



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Elisa Araújo Barbosa**

# **UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA APLICAÇÃO DE BIOPOLÍMEROS PARA UMA CONSTRUÇÃO CIVIL SUSTENTÁVEL**

Ouro Preto

2025

Elisa Araújo Barbosa

**Uma revisão sistemática da aplicação de biopolímeros para uma construção  
civil sustentável**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do  
Grau de Engenheiro Civil na Universidade  
Federal de Ouro Preto.

Materiais e Componentes da Construção

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini  
Silva

Ouro Preto

2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B238r Barbosa, Elisa Araujo.  
Uma revisão sistemática da aplicação de biopolímeros para uma construção civil sustentável. [manuscrito] / Elisa Araujo Barbosa. - 2025. 63 f.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.  
Coorientador: Me. Matheus Henrique Dela Costa.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Biopolímeros. 2. Construção civil. 3. Economia - Economia Circular. 4. Polímeros - Polímero Natural. 5. Sustentabilidade -Materiais sustentáveis. I. Silva, Guilherme Jorge Brigolini. II. Costa, Matheus Henrique Dela. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Elisa Araújo Barbosa**

### **Uma Revisão Sistemática Da Aplicação De Biopolímeros para uma Construção Civil Sustentável**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil

Aprovada em 04 de setembro de 2025

#### Membros da banca

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva - Orientador: Universidade Federal de Ouro Preto  
M.Sc Matheus Henrique Dela Costa - Coorientador: Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Bruna de Carvalho Faria Lima Lopes - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
M.Sc Christopher Antônio Martins de Moura - Universidade Federal do Mato Grosso

Guilherme Jorge Brigolini Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Jorge Brigolini Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/09/2025, às 17:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0984048** e o código CRC **64E83362**.

*Dedico este trabalho à minha avó Marília  
e à minha tia-avó Marli, que nunca tiveram  
a oportunidade de concluir o ensino fundamental  
embora tanto sonhassem.*

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus familiares e amigos pela motivação diária, inclusive à República Chocolate com Pimenta. Agradeço também os professores do DECIV pela excelência, em especial ao Professor Guilherme, que me orientou e me incentivou aprofundar nessa temática. Assim como meu coorientador, Matheus Dela, que mesmo diante dos meus devaneios, soube conduzir e priorizar o aprendizado durante todo o processo. Gostaria de agradecer também ao Projeto *Living Lab Biobased* Brasil, seus coordenadores e pesquisadores, principalmente à Rudy e Ana Carolina, por ter me aberto portas e me mostrado o mundo dos biopolímeros, no qual me despertou o anseio de ver o tema mais inserido na engenharia civil.

Sou eternamente grata à UFOP, à Fundação Gorceix e seus funcionários, aos longos desses anos como discente, que também podem ser chamados de anos de oportunidades, me fizeram crescer como profissional e pessoa.

Viva a Escola de Minas.

## RESUMO

A construção civil está diretamente associada ao esgotamento dos recursos naturais necessários à sua manutenção. Com isso, a iniciativa de se obter produtos e técnicas alinhadas à economia circular está crescendo, impulsionando a busca por alternativas sustentáveis com potencial de aplicação na engenharia civil. Neste contexto, os biopolímeros emergem como materiais promissores para reduzir impactos ambientais da construção civil. Este trabalho realiza uma revisão sistemática da literatura, seguindo o método PICO para responder: “Quais são os estudos e aplicações dos biopolímeros para uma construção civil mais sustentável, e no contexto da engenharia contemporânea, quais são suas limitações e prospecções?”. Mapeando aplicações, contribuições e desafios que os biopolímeros enfrentam para sua ampla adoção, foram analisados estudos recentes, destacando-se biopolímeros utilizados para: (1) estabilização de solos em geotecnia; (2) redução de aglomerantes em pavimentação; e (3) redução de ligantes e aglomerantes em materiais de construção. Os resultados indicam que os avanços multifuncionais das pesquisas dos biopolímeros oferecem soluções mais limpas para economia circular na construção, além de comprovarem a eficiência do uso desses biopolímeros. Apesar das inovações, os biopolímeros carecem mais aplicação em estudos de escala real, melhor verificação da durabilidade e abrangência do ciclo de vida das soluções apresentadas, visando consolidação das tecnologias na construção civil.

