (t_{90}) (HIRANOBE, 2020, SIRQUEIRA, 2006).

Figura 6: Curva reométrica



Fonte: Caetano (2020).

Os ensaios reométricos foram realizados com um equipamento da marca Team, no Laboratório de Tecnologia da Borracha da UNESP, campus de Presidente Prudente – SP. As amostras de nanocompósito foram então prensadas termicamente usando um equipamento Mastermac - Modelo Vulcan 400/20-1, com uma pressão máxima de 210 Kgf/cm². O molde de aço utilizado tinha dimensões de 150 x 150 x 2 mm (1010/1020), formando filmes finos. As amostras foram prensadas até atingir 90% de suas ligações cruzadas e depois removidas da prensa. Mesmo após a interrupção do aquecimento, o calor acumulado no material permitiu que as amostras atingissem 100% das ligações cruzadas, completando a vulcanização da borracha (GUERRA, 2004).

4.3.2. Determinação das ligações cruzadas pelo método do inchamento em solvente orgânico (Flory-Rehner)

Para realizar o processo de inchamento, é necessário, inicialmente, imergir o elastômero vulcanizado em um solvente que possua características moleculares compatíveis com o material. Isso deve ser feito de maneira a preservar a integridade do material estudado, permitindo que as moléculas do solvente penetrem na estrutura da amostra e a expandam. Esse procedimento foi detalhado por Mansilla (2017), que observou que, ao longo de um período específico, o volume da amostra aumenta devido à afinidade do solvente com o

compósito. No entanto, em certo ponto, um equilíbrio é alcançado, no qual a absorção do solvente pelo compósito se estabiliza devido às pressões osmóticas e às forças da rede. O volume do inchamento dependerá da densidade de reticulação e da compatibilidade do solvente com a amostra.

Para realizar as análises de inchamento, as amostras foram pesadas com massas aproximadas a 0,25g, com erro de 0,05g. Em seguida, estas amostras são imersas em tolueno por 5 dias em recipiente protegido da luz. Após 5 dias imersos em solvente, todas as amostras foram pesadas, de forma que apenas retirassem o excesso de solvente. Em seguida, as amostras foram para a secagem na estufa, com temperatura de 60 °C por 24h, para que em seguida fossem pesadas novamente. Após anotar as variações do peso das amostras antes e depois de cada um dos processos serão calculadas as densidades específicas e as densidades das ligações cruzadas de cada amostra.

A equação criada por Flory-Rehner, foi utilizada para calcular a densidade de ligação cruzada por meio da equação (16) (FLORY, 1943; VIEYRES, 2013; SANTOS, 2014).

$$v = \frac{-(\ln(1 - V_B) + V_B + \chi \cdot (V_B)^2)}{(\rho_B) \cdot (V_0) \cdot \left(V_B^{\frac{1}{3}} - \frac{V_B}{2} \right)} \quad (16)$$

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

$$V_B = \frac{V_{\text{borracha}}}{V_{\text{solvente}} + V_{\text{borracha}}} = \frac{\frac{m_{\text{borracha}}}{\rho_{\text{borracha}}}}{\frac{m_{\text{toluena}}}{\rho_{\text{toluena}}} + \frac{m_{\text{borracha}}}{\rho_{\text{borracha}}}} \quad (17)$$

Para determinar a densidade de cada composto de BN, é necessário utilizar a densidade relativa, conforme as normas ASTM D297-15 e ASTM D792-13 (NORMA, 2015; NORMA, 2013). Essas normas exigem a consideração da massa da amostra no ar e em um líquido de densidade conhecida, como o álcool etílico, que possui uma densidade de 0,79 g/cm^3 . A densidade específica é calculada através da equação (18).

$$\rho = \frac{\rho_L \cdot m_A}{m_A - m_B} \quad (18)$$

onde ρ é a densidade da amostra (g/cm^3); m_A é massa da amostra sem fio no ar (g); ρ_L é a densidade do etanol na temperatura de análise (g/cm^3); m_B é a massa da amostra sem fio no líquido (g).

4.3.3. Análise Termogravimétrica (TGA)

As análises termogravimétricas (TG/DTG) foram realizadas utilizando cerca de 10 mg de cada amostra. Estas foram executadas com um equipamento do modelo 209 da marca Netzsch. O intervalo de temperatura utilizado foi de 30 °C a 900 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, em uma atmosfera de nitrogênio inerte, com um fluxo de 15 mL/min.

4.3.4. Análise mecânica

Ensaaios de mecânicos em modo tração foram realizados para avaliar a influência das PM nas propriedades mecânicas da matriz BNV. Os testes mecânicos foram realizados à temperatura ambiente utilizando uma máquina de ensaio universal da *Instron*, modelo 3639, seguindo a norma ISO 37:2011. Foi usada uma célula de carga de 100 N e velocidade de cruzeta de 100 mm/min. Os espécimes foram cortados de acordo com a ISO 1286:2006 e os resultados foram calculados em média a partir dos dados de cinco corpos. Os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório do Grupo de Polímero da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, sob a supervisão do Prof. Dr. José Antônio Malmonge.

4.3.5. Propriedades Elétricas e Dielétricas

Anteriormente às análises elétricas, as amostras foram metalizadas com tinta condutora na configuração: eletrodo amostra-eletrodo. Com as amostras metalizadas utilizando um equipamento de impedância elétrica da marca *Solartron*, modelo SI 1260 que tem precisão de 0,1%, utilizou o método de duas pontas para realizar as análises em temperatura ambiente e com faixa de frequência de 10^{-2} Hz a 10^6 Hz. Através das análises foram obtidos dados de condutividade elétrica real ($\sigma'(f)$) e imaginária ($\sigma''(f)$), permissividade relativa real ($\epsilon'(f)$) e o módulo elétrico M' .

A análise de condutividade elétrica *dc* (σ_{dc}) das amostras foram realizadas utilizando o método de duas pontas, acoplado a fonte de tensão modelo 247 *high voltage supply* e um eletrômetro modelo 610C ambos da *Keithley Instruments* e foi aplicado uma ddp igual a 40V para identificar a corrente elétrica no eletrômetro.

As análises de impedâncias elétricas foram realizadas nos laboratórios do grupo de polímeros do departamento de física e química da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS-UNESP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Comportamento Reológico

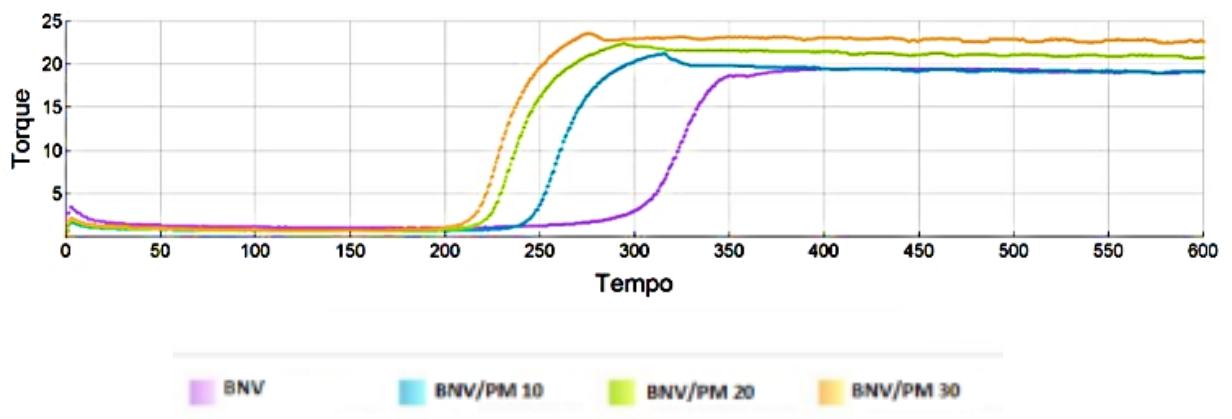
5.1.1. Reometria

A análise reométrica é uma importante ferramenta para determinar alguns parâmetros reométricos peça chave para compreender os processos de vulcanização das amostras de BNV pura e dos compósitos BNV/PM. Entre os parâmetros destacam-se o torque mínimo (M_L); torque máximo (M_H); tempo de pré-cura (t_{SI}), também conhecido como tempo de cura inicial; bem como o tempo ideal de cura (t_{90}), que representa o momento em que a amostra atinge 90% de suas ligações cruzadas; a taxa de velocidade de reticulação (CRI), que indica a velocidade de vulcanização por minuto (min^{-1}) do material, como apresentado pela equação (19).

$$CRI = \frac{100}{(T_{90} - t_{SI})} \quad (19)$$

Na Figura 7, pode ser observado as curvas reométrica do torque em função do tempo a 150 °C para as amostras BNV e dos compósitos magnéticos BNV/PM com diferentes concentrações de PM.

Figura 7: Curvas reométricas dos compósitos magnéticos BNV/PM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o padrão reométrico dos compósitos foi influenciado com a dispersão de PM. À medida que concentração de PM foi adicionada na matriz BNV, foi constatado que valor do t_{90} diminui, enquanto o valor do M_H se tornou maior (Tabela 5). O aumento do M_H pode estar relacionado ao efeito do reforço das PM que atuam como centro de resistência mecânica entre as cadeias da BNV dificultando seu movimento. Portanto, a presença de PM tem influência significativa no processo de vulcanização.

É evidente na Figura 7 que a partir de um certo instante de tempo, isto é, após o período de pré-vulcanização, ocorre um aumento gradual no torque. Isso ocorre à medida que as ligações cruzadas começam a se formar durante o processo de vulcanização dos espécimes, bem como devido à presença das cargas PM. Conforme as ligações cruzadas se multiplicam no interior dos espécimes NRV/PM, a viscosidade do material também aumenta e, como consequência ocorre um aumento correspondente no torque.

