



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**JOÃO PAULO DA SILVA JERÔNIMO**

**REFERENCIAL TEÓRICO: COMPOSITO EM MATERIAL LIGNOCELULÓSICO-  
BORRACHA**

Prof. Dr. GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
DEZEMBRO – 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**JOÃO PAULO DA SILVA JERÔNIMO**

**REFERENCIAL TEÓRICO: COMPÓSITO EM MATERIAL LIGNOCELULÓSICO-  
BORRACHA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO  
Orientador

SEROPÉDICA, RJ  
DEZEMBRO – 2023

**REFERENCIAL TEÓRICO: COMPÓSITO EM MATERIAL LIGNOCELULÓSICO-  
BORRACHA**

**JOÃO PAULO DA SILVA JERÔNIMO**

APROVADA EM: 05/12/2023

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. GILMARA PIRES DE MOURA PALERMO – UFRRJ  
Orientador

---

Prof. Dr. HENRIQUE TREVISAN – UFRRJ  
Membro

---

Ma. SABRINA MAYER DE ALMEIDA – UFRRJ  
Membro

Dedico essa monografia a todas as pessoas importantes para mim e que me ajudaram a chegar até aqui.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por me fornecerem toda a ajuda necessária e o incentivo para que eu buscasse e finalizasse o ensino superior, além de me incentivarem a buscar sempre a realização profissional.

Ao meu namorado Israel, agradeço por todo o apoio financeiro e emocional em todos esses anos de companheirismo, pois sem ele, provavelmente não teria conseguido chegar até aqui.

A minha sogra, Aurea, agradeço por todo apoio emocional, principalmente na reta final da minha graduação. Agradeço também por sempre ter me acolhido com tanto amor e carinho.

Aos meus amigos do jogral: Nayara, Nathalia, Klara, Laura, Tati, Lemos, Rosinha, Mari, Julia, Duda, Brendon, vocês tornaram minha caminhada mais leve e divertida, além de sempre se preocuparem comigo.

A minha orientadora, por toda a paciência, compreensão e disposição em sempre me ajudar, mesmo quando tudo parecia tão incerto.

A banca examinadora, doutoranda Sabrina Mayer e professor Henrique Trevisan, por disponibilizarem seu tempo para contribuir com esse trabalho e para o cumprimento dessa etapa.

Gratidão a todos!

## RESUMO

Visando propor alternativas eficazes para diminuir os impactos causados à natureza, provenientes da produção de resíduos, estudos desenvolvendo compósitos entre polímeros e fibras naturais vem se tornando cada vez mais comum. Sendo assim, buscando informação sobre a utilização de borracha em compósitos madeira-borracha, este trabalho objetivou fazer uma revisão sistemática sobre compósitos de matriz de borracha reforçados por diferentes tipos de fibras lignocelulósicas, comparando suas propriedades com as das matrizes elastoméricas de origem e possível reutilização de resíduos. A seleção dos trabalhos estudados foi realizada por meio de critérios PICO (População, Intervenção e Comparação), sendo ele um modelo de revisão sistemática na área de Ciência e Engenharia de Materiais. Foram excluídos estudos que abordam outros tipos de compósitos, com outras matrizes ou reforços e estudos que tratam apenas de borracha ou fibras, de modo individual. Após a triagem dos dados, foram selecionados das bases de dados Google Scholar, SciELO e ScienceDirect um total de 17 trabalhos, que apresentaram os resultados mais relevantes em quadros comparativos referente ao assunto madeira-borracha. Os resultados mostram que a incorporação de partículas lignocelulósicas aumentou significativamente a dureza e estabilidades dimensional dos compósitos, com uma diminuição marginal na resistência à tração, alongamento na ruptura e resiliência ao impacto. Todos eles apresentaram baixa absorção de água. Os compósitos em materiais lignocelulósicos-borracha são viáveis tecnicamente e economicamente, podendo ser empregados para diversas utilizações por apresentarem vantagens como: leveza, resistência mecânica, estabilidade dimensional, baixa absorção d'água etc., além de poderem reaproveitar resíduos descartados.

**Palavras-chave:** matriz; resíduos; propriedades; partículas; aplicações.

## ABSTRACT

Aiming to propose effective alternatives to reduce the impacts on nature caused by waste production, studies developing composites of polymers and natural fibers have become increasingly common. Thus, seeking information about the use of rubber in wood-rubber composites, this work aimed to conduct a systematic review of rubber matrix composites reinforced by different types of lignocellulosic fibers, comparing their properties with those of the elastomeric matrices of origin and possible reuse of waste. The selection of the studies was carried out using PICO criteria (Population, Intervention, and Comparison), which is a systematic review model in the field of Materials Science and Engineering. Studies addressing other types of composites with different matrices or reinforcements, as well as studies dealing only with rubber or fibers individually, were excluded. After screening the data, a total of 17 studies were selected from the Google Scholar, SciELO, and ScienceDirect databases, which presented the most relevant results in comparative tables regarding the wood-rubber subject. The results show that the incorporation of lignocellulosic particles significantly increased the hardness and dimensional stability of the composites, with a marginal decrease in tensile strength, elongation at break, and impact resilience. All of them exhibited low water absorption. Lignocellulosic-rubber composite materials are technically and economically viable, capable of being employed for various purposes due to their advantages such as lightweight, mechanical strength, dimensional stability, low water absorption, etc., in addition to the ability to reuse discarded waste.

**Keywords:** matrix; waste; properties; particles; applications.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	2
2.1. Borracha.....	2
2.1.1. Vulcanização .....	3
2.1.2. Tipos de borrachas.....	5
2.1.3. Resíduos de borracha.....	9
2.1.4. Moagem.....	10
2.2. Materiais lignocelulósicos .....	13
2.2.1. Madeira.....	13
2.2.2. Fibras lignocelulósicas .....	16
2.3. Adesivos.....	17
2.3.1. Tipos e características dos adesivos .....	17
2.3.2. Propriedades dos adesivos .....	19
2.4. Compósitos de materiais lignocelulósico-borracha .....	20
2.4.1. Propriedades do compósito.....	21
2.4.2. Tipos de compósitos .....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1. Aplicação prática dos compósitos.....	33
5. CONCLUSÃO .....	34
6. REPEFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	35

## 1. INTRODUÇÃO

Tão importante quanto o aço e o petróleo, a borracha é amplamente utilizada pela indústria na confecção de diferentes produtos, por todos os lugares do mundo. Segundo a Associação dos Países Produtores de Borracha Natural (ANRPC), a produção mundial de borracha cresceu a uma taxa média anual de 2,8%, totalizando 29,04 milhões de toneladas em 2018. Nesse ano, a borracha natural correspondeu a 48,3% da produção mundial de borrachas, com aproximadamente 14 milhões de toneladas. Já a borracha sintética representou 52,7% da produção mundial em 2018, com um valor totalizado de 15 milhões de toneladas (Pennacchio, 2019).

Os produtos provenientes da borracha variam conforme a origem, podendo ser provenientes da borracha natural, vulcanizada ou, ainda, sintética (Job *et al.*, 2003). Atualmente, há uma lista quase incontável de produtos originados da borracha ou que a utilizam em sua formulação em diferentes aplicações, como por exemplo: adesivos, produtos pneumáticos, luvas descartáveis, materiais cirúrgicos, preservativos e lubrificantes, pisos e revestimentos, calçados, impermeabilização de fios e tecidos, ferramentas, utensílios de cozinha, brinquedos infantis, peças automobilísticas etc. (Beilen; Poirier, 2007).

As atividades antrópicas causaram grandes impactos ambientais durante o século XX. A partir da década de 1980, a indústria começou a demonstrar maior preocupação com o meio ambiente, especialmente devido ao aumento da produção de resíduos sólidos e à crescente pressão da legislação. Estes resíduos significam matéria-prima desperdiçada nas etapas de produção, gerando prejuízos econômicos e consequências impactantes ao meio ambiente (Tachizawa, 2009). Tendo em vista os problemas ambientais registrados e à escassez de recursos naturais, a população passou a exigir dos órgãos governamentais soluções para o controle da poluição, desmatamento e degradação. Paralelamente, começou a se exigir das organizações a responsabilidade pelos impactos causados por seus processos industriais.

Atualmente, outro impacto ambiental negativo que também vem sendo avaliado é o da geração excessiva de resíduos madeireiros pela indústria desse setor, considerado até mesmo um problema econômico, pois há um alto volume de perdas e não aproveitamento do material gerado (Mady, 2000). Segundo Fontes (1994), de acordo com suas características morfológicas e métodos de processamento, os resíduos de madeira podem ser classificados como: cavacos, maravalhas, serragem, pó, lenha, aparas e resíduo de topo de tora. Estudos mostram que, geralmente, as perdas no desdobro e nos cortes de reserra de madeira representam cerca de 20% a 40% do volume das toras processadas (Finotti *et al.*, 2006), sendo parte utilizada na produção de energia e parte descartada, onde muitas vezes são lançados na natureza ou ainda queimados a céu aberto.

Com o intuito de estabelecer alternativas eficazes para diminuir os impactos causados à natureza, provenientes da produção de resíduos gerados nos processos fabris, vem se tornando cada vez mais comum estudos desenvolvendo compósitos entre polímeros e fibras naturais, sendo considerada uma opção economicamente viável e rentável (Marinelli *et al.* 2008). Alguns estudos desses compósitos vêm apresentando inúmeros benefícios, entre eles: maior resistência à umidade e deterioração ambiental, maior resistência a pragas e insetos, possibilidade de atribuir diversos formatos, estabilidade dimensional superior, resistência ao empenamento e trincas, maior durabilidade e, ainda, dispensam o uso de proteção superficial como tintas e vernizes (Correa *et al.*, 2003).

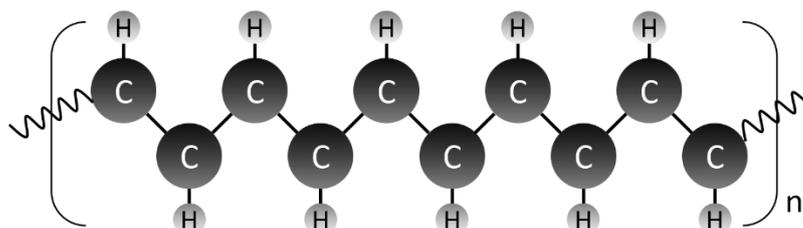
O objetivo do presente estudo é revisar a literatura de modo sistemático, os trabalhos existentes sobre os compósitos feitos de materiais elastoméricos reforçados com fibras lignocelulósicas, de modo a comparar as propriedades encontradas e seus métodos de preparo, principalmente no que diz respeito aos tratamentos para melhorar a interação entra fibra e matriz e o reaproveitamento de resíduos industriais da indústria da celulose e papel. Assim, é possível

propor diferentes aplicações desses produtos, além de oferecer melhores destinações e reaproveitamento desses resíduos, diminuindo conseqüentemente os impactos causados no meio ambiente.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Borracha

Monômeros são micromoléculas, ou ainda, compostos químicos capazes de reagir para formar polímeros. A reação química que conduz à formação de polímeros é a polimerização, uma reação funcional capaz de continuar indefinidamente (Prodóssimo, 2021). De acordo com o comportamento mecânico dos polímeros, os materiais macromoleculares podem ser divididos em três grandes grupos, sendo eles: borrachas, plásticos e fibras. A borracha é um elastômero, podendo ser classificada como um polímero cuja propriedade mais importante é a elasticidade, apresentando um comportamento intermediário entre os sólidos rígidos e fluidos líquidos. Suas moléculas apresentam como característica principal a presença de uma longa cadeia linear polimérica, formada por monômeros que se agrupam através de ligações químicas cruzadas, aumentando a complexidade da estrutura (Yamashita, 2009), como pode ser observado na Figura 1. Assim, os elastômeros possuem a capacidade de serem deformados em altos níveis e, então, retornarem elasticamente, como uma espécie de mola, à sua forma original, ou próxima a ela.



**Figura 1.** Estrutura química básica de um elastômero. Fonte: Autor.

A norma ASTM D1566 (2011) define a borracha como um material capaz de se recuperar de maneira rápida e eficaz de deformações, podendo ser modificado em um estado que é insolúvel em solventes em ebulição (podendo ser expandida), como por exemplo, etanol-tolueno, benzeno e metiletilcetona e, estando em seu estado de modificação, a conversão para uma forma permanente não ocorre de maneira simples, através da aplicação de calor e pressão. Isso possibilita a confecção de uma gama de variações desse material, conferindo a ele propriedades mecânicas, químicas e térmicas extremamente versáteis e desejáveis, o que resulta em sua produção e utilização pela indústria em diferentes setores, como por exemplo: automobilística, naval, aeroespacial, eletrônica etc. (Oliveira, 2017).

Em sua forma natural, também conhecida como crua, a borracha é produzida através do látex extraído de uma espécie florestal chamada *Hevea brasiliensis*. Em sua forma sintética, ela é produzida a partir de derivados do petróleo, podendo ser citadas as borrachas de etileno, isopreno, butadieno, estireno, cloropreno e polissiloxano (Santana; Schmidt; Silverio, 1987), como pode ser observado na Figura 2.

Natureza química	Nomes comerciais (comuns)	Alongamento (%)	Faixa de temperatura útil [°C (°F)]	Principais características de aplicação
<b>Poli-isopreno natural</b>	Borracha Natural ou (NR- Natural Rubber)	500-760	- 60 a 120	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelentes propriedades físicas;</li> <li>• Boa resistência ao corte, entalhe e abrasão;</li> <li>• Baixas resistências ao calor, ozônio e óleos;</li> <li>• Boas propriedades elétricas.</li> </ul>
<b>Copolímero estireno-butadieno</b>	GRS, Buna S (SBR)	450-500	- 60 a 120 (-75 a 250)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boas propriedades físicas;</li> <li>• Excelente resistência a abrasão;</li> <li>• Não possui resistência a óleos, ozônio ou intempéries;</li> <li>• Boas propriedades elétricas, porém não excepcionais.</li> </ul>
<b>Copolímero acrilonitrila-butadieno</b>	Buna A, Nitrile (NBR)	400-600	- 50 a 150 (-60 a 300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente resistência a óleos vegetais, animais e de petróleo;</li> <li>• Propriedades ruins a baixas temperaturas;</li> <li>• As propriedades elétricas não são excepcionais.</li> </ul>
<b>Cloropreno</b>	Neoprene (CR)	100-800	- 50 a 105 (-60 a 225)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente resistência a ozônio, calor e intempéries;</li> <li>• Boa resistência a óleos;</li> <li>• Excelente resistência a chamas;</li> <li>• Não é tão bom em aplicações elétricas quanto a borracha natural.</li> </ul>
<b>Polissiloxano</b>	Silicone (VMQ)	100-800	- 115 a 315 (-175 a 600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelente resistência a temperaturas altas e baixas;</li> <li>• Baixa resistência mecânica;</li> <li>• Excelentes propriedades elétricas.</li> </ul>

**Figura 2.** Quadro com os principais tipos e características de borracha. Fonte: Callister (2015).

Tanto as borrachas naturais quanto as sintéticas dificilmente são utilizadas em sua forma pura, ocorrendo adições na maioria das vezes. Em suas aplicações práticas podem ser adicionados vários ingredientes, sendo a escolha de utilização desses ingredientes integrados baseada no conjunto de propriedades que se deseja obter no fim do processo (Nunes *et al.*, 2005). A polimerização pode envolver reações de adição, ou poliadição e reações de condensação ou policondensação. Os polímeros de adição em geral possuem a cadeia regularmente constituída por apenas átomos de carbono, ligados covalentemente, comumente preparados a partir de monômeros contendo uma ou mais ligações duplas. Os polímeros de condensação apresentam em sua cadeia principal átomos de carbono e de outros elementos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre, fósforo e outros (Allinger *et al.*, 1976).

### 2.1.1. Vulcanização

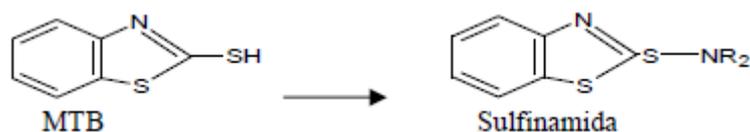
Devido as suas propriedades naturais, as borrachas têm suas características alteradas conforme as mudanças de temperatura, podendo se tornar facilmente quebradiças quando expostas a baixas temperatura ou ainda, excessivamente pegajosas quando submetidas a elevadas temperaturas (Ferreira, 1999). Além disso, quando o material é esticado ao extremo, as cadeias isoladas podem se deslizar umas sobre as outras, levando a uma deformação permanente do material quando ele estiver sob tensão (Allinger *et al.*, 1976). Essas variações físicas conforme as mudanças de temperatura e deformação quando estirado, dificultam seu manuseio para a confecção de produtos amplamente utilizados.

A vulcanização pode ser resumida na reação do enxofre em determinados pontos do polímero de borracha através do aquecimento, em uma reação que produz ligações cruzadas entre as cadeias de cis-polisopreno (Maiti; Bhattacharya; Bhowmick, 2008). Quimicamente, o

enxofre reage nas ligações duplas do polímero e com os átomos de hidrogênio alílicos, ligando as cadeias umas com as outras e formando uma estrutura tridimensional. A criação de uma quantidade suficiente dessas ligações dissulfeto (-S-S-) formando ligações cruzadas, permite que as moléculas de borracha permaneçam flexíveis evitando escoamentos relativos entre cadeias poliméricas (Solomons, 1996).

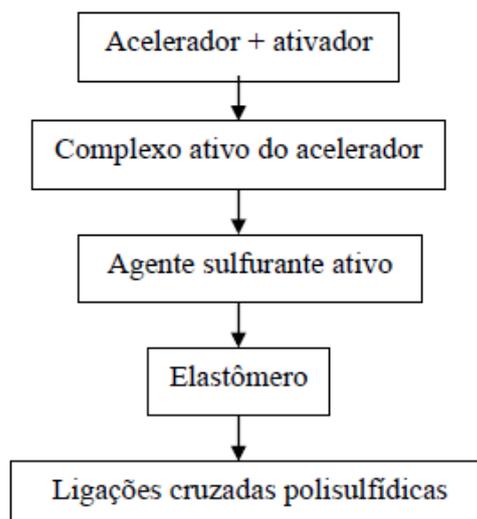
É a partir da vulcanização que o fabricante combina a elasticidade da borracha com a resistência à deformação, portanto, a borracha vulcanizada representa um ótimo material para a fabricação de solas flexíveis, resistentes à abrasão, resilientes e não deformáveis (Santana; Schmidt; Silverio, 1987). A borracha macia usada para produzir elástico, contém cerca de 1 a 3% de enxofre; a borracha processada com 3 a 10% de enxofre tem mais ligações cruzadas, é menos flexível podendo ser usada em pneus para veículos (Couteur, 2006). Entretanto, devido ao uso do enxofre no seu processo de vulcanização, a borracha requer cuidados com relação ao seu uso e descarte e, portanto, duas questões devem ser destacadas: seu período de decomposição e sua ação diante do fogo. AGA (2002) destaca que o dióxido de enxofre pode ser tóxico ao homem e ao meio ambiente.