Palavras-chave: Biopolímero, Construção Civil, Economia Circular, Polímero Natural, Materiais sustentáveis, Soluções limpas

## **ABSTRACT**

Civil construction is directly associated with the depletion of natural resources for its maintenance. The initiative to obtain products and techniques aligned with the circular economy is growing, boosting the search for sustainable alternatives with potential applications in civil engineering. In this context, biopolymers emerge as promising materials to reduce the environmental impacts of construction. This work conducts a systematic literature review, following the PICO method, to answer: 'What are the studies and applications of biopolymers for a more sustainable civil construction, and in the context of contemporary engineering, what are their limitations and future prospects?' By mapping applications, contributions, and challenges that biopolymers face for widespread adoption, recent studies were analyzed, highlighting biopolymers used for: (1) soil stabilization in geotechnics; (2) reduction of binders in paving; and (3) reduction of binders and aggregates in construction materials. The findings indicate that the multifunctional advances in biopolymer research offer cleaner solutions aligned with the circular economy in construction applications, in addition to demonstrating their technical efficacy. Despite innovations, biopolymers require more feasibility studies on a real scale, further validation of their long-term durability, deeper comprehensive life-cycle assessments, aiming to consolidate these technologies in the civil construction industry.

Keywords: Biopolymer, Civil Construction, Circular Economy, Natural Polymer, Sustainable Materials, Cleaner Solutions

## LISTA DE SIGLAS

AT – Ácido Tartárico  
AC – Alginato de Cálcio  
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida  
BA - Bioaglomerante  
BLP – Pó de folha da bananeira  
BPST – Solo tratado à base de biopolímeros  
CA - Carragenina  
CBR – Índice de Suporte Califórnia  
CV - cinza volante  
CH – Quitosana  
D - Densidade  
FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier  
GA – Goma Ágar  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
GX - Goma Xantana  
HD – Densidade alta  
LA – Limites de Atteberg  
LD – Densidade baixa  
MA – Mistura Asfáltica  
MD – Densidade média  
Mt - Megatoneladas  
MOE – Módulo de Elasticidade  
OPC – Cimento Portland Comum  
PE – Polietileno  
PET - Polietileno tereftalato  
PU/PUR – Poliuretano  
PP – Polipropileno  
PS – Poliestireno  
PS-E – Poliestireno Expandido  
RSL – Revisão Sistemática da Literatura  
RGS – Areia de Vidro Reciclado  
SCB – Ensaio de flexão semicircular;

SEM - Microscopia Eletrônica de Varredura

t - Tonelada

UV- VIS - Espectroscopia na Região do Ultravioleta-Visível

UF - Ureia-Formaldeído

UCS – Resistência à Compressão não-Confinada

W – Umidade

Wab – Absorção de água

µm - micrometros

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo .....</i>	3
1.1.1 <i>Objetivos específicos .....</i>	3
1.2 <i>Revisão sistemática da literatura.....</i>	3
1.3 <i>Polímeros utilizados na construção civil.....</i>	5
1.4 <i>Biopolímeros .....</i>	8
1.5 <i>Potencial sustentável da construção civil contemporânea .....</i>	16
<b>2. METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Mapeamento das palavras-Chave, autores e países .....</i>	21
3.2 <i>Análises qualitativas.....</i>	24
3.2.1 <i>Soluções aplicadas à Geotecnia .....</i>	31
3.2.2 <i>Soluções aplicadas a Materiais de Construção.....</i>	36
3.2.3 <i>Soluções aplicadas à Pavimentação.....</i>	41
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>44</b>
4.1 <i>Desafios e perspectivas futuras .....</i>	45
<b>5. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No que rege a relação exacerbada entre produção e consumo, os hábitos da sociedade atual estão diretamente associados à poluição e ao esgotamento de recursos naturais para sua manutenção. Entre esses fatores, a construção civil lidera como uma das indústrias mais poluentes. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), esse setor é o maior responsável pelas emissões de gases de efeito estufa, representando pelo menos 37% das emissões globais (UNEP, 2023). Fazendo parte desse valor, tem-se a indústria do cimento responsável por aproximadamente 8% das emissões globais, chegando perto de 2,5 gigatonelada de CO<sub>2</sub> (Mañosa *et al.*, 2024; Monteiro; Miller; Horvath, 2017; UNEP, 2023)