Na Tabela 5 estão dispostos os parâmetros reológicos extraídos da Figura 8. Como pode ser observado, os valores de ΔM aumentam à medida que a quantidade de PM é aumentada na matriz BNV. Esse comportamento se dá devido ao aumento da rigidez da matriz à medida que a concentração de carga é aumentada. A variação no torque representa a discrepância entre o torque máximo e mínimo, refletindo a quantidade de ligações cruzadas formadas e a presença de PM nas amostras dos compósitos.

Por outro lado, o valor do t_{90} apresenta um decréscimo com o aumento da concentração de PM na matriz NRV, isso é um indicativo que o tempo ótimo de cura ou tempo que leva para as amostras atingirem 90% das ligações cruzadas são impactadas pela dispersão das PM.

Tabela 5: Parâmetros reométricos da BNV pura e dos espécimes do compósito BNV com diferentes concentrações em phr de partículas de PM

Espécimens	t_{sI} (min)	M_L (dN.m)	M_H (dN.m)	ΔM (dN.m)	CRI (min⁻¹)	t_{90} (min)
BNV	04:43	1,13	22,03	20,90	101,70	05:42
BN/PM10	04:02	0,79	24,07	23,28	127,40	04:49
BN/PM20	03:39	0,79	25,31	24,52	120,05	04:29
BN/PM30	03:30	0,90	26,66	25,76	125,06	04:18

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor t_{sI} é outro parâmetro que foi influenciado pela dispersão de PM na matriz NRV, essa grandeza corresponde ao intervalo de tempo necessário para evitar a vulcanização imediata das amostras quando submetida ao aquecimento para vulcanização. No caso da BNV pura, esse tempo foi igual a 4,43 minutos, diminuindo conforme a quantidade de PM foi aumentada.

A avaliação do CRI permite avaliar a velocidade da reação de cura, esse parâmetro está relacionado com a diferença entre o t_{90} e o t_{sI} e, quanto menor a diferença entre eles, maior será o valor do CRI (ABHITHA, 2013). Portanto, ao examinar a Tabela 5, percebe-se que quanto maior o valor de CRI, mais rápido é o processo de cura, como evidenciado no caso do compósito BN/PM10, que apresenta um CRI de $127,40 \text{ min}^{-1}$.

5.1.2. Determinação da densidade de ligações cruzadas dos espécimes.

No presente estudo também foi realizado uma análise para determinar a densidade de ligações cruzadas dos espécimes BNV pura e dos compósitos magnéticos bifásicos NRV/PM com diferentes concentrações de partículas de PM. Esse estudo foi realizado por meio do processo de inchamento utilizando o tolueno como solvente orgânico e empregando a equação de Flory-Rehner (equação (16)). Por meio dos ensaios de inchamento e cálculo usando a equação de Flory-Rehner foi possível determinar a densidade das ligações cruzadas da BNV pura, bem como das amostras dos compósitos BNV/PM, conforme apresentado na **Tabela 6**.

Tabela 6: Densidades de ligações cruzadas determinadas por inchamento (Flory-Rehner)

Compósitos (Phr)	Flory-Rehner $\nu \times 10^{-4} (\text{mol cm}^{-3})$
BNV	$1,580 \pm 0,017$
BNV/PM10	$2,491 \pm 0,030$
BNV/PM20	$2,202 \pm 0,073$
BNV/PM30	$2,803 \pm 0,062$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os dados da Tabela 6, pode ser observado que houve um aumento gradual na densidade de ligações cruzadas à medida que a concentração de partículas de PM nos espécimes NRV/PM foi aumentada. Um comportamento semelhante foi observado em estudo

conduzido por Hiranobe et al. (2023), no qual foi constatado que o aumento da concentração de carga na matriz BNV resultou em um aumento no número de ligações cruzadas. Uma hipótese levantada pelos autores é que à medida que a quantidade de carga é aumentada nas amostras do compósito, isso pode promover um maior grau de reticulação do enxofre entre as cadeias de BNV e, conseqüentemente, aumentar a densidade das ligações cruzadas (HIRANOBE, 2020; SANTOS et al., 2022). Dessa forma, o aumento da densidade de ligações cruzadas, pode resultar em um aumento no módulo de elasticidade, na dureza e em outras propriedades mecânicas (HIRANOBE et al. (2023)).

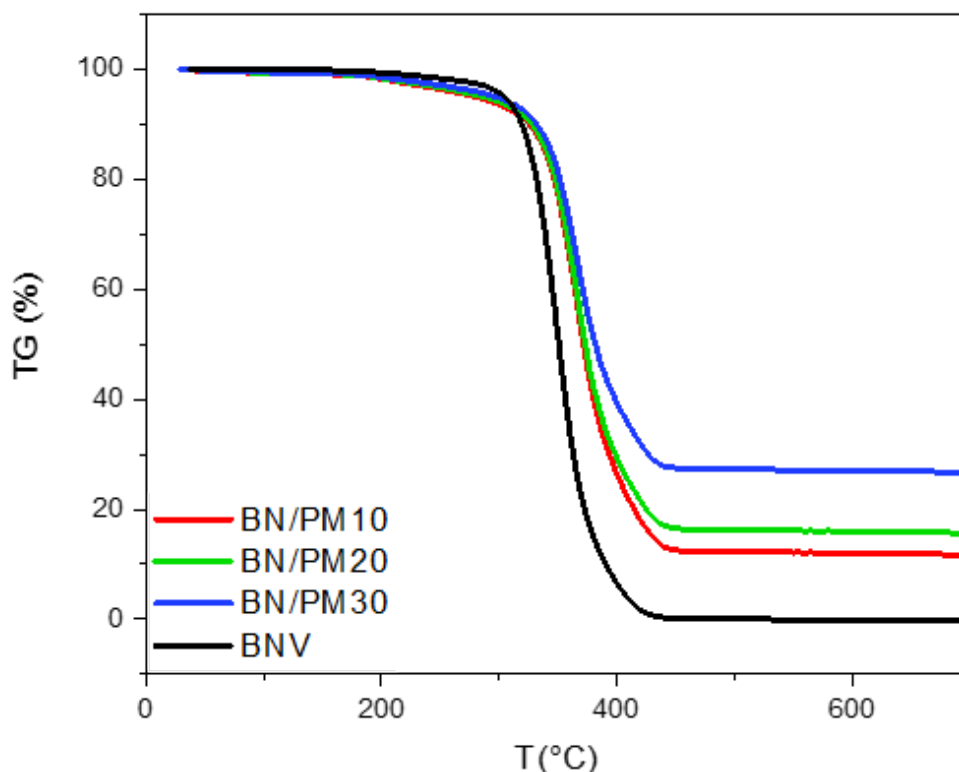
Seguindo a mesma tendência, o aumento da concentração de partículas de PM resultou em uma melhoria da qualidade da vulcanização das amostras dos compósitos BNV/PM (HIRANOBE, 2020; SANTOS et al., 2022). Este aumento no valor da densidade de ligação cruzado para os espécimes do compósito NRV/PM com maiores concentrações de partículas PM, se originam das ligações químicas entre os átomos de enxofre e grupos pendentos nas extremidades da cadeia polimérica, estabelecendo, de fato, uma conexão de enxofre entre as moléculas de BN e formando uma estrutura tridimensional (HIRANOBE, 2020; SANTOS et al., 2022).

5.2 Comportamento Térmico

5.2.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

Na Figura 8, estão apresentadas as curvas de TGA dos espécimes de NRV pura e do compósito NRV/PM com diferentes concentrações em phr de partículas de PM. Conforme ilustrado na Figura 8 a perda de massa de todas as amostras abaixo da temperatura de 250°C é devido à evaporação de água e à degradação de compostos voláteis, como ácidos graxos (SILVA; DIAS; YARIN, 2023; SILVA et al. 2018).

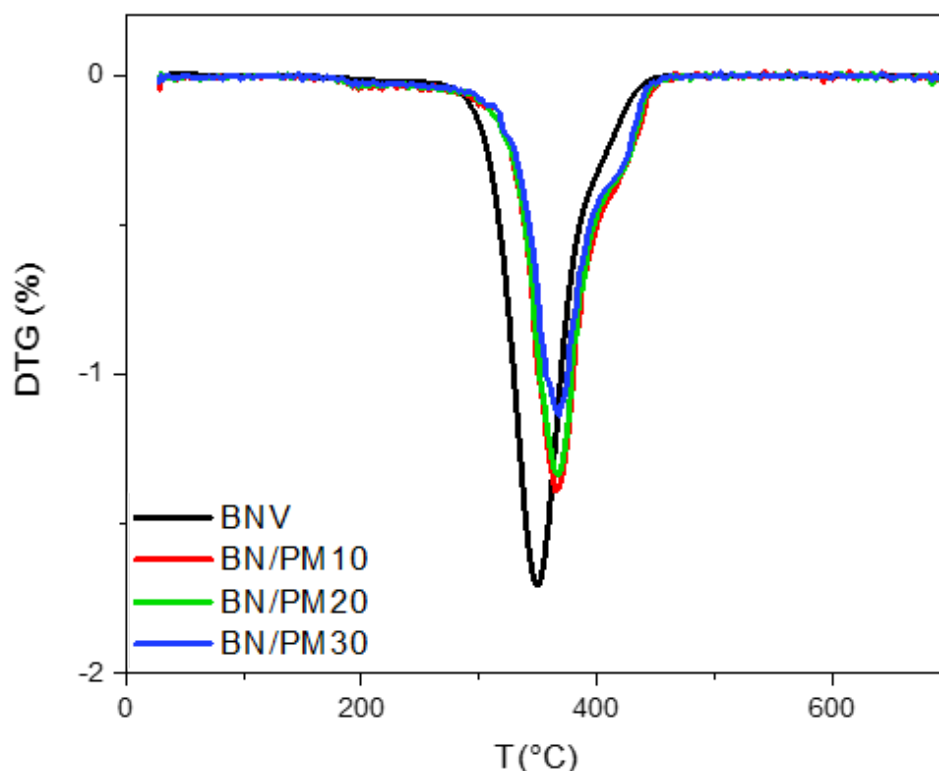
Figura 8: Análise termogravimétrica dos espécimes de BNV pura e dos compósitos BNV/PM com diferentes concentrações de partículas de PM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 8, os espécimes dos compósitos bifásicos BNV/PM com diferentes concentrações de partículas de PM apresentam um único evento de perda de massa principal na faixa de temperatura entre 300 e 450°C, muito parecido com perfil térmico da curva de TGA da amostra BNV pura. Esse evento de perda principal observado nas curvas da BNV pura e dos compósitos BNV/PM é característico da decomposição estrutural das cadeias isoprênicas da matriz BN (SILVA; DIAS; YARIN, 2023; SILVA et al. 2018). Para os compósitos bifásicos BNV/PM, a perda de massa referente ao evento de decomposição principal resultou em uma perda foi de 70% para o espécime NRV/PM30 e 82% para o espécime NRV/PM10, enquanto para amostra NRV pura foi superior a 90%.