As indústrias de borracha utilizam o processo de vulcanização para melhorar as propriedades da borracha. Atualmente uma combinação de aceleradores benzotiazóis e sulfenamidas é empregada para melhorar a resistência à pré-cura, mantendo a velocidade da cura. Os aceleradores orgânicos aumentam a velocidade de vulcanização, permitindo o emprego de temperaturas mais baixas e menor tempo de cura, minimizando assim a degradação térmica e oxidativa. Além disso, o nível de enxofre pode ser reduzido e, ainda assim, sem prejuízo para as propriedades físicas do vulcanizado. O resultado do uso de acelerador é a redução do afloramento de enxofre e a maior resistência ao envelhecimento. A possibilidade de reversão é reduzida. Vulcanizados transparentes ou coloridos podem ser preparados. Na figura 3 pode ser observada a estrutura química do acelerador sulfinamida, derivada do 2-mercaptobenzotiazol (MTB) (Costa, 2008).



**Figura 3.** Molécula de sulfinamida derivada do MTB. Fonte: Costa (2008).

Os ativadores atuam na ativação da vulcanização, ou seja, aumentam a ação dos aceleradores orgânicos. Geralmente são empregadas duas substâncias, sendo mais utilizado o óxido de zinco e o ácido esteárico. Em primeiro momento, um complexo ativo do acelerador é formado através de uma interação entre o acelerador e o ativador, na presença de zinco solúvel. Esse complexo pode reagir com o enxofre molecular, mediante a abertura do anel S8, para formar um agente sulfurante que reage com as cadeias de borracha para dar origem às ligações cruzadas polisulfídicas (Costa, 2008). Na figura a seguir são observadas as etapas do processo de vulcanização (Figura 4).



**Figura 4.** Esquema geral do processo de vulcanização. Fonte: Autor.

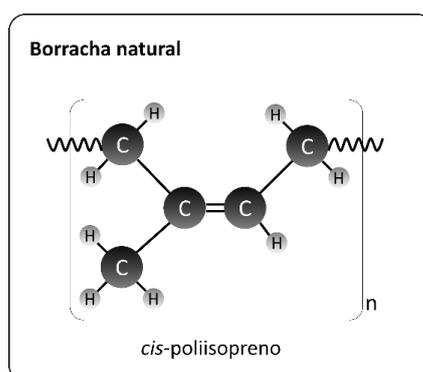
## 2.1.2. Tipos de borrachas

### 2.1.2.1. Borracha natural (NR)

A borracha natural, ou *Natural Rubber* (NR), é um polímero da molécula de isopreno, sendo obtida a partir da coagulação de látices, como por exemplo, o látex, de determinadas espécies vegetais. Este é extraído principalmente de uma espécie florestal nativa da floresta Amazônica, pertencente à família das Euforbiáceas, denominada cientificamente por *Hevea brasiliensis* e conhecida popularmente como Seringueira (Costa *et al.*, 2008).

Na casca das Seringueiras são encontradas as estruturas secretoras denominadas vasos laticíferos, que são responsáveis por produzir e armazenar o látex. Quando cortados por ocasião da sangria, a pressão de turgor desses vasos expulsam o látex promovendo o fluxo contínuo. Com o passar do tempo esse fluxo diminui e é interrompido quando as extremidades cortadas dos vasos laticíferos são obstruídas pelo látex coagulado (Prodóssimo, 2021).

Segundo Smith e Hashemi (2012), a estrutura química da borracha natural é composta pelo monômero *cis*-1,4-poli-isopreno, juntamente com por proteínas, lipídios, sais orgânicos e vários outros componentes em menores quantidades. Em sua composição, é possível observar que seu grupo metil, juntamente com um átomo de hidrogênio, estão próximos à ligação dupla entre carbonos, característica indicada pelo prefixo “*cis*”. Além disso, há a presença de unidades químicas repetidas da cadeia polimérica unidas através de ligações covalentes no primeiro e quarto átomos de carbono (1,4) (Figura 5).



**Figura 5.** Estrutura química básica da borracha natural. Fonte: Autor.

A produção da borracha a partir de sua matéria-prima, o látex, envolve as etapas de preservação, concentração, coagulação, desidratação, secagem, limpeza e mistura e, devido à sua origem natural, é vendida em uma variedade de graus com base na pureza (cor e presença de matéria estranha), viscosidade, estabilidade da viscosidade, resistência à oxidação e taxa de cura. Há também variações da borracha natural, que passam por tratamentos, estes incluem a borracha natural epoxidada (ENR); borracha natural desproteinizada (DNR); óleo de borracha natural estendida (OENR), na qual são incorporados 10-40% de óleos de processo; borracha Heveaplus MG, borracha natural com polimetilmetacrilato; cadeias laterais; e borracha natural termoplástica (TNR), misturas de borracha natural e polipropileno (Ciullio; Hewitt, 1999).

Para que o látex seja utilizado como matéria de aplicação técnica, é necessário que através de processos de beneficiamento ele adquira características capazes de fazer com que o produto possa receber utilização prática. Os processos de beneficiamento iniciam-se cerca de 8 a 10 horas após a colheita, quando o látex se coagula espontaneamente pela ação de bactérias e microrganismos presentes no soro e no ar. Esta coagulação separa a borracha em forma de coágulo que com o tempo adquire mau cheiro, tornando o látex um produto perecível (Ferreira, 1999).

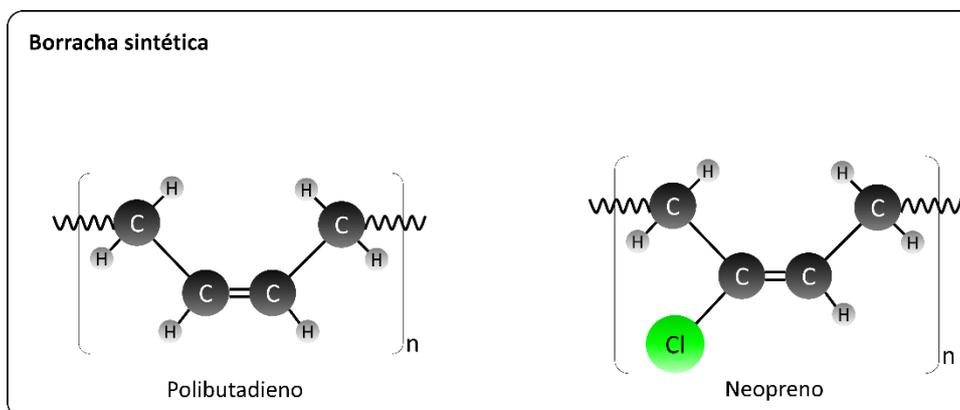
A coagulação da borracha ocorre quando as bactérias atacam os açúcares do látex, gerando ácidos graxos de baixa massa molecular. Esses ácidos abaixam o pH do látex cujo valor está em torno de 4,5 este é o chamado ponto isoelétrico do látex (o valor de pH onde a molécula apresenta carga elétrica líquida igual a zero), causando coagulação e coalescência das partículas de borracha. Portanto, para evitar a degradação por microrganismos, o látex deve ser estabilizado com soluções alcalinas. O agente estabilizante geralmente utilizado é a solução de amônia ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) em quantidades suficientes para elevar o pH do látex por volta de 10,2. Esta quantidade embora seja relativamente variável de um látex para outro, para fins práticos recomenda-se à quantidade de 2% de amônia calculada sobre a fase líquida. A coagulação espontânea provoca a degradação, mas há necessidade de coagulação do látex por métodos eficientes tais como a adição de ácido, solução de sais de alguns metais ou álcoois (Ferreira, 1999). Após a coagulação, é realizado a separação do polímero com massa molecular da ordem de 105. Os produtos de borracha são feitos a partir de uma composição que tem como componente principal um polímero. Para que a borracha seja convertida em material tecnicamente utilizável adquirindo características finais exigidas pelo mercado consumidor são incorporados ao polímero determinados produtos. Para preparar uma composição polimérica, o polímero e os ingredientes devem ser misturados em equipamento adequado, onde é feita a homogeneização da massa, à temperatura conveniente. A massa é comumente designada composição vulcanizável (Prodóssimo, 2021).

### **2.1.2.2. Borracha sintética**

A classe das borrachas sintéticas surgiu após a Segunda Guerra Mundial, como resultado do aprofundamento dos estudos e avanços na área da química orgânica, que possibilitaram o desenvolvimento dos processos de polimerização, condensação e catálise em alta pressão (Gameiro, 2002). A rápida produção desse material, juntamente com seus custos relativamente baixos contribuíram para sua alta demanda pela indústria, porém, suas características são inferiores, se comparadas às da borracha natural. Outro fator importante foi a expansão considerável da indústria automotiva nesse período, com a conseqüente impossibilidade de a indústria da borracha natural atender à demanda crescente da época (Nunes *et al.*, 2005).

Para se obter as propriedades necessárias para a aplicação da borracha em diferentes produtos, muitas vezes, é feita a mistura de dois ou mais elastômeros no processo, denominado copolimerização (Figura 6). O objetivo desse procedimento é melhorar as propriedades originais dos elastômeros utilizados, bem como seu processamento e reduzir seus custos.

Algumas das borrachas sintéticas mais importantes são as estireno-butadieno, borrachas de nitrilo e o policloropreno (Smith; Hashemi, 2012).



**Figura 6.** Estrutura química básica da borracha sintética. Fonte: Autor.

#### 2.1.2.2.1. Borrachas de Estireno-butadieno (SBR)

As borrachas de estireno-butadieno, também chamadas de *Styrene-butadiene Rubber* (SBR), correspondem à classe de elastômeros sintéticos mais utilizada industrialmente, substituindo a borracha natural (NR) em várias aplicações devido às vantagens inerentes em termos de estabilidade e propriedades físicas, bem como seu baixo custo de produção. A SBR é utilizada principalmente pela indústria automobilística, que a emprega na confecção de bandas de rolamento de pneus de automóveis.

Esse elastômero é sintetizado através da copolimerização do butadieno e do estireno, processo pelo qual se obtêm um material de alta resistência ao desgaste, porém, com maior geração de calor. Ao final da polimerização, a SBR apresenta cerca de 20 a 30% de estireno (Smith; Hashemi, 2012). No entanto, a medida em que se aumenta o teor de estireno, o produto vai assumindo a característica de um material termoplástico (Nagdi, 1987). Entre suas principais desvantagens, podem ser citadas sua suscetibilidade em absorver solventes orgânicos, como por exemplo, óleos e gasolina, e sua tendência a expansões (Callister, 2015).

#### 2.1.2.2.2. Borrachas de Nitrilo (NBR)

As borrachas de nitrilo, também chamadas de *Nitrile Rubber*, ou ainda, Buna-N (NBR), são copolímeros sintetizados a partir de butadieno e acrilonitrila. Em sua polimerização é utilizado um processo de emulsão, onde são adotadas temperaturas que variam de 5 °C a 30 °C (processo frio), ou ainda, temperaturas superiores à 30 °C (processo quente).

As NBR são consideradas como uma classe especial das borrachas, pois o grupo nitrila presente em sua cadeia molecular, fornece maior resistência a óleos e solventes, além de maior resistência ao calor e abrasões. Devido a essas características e ao seu elevado custo de produção, possui aplicações mais limitadas, se restringindo à composição de itens como mangueiras de combustível e juntas, onde é necessário uma alta resistência a óleos, solventes e graxas diversas.

Um dos pontos mais procurados sobre a borracha nitrílica é sobre seu processo de vulcanização. Quando esse processo ocorre, resultado denomina-se vulcanizado. Estes vulcanizados de NBR junto ao PVC ganham algumas vantagens em relação ao tipo comum, como maior resistência ao ozônio e intempéries. Em contrapartida, há uma piora no desempenho em relação à flexibilidade, resistência a baixas temperaturas e à compressão.

### 2.1.2.2.3. Policloropreno (CR)

As borrachas de policloropreno ou, *Chloroprene Rubber* (CR), também são conhecidas popularmente como Neoprene®, sendo produzidas através da polimerização do cloropreno (2-cloro-1,3-butadieno). Sua estrutura se assemelha à do isopreno, se diferenciando pela presença de um átomo de cloro que confere às borrachas CR maior resistência a degradações físicas e químicas provenientes do ambiente, como: calor, luz, radiação UV etc.

O policloropreno foi desenvolvido e introduzido no mercado pela empresa norte-americana DuPont com o nome Neoprene®, sendo ela sua única produtora durante décadas. Esse elastômero possui como principal característica boa resistência a óleos e combustíveis, porém, apresenta baixa flexibilidade em baixas temperaturas e qualidade inferior para aplicações elétricas, se comparado as borrachas naturais. Esses fatores, somados aos custos de produção relativamente, altos fazem com que as CR sejam utilizadas em aplicações específicas, como por exemplo: revestimentos de fios e cabos, mangueiras industriais, cintos, lacres e diafragmas automotivos.

O Neoprene® é vendido aos fabricantes como matéria-prima básica. Quando ligada a outros produtos químicos selecionados, preenchedores e processada, ela se torna passível de aplicações diversas juntamente a borracha crua, goma vulcanizada e carbono negro vulcanizado. O composto resultante da mistura é então moldado e vulcanizado. As propriedades que o produto acabado adquire depende da quantidade de policloropreno e dos seus aditivos utilizados na conformação. Já a vulcanização ocorre em processo diferente da borracha natural e sintética; o processo da vulcanização dos elastômeros de policloropreno depende dos óxidos metálicos ao invés do enxofre, sendo utilizado em muitos elastômeros. Os óxidos de zinco e magnésio são usados com maior frequência (Smith; Hashemi, 2012).

### 2.1.2.2.4. Silicones (QM)

Sendo estudados há muito tempo na área das borrachas, os silicones são elastômeros que possuem como principal constituinte os polisiloxanos. Estes, se caracterizam por serem polímeros com cadeias principais constituídas por ligações inorgânicas de silício e oxigênio, além de apresentarem grupos laterais orgânicos. As moléculas dos polisiloxanos podem ser feitas sob medida para que, ao final do processo, o material apresente propriedades desejadas para aplicações específicas, de acordo com os grupos laterais presentes nas cadeias desses polímeros. Assim, as características finais obtidas são resultado da estrutura dos polímeros utilizados e seus grupos laterais, do mecanismo, tempo, temperatura e grau de cura, da presença de cargas e aditivos e do processamento utilizado (Sakar, 2001).

Todos os silicones são produzidos a partir da mesma matéria prima, se diferenciando apenas no grau de viscosidade ou polimerização. Primeiramente, um grande volume de areia de quartzo é aquecido a temperaturas que podem atingir 1800 °C, dessa maneira é feito o isolamento do silício da sílica. Com a obtenção do silício puro em forma de pó, é adicionado cloreto de metila e a mistura é aquecida na presença de um catalizador a base de cobre, gerando uma reação que formará uma mistura de clorosilanos (Maliverney, 2013). Esta contém o principal componente do silicone, o chamado dimetilclorossilano, que pode ser obtido a partir do aquecimento da mistura, já que seus componentes possuem diferentes pontos de ebulição. O polidimetilsiloxano (PDMS) contém a ligação siloxano que é a base do silicone e a partir daí, o silicone é polimerizado utilizando-se vários métodos a partir das propriedades de cada composto e do produto que se deseja obter (Maliverney, 2013; Askeland; Phulé, 2008).

Segundo Gomes (2023) as borrachas de silicone podem ser divididas em quatro categorias, sendo elas: vulcanizável a quente ou High Temperature Vulcanizing (HTV); curada a quente ou Heat Cured Rubber (HCR); vulcanizável a frio ou Room Temperature Vulcanizing (RTV) e a borracha de silicone líquida ou Liquid Silicone Rubber (LSR). Elas se diferem pela

quantidade e tipo de peróxido mais adequado ao método, bem como a temperatura utilizada para a realização da vulcanização.

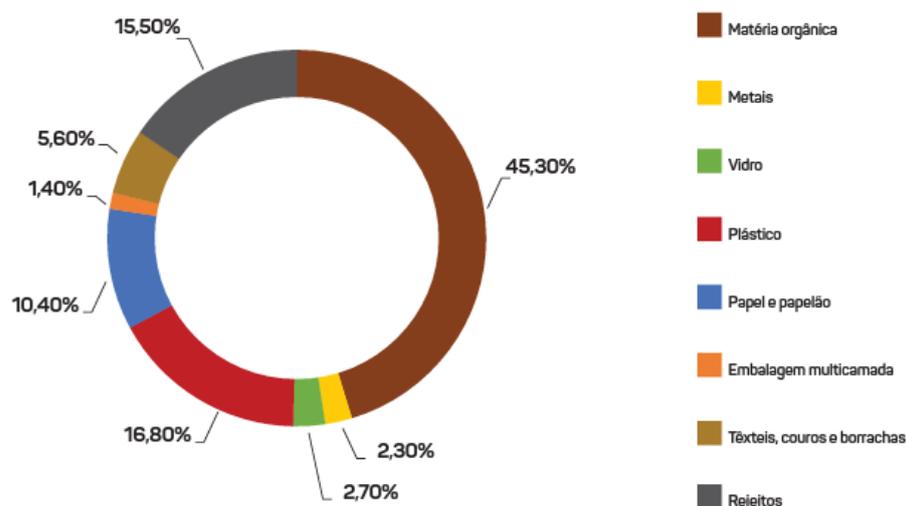
A cura ocorre quando a borracha de silicone é quimicamente reticulada através da adição de um agente de cura, podendo ser peróxido, que é o mais utilizado, ou ainda, platina. Sendo quimicamente diferentes, os agentes conferem diferentes propriedades ao produto. Essa o silicone é superior às borrachas orgânicas comuns em termos de resistência ao calor, estabilidade química, isolamento elétrico, resistência à abrasão, resistência às intempéries e resistência ao ozônio. Devido a sua versatilidade, esse material possui um amplo potencial de aplicação, sendo utilizado em larga escala para diversas finalidades e diferentes setores, como: indústria de utensílios domésticos, automotiva, aeroespacial, eletroeletrônica, de processamento de alimentos, cosméticos e na área da saúde (Kuo; Lin, 2019; Shit; Shah, 2013; Jerschow, 1998).