O concreto é o segundo material mais consumido por humanos, depois da água, e faz parte de pelo menos 70% do volume de edificações convencionais (Monteiro; Miller; Horvath, 2017). Porém, a cada tonelada de cimento produzido há a emissão de cerca de 1 t de CO<sub>2</sub> (IEA, 2023; Monteiro; Miller; Horvath, 2017). No contexto de setor mais poluente, há propostas de descarbonização globais como o "Net-zero" cenário de emissões líquidas zero até 2050, nas quais existem desafios a serem enfrentados devido à alta demanda de cimento global e a energia requerida por ele (Nwankwo *et al.*, 2020; GCCA, 2024; IEA, 2023). Atualmente, os biopolímeros em misturas cimentícias representam apenas uma pequena fração do mercado de aditivos químicos (cerca de 20%) (Pacheco-Torgal *et al.*, 2016). No entanto, com o crescimento da conscientização ambiental em relação às emissões dos constituintes dos materiais de construção, a tendência é que o uso de materiais sustentáveis continue a se expandir (Vazquez e Pique, 2016; Stabnikov e Ivanov, 2016).

Esses desafios para tornar a construção civil mais sustentável ultrapassam a fase de produção, chegando até a gestão dos resíduos sólidos. Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022), o Brasil gera anualmente aproximadamente 84 milhões de metros cúbicos de Resíduo de Construção Civil (RCC), sendo apenas 53% deles coletados adequadamente. Para os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), a Pesquisa Setorial (ABRECON, 2022) estima 105 milhões de toneladas por ano. Dentro desses resíduos, concretos, e

plásticos sintéticos se fazem presentes. Suas destinações inadequadas podem estar associadas à falta de rastreabilidade, fiscalização e custos associados à destinação, facilitando a criação de aterros irregulares, e conseqüentemente, ampliando os impactos ambientais envolvidos (BRASIL, 2002, ABRECON, 2022; ABRELPE, 2019).

Diante da representatividade dos impactos desses materiais na produção e descarte, torna-se urgente a integração de práticas sustentáveis em pelo menos uma fase do ciclo de vida da construção. Segundo Silva *et al.* (2024), essas práticas podem envolver: o uso de materiais alternativos como madeira ecológica, eficiência energética e térmica com painéis solares, e sistemas de captação de água pluvial. Para o *World Economic Forum* (2023), uma construção que transite de uma economia linear para uma circular, poderia reduzir significativamente em até 75% as emissões incorporadas aos materiais, principalmente cimento, aço, madeira e plástico (McKINSEY & COMPANY, 2023). Essas medidas, não apenas reduzem os impactos ambientais, como trazem ganhos econômicos e sociais (Silva, Aleffy Gil Pereira Da *et al.*, 2024).

Nesse contexto, uma alternativa promissora para mitigar esses problemas seria a incorporação de biopolímeros na construção civil, nas quais são originados de matéria-prima compatíveis com o modelo de economia circular (Lackner; Mukherjee; Koller, 2023). Visando a redução de materiais convencionais, os biopolímeros são produtos advindo de recursos renováveis, nos quais incluem derivados de polímeros naturais já existentes ou derivados de fermentação de bactérias a partir de outras fontes naturais de carbono como glicose, lactose e xilose (Lackner; Mukherjee; Koller, 2023; Reddy; Ghai; Kalia, 2003).

Segundo Stabnikov e Ivanov (2016), a utilização de bioplásticos biodegradáveis na indústria da construção pode reduzir: o custo de escavação em construções temporárias; o custo de descarte de resíduos da construção; e o consumo de recursos não renováveis, aumentando assim a sustentabilidade ambiental e econômica. Por mais que os custos da produção de alguns desses materiais ainda seja maior do que os baseados em petróleo, o uso de matéria-prima barata, como biomassa, e tecnologias efetivas, podem garantir uma redução desses valores. Ademais, a produção de plásticos de base biológica se encontra em tendente crescimento ao

longo dos anos, chegando em 3 Mt em 2023, o dobro do que foi produzido em 2020 (Plastics Europe, 2024).

## **1.1 Objetivo**

O presente trabalho visa mapear os estudos promissores acerca dos biopolímeros aplicados à construção civil através da revisão sistemática da literatura.

### **1.1.1 Objetivos específicos**

- Aplicar o modelo PICO para estruturar e realizar as buscas em bases de dados consolidadas acerca do tema.

- Garantir que o processo de seleção seja claro e coerente com ajuda do modelo PRISMA, identificando as palavras-chave e os critérios de acordo com a questão da pesquisa.