Figura 9: Análise da DTG da amostra BNV e das amostras das amostras dos compósitos BNV/PM com diferentes concentrações de PM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 9 é apresentado o gráfico da primeira derivada da TGA (DTG) para todos os espécimes os espécimes NRV pura e para os compósitos NRV/PM com diferentes concentrações em phr de partículas de PM. Como pode ser observado na Figura 9, entre a faixa de temperatura de 300 °C a 400 °C há um pico intenso em todas as curvas de DTG que está relacionada ao evento principal de perda de massa observado na curva de TGA (Figura 8). Esse intenso pico representa a temperatura máxima de decomposição (T_m). Os valores da T_m e do resíduo das amostras a 700°C estão apresentados na Tabela 7. Os valores da T_m dos espécimes dos compósitos NRV/PM variaram entre 367-369 °C, isto é, aproximadamente 17 °C superior a BNV pura. O valor da T_m pode ser utilizado como um indicativo para determinar a estabilidade térmica dos espécimes estudados. Como pode ser observado na Figura 9 e nos dados da Tabela 7, o pico da T_m se desloca para maiores valores de temperatura à medida que a concentração de PM foi aumentada nos compósitos bifásicos BNV/PM, demonstrando que as amostras se tornam mais termicamente estável quando comparado a BNV pura. Conforme observado por Menon et al. (1996) e Varkey et al. (2000), o pico de T_m torna-se mais pronunciado quando há uma taxa de degradação mais elevada dos compostos

orgânicos na cadeia polimérica da BN, ou seja, durante a quebra e degradação da cadeia isoprênica. Também pode ser observado um pequeno ombro nas curvas de DTG para todas os espécimes estudados e pode ser estar relacionado a regiões de matriz NRV menos acessíveis a degradação térmica estrutural que ocorreu no evento principal, ou seja, foi necessária uma maior quantidade de energia térmica para degradar essas regiões (SILVA; DIAS; YARIN, 2023; SILVA et al. 2018).

Por fim, o resíduo final dos espécimes à 700°C foi maior para os compósitos BNV/PM com maiores concentrações de partículas de PM (Tabela 7).

Tabela 7: Parâmetros térmicos de TG/DTG

Compósito	T_m (°C)	Resíduos (%)
BNV	351,34	0,87
BNV/PM10	368,70	11,39
BNV/PM20	369,09	15,30
BNV/PM30	367,44	26,88

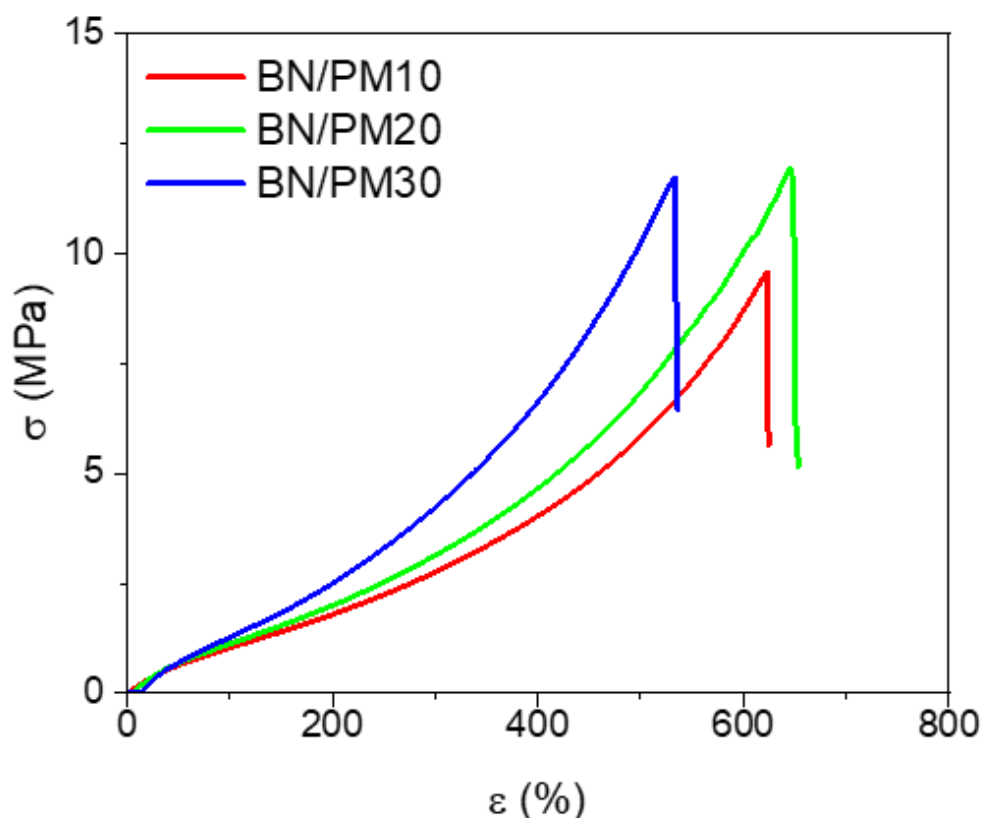
Fonte: Elaborado pelo autor

5.3. Análise das propriedades mecânicas

Por meio dos ensaios mecânicos em modo tração, foi possível avaliar a influência da dispersão das PM na matriz BNV, bem como seu impacto nas propriedades mecânicas finais dos espécimes do compósito bifásico NRV/PM. Conforme ilustrado na Figura 10, no gráfico de tensão-deformação, o comportamento mecânico apresentado pelos espécimes NRV e do compósito NRV/PM com diferentes quantidades em phr de partículas de PM é característico de materiais elastoméricos, ou seja, exibindo um comportamento não linear na curva, bem como elevados valores de deformação. Entretanto, como pode ser observado, à medida que a concentração de partículas de PM é aumentada na matriz de BNV, observa-se que os compósitos bifásicos BNV/PM tornam se mais rígidos, ou seja, resultando em uma redução na deformação no momento da ruptura ($\epsilon_{ruptura}$) e um aumento da tensão no momento da ruptura ($\sigma_{ruptura}$). Esse comportamento é indicativo que as cargas adicionadas nos compósitos bifásicos BNV/PM apresentaram caráter de reforço, no qual parte da tensão mecânica imposta na matriz NRV é transferida para as partículas de PM.

Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros mecânicos obtidos por meio das curvas de tensão-deformação de todos os espécimes investigados, incluindo a tensão quando a deformação atinge 100% ($\sigma_{100\%}$), 300% ($\sigma_{300\%}$), e 500% ($\sigma_{500\%}$), bem como os valores da $\sigma_{ruptura}$ e da $\varepsilon_{ruptura}$. É perceptível que todos os parâmetros mecânicos aumentam à medida que as concentrações de partículas de PM são aumentadas na matriz NRV, com exceção da $\varepsilon_{ruptura}$. Esse padrão de comportamento indica que as amostras se tornam mais rígidas à medida que a quantidade de partículas de PM se torna maior.

Figura 10: Curva de tensão-deformação para os espécimes do compósito BNV/PM com diferentes concentrações em phr de partículas de PM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os resultados da Tabela 8, observam-se pequenas variações nos valores da $\sigma_{100\%}$, $\sigma_{300\%}$, $\sigma_{500\%}$ e $\sigma_{ruptura}$ dos compósitos bifásicos BNV/PM com diferentes quantidades em phr de PM. Por exemplo, ao comparar os valores da $\sigma_{ruptura}$ entre os espécimes de BNV com a BN/PM10, observa-se um aumento na resistência à tração de 9,29 MPa para 9,61 MPa, um acréscimo de aproximadamente 0,31 Mpa, por outro lado, quando comparado com o espécime BNV/PM30 o valor da $\sigma_{ruptura}$ tem aumento expressivo alcançado 11,78 MPa. Isso

indica que a adição de PM à BNV resulta em maior resistência à deformação do compósito NRV/PM, evidenciando que as cargas atuam como agentes de reforço mecânico ao absorver parte da tensão mecânica imposta pela matriz. É importante notar que houve uma redução na tensão de ruptura do compósito BN/PM20 para o BN/PM30, possivelmente devido à formação de aglomerados nessas amostras.