### **2.1.3. Resíduos de borracha**

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), a classe dos resíduos sólidos engloba tanto os resíduos sólidos quanto os semissólidos, sendo eles resultantes das atividades da população e podendo ser de origem: doméstica, industrial, comercial, agrícola, de serviços da saúde, de serviços e varrição.

A Lei nº 12.305 foi criada em agosto de 2010 e instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e, no mesmo ano, ela foi regulamentada, estabelecendo uma política de resíduos em escala federal. Assim, foram delimitados objetivos e instrumentos, além de diretrizes relacionadas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, atribuindo também responsabilidades aos geradores e ao poder público, em relação ao controle e destinação desses resíduos (CNM, 2011). Essa lei institui o princípio de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, abrangendo fabricantes, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos. As punições relacionadas aos crimes ambientais causados por pessoas físicas e jurídicas estão previstas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e Decreto nº 6.514/2008 que “dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente e dá outras providências” (Skaf, 2012).

A composição gravimétrica dos resíduos diz respeito ao percentual da massa de cada componente em relação à massa total. De acordo com os dados fornecidos pela ABRELPE (2020) sobre os resíduos sólidos produzidos no intervalo de 2010 a 2018, a fração orgânica; que engloba sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras; é o principal componente dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), com 45,3%. Os resíduos recicláveis secos correspondem a 33,6%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos somam 21,1%, dentre os quais resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6% e rejeitos 15,5%, compostos principalmente por resíduos sanitários (Figura 7).



**Figura 7.** Estimativa da Composição Gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil. Fonte: Abrelpe (2020).

Reciclagem é o processo em que há a transformação dos resíduos sólidos que não seriam aproveitados, com mudanças em seus estados físico, físico-químico ou biológico, de modo a atribuir características ao resíduo para que ele se torne novamente matéria-prima ou produto, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Ecycle, 2020). A reciclagem dos polímeros representa uma importante iniciativa no estabelecimento de métodos de produção sustentáveis e pode ser dividida em três tipos: reciclagem mecânica, energética e química. Eles se baseiam em práticas comuns como a coleta e separação do descarte, onde também são separados os resíduos de acordo com o tipo de material, nível de limpeza, tamanho, conservação etc. (Ecycle, 2020).

Segundo Ricchini (2020), o processo de reciclagem energética consiste em transformar o material em energia térmica ou elétrica, através de sua incineração, aproveitando assim, seu poder calorífico para gerar energia. Além da economia e da recuperação de energia, com a reciclagem ocorre ainda uma redução de 70 a 90% da massa do material, restando apenas um resíduo inerte esterilizado.

A reciclagem química é ocorre quando os polímeros são transformados em moléculas menores adequados para a produção de novos produtos petroquímicos e polímeros, quando submetidos as etapas de hidrogenação, gaseificação, pirólise e quimólise (Ecycle, 2020). Dessa forma, são obtidos novamente os monômeros que originaram o polímero. São, porém, processos complexos e de alto custo, muitas vezes não justificáveis para obtenção de produtos muito baratos como a maioria dos polímeros (Mantovani, 2015).

A reciclagem mecânica representa o método mais utilizado em todo o mundo na reciclagem de polímeros devido a sua facilidade e aos baixos custos de realização. Seu princípio é a transformação mecânica ou física do material, sem que ocorram grandes alterações em sua estrutura química, através de processos de empacotamento ou moagem, produzindo um material granulado que, posteriormente, pode ser utilizado como matéria-prima na fabricação de novos produtos (Contemar Ambiental, 2019; Ecycle, 2020).

#### 2.1.4. Moagem

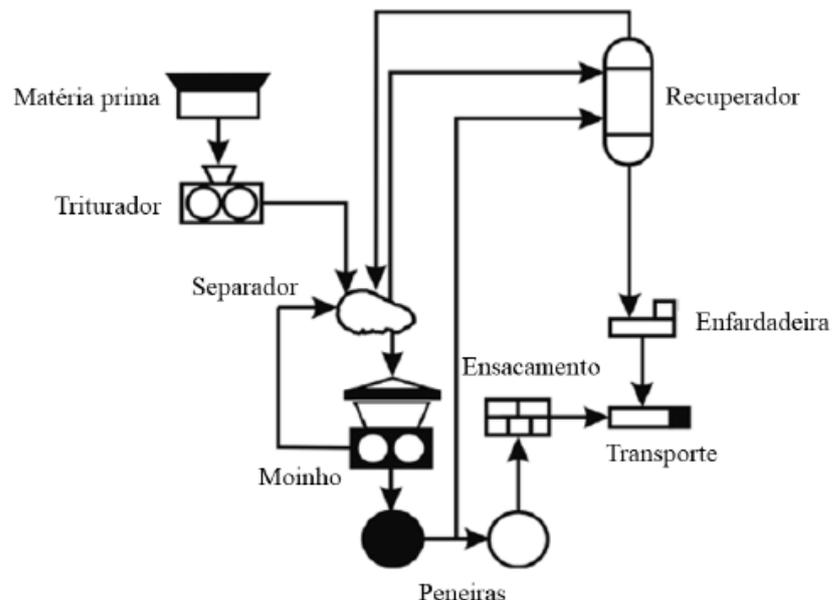
Como etapa primária obrigatória para a reciclagem de borrachas, independentemente de sua finalidade, é necessário reduzir suas partículas através do processo de moagem. A moagem pode ser realizada tanto em temperatura ambiente quanto na região de transição vítrea das

borrachas em um sistema criogênico (Asaro *et al.*, 2018). No caso dos produtos de grande porte, como por exemplo, os pneus, em um primeiro momento deve ser feita uma pré-trituração do material para que ele se torne compatível e possa ser submetido a aparelhos de moagem. Também é importante a separação de suas possíveis partes metálicas e fibras (Kim *et al.*, 2018).

#### 2.1.4.1. Moagem em temperatura ambiente

A moagem realizada em temperatura ambiente se caracteriza por ser um processo simples e de baixo custo. Nele, as borrachas vulcanizadas passam por um aparelho que contém um moinho de cisalhamento ou moinho de rolos. No equipamento, o material é forçado a passar entre o gap dos rolos o que gera altos níveis de cisalhamento, reduzindo assim o material em partículas menores (Asaro *et al.*, 2018) (Figura 8). Apesar desse processo ser definido como feito em temperatura ambiente, é importante ressaltar que essa definição é adotada apenas por conveniência, já que no interior do equipamento as temperaturas podem alcançar valores por volta de 130°C, em vista do alto cisalhamento ao qual o material é submetido. Por esse motivo, o aquecimento resultante deve ser devidamente controlado, de modo a evitar ocorrência de oxidação e degradação, responsáveis por afetar as propriedades físicas do material e o deteriorar (Kim *et al.*, 2018).

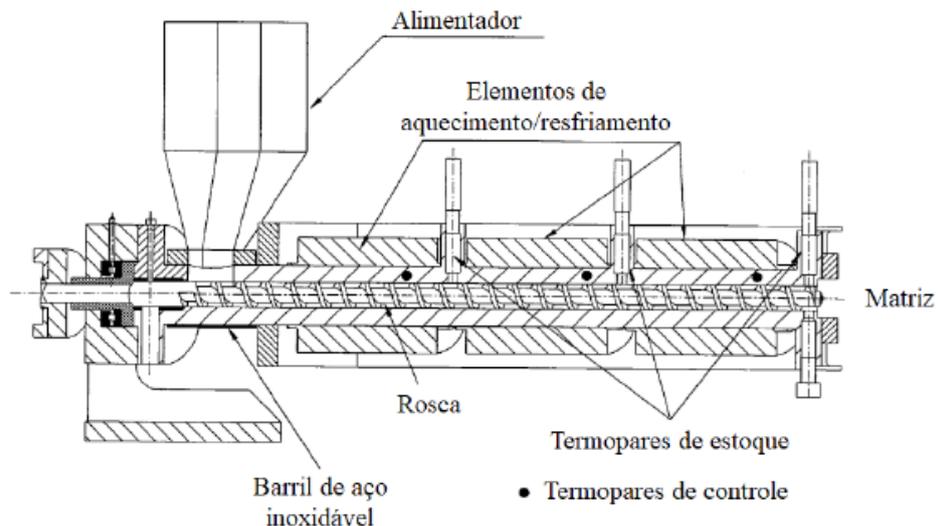
Ao final das etapas de moagem, as partículas resultantes de borracha tendem a apresentar uma estreita distribuição em seu tamanho, adotando também uma morfologia mais complexa e de característica esponjosa. Como consequência disso, elas apresentam maior área específica quando comparadas aos resultados de outros métodos de moagem (Kim *et al.*, 2018). Outra importante característica das borrachas moídas à temperatura ambiente é sua elevada viscosidade, pois isso resulta em melhorias nas suas propriedades de adesão, quando adicionadas à ligantes e outros materiais para produzir compósitos (Forrest, 2014).



**Figura 8.** Esquemática do processo de moagem em temperatura ambiente. Adaptado de: Kim *et al.* (2018).

### 2.1.4.2. Moagem por deformação elástica

Outro tipo de moagem que pode ser realizado é o de moagem por deformação elástica, feito através do emprego de extrusoras. Neste processo a borracha é submetida a altos cisalhamento e temperaturas ao longo das etapas do equipamento. Essa aplicação é denominada Extrusão por Cisalhamento no Estado Sólido (SSSE) que proporciona uma elevada deformação por cisalhamento das partículas do material, resultando no armazenamento de uma grande quantidade de energia de deformação e na formação de trincas (Bilgili; Arastoopour; Bernstein, 2001) (Figura 9). Quando essa energia armazenada atinge um valor crítico, as partículas da borracha se rompem, ocorrendo a formação de novas superfícies e sua pulverização. Através desta técnica é possível obter partículas com tamanhos que variam de 200 a 400  $\mu\text{m}$  (Kim *et al.*, 2018).



**Figura 9.** Esquemática de uma extrusora de rosca simples utilizada na moagem de borracha. Adaptado de: Bilgili; Arastoopour; Bernstein (2001).

A distribuição do tamanho das partículas de borracha resultantes é influenciada por alguns fatores, entre eles, podem ser citados as condições de processamento e as propriedades do material utilizado. Maiores elasticidades da borracha utilizada gerarão maiores quebras ao longo do processo, resultando na diminuição do tempo que ela leva para atingir o estado crítico no qual ocorre o seu rompimento. Em contrapartida, quanto maior o grau de compactação e temperatura na zona de pulverização da extrusora, maior será a aglomeração das partículas de borracha, produzindo partículas mais grosseiras (Bilgili; Arastoopour; Bernstein, 2001).

### 2.1.4.3. Moagem úmida

A moagem úmida é comumente utilizada como complemento da moagem à temperatura ambiente, sendo também utilizada para substituí-la. Este processo consiste na aplicação de jatos d'água de elevada pressão sobre a borracha, causando a desintegração de suas partículas como resultado da energia exercida pelo impacto. Uma das vantagens desse método está no tamanho que as partículas podem atingir, podendo chegar a valores inferiores a 200  $\mu\text{m}$ . Outra vantagem é a utilização da água para remover o calor da borracha durante o processo, reduzindo possíveis degradações do material (Asaro *et al.*, 2018). Outro ponto positivo é o fato da técnica ser ecologicamente sustentável, já que utiliza água reciclada em um sistema de circuito fechado, apresentando também um baixo consumo de energia. Em contrapartida, a principal desvantagem da moagem úmida é a necessidade de uma etapa de secagem após a moagem da

borracha, o que ocasiona um aumento no consumo energético total. Além disso, há certa dificuldade na separação das partículas de borracha e suas impurezas, como por exemplo, metais e fibras (Kim *et al.*, 2018).

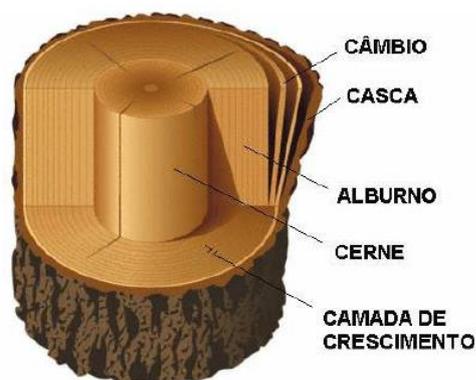
## 2.2. Materiais lignocelulósicos

### 2.2.1. Madeira

A madeira é um material heterogêneo e natural que possui diferentes tipos de células adaptadas a desempenharem funções específicas na árvore, como: condução de líquidos, transformação, armazenamento e transporte de substâncias nutritivas, além de fornecer sustentação ao vegetal (Burguer; Richter, 1991). Essas células são dispostas no sentido radial, tangencial e longitudinal, e ligadas entre si pela lignina, constituindo o tecido lenhoso. As variações físicas e anatômicas da madeira são grandes entre espécies e dentro da mesma espécie, principalmente em função da idade, de fatores genéticos e ambientais (Bodig; Jayne, 1993). Suas propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas, influenciam diretamente na formação e qualidade dos produtos reconstituídos de madeira (Iwakiri, 2005).

A madeira possui suas células dispostas e organizadas em diferentes direções, que conforme a face observada durante um corte pode ser caracterizada com os seguintes planos convencionais: transversal (X), que é perpendicular ao eixo da árvore; longitudinal radial (R), que é paralelo aos raios ou perpendicular aos anéis de crescimento; e longitudinal tangencial (T), que é perpendicular aos raios, ou tangenciando os anéis de crescimento (Burguer; Richter, 1991).

A casca da madeira tem a função de proteger externamente o vegetal, sendo formada por uma camada interna e outra externa. A primeira é formada pelo floema, que pode ser definido como o conjunto de tecidos especializados responsáveis pela condução de seiva elaborada (Burguer; Richter, 1991). Já a camada externa é formada pelo córtex, periderme e ritidoma, sendo os tecidos que revestem o tronco. A proteção do vegetal contra o ressecamento, ataques fúngicos, injúrias mecânicas e variações climáticas, é outra função da casca, além de auxiliar na identificação de árvores vivas (Glória; Gerreiro, 2006). O câmbio é o tecido meristemático localizado entre o xilema e o floema, e tem sua atividade influenciada sensivelmente pelas condições climáticas. O câmbio permanece ativo durante toda a vida do vegetal e é responsável pela formação dos tecidos secundários que constituem o xilema e a casca (Figura 10). Segundo Iwakiri (2005), as características inerentes à anatomia da madeira, como os anéis de crescimento, cerne e alburno, lenho juvenil e lenho adulto, grã e porosidade, influenciam na colagem deste material.



**Figura 10.** Esquemática dos elementos estruturais da madeira. Fonte: Costa (2001).

As fibras também estão presentes na madeira e são células responsáveis por sua sustentação, apresentando formato alongado com extremidades afiladas e maiores dimensões no sentido do eixo longitudinal do tronco. Elas são responsáveis pelas características de rigidez e flexibilidade da madeira (Glória; Gerreiro, 2006). A disposição das fibras na madeira, além de outros elementos constituintes, a tornam um material anisotrópico. Por essa razão, diferentes propriedades são encontradas, devido à orientação das fibras e seu entrelaçamento na estrutura da árvore, afetando diretamente as propriedades planas e tridimensional dos produtos (Glória; Gerreiro, 2006).

### 2.2.1.1. Propriedades da madeira

A madeira é formada por componentes químicos orgânicos e inorgânicos que variam na sua quantidade entre espécies, dentro da mesma espécie e de uma região para outra na árvore, e até entre células (Frizzo; Silva, 2001). Os principais elementos que compõem a madeira são celulose, hemicelulose, lignina e extrativos em geral, como pode ser observado na Figura 11. A celulose compõe a maior parte dos tecidos vegetais, tanto em gimnospermas, quanto em angiospermas (Winandy; Rowell, 2005). Os componentes químicos acidentais compreendem os compostos orgânicos e inorgânicos não essenciais à parede celular, sendo compostos por extrativos, minerais e outros (Frizzo e Silva, 2001).

<b>Componentes</b>	<b>Presença</b>
Celulose	40 - 45%
Hemicelulose	≈ 20%
Lignina	15 – 35%
Outros constituintes	Até 10%

**Figura 11.** Composição química da madeira. Fonte: Winandy; Rowell (2005).

Outros componentes que compõem a madeira, além dos polímeros citados, são as substâncias denominadas de extrativos, que se encontram impregnados no material. Os extrativos são substâncias que atuam em muitas características da madeira, porém, sua exata atuação ainda não foi bem determinada. Nas espécies de coníferas, as terebentinas, que são voláteis, predominam em diferentes composições. Já as folhosas apresentam maior diversidade de extrativos, englobando compostos fenólicos, aromáticos e nitrogenados, taninos e inúmeros carboidratos (Fengel; Weneger, 1984; Wikberg; Maunu, 2004; Winandy; Rowell, 2005).

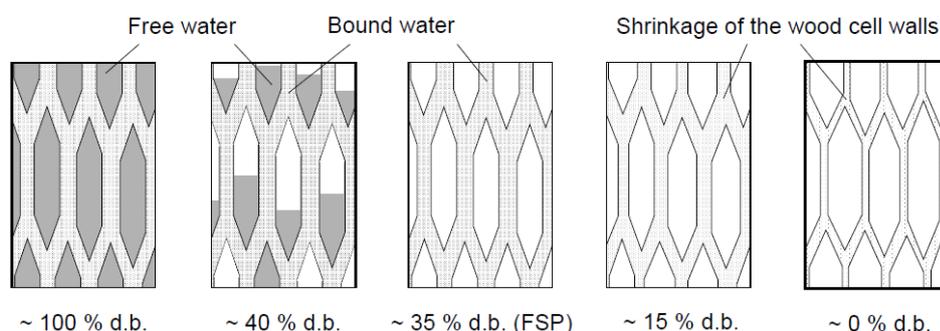
A madeira pode ser definida como um material que apresenta comportamento anisotrópico, isso ocorre devido a orientação das suas células nos sentidos longitudinal, radial e tangencial. Devido a esse fator, as propriedades da madeira divergem conforme o sentido das fibras (Pfeil; Pfeil, 2003).