- Investigar os resultados selecionados, identificar tendências de biopolímeros utilizados, áreas de aplicação e impacto dos estudos.

- Organizar e tornar acessível o conhecimento acerca de uma engenharia civil sustentável, tornando útil e comparável as informações reunidas sobre tais estudos.

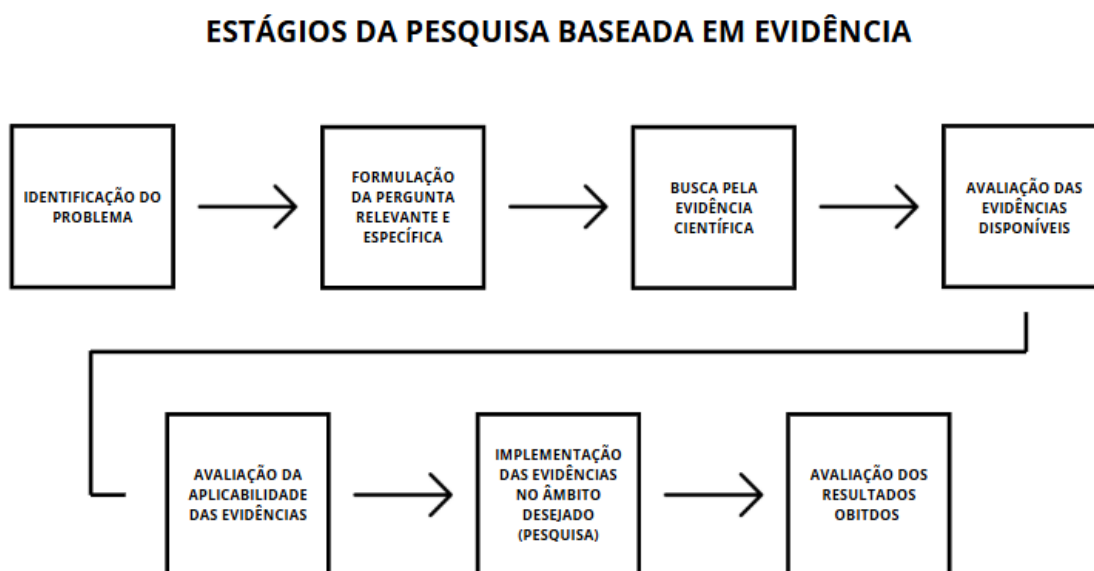
## **1.2 Revisão sistemática da literatura**

Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é um método de pesquisa que visa proporcionar coerência e estrutura aos trabalhos que serão desenvolvidos acerca de uma área do conhecimento, baseando-se em critérios pré-estabelecidos no protocolo inicial. Artigos que realizam revisões da literatura estão entre os mais consultados por leitores de publicações científicas, pois eles trazem um exame de um assunto específico sob diversos aspectos, (Galvão, 2019; Silva & Lafayette, 2024).

Diferente da revisão em narrativa, na qual há uma discussão mais livre acerca da teoria, a RSL é mais formal. Ela inclui detalhadamente a base de apoio das pesquisas, o julgamento do que é apropriado e do que não é, contendo formalidade e rigurosidade

acadêmica (Jahan *et al.*, 2016). Segundo Okoli (2015), existem passos fundamentais para a realização de uma RSL, incluindo: a identificação da questão da pesquisa, definição do protocolo, aplicação dos critérios, realização da busca, a extração de dados, síntese dos estudos e, por fim, a elaboração da revisão.

A realização desses passos está dentro com o que foi descrito por Santos, Pimenta e Nobre (2007) como “Prática Baseada em Evidências”, a qual busca e aplica estratégias de pesquisa que analisam a qualidade dos estudos e os mecanismos de implementação da RSL, como contempla a Figura 1 abaixo. No fluxograma, as técnicas exclusivas à RSL começam na identificação do problema e vão até a avaliação das evidências disponíveis, destacando o quão importante a revisão sistemática é para a prática.



**Figura 1 - Pesquisa Baseada em Evidências. Adaptado de Santos (2007).**

Em suma, a RSL adota passos para examinar o comportamento do tema de interesse diante do cenário científico mundial, selecionando o que é publicado e avaliando o conteúdo contribuído. Porém, apesar de ser mais restrito, a RSL tem sistematizações variáveis. Elas podem ser qualitativas, quantitativas ou mistas (Galvão; Ricarte, 2019). Qualitativa para destacar o conteúdo, quantitativa para destacar padrões e tendências, e mista para ambos. Independente da natureza da RSL, a ajuda de ferramentas para pesquisa fortalece a evidência científica e sua

relevância para com a comunidade acadêmica (Galvão; Ricarte, 2019; Pati; Lorusso, 2018).