Tabela 8: Parâmetros mecânicos da tensão quando a deformação atinge 100% ($\sigma_{100\%}$), 300% ($\sigma_{300\%}$), e 500% ($\sigma_{500\%}$) e, valores da $\sigma_{ruptura}$ e da $\varepsilon_{ruptura}$ para os espécimes BNV pura e dos compósitos BNV/PM

Amostras	$\sigma_{100\%}$ (MPa)	$\sigma_{300\%}$ (MPa)	$\sigma_{500\%}$ (MPa)	$\sigma_{ruptura}$ (MPa)	$\varepsilon_{ruptura}$ (%)
BNV	0,80	1,83	3,37	9,29	773,72
BNV/PM10	1,00	2,77	5,80	9,61	623,98
BNV/PM20	1,12	3,16	6,85	11,93	647,31
BNV/PM30	1,27	4,23	10,27	11,78	532,85

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Análise elétrica e dielétrica

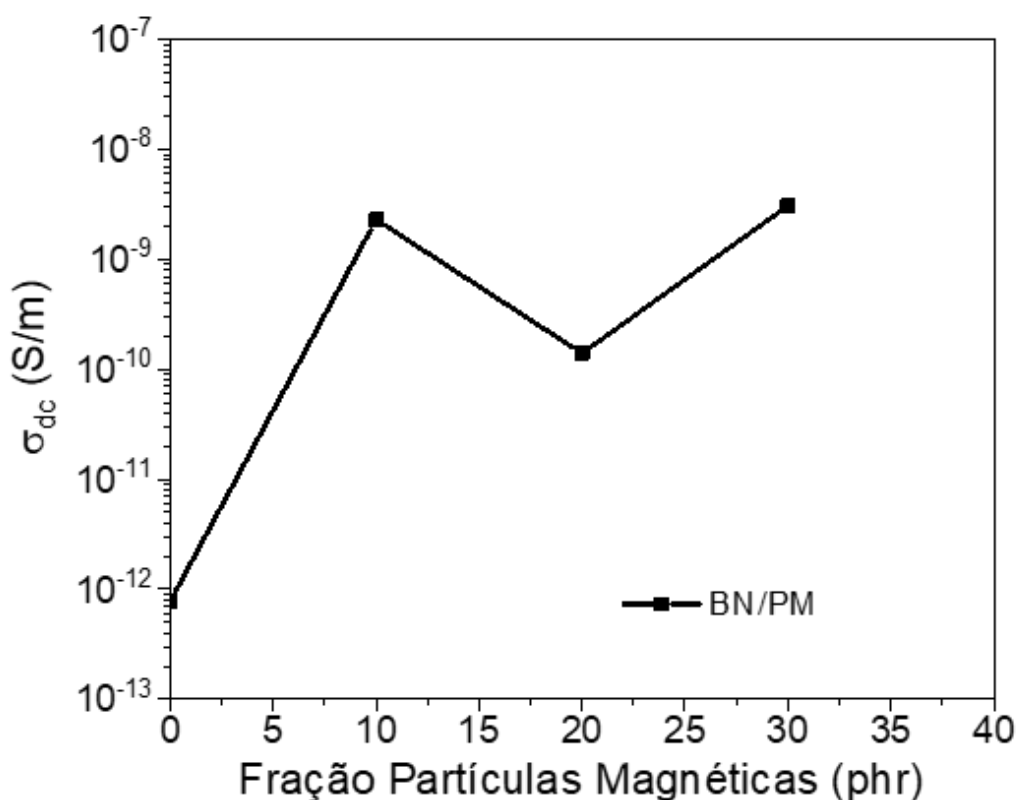
5.4.1. Análise de Condutividade

Os polímeros convencionais são devidos, quanto ao seu caráter elétrico, como materiais isolantes, principalmente, pelo fato de possuírem baixa concentração de cargas elétricas livres capazes de participar do processo de condução elétrica, quando o material é exposto a um campo elétrico externo. No entanto, para melhorar a sua propriedade elétrica se tem utilizado como estratégia a adição de uma fase condutora ou semicondutora para formar compósitos poliméricos visando aumentar sua condutividade elétrica. A incorporação de uma fase condutora ou semicondutora, em uma matriz polimérica isolante como a BNV, pode influenciar significativamente a condutividade elétrica (σ) do compósito. Dessa forma, quando a fração dessa fase atinge uma concentração crítica ou limiar dessa matriz polimérica isolante, ocorre uma transição de isolante para condutor devido à formação de uma rede tridimensional condutora. Essa rede percolativa permite que os portadores de carga elétrica se

movam sob a influência de um campo elétrico externo (PSARRAS, 2006; GOMES, 2008; SILVA, 2009; DIAS et al., 2017; CALHEIRO, 2019).

Dessa forma, para analisar a influência da dispersão das partículas de PM na matriz BNV, estudo das propriedades elétricas em regime *dc* foram realizadas e apresentadas na Figura 11. Como pode ser observado a dispersão de partículas magnéticas nos compósitos bifásicos BNV/PM influencia no valor da sua condutividade elétrica *dc* (σ_{dc}). Como pode ser observado na Figura 11, a dispersão de 10 phr de partículas de PM no compósito BNV/PM aumentou a σ_{dc} em quatro ordens de grandeza em comparação a σ_{dc} da BNV pura. Já o decréscimo do valor de σ_{dc} do espécime BNV/PM20 em relação aos espécimes BNV/PM10 e BNV/PM30 pode estar relacionado à dispersão das partículas de PM formando aglomerados.

Figura 11: Condutividade elétrica *dc* em função da quantidade em phr de PM para os espécimes do compósito BNV/PM



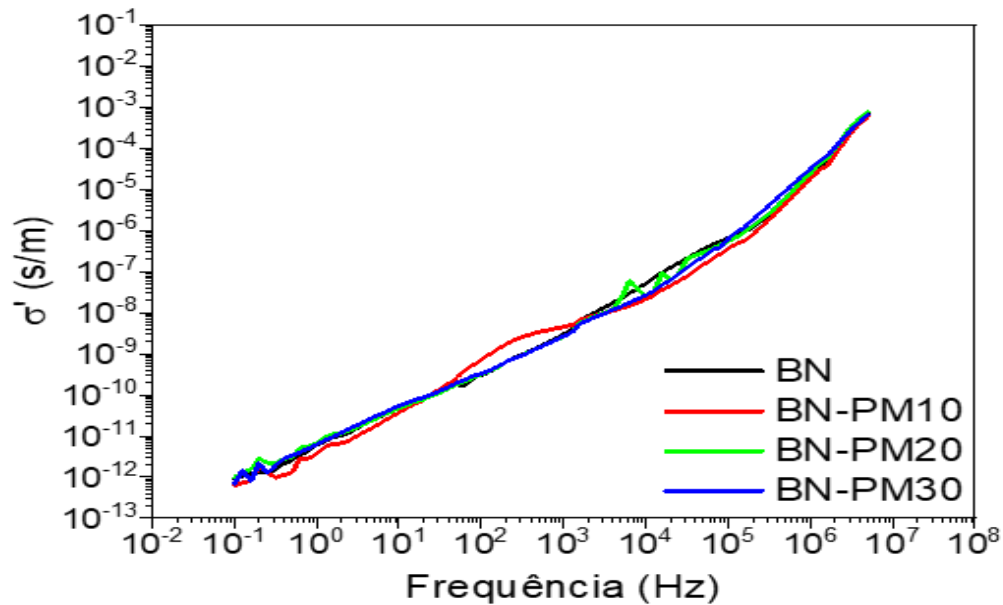
Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como os campos elétricos *dc* influenciam o processo de condução elétrica dos portadores de carga elétrica no interior dos compósitos, o mesmo ocorre quando campos elétricos *ac* externos são aplicados. Nesse sentido, além da fase condutora que pode

influenciar as propriedades elétricas do compósito, o mesmo ocorre quando a frequência do campo elétrico ac . Por exemplo, em regime de baixas frequências do campo elétrico ac , os portadores de carga possuem tempo suficiente para se deslocar por distâncias atômicas maiores e superar altas barreiras de potencial no interior do compósito antes que a direção do campo elétrico ac mude (Psarras, 2006; Silva, 2009). No entanto, em frequências elevadas do campo elétrico ac , os portadores de carga elétrica tendem a ficar confinados em regiões cada vez menores saltando entre estados localizados com barreiras de potencial menores (Psarras, 2006; Silva, 2009).

Esse comportamento pode ser observado na Figura 12, que apresenta a análise da parte real da condutividade elétrica complexa ($\sigma'(f)$) em função da frequência do campo elétrico alternado para os espécimes do compósito bifásico BNV/PM com diferentes quantidades phr de partículas PM. Como pode ser observado, todas os espécimes do compósito BNV/PM apresentaram comportamento dependente da frequência para a $\sigma'(f)$ para todo o intervalo estudado, ou seja, o valor de $\sigma'(f)$ aumenta à medida que a frequência do campo elétrico também aumenta. Esse comportamento é característico de sólidos desordenados e é devido ao movimento de cargas espaciais presos nas interfaces BNV-PM, bem como o movimento de dipolos na fase polimérica (SCHRØDER e DYRE, 2000). Além disso, à medida que a frequência aumenta também ocorre o aumento do valor de $\sigma'(f)$ devido ao compósito NRV/PM se tornar mais condutor, isso porque os portadores de cargas se movimentam mais rápido e em regiões mais restritas.