A massa específica da madeira é a razão entre a quantidade de massa por unidade de volume. Os componentes estruturais e os compostos orgânicos e inorgânicos presentes no lenho determinam a massa específica entre as espécies arbóreas. A resistência mecânica e a durabilidade aumentam à medida em que o peso específico aumenta, ao contrário do que ocorre com a permeabilidade dos produtos preservantes e com a trabalhabilidade (Costa, 2001).

Um importante fator para as propriedades da madeira é o seu teor de umidade, que varia conforme seu conteúdo de água sujeita a forças capilares, nas cavidades celulares e nos espaços entre as células (água livre); a água em estado de vapor nas paredes celulares, unidas às microfibrilas de celulose (água de impregnação); e participando da constituição química da madeira (água de constituição) (Martins 2010). Essa umidade afetará diretamente as propriedades de resistência, poder calorífico, capacidade de receber adesivos e secagem etc.

(Costa, 2001). Segundo Razera (2006), altos teores de umidade da madeira irão exercer influência negativa em sua colagem, interferindo na taxa de absorção, velocidade de cura e solidificação do adesivo.

O fenômeno de retração ocorre nas dimensões e volume das peças desse material e é causado pela sua variação de umidade. Com a mudança no teor de umidade nos valores próximos a 0% e o ponto de saturação das fibras (PSF), que ocorre por volta de 30%, a madeira pode sofrer retração ou inchamento (Costa, 2001) (Figura 12). Os tipos de contrações variam, podendo ocorrer: contração tangencial, onde as dimensões da madeira variam no sentido perpendicular aos raios; contração radial, quando essa variação das acontece no sentido dos raios; e contração volumétrica, quando há variação das dimensões da madeira em relação ao seu volume total. (Costa, 2001; Pfeil; Pfeil, 2003). Maiores alterações dimensionais com mudanças no conteúdo de umidade são apresentadas em madeiras de alta densidade, tornando esta, uma propriedade física que também influencia na colagem da madeira (Razera, 2006).



**Figura 12.** Redução do conteúdo de umidade e alteração dimensional da madeira abaixo do PSF. Fonte: Bauer (2003).

As propriedades mecânicas da madeira são influenciadas por diversos fatores, sendo os mais importantes a posição na árvore, a umidade, o tempo de duração da carga e a estrutura da madeira (Pfeil; Pfeil, 2003). Lobão *et al.* (2004) mencionam que as propriedades mecânicas da madeira são dependentes, principalmente, da densidade básica, da porcentagem de madeira juvenil, da intensidade ao ataque de insetos e da presença de nós. Green *et al.* (1999) citaram que essas propriedades mecânicas são afetadas pelas mudanças no teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, diminuindo com o aumento desse teor.

### 2.2.1.2. Resíduos madeireiros

De acordo com a Norma Regulamentadora 25 (NR 25), resíduos industriais podem ser descritos como aqueles que resultam das atividades industriais, possuindo características físicas, químicas ou microbiológicas que não se comparam aos resíduos domésticos (Brasil, 2011). Independentemente do tipo de indústria madeireira, a geração de resíduos é consequência direta do processamento primário ou secundário da madeira sólida (Cerqueira *et al.*, 2012). De acordo com Finotti *et al.* (2006), a maior parte dos resíduos madeireiros gerados no processo produtivo provém do processamento primário, sendo que, de um modo geral, as perdas no desdobro e cortes de madeira de reflorestamento representam entre 20% e 40% do volume das toras processadas.

O processamento primário, ou primeira transformação, ocorre com o processamento das toras, originando produtos como: madeira serrada e laminada, carvão vegetal, cavacos etc., podendo ser transformados em novos produtos, a partir do seguimento da cadeia de produção. Já o processamento secundário, consiste na obtenção de produtos finais ou intermediários,

provenientes do beneficiamento dos materiais submetidos ao processamento primário (Fontes, 1994; Ibá, 2015). Para Fontes (1994), os resíduos de madeira podem ser classificados em três diferentes tipos, dependendo da forma de processamento e dimensões, como: serragem, quando o resíduo é proveniente da operação com serras; cepilho ou maravalha, quando o resíduo é gerado por plainas e beneficiadoras (processamento de madeira já transformada); e lenha quando os resíduos gerados possuem maior dimensão, como costaneiras, aparas, restos de lâminas e resíduos de topo de tora.

Em estudos feitos por Yamaji (2004) em uma indústria de compensados localizada em Curitiba-PR, foi constatado que para cada 100 m<sup>3</sup> de madeira que chegam à esquadrejadeira, são gerados aproximadamente 5 m<sup>3</sup> de serragem. Esse volume depende diretamente das densidades das madeiras utilizadas no processo, o restante sai na forma de refilo. Na presença de um desintegrador na esquadrejadeira, esse volume de serragem pode chegar a valores cinco ou seis vezes maiores. Da mesma forma, na calibradora e lixadeira são gerados aproximadamente 40 m<sup>3</sup> por dia de pó-de-lixia, considerando uma densidade de 0,14 g/cm<sup>3</sup> para o pó-de-lixia. Stadler *et al.* (2009) ao analisar a produção de uma indústria de painéis e compensados localizada em Imbituva-PR, constataram que no processo de desdobramento de toras de madeira, a porcentagem média de aproveitamento é de 38,7%, com consequente perda média de 61,3%. Ou seja, para cada metro cúbico de madeira processada foi obtido 0,613 m<sup>3</sup> de resíduo.

O aproveitamento desses resíduos gerados pode contribuir para a racionalização do uso dos recursos florestais, proporcionando uma nova alternativa socioeconômica às empresas, as tornando ambientalmente adequadas ao gerenciamento de resíduos industriais (Stadler *et al.*, 2009). Em estudos feitos em uma empresa madeireira de Campos Gerais-PR, foi analisado o processo de produção e gestão de resíduos, onde houve o reaproveitamento de parte dos resíduos em seus processos e envio dos remanescentes para outras empresas como fonte extra de capital. Esse tipo de Gestão Ambiental vem se tornando cada vez mais comum, fazendo com que várias empresas invistam na área de proteção ambiental (Dutra; Soares; Carletto 2010).

### **2.2.2. Fibras lignocelulósicas**

As fibras lignocelulósicas são fibras de origem vegetal, presentes em diversas partes da planta (madeira, bambu, sementes, frutos e folha), (Santos; Silva; Castro, 2017), sendo constituídas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina (Silva *et al.* 2009).

Segundo Hodzic e Shanks (2013), as fibras lignocelulósicas podem ser obtidas através de algumas técnicas, como por exemplo: processos mecânicos, químicos, biológicos e por combinações desses processos. Sua composição se resume basicamente à celulose, hemiceluloses e lignina, que correspondem a aproximadamente 90% do seu peso seco, além de outros componentes como extrativos, proteínas, ceras e pectinas, correspondendo a aproximadamente 10% do peso seco. (Jawaid *et al.*, 2017).

A estrutura das fibras da madeira é responsável por suas ótimas propriedades mecânicas, como por exemplo, sua alta resistência, isso faz com que ela tenha grande importância na indústria de papel e de compósitos (Raia, 2022). As propriedades mecânicas das fibras naturais são determinadas pela quantidade de celulose e pelo ângulo das microfibrilas. Para a utilização dessas fibras para incorporação em compósitos, é desejável que a fibra possua uma alta quantidade de celulose e um baixo ângulo microfibrilar (Rahman *et al.*, 2015).

Alguns fatores afetam de modo direto ou indireto as propriedades mecânicas das fibras lignocelulósicas, entre eles, podem ser citados: a espécie e seu local de crescimento, o clima e suas variações, idade e posição da árvore onde as fibras foram coletadas (Hodzic; Shanks, 2014). Para a produção de compósitos com maior resistência mecânica, é recomendado a utilização de fibras provenientes da madeira, já que elas costumam apresentar propriedades

mecânicas mais elevadas se comparadas a outros tipos de fibras lignocelulósicas, além disso, podem ser obtidas mais facilmente (Raia, 2022) (Figura 13).

<b>FIBRAS</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>
Linho	1,5	1,2-3,2	345-2000	15-80
Cânhamo	1,48	1,6	550-900	26-80
Sisal	1,5	3,0-7,0	468-700	9,4-22
Coco	1,2	17-47	175	4,0-6,0
Coníferas	1,5	-	600-1200	18-40
Folhosas	1,2	-	-	37,9

**Figura 13.** Propriedades físicas e mecânicas das fibras lignocelulósicas de diferentes materiais naturais. Adaptado de: Hodzic; Shanks (2014).

Segundo Hodzic e Shanks (2014), o caráter polar da superfície das fibras as tornam menos compatíveis com resinas, usadas na colagem, e com matrizes poliméricas. A incompatibilidade entre fibra e matriz é consequência da diferença de afinidade entre os dois componentes, sendo a matriz hidrofóbica, há uma incompatibilidade com a fibra, por esta possuir uma característica hidrofílica. Além disso, as substâncias cerosas e pectinas atuam como agentes que impedem a ligação entre fibras e matriz, resultado do encapsulamento dos grupos funcionais reativos das fibras (Militký; Jabbar, 2015; Ali *et al.*, 2018). Entre os principais problemas da incorporação de fibras lignocelulósicas em polímeros podem ser citados: aumento na absorção de umidade, redução da resistência à inflamabilidade e, principalmente, a incompatibilidade entre a matriz e o reforço (Azwa *et al.*, 2013).

De acordo com Thakur et al. (2010), a força de ligação entre fibras e matriz depende do tipo de superfície das fibras, sendo necessário sua modificação para obter uma boa compatibilidade e uma forte ligação fibra-matriz. Existem alguns métodos para o tratamento de fibras, como por exemplo, o revestimento de superfície por silano, ciclos de reumidificação e secagem para melhorar a cristalinidade da fibra e tratamento o tratamento alcalino, sendo este o mais utilizado devido à sua relação custo-benefício (Liu; Rials; Simonsen, 1998; Sawsen *et al.*, 2015).

## **2.3. Adesivos**

### **2.3.1. Tipos e características dos adesivos**

Adesivos são polímeros usados para unir materiais como: outros polímeros, metais, cerâmicas, compósitos ou combinações desses materiais. Eles possuem diversas aplicações, sendo a classe denominada “adesivos estruturais” a mais utilizada pelas indústrias automotivas, aeroespacial, áreas de eletrodomésticos, eletrônicos, construção civil e de equipamentos esportivos (Askeland; Fulay; Wright, 2011). Segundo Marra (1992), os adesivos são substâncias capazes de manter unidas diferentes peças pela adesão superficial. Essa interação pode ser explicada através das propriedades dessa substância que, sob condições específicas, exerce essa função. Dentre as características mais desejáveis em um adesivo, podem ser citadas:

a preparação mínima da superfície, custo razoável, fácil aplicação do produto, fixação dentro de um limite de tempo razoável e rigidez do adesivo menor ou igual à do substrato. Para um bom funcionamento, a aplicação deve ser feita em sua forma fluída e se fixar na superfície do material, além disso, deve apresentar boa adesão e coesão substrato (Marra, 1992).

A adesão pode ser descrita como um fenômeno físico-químico que confere um mecanismo de interação entre superfícies sólidas e um ligante, que pode ser sólido ou líquido. Essa interação consiste em partículas individuais, como por exemplo, moléculas, pequenas gotas, pó ou, ainda, de uma película contínua líquida ou sólida (Iwakiri *et al.*, 2013). O conceito de coesão se refere à união entre partes de dados materiais, se relacionando com a força que se opõe à separação entre eles, uma vez unidos ou colados entre si (Marra, 1992).

Os adesivos podem ser diferenciados quanto a sua origem, podendo ser natural ou sintética. Os adesivos naturais são produzidos a partir de proteínas animais, como por exemplo a albumina e a caseína; provenientes também de proteínas vegetais, celulose, tanino, amidos, gomas naturais etc. (Cesar, 2011; Carneiro, 2010). Outro adesivo natural muito utilizado atualmente na área de papel é o silicato de sódio. Os adesivos à base de silicatos são classificados como compostos inorgânicos e produzem ligações mecânicas com alta resistência, que ocorrem pela desidratação do solvente do adesivo (Carneiro, 2010). Para Mendoza (2010) esse tipo de adesivo é classificado como não prejudicial ao meio ambiente, por esse motivo é considerado como uma boa opção para a produção de compósitos de madeira.

A classe dos adesivos sintéticos apesar de possuírem características semelhantes aos naturais, são adaptados para cada finalidade e utilização, além de apresentarem maior resistência a água. Esses tipos de adesivos podem ser separados em duas categorias: adesivos termoplásticos e termofixos (Cesar, 2011).

Os adesivos do tipo termoplásticos são capazes de resistir apenas a mudanças físicas, sofrendo alterações com a ação do calor ou de solventes, como por exemplo, o Policloreto de Vinila (PVC) e o Acetato de Polivinila (PVA). Já os adesivos termofixos sofrem reações químicas com ou sem calor, passando a apresentar características insolúveis de forma irreversível (Bianche, 2014). Entre eles, podem ser citados: a ureia-formaldeído, o fenol-formaldeído, a melanina-formaldeído e o resorcinol-formaldeído, sendo que, esses adesivos correspondem a 90% dos utilizados nos processos de colagem de madeiras (Campos; Larh, 2004).

A ureia-formaldeído apresenta coloração branca leitosa, teor de sólidos entre 64 e 66%, pH entre 7,4 e 9,0, viscosidade entre 400 e 1000 cP e temperatura de cura entre 90 e 120 °C. Ela pode ser armazenada por até três meses em estado líquido, já em seu estado de pó esse intervalo pode chegar a um ano. É mais indicada para peças de madeira que são protegidas contra a umidade, como por exemplo móveis e peças de uso interior (Iwakiri, 2005).

Os adesivos do tipo fenol-formaldeído apresentam coloração marrom avermelhado, teor de sólidos ente 48 a 51%, pH entre 11 e 13, viscosidade entre 300 e 600 cP e temperatura de cura entre 130 e 150 °C. Eles podem ser armazenados por até cinco meses em temperatura ambiente e são mais resistentes à água se comparados a ureia-formaldeído, por esse motivo, podem custar até duas vezes mais (Emerson, 2010).

De acordo com Iwakiri (2005), a melanina-formaldeído é uma resina com qualidade intermediária entre ureia-formaldeído e fenol-formaldeído, possuindo a vantagem de ser mais resistente que a ureia-formaldeído e a cura mais rápida que a do fenol-formaldeído. Apresenta coloração branca leitosa, teor de sólidos ente 65 e 67%, pH entre 7,5 e 9,0, viscosidade entre 150 e 210 cP e temperatura de cura entre 65 e 130 °C (Iwakiri, 2005). Em seu estado líquido, essa substância pode ser armazenada por até um mês, já em seu estado de forma de pó, por até um ano. A resorcina-formaldeído possui cura a frio, com o uso de um catalizador, sendo muito utilizada na construção naval e na aviação devido à sua alta resistência à umidade. Possui um custo bem mais elevado em relação às resinas citadas anteriormente. Tem coloração marrom,

teor de sólidos entre 53 e 55%, pH entre 6,9 e 7,5, viscosidade entre 500 e 800 cP e pode ser armazenada por até um ano em temperatura ambiente (Iwakiri, 2005).

De acordo com Lima (2006), o PVA é o adesivo termoplástico mais importante quando se trata de colagem de madeiras. Ele se apresenta como uma emulsão do acetato de polivinila, sendo utilizado na fabricação de móveis e em serviços de marcenaria e carpintaria, para colagem de lâminas e peças de madeira em geral. Por ser à base de água, o PVA apresenta fácil manuseio, secagem rápida, ausência de odor e não são inflamáveis, além disso, possuem baixos custos se comparado a outras resinas comerciais. Sua principal desvantagem é a baixa resistência à umidade, por esse motivo sua utilização é restrita ao uso em interiores (Iwakiri, 2005). Uma outra aplicação dos adesivos termoplásticos ocorre na produção de compósitos plástico-madeira, que são produtos obtidos a partir de uma matriz, que pode ser contínua ou descontínua, de resina termoplástica reforçada com partículas de madeira (Maciel *et al.*, 2004).

### 2.3.2. Propriedades dos adesivos

Quando se trata dos adesivos, dentre as principais propriedades que afetam diretamente o processo de colagem de madeiras, podem ser citadas: a viscosidade, o tempo, o teor de substâncias sólidas e o pH (Almeida *et al.*, 2010).

A viscosidade pode ser definida como a propriedade que está relacionada com o tempo de movimentação dos fluídos (Azevedo, 2009). Isso está relacionado à resistência ao fluxo livre que um fluído apresenta entre as camadas de uma matéria, ou ainda, valores que representam o atrito entre suas moléculas através do seu escoamento (Stella, 2009). No processo de colagem de madeiras, valores médios de viscosidade são desejados, já que adesivos que apresentam elevadas viscosidades penetram com maior dificuldade nas peças, se distribuindo de forma irregular e gerando uma espessa linha de cola. Porém, sob baixos valores de viscosidade, há uma fácil penetração do adesivo na madeira, podendo ocasionar seu encharcamento (Almeida, 2009). A viscosidade pode ser mensurada utilizando o método do copo graduado “cup-method” ou “Ford”, onde é feita a medição do tempo de passagem do líquido pelo orifício do copo, e a viscosidade é calculada em Centipoise (cP) (Cesar, 2011).

O tempo de trabalho se refere ao tempo de vida útil do adesivo, que é considerado após a preparação até a fase de gel, quando atinge sua máxima viscosidade, isso está relacionado à sua viabilidade de utilização e trabalhabilidade (Ferreira, 2017). Para Carneiro (2006), tempos de trabalho muito curtos prejudicam a aplicação e o espalhamento do adesivo na madeira, devido à sua rápida polimerização, resultando assim na queda da resistência da linha de cola.

O teor de substâncias sólidas é definido como a quantidade de sólidos resinosos contida no adesivo, sendo ele composto por material sólido e líquidos voláteis. Sua cura, ou polimerização, ocorre com a evaporação dos seus componentes durante a prensagem, como por exemplo, água e outras substâncias voláteis. Assim, é formada a linha de cola que é responsável pela ligação entre os substratos e a transferência de tensões geradas entre a madeira e essa linha. (Mendoza, 2010). A quantidade desses sólidos afeta diretamente a colagem, podendo prejudicá-la, por sua escassez na linha de cola ou, ainda, pelo seu excesso, podendo causar deformações na peça colada (Almeida, 2009). No processo de solidificação do adesivo ocorre a coesão, assim, os sólidos adquirem novas propriedades, conferindo resistência e durabilidade à peça colada (Iwakiri, 2005). O teor de substâncias sólidas é obtido secando-se 1 grama do adesivo em estufa a temperaturas em torno de 103 °C, por 3 horas, após isso é deixado esfriar em dessecador durante 15 minutos. Após esse tempo, é realizada novamente a pesagem. O teor de sólidos percentual pode ser calculado pela diferença entre a massa inicial e final dividida pela massa inicial (César, 2011).