Entre as ferramentas disponíveis, há o *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*, conhecido como método PRISMA (2022), que pode ser aplicado para seleção dos artigos em conjunto com as estratégias de buscas predefinidas. Para aumentar a replicabilidade e transparência da ferramenta, foi incluído o fluxograma indicado pelo método que apresenta o fluxo de inclusão e exclusão de artigos para revisão de artigos (Page *et al.*, 2022). As interfaces das bases de dados de pesquisa forneceram informações como título, autores, ano de publicação, revista, periódico, área do conhecimento, resumo e palavras-chave, permitindo a quantificação descritiva das etapas da revisão, conforme ilustrado no fluxograma fornecido no *PRISMA Statement Paper* (Page *et al.*, 2022)

### **1.3 Polímeros utilizados na construção civil**

Considerado como um material revolucionário para produção em escala industrial no século XX, os polímeros podem ser naturais ou sintéticos e são caracterizados por repetições de cadeias de carbonos (monômeros) nas quais também são chamadas de macromoléculas (Billmeyer, 1984). Mas uma vez que boa parte dos monômeros utilizados para sintetizar polímeros - base para produção dos plásticos - são derivados de hidrocarbonetos do petróleo não biodegradáveis, a boa reputação dos polímeros acaba se comprometendo (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Talvez por terem caído na trivialidade do consumo rotineiro de plástico, mas principalmente devido a crescente preocupação ambiental, que associa aos plásticos enorme responsabilidade ao tornarem-se onipresentes na maioria dos ecossistemas do planeta.

A longevidade dos plásticos é o que mais exponencia sua poluição, de acordo com (Barnes *et al.*, 2009) não há tempo determinado para sua decomposição, as estimativas variam de centenas a milhares de anos. Por polímeros sintéticos não degradarem tão facilmente, ao longo do tempo ocorre sua fragmentação em partículas menores que chegam a microplásticos (MPs- partículas menores que 5 mm e maiores que 1  $\mu\text{m}$  (Barnes *et al.*, 2009; Özsoy *et al.*, 2024). É dessa forma que sua presença também impacta o ambiente, seja nos oceanos ou em terra firme, os microplásticos já

tomaram conta também da fauna e da flora, inclusive no organismo humano (Özsoy *et al.*, 2024). Em termos numéricos, entre 1,5 e 6,6 Mt de microplásticos podem estar presentes nos solos em escala global, e o que foi achado de resíduo plástico nos oceanos ultrapassa 12 Mt (Geyer; Jambeck; Law, 2017; Kedzierski *et al.*, 2023).

De acordo com *Plastics Europe* (2024), a indústria do plástico obteve uma produção total de 413,8 Mt em 2023. Os principais polímeros produzidos naquele ano foram Polietileno (PE) de Alta e Média Densidade (PE-HD e -MD), Polietileno de Baixa Densidade (PE-LD e -LLD), Polipropileno (PP), Policloreto de vinila (PVC), Polietileno tereftalato (PET), Poliuretano (PUR) Poliestireno (PS) e Poliestireno Expandido (PS-E) e outros termoplásticos não especificados. Apesar de menor em quantidade, a produção total também inclui plásticos classificados como circular, como reciclados pós consumo e “*biobased*”, a porcentagem de cada um está descrita na Tabela 1 abaixo.

**Tabela 1 - Relação da produção de polímero plástico em 2023.**

<b>Tipo</b>	<b>Quantidade (Mt)</b>	<b>Porcentagem (%)</b>
PE-HD, PE-MD	50,49	12,2
PE-LD, PE-LLD	57,93	14
PP	78,62	19
PVC	52,97	12,8
PET	25,66	6,2
PUR	21,93	5,3
PS, PS-E	21,52	5,2
Outros	64,97	15,7
Plástico Circular	39,52	9,5

Fonte: Adaptado de Plastics Europe (2023).