Figura 12: Análise da condutividade elétrica real em função da frequência para os espécimes do compósito BNV/PM e da BNV pura em temperatura ambiente

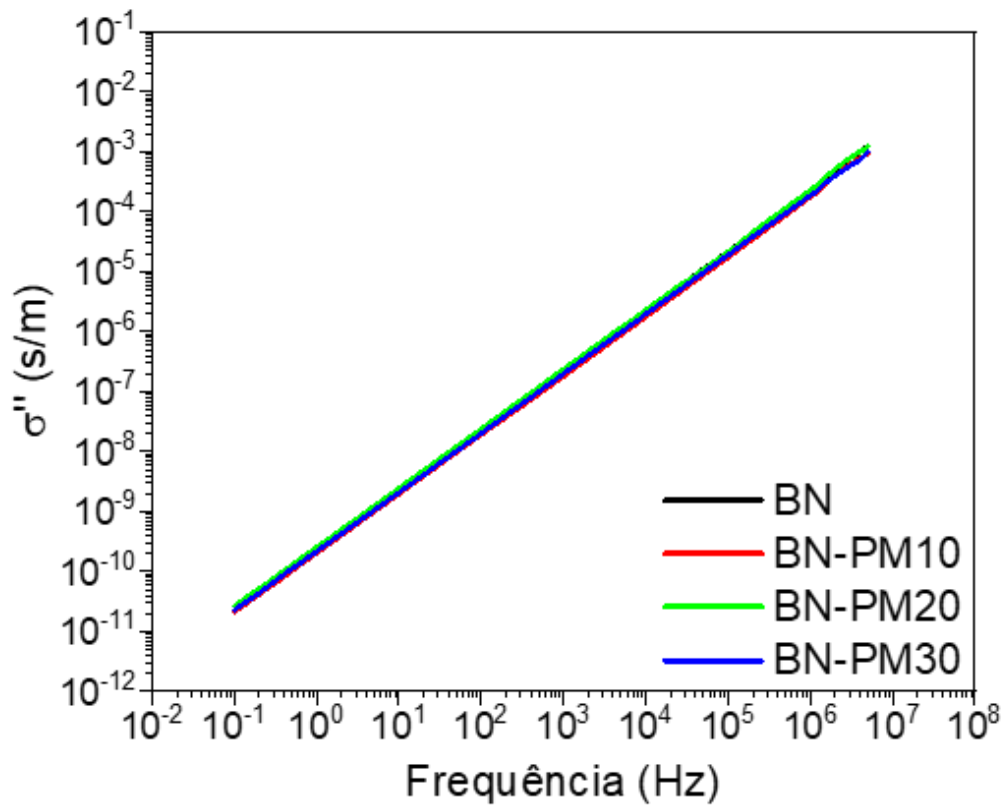


Fonte: Elaborado pelo autor.

A grandeza $\sigma'(f)$ descreve a capacidade de um material conduzir corrente elétrica sob a ação do campo elétrico ac . Já a parte imaginária da condutividade elétrica complexa ($\sigma''(f)$) está relacionada a elementos capacitivos e indutivos que ocorre no interior do compósito quando submetido a ação de campo elétrico ac , ou seja, está ligada aos portadores de carga elétrica que não participam da condução elétrica devido a sua retenção nas interfaces BNV-PM ou a resistência elétrica causada pelas barreiras de potenciais no interior do material. Dessa forma, devido essa resistência interna os portadores de carga têm dificuldade em acompanhar as variações de frequência do campo elétrico ac e desse deixam de participar do processo de condução elétrica.

O comportamento da $\sigma''(f)$ para as amostras do compósito bifásico BNV/PM com diferentes quantidades em phr de partículas de PM é apresentado na Figura 13. Como pode ser observado, todas as amostras do compósito BNV/PM apresentam comportamento semelhante e completamente dependente da frequência.

Figura 13: Análise da condutividade elétrica imaginária em função da frequência para as amostras do compósito BNV/PM em temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2. Análise da permissividade complexa

Outra grandeza importante e que pode ser extraída das análises de impedância é a permissividade dielétrica (ϵ). A grandeza ϵ pode ser definida como a capacidade do material ser polarizado quando sujeito a um campo elétrico externo. Em outras palavras, ela indica a capacidade de um material armazenar energia potencial elétrica devido um campo elétrico.

Portanto, a permissividade dielétrica relativa, também conhecida como constante dielétrica (ϵ_r), pode ser expressa pela equação (19):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (19)$$

onde ϵ_0 representa a permissividade elétrica do vácuo, cujo valor é a $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Na presença de um campo elétrico externo, as moléculas ou entidades carregadas presentes em material tendem a formar dipolos elétricos internos que se opõem ao campo elétrico externo quando a carga negativa, aumentando a capacidade do material de armazenar

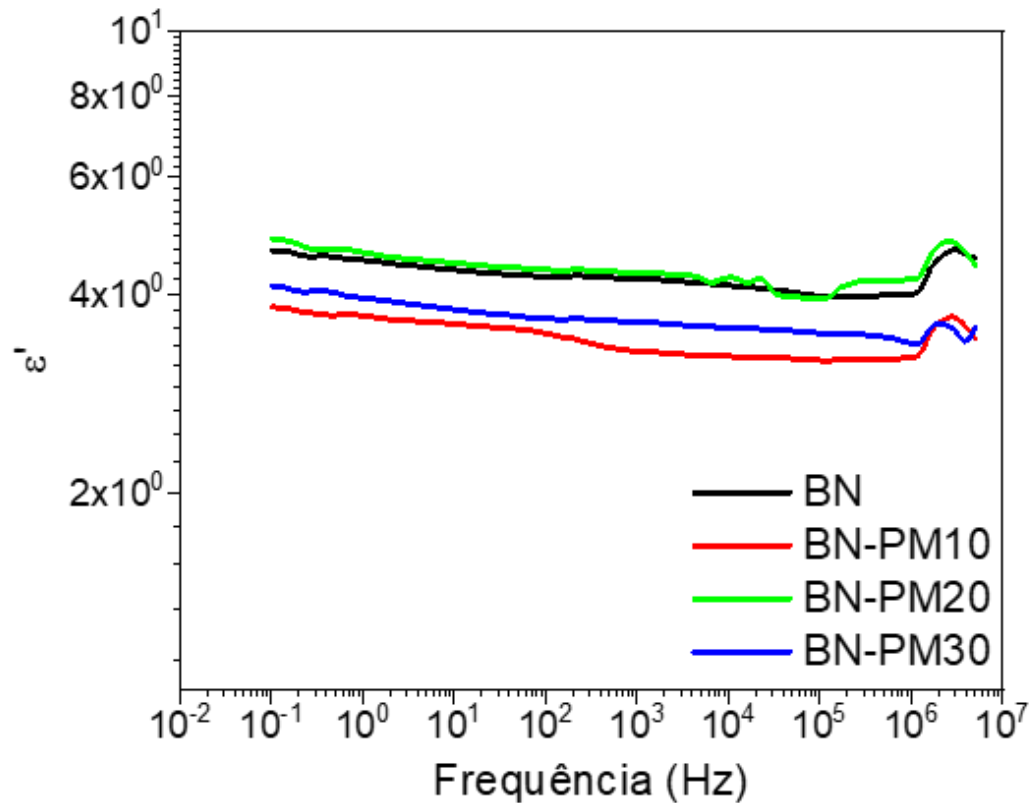
energia elétrica. No entanto, quando um campo elétrico ac é aplicado no material, quatro processos de polarização podem ocorrer em material, entre elas: a polarização de cargas espaciais, dipolar, iônica e eletrônica. Portanto, ao analisar um material sob um campo elétrico ac , é importante levar em contas todos os processos de polarização que podem contribuir com a permissividade dielétrica total de um material. Dessa forma, é importante compreender e entender a permissividade dielétrica complexa de um material sob a ação de campo elétrico ac (ϵ^*), conforme descrito na equação (20).

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (20)$$

onde ϵ' é permissividade dielétrica real que representa a energia armazenada no material devido campo elétrico, e ϵ'' é a parte imaginária que representa as perdas dielétricas do material, no qual está relacionado com os efeitos condutivos do material, j é o número complexo cujo valor é $\sqrt{-1}$.

O comportamento de ϵ' em função da frequência é mostrado na Figura 14 para os espécimes do compósito bifásico BNV/PM com diferentes quantidades de phr de PM, bem como para a NRV pura. Observa-se que houve pouca variação do valor de ϵ' na região de baixa frequência independente da concentração de PM no compósito NRV/PM, no entanto, pode se observar que à medida que a frequência aumenta, o valor ϵ' diminui para todas as amostras. Isso ocorre porque à medida que a frequência do campo elétrico aumenta o tempo de espera do portador nas interfaces em uma certa direção é menor do que a inversão do campo elétrico ac , ou seja, o tempo de polarização das entidades carregadas em uma certa direção decrescem e por sua vez diminuem o valor de ϵ' . Além disso, quando a frequência aumenta o movimento dos portadores de carga também aumenta tornando o material mais condutor, corroborando com o comportamento observado na Figura 12.