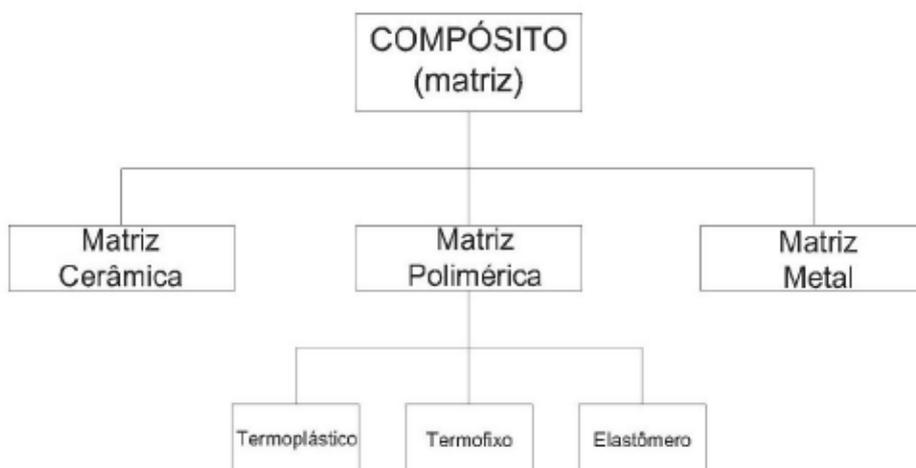
O potencial de hidrogênio (pH) é um parâmetro que indica o grau de acidez ou alcalinidade de um meio aquoso, sendo caracterizado pela concentração de íons dissociados de

H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup>. Seus valores são obtidos através de aparelhos como o pHmetro e o potenciômetro (Corrêa, 2013). Segundo Stella (2009), resinas com pH inferiores a 2,5 e superiores a 11 podem degradar as fibras da madeira. Iwakiri (2005) afirma que pH com valores muito baixos formam espuma em excesso, o que dificulta a aplicação do adesivo. A resina ureia-formaldeído possui cura em meio ácido, logo, madeiras com pH alto tornam o processo de cura do adesivo mais rápido, podendo inclusive provocar pré-cura da resina durante a prensagem dos painéis. Já a resina fenol-formaldeído tem a cura facilitada em meios alcalinos (Stella, 2009; Almeida, 2009). Madeiras com pH muito ácido podem causar a pré-cura da resina ureia-formaldeído durante a fase de fechamento da prensa, prejudicando as propriedades finais da chapa (Iwakiri *et al.*, 2013).

#### 2.4. Compósitos de materiais lignocelulósico-borracha

Compósitos podem ser definidos como materiais produzidos artificialmente, a partir de dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica, sem se dissolverem ou difundirem completamente entre si (Callister; Rethwisch, 2015). Eles se caracterizam por serem multifásicos, sendo constituídos por fases química e fisicamente distintas e apresentando uma interface de separação entre elas. A combinação desses materiais tem como objetivo melhorar ou gerar determinada característica, obtendo assim características superiores aos seus materiais de origem, como por exemplo: melhorar sua resistência mecânica, a altas temperaturas e a intempéries (Ribeiro; Silva; Mohallem, 2023).

Segundo Callister e Rethwisch (2015), a maioria dos compósitos são constituídos de duas fases, sendo elas a matriz e o reforço onde, geralmente, a matriz envolve o reforço. As propriedades dos materiais compósitos são uma função das propriedades da matriz e da dispersão da fase dispersa. O reforço pode ser utilizado em diferentes concentrações, geometrias, dimensões e orientações. Porém, cada utilização de preenchimentos tem sua particularidade, podendo prejudicar as propriedades do compósito. Já em relação à matriz polimérica, podem ser classificados em: matriz cerâmica, matriz polimérica e matriz metálica (Figura 14). Compósito polimérico é o nome dado ao polímero que se adiciona uma carga, podendo ser particulada e/ou fibrosa, para melhorar ou gerar determinada característica (Yang *et al.*, 2012; Zaimova *et al.*, 2012; Ibrahim *et al.*, 2015).



**Figura 14.** Esquema de classificação dos vários tipos de compósitos, conforme a matriz. Adaptado de Ibrahim *et al.* (2015); Yang *et al.* (2012).

Os compósitos poliméricos possuem um aglutinante ou matriz e o reforço/enchimento. O reforço é caracterizado por ser mais rígido, sólido ou fibroso. Os principais reforços utilizados na produção de compósitos de borracha são: o negro de carbono, sílica, nanotubos de carbono, grafeno, carbonato de cálcio, argila modificada, a própria borracha recuperada, tereftalato de etileno, celulose e nanocelulose, fibras lignocelulósicas e nanocristais de amido (Hayeemasae; Hanafi, 2012; De *et al.*, 2013; Zhong; Abd-El-Aziz, 2016).

Os compósitos com reforço de fibras são os mais importantes, pois os produtos que as utilizam visam sempre a alta resistência e rigidez com um baixo peso. Essas características podem ser expressas em termos de aumento da resistência específica e aumento da resistência à tração e do módulo de elasticidade (Callister; Rethwisch, 2015). Nos últimos anos houve um grande avanço nos estudos de compósitos de fibras lignocelulósicas e seu desempenho mecânico, já que seu interesse vem crescendo devido às vantagens deste material em relação aos materiais monolíticos (Pickering; Efendy; Le, 2016). Além disso essas fibras são ecológicas, baratas, abundantes e renováveis. Apesar disso, sua utilização em compósitos de borracha pode ocasionar, em algumas concentrações, desvantagens como: aumento da absorção de umidade, variação na qualidade, baixa estabilidade térmica e baixa compatibilidade com a matriz polimérica (Zhong; Abd-El-Aziz, 2016). Também é importante destacar que seu uso é restrito a peças não estruturais devido à baixa densidade das fibras, resultando em menores propriedades de resistência, com isso há uma menor competitividade para usos mais tecnológicos (Ishaimi, 2007).

Um fator limitante ao uso das fibras de madeira é a natureza higroscópica da celulose e sua susceptibilidade a degradações térmicas em temperaturas acima de 200 °C. Esse problema é enfrentado durante o processamento dos polímeros e das fibras para a produção dos compósitos. Por esse motivo, os polímeros escolhidos para a fabricação dos compósitos devem ter pontos de fusão inferiores a esse valor (Yamaji, 2004; Mondardo, 2006).

#### **2.4.1. Propriedades do compósito**

Segundo Callister e Rethwisch (2015), com a utilização dos compósitos, cargas permanentes ou cíclicas estarão aplicadas sobre o material e, por esse motivo, é de extrema importância o conhecimento sobre suas características e comportamento, de modo a evitar danos ocasionados por cargas excessivas. Os estudos sobre o comportamento mecânico dos compósitos fornecem sua resposta em relação a uma carga aplicada, podendo ser citadas como as principais propriedades: rigidez, resistência à tração e compressão, dureza e resistência à abrasão (Callister; Rethwisch, 2015).

O módulo de Young representa o quociente entre a tensão e a deformação, na região de proporcionalidade. Este módulo representa deformação de baixa tensão, de 10 a 20% das deformações, ou seja, o limite elástico do material (Castro, 2021). Já o módulo de tração representa o limite plástico do material, ou seja, das grandes deformações até sua ruptura. A tensão de ruptura pode indicar uma baixa resistência à fadiga e abrasão do material (Castro, 2021).

A abrasão corresponde ao desgaste superficial do material, que ocorre com a sua utilização contínua, ou seja, sua perda de massa causada pelo atrito do arraste de objetos ou o caminhar de pessoas. Para se determinar as perdas por abrasão, há uma análise que consiste em submeter os materiais ao desgaste, sendo que, o estudo é realizado para garantir a qualidade do material. Esse ensaio possui um limite aceitável de 250 mm<sup>3</sup> em um total de 40 metros percorrido sobre uma lixa abrasiva (Ruiz, 2015).

A dureza é a propriedade mecânica mais utilizada pela indústria de borracha e se baseia na penetração de uma esfera rígida num provete normalizado (durômetro), em condições previamente estabelecidas. Através de cálculos que consideram a profundidade da penetração

e o módulo de Young do material, dureza da borracha é calculada (Castro, 2021). A relação entre a dureza e módulo de Young é muito importante, pois a partir dela se desenvolve a teoria das deformações. Para cada valor de penetração há uma correspondência de valores de dureza, sendo definida pela escala que varia de 0 a 100, segundo o Grau Internacional de Dureza de Borracha (IRHD) (INTERNATIONAL RUBBER HARDNESS DEGRESS, 2021).

A caracterização morfológica dos compósitos também é de grande importância para estudos do seu comportamento e para a obtenção de materiais que possam competir com os compósitos de origem monolítica, pois quanto mais próximas forem essas características, melhor a probabilidade de uso deste material (Paula, 2011). Uma característica morfológica dos compósitos é sua superfície, controlada pela microestrutura do compósito e a composição química da superfície, que pode ser afetada pela quantidade e composição química do reforço utilizado (Zhu *et al.*, 2019). A caracterização térmica exerce impacto direto sobre as propriedades mecânicas dos compósitos, então, é importante que seja determinada a característica de estabilidade térmica dos materiais utilizados (Choudhury, 2008; Müller; Laurindo; Yamashita, 2009). Com a avaliação da distribuição das fibras dentro da matriz é possível avaliar a adesão superficial, ou seja, a ligação que ocorre entre as fibras e a matriz. A técnica utilizada para obtenção destas características é a microscopia eletrônica de varredura (MEV) (Callister; Rethwisch, 2015).

#### 2.4.2. Tipos de compósitos

Raia (2022) incorporou fibras de *Pinus* em borracha natural crepe escuro (NR), para produção de pisos antiestáticos, através da prensagem quente (150 °C e MPa). Foi realizado um tratamento alcalino das fibras através de imersão em NaOH em diferentes concentrações com o intuito de aumentar sua compatibilidade com a matriz polimérica. Os resultados foram analisados estatisticamente utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov para determinação da normalidade dos dados, após isso, estes foram submetidos ao teste de Tukey HSD a 95% de probabilidade. A utilização das fibras aumentou a dureza, porém resultou no aumento da perda de massa por abrasão e na diminuição da resistência a tração. Foi observado também uma diminuição da tensão máxima e deformação com o aumento da quantidade de fibras de madeira na formulação, isto ocorre pois o compósito se torna mais rígido e menos elástico. O autor concluiu que é viável o uso de fibras de madeira como carga inerte, reduzindo assim os custos na indústria de borracha e ajudando a elevar as credenciais ambientais da fabricação de pisos de borracha, tornando o compósito antiestático ecologicamente correto.

Alencar (2019) reutilizou resíduos de madeira de *Eucalyptus* spp., incorporando suas fibras em compósitos expandidos de borracha natural, produzindo um substituto para espumas utilizadas na construção civil. Os compósitos foram produzidos através da prensagem quente (150 °C e MPa), sendo avaliados quanto às propriedades térmicas, mecânicas e estruturais, com ênfase nas características termoacústicas. A incorporação dos resíduos de madeira resultou no aumento do módulo de elasticidade (MOE) do material, ocasionando na diminuição de seus poros. Houve também um aumento na taxa de aquecimento das espumas. A autora concluiu que os resíduos carregados influenciam na absorção sonora e que o aumento do módulo de compressão e armazenamento resultou no aumentando da rigidez do compósito, melhorando suas propriedades mecânicas. Ainda segundo a autora, mesmo com o aumento da condutividade térmica, é possível aplicação dos compósitos expandidos de borracha-madeira em um sistema combinado com outros painéis.

Ozaki e Souza (2004) aplicaram resíduos de pinus *Caribaea hondurensis* juntamente com emulsão látex SB (estireno-butadieno) e pó de borracha proveniente de pneu reciclado, produzido por prensagem a quente (160 °C e 10 MPa). Com o aumento da substituição do látex SB pelo pó de borracha de pneu houve o aumento do módulo de ruptura (MOR) e diminuição

do módulo de elasticidade (MOE), devido ao aumento da rigidez. Os autores concluíram que devido as boas propriedades mecânicas, esse tipo de compósito é viável para substituir as chapas duras de madeira, em que a absorção de água é um fator crítico. Além disso, a substituição gradual do látex SB por pó de borracha promove a redução dos custos de produção do compósito e promover a diminuição de resíduos sólidos, tanto de madeira como de borracha.

Xu e Li (2012) produziram compósitos a partir de partículas de madeira provenientes de *Populus* spp. juntamente com pó de borracha de pneus, com tamanho das partículas entre 80 e 800  $\mu\text{m}$ , e metileno difenil diisocianato (MDI) como adesivo, com prensagem a quente (140 a 180  $^{\circ}\text{C}$  e 3 MPa). O objetivo foi estimar as condições ideais de produção dos painéis, a partir de parâmetros como: resistência dos compósitos, teor de borracha, temperatura de prensagem, teor de resina e densidade do painel, além de propriedades mecânicas. Com a adição do pó de borracha em partículas de madeira, houve a redução do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), porém, a resistência à água aumentou consideravelmente quando 20% a 40% do pó de borracha foi adicionado, melhorando de 7,3-61%. Os autores concluíram que as propriedades do painel podem ser estimadas pela fábrica, considerando as condições de fabricação (conteúdo de borracha, temperatura da prensa, conteúdo de resina e densidade alvo do painel), utilizando o modelo de programação não-linear, o MOR, MOE, IB ou TS ideal poderia ser obtido sob certas restrições práticas.

Mousa *et al.* (2012) produziram compósitos híbridos de Borracha Nitrílica Butadieno Carboxilada (XNBR) junto com resíduos de pó de casca de oliveira (OSW), com partículas de tamanho em torno de 45  $\mu\text{m}$ . A mistura foi prensada a quente (160  $^{\circ}\text{C}$  e 10 Mpa), utilizando Mercapto Benzotiazol Sulfinamida (MBTS) como acelerador da vulcanização da borracha. Foi estudado a capacidade que o biomaterial OSW possui em reforçar a borracha XNBR, identificando sua influência nas propriedades mecânicas, morfológicas e dinâmicas do vulcanizado XNBR. Os autores concluíram que a adição de OSW ao compósito resultou no aumento do módulo de tração, sendo um indicador do aumento de rigidez, que pode ser explicado pela reatividade superficial dos enchimentos, tamanho de partícula e interação enchimento-borracha. Constataram também que a utilização dos resíduos de casca de oliveira (OSW) é viável, sendo ele um material mais acessível, que pode equilibrar a questão econômica do compósito.

Shao *et al.* (2016) ao invés de utilizarem o método de prensagem a quente e adesivos na fabricação de compósitos de madeira-borracha tradicionais (WRC's), utilizou apenas um composto de borracha processada, com o objetivo de melhorar a resistência à água e as propriedades mecânicas. Foi utilizada uma mistura de borracha vulcanizada, contendo borracha natural (NR), borracha estireno-butadieno (SBR), borracha butadieno (BR), juntamente com fibras provenientes de coníferas. Foram avaliados os efeitos dos teores de fibra (0% a 50%), velocidade de rotação (15 a 45 rpm) e coeficiente de enchimento (0,55 a 0,75), nas propriedades mecânicas do material. Os painéis de WRC foram confeccionados em três etapas: mistura da fibra-borracha, compactação em tabletes e o processo de moldagem por vulcanização. Embora a tensão de tração (Ts), alongamento na ruptura (Eb) e resistência ao impacto (Rr) dos painéis tenham diminuído, a dureza (Ha) teve um aumento considerável (17% a 58%), devido à adição de fibras de madeira. A absorção de água em 24 horas foi de apenas 1% a 3%, valor muito menor do que os compósitos tradicionais de madeira.

Jun *et al.* (2007) estudaram a viabilidade de fabricar compósitos funcionais de madeira-borracha com um sistema de ligante combinado de isocianato de difenilmetileno (PMDI) e ureia-formaldeído (UF), utilizando partículas de borracha reutilizada de pneus (entre 1 e 7 mm) e partículas de madeira de *Larix gmelinii* (comprimento de 3 a 25 mm, largura de 1,0 a 2,5 mm e espessura de 0,2 a 0,8 mm), prensados a quente (160 a 180  $^{\circ}\text{C}$ ). Foram avaliadas variáveis como: densidade da placa, tempo e temperatura de prensagem, bem como seus efeitos nas propriedades do material. Os autores concluíram que a temperatura e o tempo de prensagem

impactam significativamente o MOR, e que a densidade da placa influencia significativamente em todas as suas propriedades (IB, MOE e MOR). Concluíram também que as variáveis ótimas de fabricação para compósitos de alta qualidade são aproximadamente 170 °C para a temperatura de prensagem, cerca de 300 segundos para o tempo de prensagem e de 1000 g/cm<sup>3</sup> para a densidade da placa.

Xu *et al.* (2017) utilizaram pó de madeira de álamo (*Populus spp.*) e borracha de pneu por meio do processo de moldagem por vulcanização (160°C sob pressão de 15 Mpa), com o objetivo de investigar a viabilidade de fabricar compósitos madeira-borracha (WRC) e determinar a carga máxima de pó de madeira para sua composição. Foram avaliadas as propriedades morfológicas, características de cura e propriedades mecânicas do WRC. Os autores concluíram que a carga de pó de madeira não deve ser superior a 50% do peso, e concluíram que sua incorporação aumentou a dureza do compósito, com cerca de 53% de melhoria quando a carga de pó de madeira aumentou de 0% para 50%. Também foi observado que a absorção de água do compósito foi menor do que a dos compósitos de madeira tradicionais.

Bülbül *et al.* (2019) investigaram o efeito da adição de cinzas de madeira de carvalho nas propriedades mecânicas, como por exemplo: tração, abrasão, rasgamento, alongamento etc.; em compósitos com borracha natural (NR) e borracha de estireno-butadieno (SBR), utilizando o processo de moldagem por vulcanização (160°C sob pressão de 160 MPa). Foram preparadas cinco composições diferentes, adicionando 16%, 32%, 48% e 64% de cinzas de madeira ao composto geral (G), que não continha as cinzas. Foram feitos testes mecânicos e análise morfológica do material, utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Foi observado que os compósitos apresentaram um aumento na resistência à tração, abrasão, capacidade de flexão e densidade, em comparação com o compósito G (sem cinzas), porém, houve redução nos valores de dureza. Os autores concluíram que a proporções ótimas de cinza de madeira está entre 16% e 32% e que a quantidade de material de enchimento utilizada deve ser igual à quantidade máxima de borracha, caso contrário, afetará negativamente propriedades como: abrasão, ruptura, rasgamento, alongamento e dureza.