Materiais poliméricos destinados às construções representam mais de 20% dessa produção, ou seja, mais de 82,8 Mt no ano (Plastics Europe, 2024). No Brasil, a participação da indústria da construção civil no valor econômico gerado pelo consumo de plásticos em 2023 foi de 28,3% (Abiplast, 2023). Esses números revelam a proporção da participação dos polímeros na indústria e na economia. Essa demanda também reflete sobre acessibilidade e aplicabilidade do material, como por exemplo, os mais popularmente conhecidos: PET e PVC.

Com a produção superada apenas pelo PE e PP, o PVC é o polímero mais amplamente utilizado na construção civil (Turner; Filella, 2021). O PVC é leve, durável, de baixo custo, possui propriedades como; resistência química e mecânica, maleabilidade, impermeabilidade e boa aderência (Lewandowski; Skórczewska, 2022). É amplamente utilizado em encanamentos, revestimentos, pisos, cabos, mangueiras, calhas, entre outros materiais (Mnyango; Hlangothi, 2024; Turner; Filella, 2021). Geyer (2017) descreve que o setor da construção civil consome ao menos 69% de todo o PVC produzido. Diante dessa representatividade, o PVC possui um ciclo de vida que impacta tanto o ambiente quanto os seres humanos, com a geração e liberação de químicos tóxicos em sua produção e disposição (Turner; Filella, 2021)

Outros polímeros sintéticos muito utilizados em infraestrutura de engenharia civil contam com Polimetilmetacrilato (PMMA) ou acrílico, Polivinil butiral (PVB), Policarbonato (PC) e Resina Epoxy (Tamošaitienė *et al.*, 2024). As variáveis aplicações desses polímeros vão desde a estrutura até acabamento. PMMA, PVB e PC estão presente em compósitos para painéis translúcidos e vidros (Behúnová *et al.*, 2021; Dayananda Jawali *et al.*, 2008). Também em estruturas para isolamento térmico e elétrico. Eles podem ser portas, janelas, peças de acabamento e decoração. Já as resinas epóxis podem ser utilizadas para reforço de argamassa e no concreto modificado (Rahman; Akhtarul Islam, 2022). Além de atuar como adesivos, ligantes, protetores impermeabilizantes - tanto na construção como na reparação-, melhoram a resistência mecânica e a adesão (Rahman; Akhtarul Islam, 2022; Lima *et al.*, 2012).