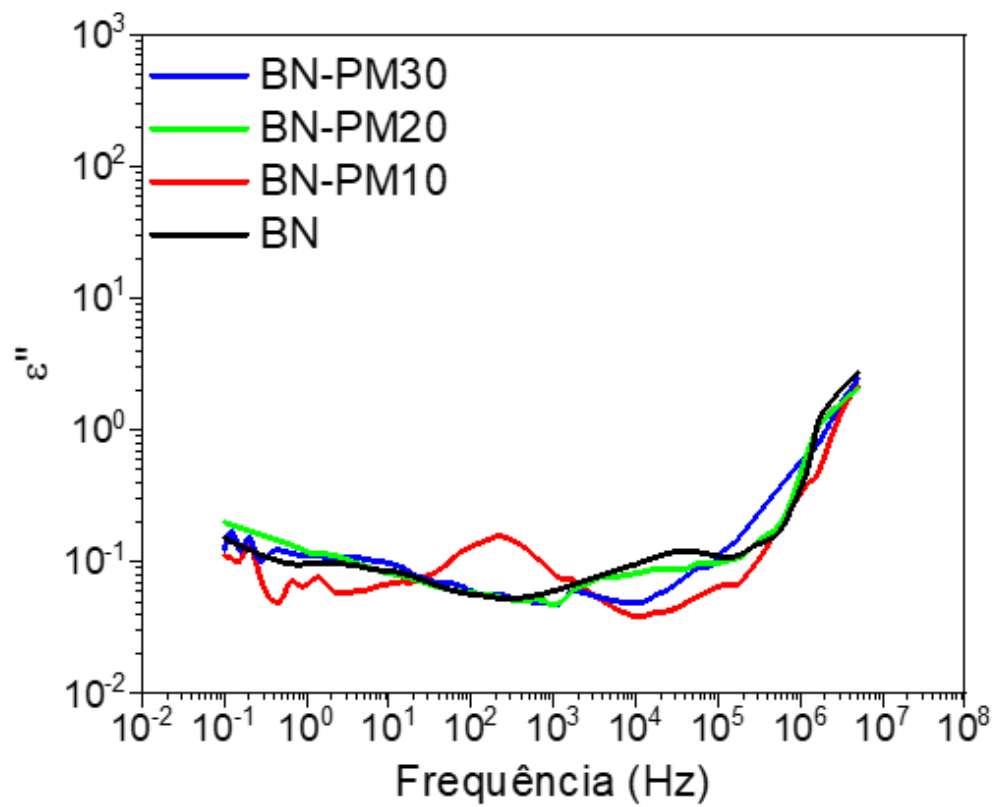
Figura 14: Curvas da permissividade dielétrica real em função da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 16, é apresentado a parte imaginária de ϵ^* (ϵ'') para todas os espécimes do compósito bifásico NRV/PM com diferentes concentrações em phr de PM. Semelhante ao que acontece com ϵ' , o valor ϵ'' decresce com o aumento da frequência. Esse comportamento dependente de ϵ'' para todas os espécimes dos compósitos NRV/PM demonstram que todas se tornam mais condutoras à medida que a frequência se torna maior, isso porque os portadores de carga ficam restritos em regiões cada vez menores e deixam de participar do processo de polarização.

Figura 15: Curvas da permissividade dielétrica imaginária em função da frequência



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

O objetivo do presente estudo foi caracterizar e avaliar as propriedades de um compósito magnético bifásico formado por uma matriz BNV reforçada com partículas de PM.

As análises reométricas revelaram que o tempo ideal de vulcanização (t_{90}) variou entre 4 e 5 minutos, evidenciando a influência das partículas de PM nos parâmetros de vulcanização do compósito bifásico NRV/PM. Por meio das análises TG/DTG foi possível verificar que todos os espécimes do compósito bifásico BNV/PM, apresentaram perfil térmico semelhante ao da BNV pura, com uma única perda de massa entre 300-450°C devido à degradação estrutural da BNV. Além disso, as amostras do compósito bifásico BNV/PM mostraram ser mais estáveis termicamente do que a BNV pura. Nos testes mecânicos de tração, observou-se que a variação de PM na matriz BNV tiveram um impacto positivo nas propriedades mecânicas do compósito, isto é, ocorreu um aumento na tensão de ruptura e uma redução na deformação na ruptura com o aumento da quantidade em phr de partículas de PM na matriz BNV.

Nos estudos da condutividade elétrica em regime dc observou-se que houve um aumento de quatro ordens de magnitude no valor de σ_{dc} dos espécimes do compósito NRV/PM em comparação a NRV pura. Por outro lado, a $\sigma'(f)$ de todos os espécimes do compósito bifásico NRV/PM indicaram um comportamento típico de materiais desordenados, ou seja, exibem um comportamento dependente da frequência do campo elétrico alternado. Também foi observado que a permissividade real exibe um comportamento dependente da frequência, ou seja, diminui à medida que a frequência aumenta.

Por fim, devido às excelentes propriedades elétricas, térmicas e mecânicas dos espécimes do compósito bifásico BNV/PM, esses novos materiais possuem o potencial de ser aplicado como sensores magnéticos e dispositivos de blindagem contra radiação eletromagnética.

7. REFERÊNCIA

AGREBI, F.; BEN ABDERRAZAK, C.; BOUKHERROUB, T.; AMLI, F.; AMMAR, S.; BOUSSEMA, F. Enhanced dielectric properties induced by loading cellulosic nanowhiskers in natural rubber: Modeling and analysis of electrode polarization. **Materials Chemistry and Physics**, v. 200, p. 155–163, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.07.060>. Acesso em: 15 abr. 2024.

ÁLVAREZ, J. Exposición de semillas de triticale a campos magnéticos estacionarios de 125 mT y 250 mT. **Efectos en la velocidad de germinación y primeras etapas de desarrollo**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – ETSIAAB, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2011.

ALVES, M. R. da C. **Estudo da borracha natural para utilização em períodos de entressafra num mesmo composto**. Orientador: Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos. 2004. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

ANADÃO, P.; WIEBECK, H.; VALENZUELA-DÍAZ, F. R. Panorama da Pesquisa Acadêmica Brasileira em Nanocompósitos Polímero/Argila e Tendências para o Futuro. **Polímeros**, São Carlos, v. 21, n. 5, p. 443–452, 1 dez. 2011. Acesso em: 14 de abr. 2024

ARAÚJO, R. G. **Compósitos PVC/nanotubos de carbono: Preparação e caracterização de propriedades elétricas, térmicas e mecânicas**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010

ARNECKE, L. L. **Caracterização das propriedades físico-químicas de nanocompósitos de resina epóxi e nanotubos de carbono**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

BACKES, E. H.. **Desenvolvimento de Nanocompósitos Híbridos de Epóxi/Ntcpm/Cargas Minerais e avaliação das propriedades mecânicas, elétricas e térmicas**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de

Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Acesso em: 18 de mar. 2024.

BARASUOL, F.; ZÜGE, G.; JAURIS, C. F. M. **Otimização experimental de preparo de nanocompósitos de látex de borracha natural e nanoestruturas de carbono**. Em: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA UNIPAMPA. v. 11, n. 2, 2019, Santana do Livramento. Anais eletrônicos [...]. Santana do Livramento: Unipampa. 2019. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/101562>. Acesso em: 1 abr. 2024.

BELLUCCI, F. S. ; SALMAZO, L. O. ; Nobre, M. A. L. ; MORAES, J. ; JOB, A. E.. **Nanocompósitos Funcionais a Base de Borracha Natural Vulcanizada: Estudo de Caso Quanto a Toxicidades**. Em: 12 Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPOL, 2013, Florianópolis - SC. Anais do 12 Congresso Brasileiro de Polímeros - CBPOL, 2013.

BLAKEMORE, R. Magnetotactic bacteria. **Science**, v. 190, n. 4212, p. 377-379, 1975. DOI: 10.1126/science.170679. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.170679>. Acesso em: 10 de jun. 2024.

BOJNOURD, F. M.; PAKIZEH, M. Preparação e caracterização de uma membrana nanocomposta de nanoargila/PVA/PSf para remoção de produtos farmacêuticos da água. **Applied Clay Science**, v. 162, p. 326-338, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.05.010>. Acesso em: 8 de mar. 2024.

BOONSTRA, B. B. Role of particulate fillers in elastomer reinforcement: a review. **Polymer**, v. 20, n. 6, p. 691-704, 1979. DOI: [10.1016/0032-3861\(79\)90243-X](https://doi.org/10.1016/0032-3861(79)90243-X). Acesso em: 20 de abr. 2024.

CALHEIRO, D. S. **Ajuste do limite de detecção elétrica de compósitos condutivos para melhorar o desempenho de sensores híbridos**. 2019. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Física de Materiais) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://fimat.ufop.br/event/defesa-de-disserta%C3%A7%C3%A3o-intitulada%C2%A0ajuste-do-limite-de-detec%C3%A7%C3%A3o-el%C3%A9trica-de-comp%C3%B3sitos>. Acesso em:

16 jul. 2024.

CALLISTER JUNIOR, W. S.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Tradução de Sergio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 882 p.

CARNEIRO, M. C. **Análise de parâmetros térmicos e T90 para vulcanização da borracha**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS, Varginha, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/anaisjeatec/593146-analise-de-parametros-termicos-de-t90-p-ara-vulcanizacao-da-borracha>. Acesso em: 14 mar. 2024.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 25, p. 1-13, 2008. Disponível em: https://web.archive.org/web/20180410113944id_/http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_3_quad_2008/propr_caract_compostos_compositos.pdf. Acesso em: 16 jul. 2024

CHINAGLIA, D. L.; GOZZI, G.; ALFARO, R. A. M.; HESSEL, A. Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, p. 4504.1-4504.9, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/CtQH65LJBMqzpsNfLv6jmCv/?lang=pt>. Acesso em: 16 jul. 2024

CLAUDIO, I. O homem que roubou a borracha do Brasil. **ISTOÉ**, v. 2181, p. 138–138, ago. 2011.
CTB; Borracha natural, CTB, 2024. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borracha-natural/>. Acessado em 10 junho. 2024.

DA SILVA, N. M. G. **Caracterização dos processos de vulcanização da cortiça com borracha**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Porto, Porto, 2021. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/135841/2/489760.pdf>. Acesso em: 16 jul.

2024.

DALL'ANTONIA, A. C.; CAETANO, F. A.; SILVA, A. C.; GARCIA, J. A.; REIS, R. S. Caracterização mecânica e térmica da borracha natural formulada e vulcanizada dos clones: GT 1, IAN 873, PB 235 e RRIM 600. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 1, p. 63-71, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/dQ4JX6cCDX8tCnZk3MFKNvq/?lang=pt>. Acesso em: 16 jul. 2024.

DAMÁSIO, R. A. P. **Caracterização e aplicação de celuloses nanofibrilada (CNF) e nanocristalina (CNC)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/861ca031-46de-4049-8e31-6a2508ad4851>. Acesso em: 16 jul. 2024.