Makhalema *et al.* (2021) produziram compósitos a partir de lignina Kraft (um dos produtos oriundos do processo de produção de celulose) na forma de pó, juntamente com um blend de borracha reciclada (RR) e borracha natural (NR), com o objetivo de avaliar a influência do teor de lignina nesse tipo de compósito. As amostras foram preparadas em um moinho de cilindros duplos a temperatura ambiente, antes de serem prensadas hidraulicamente em folhas. Foram feitos estudos de Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), termogravimétrica (TGA) e ensaio de tração, usados para caracterização morfológica, interação química e prever a resistência do material para aplicações práticas. Os autores observaram que houve uma queda na resistência à tração e um deslocamento na temperatura de transição vítrea, exceto para o composto de mistura com a maior concentração de lignina. A MEV revelou poros de tamanhos variados que resultaram na diminuição geral de quase 50% nas propriedades mecânicas e na densidade.

Paiva *et al.* (2018) reutilizaram fibras de bagaço de cana-de-açúcar, não tratadas (SCBU) e com tratamento alcalino (SCBT), incorporadas como reforço em compósitos de borracha natural crepe claro (NR) em proporções variáveis de 10 a 40 partes de SCB por 100 partes de borracha (phr). Em comparação com as fibras não tratadas, o tratamento alcalino das fibras reduziu 20% da dureza, aumentou 98% da resistência à tração, manteve a flexibilidade dos compósitos de borracha e aumentou a elongação na quebra para 546% (tratados), utilizando 40 phr de resíduos. Os autores concluíram que o compósito representa uma alternativa promissora e viável para elastômeros na indústria de calçados, além de ser uma boa forma de reciclar resíduos da indústria da cana-de-açúcar.

Pashaei, Hosseinzadeh e Syed (2015) estudaram o efeito do pó de casca de coco (CSP) e crysnanoclay (CN) nas propriedades mecânicas, térmicas e morfológicas dos nanocompósitos de borracha para compará-los com a matriz de mistura. Foram preparadas misturas de borracha de acrilonitrila butadieno (NBR) e borracha de estireno butadieno (SBR) com pó de casca de coco (CSP) usando uma técnica de mistura na presença de diferentes quantidades de crysnanoclay (CN), utilizando a moldagem por vulcanização em uma prensa hidráulica (170°C e 4 Mpa). Foi avaliado o efeito do carregamento de CN nas propriedades de tração e térmicas, além do comportamento de inchamento e de absorção de água. Os autores observaram uma melhoria significativa no módulo de Young e na resistência à tração como resultado da adição de nanoclay à matriz de borracha, especialmente com um carregamento de 10% em peso. A presença de CSP resultou em uma maior absorção de água. As características térmicas foram analisadas usando análise termogravimétrica (TGA), que indicaram redução na estabilidade térmica dos nanocompósitos com a incorporação de CSP.

Correia e Valera (2019) compararam três compósitos de borracha natural (NR) com fibras de juta (*Corchorus capsularis*), um contendo fibras brutas, um contendo fibras de juta alvejadas e outro contendo apenas nanocristais de celulose (CNC). Os compósitos foram preparados adicionando cada carga em 5 ou 10 partes por cem (ppc) a pequenas porções de látex antes da coagulação química, sendo processados em um moinho de mistura de dois rolos. Foi aplicando em seguida moldagem por vulcanização em prensa hidráulica (150°C e 20 MPa) por seus respectivos tempos de vulcanização ( $t_{90}$ ). As propriedades mecânicas, térmicas e de vulcanização dos compósitos foram analisadas. As autoras concluíram que a rigidez da NR aumentou com o aumento do teor de fibras, principalmente com a adição de fibras alvejadas, como evidenciado pelo aumento dos módulos elásticos, torques máximos, temperatura de transição vítrea e densidade de reticulação. As fibras alvejadas e CNC, favoreceram as reações de vulcanização do NR, avançando significativamente o tempo de vulcanização ideal, aumentando assim o índice de taxa de cura do NR. Porém, o compósito com CNC apresentou desempenho mecânico inferior em comparação com os compósitos reforçado com fibras.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização do presente trabalho, foi adotada a revisão sistemática de literatura, que possibilita a identificação, seleção, avaliação, interpretação e sumarização de informações referentes ao tópico de interesse. Esse tipo de revisão se difere de revisões tradicionais por apresentar um planejamento, que por sua vez, proporciona uma pesquisa mais criteriosa, de maior abrangência e confiável (Felizardo *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2020). Uma ferramenta que auxilia na realização deste tipo de revisão é a aplicação de critérios PICO (População, Intervenção e Comparação). Essa ferramenta surgiu na área médica e tem sido cada vez mais utilizada em outros campos de estudo devido ao seu potencial de síntese no delineamento da pesquisa quanto às informações a serem coletadas (Felizardo *et al.*, 2017). O Quadro 1 apresenta os critérios PICO referentes ao estudo realizado (Quadro 1).

**QUADRO 1** – Critérios pico na área de ciência e engenharia de materiais.

<b>Critérios PICO</b>	<b>Descrição</b>
População	Pesquisadores de compósitos poliméricos (borracha)
Intervenção	Compósitos poliméricos de borracha, reforçados com fibras lignocelulósicas, seus métodos de produção, suas finalidades de aplicação e propriedades mecânicas, térmicas e caracterização morfológica.
Comparação	Não se aplica.

Resultados	Visão geral dos estudos disponíveis na literatura sobre os compósitos poliméricos de borracha, reforçados com fibras lignocelulósicas.
------------	--

Fonte: Adaptado de Felizardo *et al.* (2017).

Após o delineamento inicial da pesquisa, foi criado um método de organização e seleção das informações para a revisão sistemática, de modo a se detalhar as variáveis envolvidas no presente estudo (Quadro 2).

**QUADRO 2** – Protocolo de revisão sistemática na área de ciência e engenharia de materiais.

Objetivo	Pesquisa sobre poliméricos de borracha, reforçados com fibras lignocelulósicas, quanto às seguintes informações: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Método de produção dos compósitos;</li> <li>– Tipo de polímero (borracha) utilizado;</li> <li>– Tipo de fibra (lignocelulósica) utilizada;</li> <li>– Avaliação das propriedades mecânicas, térmicas e caracterização morfológica.</li> </ul>
Estratégia de busca	Artigos publicados em congressos ou periódicos, dissertações e teses.
Fonte de busca	Bases de dados <i>Google scholar</i> (sem filtrar por data), <i>SciELO</i> (sem filtrar por data) e <i>ScienceDirect</i> (sem filtrar por data).
<i>Strings</i> de busca (palavras-chave)	"composite" AND "lignocellulosic fibers" AND "wood" AND "rubber" AND "mechanical properties" AND "thermal properties" AND "rubber-wood" AND "rubber-lignocellulosic".
Critérios de seleção (Exclusão)	A. O estudo trata de outros tipos de compósitos, com outras matrizes e/ou reforços (exemplos: cerâmicas, metais, fibras artificiais, plásticos etc.) B. O estudo trata apenas de borracha ou fibras.
Extração dos dados	Extração de dados com os campos descritos no objetivo.
Sumarização dos dados	Resultados agrupados por tipo de matriz polimérica (borracha), e por método de produção. Apresentação resumida em tabelas contendo informações do formulário de extração de dados, para cada variável avaliada.

Fonte: Adaptado de Felizardo *et al.* (2017).

Os resultados da triagem realizada por meio dos critérios de seleção (exclusão) foram apresentados no Quadro 3 a seguir.

**QUADRO 3** – Triagem dos resultados.

Base de dados	Total	Restante após critério de exclusão
<i>Google Scholar</i>	65	10
<i>SciELO</i>	86	5
<i>ScienceDirect</i>	15	2

Fonte: Adaptado de Felizardo *et al.* (2017).

Portanto, 17 publicações foram estudadas, que correspondem as seguintes bases de dados: *Google Scholar* (10), *SciELO* (5) e *ScienceDirect* (2), sendo seus resultados

apresentados no tópico a seguir. Foi decidido não excluir publicações referentes a anos anteriores a 2020, por estarem em conformidade com o objetivo descrito (Quadro 2).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão abordados os resultados referentes aos materiais compósitos e reforçados por matrizes poliméricas de borracha, de modo a contemplar discussões a respeito do método de preparação, características de cada compósito produzidos, algumas observações ou aspectos relevantes desses materiais. Os resultados da busca referente a compósitos lignocelulósicos-borracha são apresentados no Quadro 4, com a abordagem de aspectos importantes no preparo de cada um deles, com suas principais propriedades físicas, mecânicas e térmicas e alguns aspectos relevantes de avaliação das propriedades.

**QUADRO 4** – Características gerais dos compósitos.

Matriz	Carga de Reforço	Método de preparação	Propriedades	Observações	Referências
Borracha de pneu	Resíduos de pinus <i>Caribaea hondurensis</i> (partículas: 125-250 µm)	Moldagem por compressão a quente	Com a adição de borracha: Módulo de elasticidade diminuiu de 3,51 para 2,9 GPa Módulo de ruptura aumentou de 2,95 para 10,1 MPa Melhoria de 43% na resistência à absorção de água, e de 63% na variação dimensional	Foram observados 2 grupos: com e sem adição de pó de borracha  *Com a adição de borracha houve diminuição do módulo de elasticidade e aumento do módulo de ruptura.	Ozaki e Souza (2004)
	Fibras de larício ( <i>Larix gmelinii</i> ) (10% em massa)	Moldagem por compressão a quente	*Valores ótimos Módulo de elasticidade: 2,4 GPa Módulo de ruptura: 15,6 MPa	Combinação de isocianato de difenilmetileno (PMDI) e ureia-formaldeído (UF) como ligantes	Jun <i>et al.</i> (2008)
	pó de álamo ( <i>Populus</i> spp.) (10, 20, 30, 40 e 50% em massa)	Moldagem e vulcanização	Resistência à tração diminuiu: 10,9; 6,6; 6,3; 4,4 e 5 Mpa Alongamento na ruptura diminuiu de 485% para 34,6% com o aumento das fibras Dureza aumentou de 68-92 Baixa absorção de água: 0,19%, 0,81%, 0,99%, 2,90%, e 4,13%	Foram observados 6 grupos: com 0, 10, 20, 30, 40 e 50% de pó de álamo  Uso de máquina de vulcanização de placas a 160°C e pressão de 15 MPa pelo tempo de cura ótimo (tc90).	Xu <i>et al.</i> (2017)
	Partículas de álamo ( <i>Populus</i> spp.)	Moldagem por compressão a quente	Com a adição de borracha: Módulo de elasticidade diminuiu: 3,3; 3,2; 2,9 e 2,7 GPa	Foram observados 5 grupos: com 0, 10, 20, 30 e 40% de pó de borracha	Xu e Li (2012)

			Módulo de ruptura diminuiu: 39, 35, 34 e 31 Mpa Melhoria de 2,3-40% na resistência à absorção de água	Uso de resina metileno difenil diisocianato (MDI)	
	Madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	Prensagem em temperatura ambiente	MOE teve seu valor máximo quando foi utilizado 36,60% de resíduo (2074MPa). Para MOR o valor mínimo encontrado foi de 10,35MPa, utilizando a proporção de 46,74% de resíduo de pneu.	As partículas de borracha acrescentadas como reforço nos compósitos minerais (cimento) variando de 20 a 60% em substituição a madeira	Faria <i>et al.</i> (2018)
Borracha Natural (NR)	Fibras de <i>Pinus</i>	Moldagem por compressão a quente	Baixos valores de absorção de água Dureza aumentou de 70-90	Fibras tratadas com NaOH em diferentes concentrações (alcalino)	Raia (2020)
	Fibras de palha de arroz (20, 30, 40, 50 e 60% em massa)	Moldagem por compressão a quente	Resistência à tração aumentou: 7,5; 8,1; 8,8; 9,67 e 9,2 MPa Dureza aumentou: 71, 76, 80, 90, 90	O estudo conclui que uma carga de 5% de fibras com comprimento de 3 mm é adequada para aplicações leves.	Anand e Jayamohan (2016)
	Fibras de bagaço de cana-de-açúcar (1, 3, 5, 7 e 10 % em massa)	Moldagem e vulcanização	As amostras tiveram uma boa dispersão e homogeneidade, influenciando nas propriedades por causa das diferenças de concentrações de fibras e reticulações Dureza aumentou	Os compostos apresentados se mostraram uma excelente alternativa em substituição ao óleo naftênico pelo resíduo de cana-de-açúcar	Britez (2022)
	Fibras de bagaço de cana-de-açúcar (10, 20, 30 e 40% em massa)	Moldagem e vulcanização	Resistência a abrasão aumentou em 28%, mas apenas com a incorporação de 10% de fibras Dureza aumentou: 50-70 Resistência à tração diminuiu (com exceção do compósito com 10% de fibras)	Foram comparados 5 grupos: o controle (sem fibras) com os aumentos contínuos de fibras	Paiva <i>et al.</i> (2018)
	Fibras de juta ( <i>Corchorus capsularis</i> ) (partículas 22 µm) (5 e 10% em massa)	Moldagem e vulcanização	Módulo de elasticidade: 1,41 e 2,12 MPa Resistência à tração diminuiu: 20,2 MPa e 20,5 MPa Alongamento na ruptura diminuiu: 649 e 653% Dureza aumentou: 39,3 e 47,8	Foram observados 3 grupos: o controle, com fibras tratadas e sem tratamento químico. *Aumento em todas as propriedades mecânicas	Correia e Valera (2019)

	Resíduos de <i>Eucalyptus</i> spp. (partículas 5-10 µm) (20, 40 e 60% em massa)	Moldagem por compressão a quente	Aumento da densidade relativa com a adição de fibras (maior resistência à compressão) Módulo de elasticidade aumentou de 13 para 38 MPa Melhoria na absorção sonora com o acréscimo das fibras	Incorporação das fibras em compósitos expandidos de borracha natural (espumas)	Alencar (2019)
Mistura de borracha de pneu e borracha natural (NR)	Lignina Kraft (10, 20, 30% em massa)	Moldagem por compressão	Resistência à tração aumentou apenas no compósito com 30% de lignina: de 1,4 para 2 Mpa Alongamento na ruptura diminuiu de 700% para 500%	Utilização de lignina Kraft na forma de pó	Makhalema <i>et al.</i> (2021)
Mistura de borracha natural (NR), borracha estireno-butadieno (SBR), borracha butadieno (BR)	Fibras de <i>Pinus</i> (10, 20, 30, 40 e 50% em massa)	Moldagem e vulcanização	Resistência à tração diminuiu: 10, 7, 6, 5 e 4 Mpa Alongamento na ruptura diminuiu de 400% para 31% Dureza aumentou de 70-95 Absorção de água aumentou: 1-3%	Foram observados 5 grupos, com 0, 10, 20, 30, 40 e 50% de fibras. Uso de máquina de vulcanização de placas a 160°C e pressão de 15 MPa pelo tempo de cura ótimo (tc90).	Shao <i>et al.</i> (2016)
Misturas de borracha de acrilonitril a butadieno (NBR) e estireno butadieno (SBR)	Pó fibras de casca de coco (partículas: 30-40 µm) (5% em massa)	Moldagem e vulcanização	Resistência à tração aumentou: 18,5 Mpa (10% de CN) Alongamento na ruptura apresentou de 80-90% de redução Dureza aumentou: 65-70	Foram comparados o controle (sem fibras) com os nanocompósitos Uso de crysnanoclay (CN) para produzir nanocompósitos (2,5; 5 e 10% em massa)	Pashaei, Hosseinzadeh e Syed (2015)
Borracha natural (NR) e borracha de estireno-butadieno (SBR)	Cinzas de carvalho (10, 30, 40 e 60% em massa)	Moldagem e vulcanização	Resistência à tração aumentou apenas nos compósitos com 10 e 30% de cinzas: 13 e 11 MPa Alongamento na ruptura aumentou: 880, 750, 740 e 730%	Foram observados 2 grupos: o controle e com cinzas Uso de máquina de vulcanização de placas a 160°C e pressão de 160 Mpa pelo tempo de cura ótimo (tc90).	Bülbül <i>et al.</i> (2019)
Borracha Nitrílica Butadieno Carboxilada (XNBR)	Pó de resíduos de casca de oliveira (partículas ≤ 45 µm)	Moldagem por compressão a quente	Módulo de elasticidade aumentou de 3,5 para 7 MPa Resistência à tração aumentou de 8,5 para 10 MPa	Foram observados 2 grupos: o controle com e sem fibras. Dissulfeto de dibenzotiazol-2-il (MBTS) e enxofre	Mousa <i>et al.</i> (2012)

			Alongamento na ruptura diminuiu de 700 para 650%	usados como sistema de vulcanização	
Mistura de Silicone (PDMS) e Polianilina (PANI)	Fibras de açafá (FNA) (Até 10% em massa)	Prensagem em temperatura ambiente	Os compósitos apresentaram eficiência elétrica em função da pressão aplicada, sendo obtido um dispositivo elétrico eficiente	Foram fabricados compósitos com diferentes proporções de inclusões FNA-PANI embebidas na matriz PDMS	Costa (2019)

Dentre as matrizes elastoméricas utilizadas na fabricação dos compósitos, muitos autores optaram por adicionar resíduos de borracha provenientes de pneus, mostrando um interesse em encontrar métodos viáveis de reutilizar esse material que, após descartado, dificilmente é reaproveitado. Por terem um elevado custo de reciclagem, muitas vezes acabam sendo descartados indevidamente em enormes depósitos a céu aberto, podendo se tornar um grande poluente ambiental por conterem várias substâncias químicas em sua composição. Com o passar do tempo, os óleos, metais pesados e produtos químicos usados na fabricação da borracha podem se decompor e penetrar no solo e água, causando contaminação e afetando a qualidade dos recursos naturais. Além disso incêndios em depósitos ilegais de pneus podem ser difíceis de controlar e resultar em incêndios florestais de grande escala, devido a sua alta inflamabilidade (Silva, 2011).