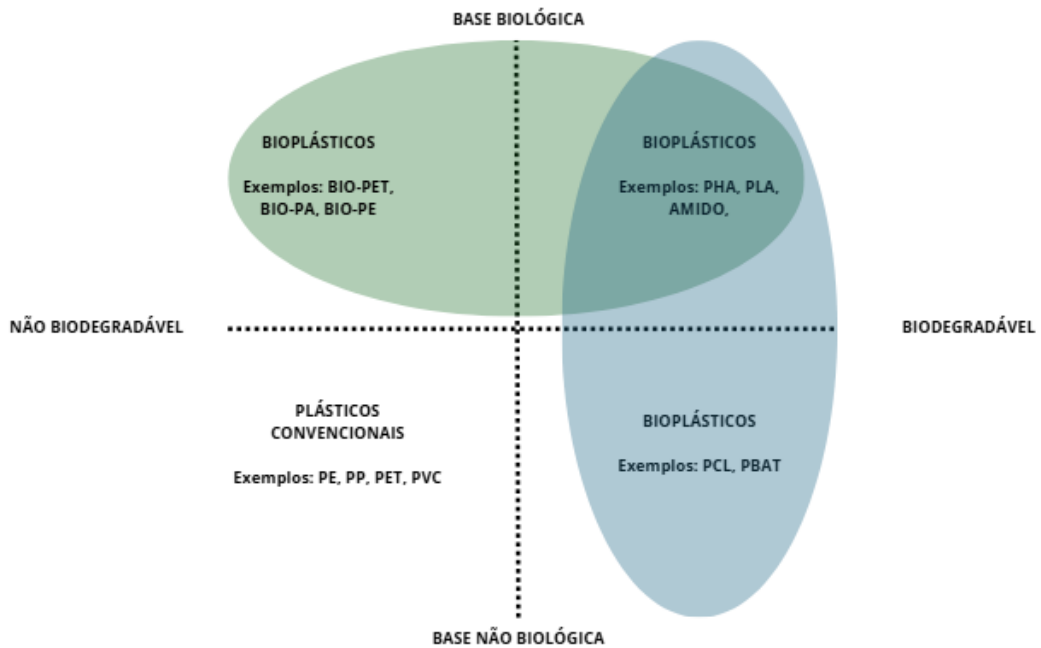
## 1.4 Biopolímeros

A etimologia de biopolímeros, vinda do Grego, significa que são cadeias poliméricas que são originadas a partir da matéria viva (Diogo, 2015; George *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2021). Os polímeros são os macroprodutos das estruturas formadas pelas repetidas cadeias químicas de pequenas partes chamadas monômeros (Diogo, A. 2015). As estruturas químicas dos monômeros podem existir naturalmente, serem sintetizados artificialmente ou serem semiartificial (Varghese *et al.*, 2020). Essa diferenciação influencia outras classificações, como quanto à biodegradabilidade (George *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2021).

A amplitude da existência do biopolímero é devido às diversas possibilidades e formas que cadeias poliméricas tomam na natureza, e como retornam a ela. Ao contrário dos polímeros de fontes não renováveis e não biodegradáveis como o PP e PET, os biopolímeros são baseados em matéria biológica em sua totalidade ou parcialmente, também podendo ser biodegradável ou útil para compostagem (Ravenstijn, 2010).

Essenciais para manutenção da vida no planeta, os polímeros naturais são mais familiares do que a palavra em si soa. Eles podem ser abundantes como a celulose, o biopolímero mais produzido. Em seguida, a quitina, a segunda maior fonte polimérica, são encontradas em exoesqueleto de crustáceos (Negm *et al.*, 2020). E podem ser tão importantes para os humanos quanto o DNA, carboidratos, proteínas e colágeno (Singh *et al.*, 2021; Varghese *et al.*, 2020).

De acordo com Ravenstijn (2010), os biomateriais podem ser facilmente confundidos como necessariamente renováveis e biodegradáveis ao mesmo tempo, mas outras definições como a do *European Bioplastics* (2024) reforçam que as denominações podem ser independentes. A Figura 2 abaixo exemplifica as diferentes denominações pelos diferentes quadrantes do plano cartesiano. Assim, há os biopolímeros de base biológica e não biodegradáveis, como os Bio-PET; os biopolímeros biodegradáveis e não renováveis, como o Álcool Polivinílico (PVA); e os de base biológica e biodegradáveis como os Polihidroxialcanoatos (PHA).



**Figura 2 - Sistema de classificação de materiais para bioplástico.**

**Fonte: Dados Adaptados da Classificação Oficial da European Bioplastics (EUBP).**

Além das plantas e seres humanos, os biopolímeros também são produzidos como forma de sobrevivência por outros grupos de seres vivos como bactérias e algas (Devadas *et al.*, 2021; Hassan; Bai; Dou, 2019). Aplicadas a um estresse, as bactérias utilizam e sintetizam as fontes de carbono para assegurar seu ciclo de vida, gerando então os biopolímeros (Martins *et al.*, 2014). Com isso, dentro do conceito de biodegradável e/ou de base biológica, a Tabela 2 abaixo descreve resumidamente as comuns aplicações dentre os principais biopolímeros biodegradáveis conhecidos.

Os biopolímeros foram classificados pelo tipo: naturais ou sintetizados pelo homem. Em seguida, a tabela divide pela característica química e finalmente, pela origem vegetal, animal, ou outros - bactérias, algas ou fungos. Pois essas variações se relacionam diretamente com a fonte de matéria prima, suas propriedades, aplicações comuns na indústria e potencial sustentável.

**Tabela 2 - Classificação de alguns dos principais exemplos de biopolímeros biodegradáveis e suas aplicações. (Singh *et al.*, 2021; Imeson, 2009)**