DIAS, C.; MONTEIRO, S. N.; SANTOS, J. G.; CUNHA, J. A. Caracterização do compósito PVDF/PANI com partículas de níquel. **Polímeros**, v. 27, p. 116-126, jan. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/2mD3P4JX6cCdZJRGz9b9dQ/?lang=pt>. Acesso em: 16 jul. 2024

DURIGAN NETO, P. R.; FIORI, V. A.; LIMA, M. L.; VIEIRA, M. G.; PINTO, A. F.; MOREIRA, E. F.; SILVA, J. L.; MORAIS, J. R. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de nanocompósitos à base de epóxi/nanotubos de carbono**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/161522874.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FLORY, P. J.; REHNER JR, J. Statistical mechanics of cross-linked polymer networks I. Rubberlike elasticity. **The Journal of Chemical Physics**, v. 11, n. 11, p. 512-520, 1943. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article-abstract/11/11/512/181612/Statistical-Mechanics-of-Cross-Linked-Polymer?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FLORY, P. J. Molecular theory of rubber elasticity. **Polymer Journal**, v. 17, n. 1, p. 1-12, 1985. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/pj19851>. Acesso em: 16 jul. 2024.

FLORY, Paul J. Molecular theory of rubber elasticity. **Polymer**, v. 20, n. 11, p. 1317-1320, 1979. Disponível em: [https://sci-hub.se/10.1016/0032-3861\(79\)90268-4](https://sci-hub.se/10.1016/0032-3861(79)90268-4). Acesso em: 24 mar. 2024.

FREITAS, R. L. B. de. **Fabricação, caracterização e aplicações do compósito PZT/PVDF**. 2012. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/a2eedb11-da67-488d-bef0-621fcd47ed16>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GHANDFOROUSHAN, P.; SHAFIEI, N.; AMINI, M.; KHORASANI, M. T.; ZARE, M.; SHOKROLLAHI, M.; RAHEMI, K.; KHAJAVIKHOO, N.; JAFARI, S.; ASHRAFIZADEH, A.; REZAEI, F. Novo scaffold nanocompósito baseado em hidrogéis de gelatina/PLGA-PEG-PLGA incorporados com TGF- β 1 para diferenciação condrogênica de células-tronco de polpa dental humana in vitro. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 201, p. 270-287, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34998887/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GIMENES, R. **Síntese e caracterização de compósitos poli(fluoreto de vinilideno-trifluoretileno)/titanato de bário para uso em regeneração tecidual guiada**. 2005. 206 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp, Araraquara, 2005. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/102572>. Acesso em: 14 abr. 2024.

GOMES, D. M. **Estudo dos mecanismos de relaxações dielétrica e mecânica na borracha natural**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/14700?show=full>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GOMES, W. P.; SANCHES, A. O.; MALMONGE, J. A. **Estudo comparativo da prevulcanização de látex obtido da *Hancornia speciosa* Gomes e *Hevea brasiliensis***. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS (CBECIMAT), 20., 2012, Joinville - SC. Anais [...]. Joinville: CBECIMAT, 2012. p. 120-125. Disponível em:

<https://www.cbecimat.org.br/wp-content/uploads/2021/05/ANAIS-CBECIMAT-2012.pdf>.

Acesso em: 16 jul. 2024.

GOUVEIA FILHO, M. D. **Caracterização do sinal de emissão acústica proveniente da deformação axial em poço de visita de polietileno**. 2015. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/13728>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GUERRA, B. B.; FURTADO, C. R. G.; COUTINHO, F. M. B. Avaliação reológica de elastômeros e suas composições. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 14, n. 4, p. 289-294, 2004. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/po/a/SxzQmX2Y4dD6P3z9p7nbKqL/?lang=pt>. Acesso em: 16 jul. 2024.

GUTIÉRREZ, J. C. H.; GONZÁLEZ, L. M.; MARTÍNEZ, A. A.; HERRERA, R. Usinabilidade de materiais compósitos poliméricos para aplicações automotivas. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 24, n. 6, p. 711–719, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/5gkF5TQ5v6jmhCwqR5xkX4Y/?lang=pt>. Acesso em: 16 jul. 2024.

HAAG, C. As sementes da discórdia: pesquisas discutem impacto do contrabando de sementes da seringueira por ingleses. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, v. 158, n. 2, p. 22-25, abr. 2009. Mensal. Disponível em:

<https://revistapesquisa.fapesp.br/as-sementes-da-discordia/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Engineering electromagnetics**. 7. ed. Erlangga, 2006.

Disponível em: <http://www.uop.edu.pk/ocontents/EMT.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

HIRANOBE, C. T. **Avaliação da densidade de ligações cruzadas da borracha natural reticulada em diferentes sistemas de vulcanização por meio de ensaios mecânicos**. 2020. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Rosana-SP, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/192071>. Acesso em: 16 jul. 2024.

HIRANOBE, C. T.; TOLOSA, G. R.; DE ALMEIDA SANTOS, G. T.; DE OLIVEIRA, J. P. J.; BUDENBERG, E. R.; DA SILVA, M. J.; CABRERA, F. C.; JOB, A. E.; PAIM, L. L.; TORRES, G. B.; DOS SANTOS, R. J. Recycling waste polyurethane from the refrigeration industry as filler in SBR/NR composites for industrial applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 140, n. 14, art. e53709, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.53709>. Acesso em: 16 jul. 2024.

HOWARD, J. N. Impedance spectroscopy: emphasizing solid materials and systems. *Applied Optics*, v. 26, n. 6, p. 1035-1040, mar. 1987. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-26-6-1035&id=108501>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1382:2012. **Rubber - Vocabulary**. 2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/59724.html>. Acesso em: 16 jul. 2024.

JUNIOR, W. D. C.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 589 p. ISBN 978-85-216-2107-0.

JOSEPH, S.; JACOB, M.; THOMAS, S. Natural fiber–rubber composites and their applications. In: MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. (Eds.). **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. New York: Taylor & Francis, 2005. p. 852-870. Disponível em: <https://www.taylorandfrancis.com/books/mono/10.1201/9780367852875/natural-fibers-biopolymers-biocomposites-ashok-mohanty-misra-l-t-drzal>. Acesso em: 16 jul. 2024.

KIRSEHVINK, J.; WALKER, M.; DIEBEL, C. Magnetite-based magnetoreception. **Current Opinion in Neurobiology**, v. 11, p. 462-467, 2001. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11531570/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

KRUZELAK, J.; SYKORA, R.; HUDEC, I. Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds – overview. **Chemical Papers**, v. 70, n. 12, p. 1533-1555, 2016. Disponível em: <https://www.sciendo.com/article/10.1515/chempap-2016-0174>. Acesso em: 16 jul. 2024.

LENZ, J. E. A review of magnetic sensors. **Proceedings of the IEEE**, New York, v. 78, n. 6, p. 973-989, 1990. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/57248>. Acesso em: 16 jul. 2024.

LEVY-NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 2. ed. rev. ampl. [S.l.]: Blucher, 2018. 400 p. ISBN 978-85-212-1078-8. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/livro/compósitos-estruturais-ciência-e-tecnologia>. Acesso em: 16 jul. 2024.

LIU, H.; WANG, Z.; LIU, X.; WANG, Z.; ZHAO, B.; CHEN, S.; LIU, W.; LI, X.; ZHANG, Y.; GUO, W.; LI, J.; ZHANG, X. Aplicação de nanocompósitos biodegradáveis e biocompatíveis em eletrônica: estado atual e direções futuras. **Nanomaterials**, v. 9, n. 7, p. 950, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-4991/9/7/950>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MACDONALD, J. R.; JOHNSON, W. B. Fundamentals of impedance spectroscopy. In: BARSOUKOV, E.; MACDONALD, J. R. **Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. p. 1-26. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329801110_Impedance_Spectroscopy_Theory_Experiment_and_Applications_Third_Edition. Acesso em: 16 jul. 2024.

MADRONA, B. S.; SANTORO, F.; FIGUEIREDO, H.; SAMPAIO, L. J. **Nanocompósitos poliméricos constituídos de epóxi e nanotubo de carbono**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13278>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MALMONGE, E.; ROGÉRICO, M. **Comparação entre a borracha natural obtida do látex da *Hancornia speciosa* Gomes e *Hevea brasiliensis***. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 2005, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: [s.n.], 2005. p. 1-2. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2005/PDF/623.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MATOS, C. F.; GALEMBECK, F.; ZARBIN, A. J. G. Multifunctional nanocomposites of natural rubber latex and carbon nanostructures. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p.

73–96, 2017. Disponível em: <https://revistavirtual.qf.uem.br/vol9n1/2017-07-matos.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MANSILLA, M. A.; ARIAS, F. J.; ABREU, D. M.; FERNÁNDEZ, M.; REQUENA, C.; FARRERA, J. Natural rubber/styrene-butadiene rubber blends prepared by solution mixing: Influence of vulcanization temperature using a Semi-EV sulfur curing system on the microstructural properties. **Polymer Testing**, v. 63, p. 150-157, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.08.006>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MENON, A. R. R.; PILLAI, C. K. S.; NANDO, G. B. Thermal degradation characteristics of natural rubber vulcanizates modified with phosphorylated cashew nut shell liquid. **Polymer Degradation and Stability**, v. 52, n. 3, p. 265-271, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0141-3910\(95\)00101-6](https://doi.org/10.1016/0141-3910(95)00101-6). Acesso em: 16 jul. 2024.

METAL-CHEK. **Supermagna BW 333**. Disponível em: <https://metalchek.com.br/loja/particulamagnetica/supermagna/viaumida/bw-333/>. Acesso em: 14 mar. 2024.

MOSTAFA, A.; DUGGAN, B.; THOMAS, S. M.; SURESH, K. S. Rubber-filler interactions and its effect in rheological and mechanical properties of filled compounds. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 38, n. 3, p. 1-13, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/JTE20110026>. Acesso em: 16 jul. 2024.

MOURITSEN, H. Navigation in birds and other animals. **Image and Vision Computing**, v. 19, n. 11, p. 713-731, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(01)00038-5). Acesso em: 16 jul. 2024.