Outra matriz muito utilizada na fabricação desses materiais foi a borracha natural (NR), mesmo misturada com borrachas sintéticas, isso pode ser explicado por ela possuir melhores propriedades, em comparação com as sintéticas, podendo ser citado: alta elasticidade, resiliência, resistência a abrasão e ao impacto, impermeabilidade a líquidos e gases, isolamento elétrico, maleabilidade a baixas temperaturas e ótimo custo-benefício, além de serem oriundas de fonte renovável. Além disso, há aplicações que requerem essas propriedades restritas à borracha natural, como por exemplo, a produção de pneus de avião, impossibilitando sua substituição total pelas borrachas sintéticas (Venkatachalam *et al.*, 2013).

De um modo geral, pode-se observar que diferentes tipos de fibras apresentam diferentes resultados nas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e absorção de água, o que pode ser explicado pelas características das diferentes fibras tais como morfologia, composição, em especial o teor de celulose, que varia de fibra para fibra e traz implicações sobre as propriedades químicas e mecânicas e que, por sua vez, envolve variáveis tais como influências geográficas e climáticas que influenciam na composição química dessas fibras (Komuriah; Kumar; Prasad, 2014). Muitos autores utilizaram fibras provenientes de madeira como carga de enchimento da matriz, ao invés de utilizar fibras de outros materiais. As fibras de madeira normalmente possuem propriedades mecânicas mais elevadas que outras fibras lignocelulósicas de espécies alternativas, já que as propriedades mecânicas das fibras naturais são determinadas pela quantidade de celulose e pelo ângulo microfibrilar. Além disso a rede hidrofóbica de lignina afeta as propriedades de outras redes de maneira a atuar como um agente de acoplamento e aumentar a rigidez dos compósitos (Jacob John; Anandjiwala, 2009). No caso da utilização das fibras lignocelulósicas para incorporação em compósitos, é desejável que a fibra possua alta quantidade de celulose e um ângulo microfibrilar baixo (Rahman *et al.*, 2015). Portanto, se o resultado requerido for o maior aumento possível da resistência mecânica em compósitos, é aconselhável optar pela incorporação de fibras provenientes de madeira, por possuírem características mais uniformes e serem de fácil obtenção, além de mais abundantes.

Ainda ao observar o Quadro 4, nota-se que Makhalema *et al.* (2021) reutilizaram subprodutos gerados pela indústria do papel e celulose na criação de compósitos de borracha, mostrando certa preocupação em adotar uma abordagem sustentável ao propor uma finalidade

para esse material. Esses subprodutos geralmente são dispostos em aterros industriais próximo às fábricas, e sua utilização em compósitos não só reduz o impacto ambiental gerado por esse descarte, como também agrega valor econômico a ele, sendo um bom exemplo de como resíduos industriais podem ser reaproveitados, ajudando a contribuir para práticas sustentáveis. Além disso, a legislação ambiental cada vez mais severa e os altos custos de deposição em aterros têm levado a busca de novas alternativas para disposição final deste abundante resíduo.

Nos estudos de Bülbül *et al.* (2019), a utilização de cinzas de madeira em compósito elastomérico teve efeito significativo em suas propriedades mecânicas. As cinzas de madeira, que são um subproduto da queima de madeira, contêm vários compostos e minerais, e sua incorporação em compostos de borracha pode levar a efeitos positivos e negativos nas propriedades mecânicas. A sílica, em particular, influenciou no aumento do módulo e a resistência à tração da borracha., podendo também melhorar a resistência à abrasão. Isso é especialmente importante em aplicações onde o produto de borracha está exposto ao desgaste e atrito. Foi observado que os compósitos apresentaram um aumento na resistência à tração, abrasão, capacidade de flexão e densidade, em comparação com o compósito sem cinzas, porém, houve redução nos valores de dureza. Os autores concluíram que a proporções ótima de cinza de madeira está entre 16% e 32% em massa, e que a quantidade de material de enchimento utilizada deve ser igual à quantidade máxima de borracha, caso contrário, ela afetará negativamente propriedades, podendo tornar os compósitos mais quebradiços e reduzir sua capacidade de alongamento antes da ruptura.

As fibras têm baixo alongamento na ruptura e os elastômeros têm alto alongamento na ruptura. A combinação de alta resistência à tração e alto alongamento indica que o material possui alta tenacidade. Assim, o alongamento medido em valores de ruptura é um indicador da ductilidade de um polímero. O alongamento na ruptura é importante para componentes que absorvem energia por deformação plástica. A diminuição da resistência à tração e do alongamento na ruptura dos compósitos de forma geral, pode ser explicada devido à incapacidade do material de enchimento de suportar as tensões transferidas da matriz para ele (Hanafi *et al.*, 2002). Quando as fibras estão alinhadas paralelamente à direção do estresse, a resistência à tração apresenta uma queda característica com o aumento do teor de volume de fibras até atingir um nível crítico de fibras. O nível crítico de concentração, no qual a resistência da matriz não reforçada é recuperada, varia diretamente com a razão crítica de aspecto da fibra. (Jacob John; Anandjiwala, 2009). A dureza dos painéis compósitos foi superior à dos painéis feitos apenas de borracha pura. Sendo que dentre todos eles, os que utilizaram pó de madeira como carga de reforço obtiveram valores de dureza ainda mais elevados. Estes resultados indicam que a incorporação de pó de madeira na matriz de borracha eleva ainda mais a rigidez dos compósitos.

Ao analisar os processos de fabricação dos compósitos, em comparação com o processo de moldagem por compressão a quente, muito utilizado atualmente, o uso do processo de mistura de borracha e vulcanização para fabricar os compósitos apresentou melhor ligação na interface entre as fibras lignocelulósicas e borracha, bem como uma distribuição mais uniforme das partículas dessa carga de reforço na forma de pó. Para a maioria dos compósitos feitos através da moldagem por vulcanização, o inchamento em espessura foi menor do que o material feito apenas com borracha, madeira e adesivo, utilizando o processo de moldagem por compressão a quente (Xu; Li, 2012; Xu *et al.*, 2014). Isso indica que a maior parte das partículas lignocelulósicas estavam encapsuladas na matriz polimérica de forma mais eficiente, uma vez que a borracha de pneu é praticamente hidrofóbica.

A absorção de água dos compósitos em 24 variou de 0% a 4%, aproximadamente, representando valores muito inferiores aos dos compósitos tradicionais à base de madeira, que geralmente ultrapassam os 20% (Shi; Wu, 2009; Shi *et al.*, 1999). O inchamento em espessura após 24 horas de imersão dos compósitos aumentou conforme a adição gradativa de fibras lignocelulósicas. O aumento no inchamento em espessura também se deve à natureza

higroscópica das fibras (Shi; Gardner, 2006). Comparando com os compósitos tradicionais, o uso direto de borracha envolvendo as partículas lignocelulósicas demonstrou menor sensibilidade à umidade e uma boa resistência à água.

O Quadro 4 mostra também que a quantidade de fibra adicionada nas matrizes varia de 0 a 60% em massa, dependendo das características da fibra e do objetivo de cada estudo. Em geral, a maior parte dos experimentos foi feito com um teor médio de fibras entre 20 e 40%, com poucos casos de compósitos preparados com teor menor ou maior que essa faixa. Normalmente, isso acontece porque o aumento da fração de fibras até esse limite implica no aumento das interfaces entre matriz e reforço, o que favorece as propriedades mecânicas, tais como resistência mecânica à tração e módulo de elasticidade. O aumento da fração em massa das fibras acima de 50% impacta negativamente tanto na resistência mecânica quanto na dureza e rigidez do material (Joseph; Medeiros; Carvalho, 1999). Em geral, fibras lignocelulósicas são boas opções para reforço em matrizes de borrachas, sendo relatado em alguns estudos um aumento significativo das propriedades mecânicas dos compósitos, desde que dentro desses limites aceitáveis. Segundo Xu *et al.* (2017), em seus estudos, quando a carga de pó de madeira era superior a 50%, o torque durante o processo de mistura da borracha diminuía sem recuperação, indicando que o composto não podia ser vulcanizado. Os autores concluíram que a carga de pó de madeira não deve ser superior a 50% do peso, e concluíram que sua incorporação aumentou a dureza do compósito, com cerca de 53% de melhoria quando a carga de pó de madeira aumentou de 0% para 50%. Também foi observado que a absorção de água do compósito foi menor do que a dos compósitos de madeira tradicionais.

Para melhorar a interação entre a matriz e as fibras lignocelulósicas, alguns autores optaram por utilizar o método de tratamento alcalino dessas fibras. (Quadro 5)

**QUADRO 5** – Tratamento alcalino das fibras.

Matriz	Carga de Reforço	Método de preparação	Tratamento alcalino das fibras	Observações	Referências
Borracha natural (NR)	Fibras de <i>Pinus</i>	Moldagem por compressão a quente	Fibras de madeira, tratadas com diferentes concentrações de NaOH (5-30%) durante 2h a 24h	O tratamento químico aumentou a cristalinidade em baixas concentrações de álcali (5 e 10%).  Houve remoção parcial das hemiceluloses e da lignina  O tratamento 2h5% foi mais viável	Raia (2020)
	Fibras de palha de arroz	Moldagem por compressão a quente	Fibras pré-lavadas com água destilada e secas a 50 graus Celsius por 24 horas. Foram tratadas com uma solução de NaOH (5% p/v) por 1 hora.	A as propriedades do compósito foram ainda mais aprimoradas pelo tratamento da superfície das fibras, o que melhora a adesão entre a fibra e a matriz.	Anand e Jayamohan (2016)
	Fibras de bagaço de cana-de-açúcar	Moldagem e vulcanização	Tratamento conduzido em 10% em peso de NaOH com 1,0 g de fibra imersa em cada 10 mL por 24 horas, e	O ácido acético promoveu a deslignificação das fibras.	Paiva <i>et al.</i> (2018)

			neutralizado por 1 hora com 2% v de ácido acético até atingir um pH de 7,0		
	Fibras de juta ( <i>Corchorus capsularis</i> ) (partículas 22 µm)	Moldagem e vulcanização	As fibras foram tratadas com uma solução de NaOH a 2% (p/p), agitadas a 80 °C por 2 horas, filtradas até obter um pH de 7	O tratamento ajudou a remover os sólidos da superfície das fibras, além de separar as microfibrilas e remover a massa amorfa das fibras	Correia e Valera (2019)

Os autores descritos no Quadro 5 investigaram os efeitos de fibras tratadas quimicamente nas propriedades mecânicas dos compósitos, abordando as concentrações e tempo de exposição ideais. Em suma, foi demonstrado que as concentrações de 2 a 6% de NaOH nos tratamentos de fibras proporcionam uma melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos estudados (Owen *et al.*, 2015). Correia e Valera (2019) utilizaram 2% de NaOH para tratamento de fibras lignocelulósicas e concluíram que o tratamento modificou a superfície das fibras, tornando-as mais lisas, aumentando a cristalinidade, densidade e as propriedades mecânicas após o tratamento, além de separar as microfibrilas e remover a massa amorfa das fibras. Segundo Jawaid, Sapuan e Alothman (2017), no processo de alcalinização, o íon Na<sup>+</sup> causa o inchaço das fibras, devido à sua penetração nos cristais de celulose. Uma parte dos grupos hidroxilas presentes na superfície das fibras são ionizadas em alcóxidos, aumentando suas dimensões moleculares. Esse processo altera a estrutura cristalina da celulose, deixando sua cadeia mais termodinamicamente estável que a cadeia das fibras não tratadas. O tratamento alcalino também provoca a remoção de lignina, hemiceluloses, pectinas e ceras presentes na superfície da fibra, aumentando sua rugosidade e, conseqüentemente, sua área superficial, contribuindo assim na compatibilidade interfacial entre a fibra e a matriz (Neto *et al.*, 2019). Porém, maiores concentrações de NaOH resultam na diminuição da cristalinidade, indicando que uma baixa concentração tem efeito mais positivos, sendo que o tratamento durante aproximadamente 2 horas e na concentração 5% é a condição de alcalinização mais viável tecnicamente e eficaz para modificação das fibras, visando melhorar sua incorporação na matriz do compósito (Raia, 2020). Outro fato importante é de que todos os compósitos com fibras tratadas quimicamente, apresentaram redução no tempo ótimo de cura, otimizando o processo de vulcanização.

#### 4.1. Aplicação prática dos compósitos

Entres as possíveis aplicações dos compósitos, estão: na indústria automotiva, em componentes internos e externos de veículos (painéis, painéis de porta e revestimentos, peças de isolamento e absorção de impacto); na construção civil, em materiais de construção leves e duráveis (painéis de parede, pisos e telhas, isolamento térmico e acústico); embalagens sustentáveis para alimentos e produtos diversos; no setor mobiliário para fabricação de móveis sustentáveis (cadeiras, mesas e prateleiras); na indústria naval para componentes de barcos e estruturas marítimas; peças para eletrodomésticos que exigem resistência e durabilidade; equipamentos esportivos (raquetes, tacos de golfe e capacetes); na indústria de calçados, em solados e componentes de calçados devido à resistência e flexibilidade; e diversos produtos de consumo, como utensílios de cozinha, brinquedos e artigos de decoração.

Raia (2020), em seus estudos de compósitos para a produção de pisos e pavimentos, estabeleceu que a dureza Shore A dos materiais elastoméricos deve variar de 60 a 85, dependendo da aplicação. Com isso, concluiu que as formulações estudadas, estão dentro do

especificado pela indústria de pisos de borracha e para produtos engenheirados. Além disso, eles apresentaram durezas compatíveis com os padrões estabelecidos pela indústria e baixa absorção d'água, indicando que é apropriado até para áreas com teor umidade elevado.

Bacarin *et al.* (2020) chegou à conclusão de que os compósitos feitos a partir de borracha natural (NR) com resíduos de Grits da indústria do papel e celulose apresentaram propriedades semelhantes aos materiais que contêm carbonato de cálcio e óxido de cálcio em sua composição, concluindo também que uma aplicação alternativa para esses materiais de resíduos de Grits poderia ocorrer na produção de chinelos. Os compósitos produzidos foram cortados e moldados com sucesso por uma empresa local para fabricar chinelos e sapatos, sendo a flexibilidade desses materiais preservada durante o processo, resultando em chinelos bem-sucedidos. Uma importante vantagem observada nesse processo foi a diminuição dos custos de matéria-prima e maior rendimento do material.

## 5. CONCLUSÃO

- A revisão sistemática da literatura é um eficiente método para integração da informação acadêmica produzida sobre os diferentes tipos de compósito e possibilita a ampliação do conhecimento sobre esses materiais.
- Os compósitos feitos a partir da borracha juntamente com materiais lignocelulósicos são viáveis tecnicamente e podem ser aplicados para diferentes produtos e com diversas utilizações em diferentes segmentos da indústria.
- É possível utilizar resíduos da indústria do papel e celulose (lignina kraft) na fabricação de compósitos, sendo uma boa opção de destinação desses rejeitos.
- Os compósitos madeira-borracha podem ser utilizados para diversas finalidades por apresentarem vantagens como leveza, resistência mecânica, estabilidade dimensional, baixa absorção d'água etc., além de poderem reutilizar resíduos industriais gerados, diminuindo consequentemente os impactos causados no meio ambiente.
- A aplicabilidade desses compósitos em estruturas específicas depende das propriedades mecânicas e estruturais desses materiais, bem como dos requisitos específicos de cada aplicação. Além disso, as propriedades de resistência à umidade ao longo do tempo também são considerações importantes ao escolher esses materiais para aplicações estruturais.
- O tratamento químico das fibras tem impacto positivo na interação matriz-reforço, melhorando ainda mais as características dos compósitos.

## 6. REPEFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira NBR 10004: Classificação de Resíduos. p.1-1, 2004.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em set. 2023.

AGA. Ficha de informações de segurança de produto químico - dióxido de enxofre. 2021. Disponível em: [https://www.linde-gas.pt/pt/images/10021940\\_Biogon%20OC%2020\\_v1.2\\_tcm310-81726.pdf](https://www.linde-gas.pt/pt/images/10021940_Biogon%20OC%2020_v1.2_tcm310-81726.pdf). Acesso em: 10 out. 2023.

ALENCAR, L. N. **Compósito expandido de borracha natural com madeira: materiais para isolamento térmico e acústico na construção civil**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

ALI, A *et al.* Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites: A review. **Journal of Industrial Textiles**. v. 47(8), p. 2153-2183, 2018.

ALLINGER, N. L.; CAVA, M. P.; JONGK, D. C.; JOHNSO, C. R.; LEBEL, N. A.; STEVENS, C. L. Química Orgânica. **Livros Técnicos e Científicos**. vol. 2, p. 612-613, 1976.

ALMEIDA, N. F. *et al.* Estudo da reatividade de taninos de folhas e cascas de barbatimão *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville. **Scientia Forestalis**. v. 38, n. 87, p. 401-408, 2010.

ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo ureia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

ANAND, G. S.; JAYAMOHAN, K. G. Synthesis of rice straw fiber reinforced natural rubber composite and effects of surface treatment in its mechanical properties. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**. v. 3, n. 9, p. 82-89, 2016.

ASARO, L. *et al.* Recycling of rubber wastes by devulcanization. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 133, p. 250-262, 2018.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. **Cengage Learning**, v. 1, p. 507-511, 2008.

ASKELAND, Donald. Composite materials. *In*: ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The Science and Engineering of Materials**. Solutions Manual, 2011. p. 191-203.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1566-11: Standard terminology Relating to rubber. **ASTM**. West Conshohocken, 2011.

AZEVEDO, E. C. **Efeito da radiação nas propriedades mecânicas do adesivo de poliuretana derivado do óleo de mamona**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

- AZWA, Z. N. *et al.* A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibers. **Materials and Design**. v. 47, p. 424-442, 2013.
- BAUER, K. **Development and optimisation of a low- temperature drying schedule for *Eucalyptus grandis* (Hill) ex maiden in a solar-assisted timber dryer**. 2003. Dissertação (Doktors der Agrarwissenschaften) – Universität Hohenheim, Hohenheim, 2003.
- BEILEN, J. B.; POIRIER, Y. Establishment of new crops for the production of natural rubber. **Trends in Biotechnology**, v. 25, n. 11, p. 522–529, 2007.
- BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- BILGILI, E.; ARASTOPOUR, H.; BERNSTEIN, B. Pulverization of rubber granulates using the solid-state shear extrusion (SSSE) process: Part I. Process concepts an characteristics. **Powder Technology**. v. 115, p. 265-276, 2001.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. Mechanics of wood and wood composites. **Malabar: Krieger Publishing Company**. v. 2, p. 500-520, 1993.
- BRITZ, B. L. P. **Avaliação da influência da incorporação da cana-de-açúcar quimicamente modificada nas propriedades químicas, térmicas, morfológicas e dinâmico-mecânicas na borracha natural (nr)**. 2022. Dissertação (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022.
- BRYDSON, J. A. Rubber chemistry: relatório. **Applied Science Publishers Ltd**. v. 1, 1978.
- BÜLBÜL, S. *et al.* The effect of wood ash on the mechanical properties of rubber compounds. **Materials and Technology**. v. 53, n. 3, p. 333-339, 2019.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.
- CALLISTER JR., W. D; RETHWISCH, D. R. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. LTC. v. 8, 2015.
- CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. Estudo comparativo dos resultados de ensaio de tração perpendicular para MDF produzido em laboratório com fibras de pinus e de eucalipto utilizando ureia-formaldeído. **Matéria**. v. 1, n. 9, p. 32-42, 2004.
- CARNEIRO, A. C. O. **Efeito da hidrólise ácida e sulfitação de taninos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Anadenanthera peregrina* Speg., nas propriedades dos adesivos**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
- CASTRO, V. G. Propriedades físico-mecânicas dos compósitos. In: Compósitos madeiramento: um produto sustentável para o Futuro [online]. **EdUFERSA**. p. 93-100, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786587108612.0007>. Acesso em 27 out. 2023.
- CÉSAR, A. A. S. **Estudo da interação adesivo-partícula em painéis OSB (oriented strand board)**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

- CHOUDHURY, A. Isothermal crystallization and mechanical behavior of ionomer treated sisal/HDPE composites. **Materials Science and Engineering**. v. 491, n. 2, p. 492-500, 2008.
- CIULLIO, P. A.; HEWITT, N. The Rubber Formulary. **Plastics Design Library**. p. 4-49, 1999.
- CONFEDERAÇÃO NATURAL DE MUNICÍPIOS – CNM. Informativo CNM: Meio ambiente – 2010. **CNM**. p. 1-12, 2010.
- CONTEMAR AMBIENTAL. Tipos de reciclagem. 2020. Disponível em: <http://blog.contemar.com.br/tipos-de-reciclagem/>. Acesso em: 27 set. 2023.
- CORREA C. A. *et al.* Compósitos Termoplásticos com Madeira. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, n. 3, p. 154-165, 2003.
- CORRÊA, C. PH. **Revista de Ciência Elementar**. v. 1, n. 1, p. 1-2, 2013.
- CORREIA, C. A.; VALERA, T. S. Cellulose nanocrystals and jute fiber-reinforced natural rubber composites: cure characteristics and mechanical properties. **Materials Research**. p. 1-9, 2019.
- COSTA, Arlindo. Anatomia da madeira. *In*: COSTA, A. **Coletâneas de Anatomia da Madeira**. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001, p. 1-42.
- COSTA, C. C. **Efeitos da pressão mecânica nas propriedades elétricas ac em compósitos elastoméricos a base de fibras naturais recobertas com polímero condutor**. 2019. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.
- COSTA, H. M.; VISCONTE, L.; NUNES, C. R.; FURTADO, C. R. G. Aspectos históricos da vulcanização. Instituto de Química, UERJ. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 13, n. 2, p. 125-129, 2008.
- COUTEUR, P. L.; BURRESON, J. **Os Botões de Napoleão: as 17 moléculas que mudaram a história**. Rio de Janeiro: Zahar. 1. ed. p. 140, 2006.
- DALL'ANTONIA, A. C.; MATTOSO, L. H. C. Caracterização térmica e mecânica de compostos vulcanizados de borracha natural. *In*: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, 5., 2002, São Carlos, 2002. **Anais [...]**. São Carlos: USP, 2002.
- DE D. *et al.* Reinforcing effect of nanosilica on the properties of natural rubber/reclaimed ground rubber tire vulcanizates. **Polymer Engineering & Science**. v. 53, 2013.
- DUTRA, G.; SOARES, A. L.; CARLETTO, M. R. Geração e reaproveitamento de resíduos na indústria madeireira. **UTFPR**. p. 1-9, 2010.
- ECYCLE. Reciclagem: o que é e qual a importância. 2020. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/reciclagem/>. Acesso em: 27 set. 2023.
- FABBRI, S.; OCTAVIANO, F.; HERNANDES, E. Protocolo da revisão sistemática. *In*: FELIZARDO, K.; NAKAGAWA, E.; FABBRI, S.; FERRARI, F. **Revisão sistemática da literatura em engenharia de software – teoria e prática**. Elsevier, 2017. ed. 1.
- FARIA, D. L. *et al.* Compósitos minerais reforçados com madeira e borracha de pneu. **Revista Matéria**. v. 23, n. 4, 2018.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood chemistry, ultra structure, reactions. Berlim, **Walter de Gruyter Publisher**, 1984.

- FERREIRA, J. C. **Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina kraft e celulose nanocristalina**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.
- FERREIRA, M. **Caracterização do látex e da borracha natural de seringais de Presidente Prudente/SP**. 1999. Dissertação (Mestrado em Físico-Química) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- FONTES, P. J. P. **Autossuficiência energética em serraria de pinus e aproveitamento dos resíduos**. 1994. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.1994.
- FORREST, M. Recycling and re-use of waste rubber. **Smithers Rapra Technology Ltd**, v. 2, p. 280-300, 2014.
- FRIZZO, S. M. B.; SILVA, M. C. M. Apontamentos de química da madeira. **Apostila Didática**. Santa Maria: UFSM, 2001.
- GLÓRIA, B. A.; GERREIRO, S. M. C. **Anatomia Vegetal**. Viçosa: UFV, 2006.
- GOMES, M. M. Portal da indústria da borracha. Disponível em: <http://www.rubberpedia.com/>. Acesso em: 25 set. 2023.
- GREEN, D.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical properties of wood**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1999.
- HAYEEMASAE, N.; HANAFI, I. R. A. A. Effects of partial replacement of commercial fillers by recycled poly (ethylene terephthalate) powder on the properties of natural rubber composites hayeemasae. **Journal of Vinyl Addit. Technol.** v. 18, 2012.
- HODZIC, A.; SHANKS, R. A. Natural fiber reinforcements. *In*: HODZIC, A.; SHANKS, R. A. **Natural fibre composites: materials, processes, and applications**. Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2014. p. 3-43.
- IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Anuário Ibá: 2015. **Ibá**, 2015. Disponível em: [https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/estatisticas/anuario-iba\\_2015.pdf](https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/estatisticas/anuario-iba_2015.pdf). Acesso em: 02 out. 2023.
- IBRAHIM, I. D. *et al.* The use of polypropylene in bamboo fibre composites and their mechanical properties - A review. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. v. 34(16), p. 1347–1356, 2015.
- ISHAIMI, N. I. B. **Mechanical properties of pineapple leaf fibre (PALF) reinforced rubber composite**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – University Taknologi Malaysia, Johor, 2007.
- IWAKIRI, S. *et al.* Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de Eucalyptus benthamii com diferentes adesivos e faces de colagem. **Scientia Forestalis**. v. 41, n. 99, p. 411-416, 2013.
- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF. v. 2, 2005.
- JACOB JOHN, M.; ANANDJIWALA, R. D. Lignocellulosic fiber reinforced rubber composites. **Old City Publishing**, p. 252-269, 2009.
- JAWAID, M.; SAPUAN, S. M.; ALOTHMAN, O. Y. **Green Biocomposites: Manufacturing and Properties**. Cham: Springer. 2017.

- JOB, A. E. *et al.* Conductive composites of natural rubber and carbon black for pressure sensors. **Synthetic Metals**, v. 135-136, p. 99-100, 2003.
- JUN, Z. *et al.* Optimization of processing variables in wood-rubber composite panel manufacturing technology. **Bioresource Technology**. v. 99, p. 2384-2391, 2008.
- KIM, J. K. *et al.* Rubber Recycling: Challenges and Developments. **Royal Society of Chemistry**, p. 1-351, 2018.
- KREJSA, M. R.; KÖENIG, J. L. A review of sulphur cross-linking fundamentals for accelerated and unaccelerated vulcanization. **Rubber Chemistry and Technology**, v. 66, p. 376-410, 1993.
- KUO, C. C.; LIN, J. X. A cost-effective method for rapid manufacturing polymer rapid tools used for liquid silicone rubber injection molding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, p. 1159-1170, 2019.
- LIMA, C. K. **Avaliação da qualidade de juntas coladas na madeira de clones de Eucalyptus**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- LIU, F. P.; RIALS, T. G.; SIMONSEN, J. Relationship of wood surface energy to surface composition. *Langmuir*. v. 14, n. 2, p. 536-541, 1998.
- LOBÃO, M. S. *et al.* Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, v.28, n. 6, p. 889-894, 2004.
- MACIEL, A. S. *et al.* Painéis de partículas aglomeradas de madeira *Pinus elliotti* Engelm., poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). **Revista Árvore**. v. 28, n. 2, p. 257-266, 2004.
- MADY, F. T. M. Conhecendo a madeira: informações sobre 90 espécies comerciais. **SEBRAE**. p. 212-212, 2000.
- MAITI, M.; BHATTACHARYA, M.; BHOWMICK, A. K. Elastomer nanocomposites. **Rubber Chemistry and Technology**. v. 81, n. 3, p. 384-469, 2008.
- MAKHALEMA, M. *et al.* Influence of kraft lignin on the properties of rubber composites. **Wood Research**. v. 66, n. 2, p. 285-296, 2021.
- MALIVERNEY, C. *et al.* Room-temperature vulcanizable organopolysiloxane compound to give an elastomer and novel organopolysiloxane polycondensation catalysts. **USPTO**. Disponível em: <https://uspto.report/patent/grant/8461283>. Acesso em: 15 out. 2023.
- MANTOVANI, G. A. **Reciclagem Mecânica de Resíduos de Rótulos e Etiquetas Utilizando Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.
- MARINELLI A.L; MONTEIRO M.R; AMBRÓSIO J.D; BRANCIFORTI M.C; KOBAYASHI M; NOBRE A.D; Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 18, n. 2, p. 92-99, 2008.
- MARRA, A. A. **Technology of wood bonding – principles in practice**. Van Nostrand Reinhold. 1992.

- MARTINS, TOMÁS F. R. M. **Dimensionamento de estruturas em madeira - coberturas e pavimentos**. 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2010.
- MENDOZA, Z. M. S. H. **Efeito da inclusão laminar nas propriedades de painéis aglomerados fabricados com resíduos da indústria laminadora**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
- MILITKÝ, J.; JABBAR, A. Comparative evaluation of fiber treatments on the creep behavior of jute/green epoxy composites. **Composites Part B: Engineering**. v. 80, p. 361-368, 2015.
- MONDARDO, F. H. **Compósitos de polipropileno e farinha de madeira**. 2006. Tese (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pelotas, 2006.
- MOUSA, A. *et al.* Carboxylated nitrile butadiene rubber/hybrid filler composites. **Materials Research**. v. 15, n. 4, p. 671-678, 2012.
- MÜLLER, C. M. O.; LAURINDO, J. B.; YAMASHITA, F. Effect of cellulose fibers on the crystallinity and mechanical properties of starch-based films at different relative humidity values. **Carbohydrate Polymers**. v. 77, n. 2, p. 293–299, 2009.
- NETO, J. S. S. *et al.* Effect of chemical treatment on the thermal properties of hybrid natural fiber-reinforced composites. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 136, n. 10, 2019.
- NUNES, D. S. S., COUTINHO, F. M. B., MELLO, I. L. Principais aspectos da polimerização do 1,3-butadieno. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 15, n. 4, p. 296–305, 2005.
- OLIVEIRA, L. M. DE. **Caracterização do compósito de borracha natural reforçado com nanocristais de celulose**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- OZAKI, S. K.; SOUZA, M. F. Compósitos de resíduos de madeira e borracha. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7., 2004, São Paulo. **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Polímeros**. São Paulo: USP, 2004.
- PAIVA, F. F. G. *et al.* Sugarcane bagasse fiber as semi-reinforcement filler in natural rubber composite sandals. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 21, p. 326-335, 2019.
- PASHAEI, S.; HOSSEINZADEH, S.; SYED, A. A. Studies on coconut shell powder and crysanoclay incorporated acrylonitrile-butadiene rubber/ styrene butadiene rubber (nbr/sbr) green nanocomposites. **Polymer Composites**. p. 1-9, 2015.
- PAULA, P. G. D. E. **Fibras vegetais e matriz termoplástica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2011.
- PENNACCHIO, H. L. Análise mensal: borracha natural – março de 2019. **Conab**. p. 1-4, 2019.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: LTC, 2003. ed. 6, 2003.
- PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 83, p. 98–112, 2016.
- PRODÓSSIMO, V. Polímero de interesse industrial: um estudo sobre a borracha. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 2, p. 852-881, 2021.

RAHMAN, M. A.; PARVIN, F.; HASAN, M.; HOQUE, M. E. Introduction to manufacturing of natural fiber-reinforced polymer composites. **Manufacturing Polymer Reinforced of Natural Fiber Composites**. p.17-43, 2015.

RAIA, R. Z. **Compósitos borracha-madeira para produção de piso antiestático**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

RAZERA, D. L. **Estudo sobre as interações entre as variáveis do processo de produção de painéis aglomerados e produtos moldados de madeira**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RIBEIRO, R. A.; SILVA, G. G.; MOHALLEM, N. D. S. Compósitos poliéster/Lil/LiAl<sub>5</sub>O<sub>8</sub>. **Sociedade Brasileira de Química**. Disponível em: <https://www.s bq.org.br/ranteriores/23/resumos/0789/#:~:text=Comp%C3%B3sitos%20s%C3%A3o%20materiais%20multif%C3%A1sicos%20constitu%C3%ADdos%20por%20duas%20ou&text=Comp%C3%B3sitos%20s%C3%A3o%20materiais%20multif%C3%A1sicos%20constitu%C3%ADdos%20por%20duas%20ou%20mais%20fases,entre%20as%20fases%5B1%5D>. Acesso em 18 out. 2023.

RICCHINI, R. Reciclagem de plásticos. 2020. Disponível em: <https://www.setorreciclagem.com.br/reciclagem-de-plastico/reciclagem-de-plasticos/>. Acesso em: 27 set. 2023.

SAKAR, A. S. K. Rubber Technologist's Handbook. **Smithers Rapra Publishing**, p. 381-412, 2001.

SAWSEN, C. *et al.* Effect of flax fibers treatments on the rheological and the mechanical behavior of a cement composite. **Construction and Building Materials**. v. 79, p. 229-235, 2015.

SCHNEIDER, Vânia Elisabete. Uso energético de resíduos de madeira na cadeia produtiva de madeira/móveis e possibilidades de geração de créditos de carbono. *In*: FINOTTI, A. R., SCHNEIDER, V. E., WANDER, P. R., HILLIG, É., SILVA, M. D'A (org.). **Pólo moveleiro da serra gaúcha: sistemas de gerenciamento ambiental na indústria moveleira**. EDUCS, 2006. p. 191-230.

SHAO, D. *et al.* Fabrication of wood-rubber composites using rubber compound as a bonding agent instead of adhesives. **Materials**. p. 1-13, 2016.

SHIT, S.; SHAH, P. A review on silicone rubber. **National Academic Science Letters**. p. 355-365, 2013.

SILVA, R. *et al.* Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Quim. Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SILVA, S. A. **Aproveitamento sustentável da borracha proveniente dos pneus usados: ecodesign uma nova abordagem no design de mobiliário urbano**. 2011. Dissertação (Mestrado em Design Industrial) – Universidade do Porto, Porto, 2011

SKAF, P. Perguntas frequentes sobre política nacional de resíduos sólidos (pnrs). **Federação das Indústrias do Estado de São Paulo – DMA**, 2012.

SMITH, William; HASHEMI, Jamad. Elastômeros (borracha). *In*: SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Porto Alegre: AMGH, 2012. p. 376-379.

- SOLOMONS, T. W. G. **Química Orgânica**. Livros Técnicos e Científicos, vol. 6, p. 416-417, 1996.
- SOUZA, M. M. *et al.* Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. **Revista Matéria**. v. 25, n. 1, p. 1-10, 2020.
- STADLER, K.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N.; VANZETTO, S. C.; Análise do processo produtivo e geração de resíduos em uma indústria de painéis compensados. **ACTA Ambiental Catarinense**. v. 6, n. 1, 2009.
- STELLA, J. C. **A influência de variáveis do ciclo de prensagem e gramatura de cola nas propriedades mecânicas de compensados de paricá (*Schizolobium amazonicum*)**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- TACHIZAW. A, T. **Gestão ambiental e responsabilidade social corporativa: estratégias de negócios focadas na realidade brasileira**. Atlas, 2009.
- TANG, B. Z.; ABD-EL-AZIZ, A. S. **Natural rubber materials**. RSC Polymer Chemistry Series, v. 2, 2016.
- THAKUR, V. K. *et al.* Silane functionalization of *Saccharum cilliare* fibers: Thermal, morphological, and physicochemical study. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**. v. 15, n. 7, p. 397-414, 2010.
- VENKATACHALAM, P.; GEETHA N.; SANGHEETA, P.; THULASEEDHARAM, A. Natural rubber producing plants: an overview. **African Journal of Biotechnology**. v. 12, n. 12, p. 1297-1310, 2013.
- WIKBERG, H.; MAUNU, S. L. Characterization of thermally modified hard – And Softwoods by <sup>13</sup>C CPMAS NMR. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, p. 461-466, 2004.
- WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The chemistry of wood strength. *In*: ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.
- XU, M. *et al.* Wood-rubber composites fabricated from rubber mixing and vulcanization molding process. **Wood and Fiber Science**. v. 49, n. 4, p. 386-395, 2017.
- XU, M.; LI, J. Effect of adding rubber powder to poplar particles on composite properties. **Bioresource Technology**. v. 118, p. 56-60, 2012.
- YAMAJI, F. M.; BONDUELLE A.; Utilização da serragem na produção de compósitos plástico madeira. **Revista Floresta**. p. 59-66, 2004.
- YAMASHITA, D. M. Compostos de borracha. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens – CETEA**. v. 21, n.1, p. 1-9, 2009.
- YANG, Y. *et al.* Recycling of composite materials. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 51, p. 53-68, 2012.
- ZAIMOVA, D. *et al.* Elastomeric matrix composites: effect of processing conditions on the physical, mechanical and viscoelastic properties. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**. v. 50, n. 2, p. 81-91, 2012.
- ZHU, J. *et al.* Mechanical properties and wettability of bagasse-reinforced composite. **Journal Wuhan University of Technology – Materials Science Edition**. v. 34, n. 2, p. 312–316, 2019.