NIKOLAIDIS, A. K.; BELL, A. A.; KELLEHER, S. S.; GILES, S. M.; KOUTSOUKOS, P. S.; WRIGHT, G. M.; SMITH, J. L. Síntese e caracterização de resinas nanocompostas odontológicas preenchidas com diferentes nanopartículas de argila. **Polymers**, v. 11, n. 4, p. 730, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym11040730>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D2084-17: Método de teste padrão para propriedade de borracha - Vulcanização usando medidor de cura de disco**

oscilante. ASTM, 2017. Disponível em: <https://www.astm.org/Standards/D2084.htm>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PAIVA, F. **Compósito de borracha natural com incorporação de bagaço da cana-de-açúcar**. 2018. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Materiais Poliméricos, Híbridos e Nano-Estruturados, Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais - POSMAT, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Rosana-SP, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/142556>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PAIVA, M. B. de. **Efeito das membranas de látex natural e/ou colágeno na regeneração óssea guiada em tíbias de ratos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ortopedia, Traumatologia e Reabilitação) - Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/handle/123456789/123456>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PANINA, L. V.; RALYUK, V. V.; CORDONNIER, J. L.; KIRILLOV, K. S.; KOLEVA, S. S. Giant magneto-impedance in Co-rich amorphous wires and films. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 31, n. 2, p. 1249-1260, 1995. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/377233>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PANINA, L. V.; MOHRI, K. Magneto-impedance effect in amorphous wires. **Applied Physics Letters**, v. 65, n. 9, p. 1189-1191, 1994. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.112485>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PHAN, M.-H.; PENG, H.-X. Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. **Progress in Materials Science**, v. 53, n. 2, p. 323-420, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642507000162>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PSARRAS, G. C. Hopping conductivity in polymer matrix – metal particles composites. **Journal of Applied Physics**, v. 37, p. 1545–1553, 2006. Disponível em: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2335939>. Acesso em: 16 jul. 2024.

PSARRAS, G. C.; MANOLAKAKI, E.; TSANGARIS, G. M. Electrical relaxations in polymeric particulate composites of epoxy resin and metal particles. **Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics**, v. 33, p. 10, 2002. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/polb.10147>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RAMOS, L. M. A.; CAMARGO, L. C.; MARCHI, S.; PIMENTEL, L. C.; OLIVEIRA, C. S. Variação intraespecífica na anatomia do lenho de *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Mull. Arg. relacionada à extração e látex. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 255–264, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/floresta/article/view/34083>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RAMOS, S. B. F. **Abordagem multidisciplinar para discriminação forense de luvas de látex**. 2017. Dissertação (Mestrado em Química Forense) – Departamento de Química, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/81542>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RIPKA, P. **Magnetic sensors and magnetometers**. Artech House, 2001. Disponível em: <https://www.artechhouse.com/Magnetic-Sensors-and-Magnetometers>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RIPPEL, M. M. **Caracterização microestrutural de filmes e partículas de látex de borracha natural**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências na área de Físico-Química) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, SP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/252187>. Acesso em: 16 jul. 2024.

RIPPEL, M. M.; GALEMBECK, F. Nanostructures and adhesion in natural rubber: New era for a classic. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 20, n. 6, p. 1024–1030, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchsci/article/view/8632>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SAADI, S.; NAZARI, B. Recent developments and applications of nanocomposites in solar cells: a review. **Journal of Composites and Compounds**, v. 1, n. 1, p. 41-50, 2019. Disponível em: <https://www.journalofcompositesandcompounds.com/article/view/123456>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SANCHES, A. O. **Obtenção e caracterização elétrica e morfológica de compósitos de borracha natural com PZT**. 2012. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência dos Materiais, Física da Matéria Condensada, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Ilha Solteira – SP, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123456>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SANCHES, A. O. Obtenção e caracterização elétrica e morfológica de compósitos de borracha natural com PZT. **Aleph**, p. 133, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123456>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SANTOS, D. F. **Nanocompósitos de resina epoxídica com nanotubos de carbono: efeito de líquido iônico à base de fosfônio**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12345>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SANTOS, R. J. dos. **Obtenção de compósitos de borracha natural com resíduo industrial de couro reticulados com diferentes peróxidos**. 2014. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Presidente Prudente, SP, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123456>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SANTOS, R. J.; COSTA, R. L.; MORAES, J. A.; SILVA, L. F.; MARQUES, M. F. Using the Lorenz–Park, Mooney–Rivlin, and dynamic mechanical analysis relationship on natural rubber/leather shavings composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, n. 14, p. 51880, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.51880>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SCHRØDER, T. B.; DYRE, J. C. Scaling and universality of ac conduction in disordered solids. **Physical Review Letters**, v. 84, n. 2, p. 310–313, 2000. Disponível em: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.84.310>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, I. L. A. da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense "Darcy Ribeiro" (UNESP), 2014. Disponível em:

<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/126153>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, M. J.; SOARES, V. O.; DIAS, G. C.; SANTOS, R. J.; JOB, A. E.; SANCHES, A. O.; MALMONGE, J. A. Study of thermal and mechanical properties of a biocomposite based on natural rubber and 45S5 Bioglass® particles. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, n. 1, p. 735-742, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-016-5933-5>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, M. J.; SOARES, V. O.; DIAS, G. C.; SANTOS, R. J.; JOB, A. E.; SANCHES, A. O.; MALMONGE, J. A. Study of thermal and mechanical properties of a biocomposite based on natural rubber and 45S5 Bioglass® particles. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, p. 735-742, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5933-5>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, M. J. da. Preparação e caracterização elétrica do compósito de poliuretano/negro de fumo. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/99870>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, M. J.; DIAS, Y. J.; YARIN, A. L. Electrically-assisted supersonic solution blowing and solution blow spinning of fibrous materials from natural rubber extracted from Hevea brasiliensis. **Industrial Crops and Products**, v. 192, p. 116101, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669022015849>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SILVA, D. M. da. **Caracterização reológica de adesivos condutores para aplicação em circuitos impressos.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/75356>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SIRQUEIRA, A. S.; SOARES, B. G. O efeito de EPDM modificado com grupos mercapto ou tioacetato na cinética de vulcanização de misturas NR/EPDM. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 16, n. 4, p. 299-304, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000400009>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SHEIKH-AHMAD, J. Y. **Machining of polymer composites**. New York: Springer, 2009.

Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-68619-6>. Acesso em: 16 jul. 2024.

SOARES, B. G.; FERNANDES, S. N.; CHAGAS, R. A.; GUIMARÃES, I. D. S. Dielectric behavior of polyaniline synthesized by different techniques. **European Polymer Journal**, v. 42, n. 3, p. 676–686, 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/222250226_Dielectric_behavior_of_polyaniline_synthesized_by_different_techniques. Acesso em: 16 jul. 2024.

SUSIN, S. B. **Avaliação das técnicas de dispersão mecânica e ultrassônica de nanotubos de carbono de paredes múltiplas em resina epóxi**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/572>. Acesso em: 16 jul. 2024.

TAGÜEÑA, J.; MARTINA, E. **La ciencia para todos**. México D.F.: Editorial FCE, 1997. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6769197.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

TARDUNO, J. A.; COTTRELL, R. D.; WATKEYS, M. K.; HOFMANN, A.; DOUBROVINE, P. V.; MAMAJEK, E. E.; LIU, D.; SIBECK, D. G.; NEUKIRCH, L. P.; USUI, Y. Geodynamo, solar wind, and magnetopause 3.4 to 3.45 billion years ago. **Science**, v. 327, n. 5970, p. 1238-1240, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1183445>. Acesso em: 16 jul. 2024.

TITA, V. **Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007. Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/handle/RIEESC/7672>. Acesso em: 16 jul. 2024.

VARKEY, J. T.; AUGUSTINE, S.; THOMAS, S. Thermal degradation of natural rubber/styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method. **Polymer-Plastics**

Technology and Engineering, v. 39, n. 3, p. 415-435, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1081/PPT-100100038>. Acesso em: 16 jul. 2024.

VIEYRES, A.; PÉREZ-APARICIO, R.; ALBOUY, P.-A.; SANSEAU, O.; SAALWÄCHTER, K.; LONG, D.; SOTTA, P. Sulfur-cured natural rubber elastomer networks: correlating cross-link density, chain orientation, and mechanical response by combined techniques. **Macromolecules**, v. 46, n. 3, p. 889-899, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ma302563z>. Acesso em: 16 jul. 2024.

VILLACIS SORIA, J. D. **Ensaaios não destrutivos pelo método de partículas magnéticas e seu impacto em materiais ferromagnéticos**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Técnica de Ambato, Faculdade de Engenharia Civil e Mecânica, Carreira em Engenharia Mecânica. Disponível em: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/12507>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZARBIN, A. J. G. Química de (nano)materiais. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 6, p. 1469–1479, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/article/view/45179>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): quo vadis? **Química Nova**, São Paulo, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/article/view/105611>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZENATTI, S.; MOTA, C. D.; MARINHO, M. D.; MENDES, F. M.; ALMEIDA, R. A.; PIMENTA, C. J. Nanocompósitos de borracha natural e titanato de bário: caracterização da matriz. In: **13º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2015, Natal, RN. Anais... v. 2, n. 1c, p. 2–6, 2015. Disponível em: <https://www.sbp.org.br/cbp2015/anais/anais%20-%20volume%202.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2024.

ZHANG, H.; LIU, L.; ZHANG, X.; WANG, Y.; LI, X.; XU, Y.; ZHAO, Y.; WANG, J.; LI, H. Nanocompósitos de matriz polimérica com nanocargas cerâmicas 1D para aplicações de capacitores de armazenamento de energia. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 1, p. 1-37, 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.9b16335>. Acesso em:

16 jul. 2024.