Tipo	Característica	Origem	Exemplos	Aplicações	Referências	
Naturais	Polissacarídeo	Vegetal	Celulose	Indústria do papel e têxtil; espessantes; estruturas leves e móveis (fibras vegetais)	(Shah <i>et al.</i> , 2016; Lavanya <i>et al.</i> , 2011; Singh <i>et al.</i> , 2021)	
			Amido	Indústria alimentícia e do papel, condução de fármacos, engenharia de tecidos, diagnóstico de imagem, filmes e sacolas biodegradáveis	(Sarder <i>et al.</i> , 2022)	
			Goma Guar	Indústria alimentícia, encapsulamento e condução de fármacos, indústria papel e têxtil	(Gupta; Variyar, 2018; Tahmouzi <i>et al.</i> , 2023a; Wang, Tao <i>et al.</i> , 2016)	
		Animal	Quitina	Emulsificantes, revestimento de sementes, curativos e implantes, biossensores, filtrador de metais pesados	(Desbrières; Guibal, 2018; El Knidri <i>et al.</i> , 2018; Taye <i>et al.</i> , 2025)	
		Bactéria	Goma Xantana	Indústria alimentícia, embalagens biodegradáveis comestíveis	(Imeson, 2009)	
			Goma Agar	Indústria alimentícia, embalagens biodegradáveis comestíveis, sensores eletrônicos, condução de fármacos	(Imeson, 2009; Kumar; Yadav; Raj, 2024; Nie <i>et al.</i> , 2023)	
		Algas	Alginatos	Indústria alimentícia, engenharia de tecidos, condução de fármacos, curativos	(Varghese <i>et al.</i> , 2020)	
	Carrage-nina		Indústria alimentícia e farmacêutica, filmes biodegradáveis comestíveis, condução de fármacos, regeneração de tecidos	(Li, Liang <i>et al.</i> , 2014; Necas; Bartosikova, 2013; Sedayu; Cran; Bigger, 2019)		
		Proteínas	Vegetal	Glúten	Indústria alimentícia, encapsulamento, embalagens, adesivos	(Domenek <i>et al.</i> , 2004; Zhang <i>et al.</i> , 2023)
			Colágeno	Cirurgias reconstrutivas, curativos, condução de fármacos e gelatinantes e suplementos	(Varghese <i>et al.</i> , 2020)	
Animal	Seda		Aplicações têxteis e médicas: engenharia de tecidos, curativos, reparos cartilagosos e suturas	(Varghese <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2022)		
	Queratina		Cosméticos, regeneração de tecidos, curativos e filmes biodegradáveis	(Donato; Mija, 2019; Rouse; Van Dyke, 2010)		
	Outros	Vegetal	Casca da Laranja	Agropecuária, fertilizante, biocombustíveis, fármacos e cosméticos	(Tahir <i>et al.</i> , 2023)	
Lignina			Resinas, adesivos, compósitos biodegradáveis, biocombustíveis	(Mastrolitti <i>et al.</i> , 2021; Varghese <i>et al.</i> , 2020)		

Tipo	Característica	Origem	Exemplos	Aplicações	Referências
Sintéticos	Poliésteres	Vegetal	Poliuretano vegetal (PU)	Espumas, resinas, revestimentos, adesivos, tintas, embalagens biodegradáveis	(Sawpan, 2018; Sun, Xiuzhi Susan, 2013)
			Ácido Polilático (PLA)	Filmes, utensílios e embalagens biodegradáveis, revestimento elétrico	(Naser; Deiab; Darras, 2021; Sanyang <i>et al.</i> , 2016)
		Bactéria	Polihidroxi - alcanoatos (PHA)	Engenharia de tecidos, suturas, condução de fármacos, filmes e embalagens, biossensores, envelopamento de sementes	(Kaniuk, L.; Stachewicz, U, 2021; Naser; Deiab; Darras, 2021)
		Petróleo	Álcool polivinílico (PVA)	Filmes e embalagens biodegradáveis, tratamento d'água, biomedicina e fármacos	(Dallaev <i>et al.</i> , 2025; Faria; Vercelheze; Mali, 2012)

Diante da Tabela 2 acima, os polímeros naturais compõem a maior parte dos biopolímeros, e por serem de origem biológica naturalmente, como o amido, as gomas e o PHA, são materiais biodegradáveis, biocompatíveis, não-tóxicos e muito versáteis (Singh *et al.*, 2021; Varghese *et al.*, 2020). Os polímeros naturais podem ser da família dos carboidratos polissacarídeos, proteínas ou dos ésteres. Essa classificação da natureza química, apesar de independentes, integra origem diferentes (Singh *et al.*, 2021; Varghese *et al.*, 2020).

Para a indústria do papel, a celulose é o principal biopolímero base, tendo a lignina como subproduto (Sun *et al.*, 2013). A reutilização da lignina também é amplamente estudada por ser acessível com custo relativamente baixo e propriedades hidrofóbicas que conferem maior resistência à umidade (Varghese *et al.*, 2020). Outras fibras vegetais que possuem celulose e lignina, como os bambus, são usadas desde muito tempo para estruturas leves e que atualmente também compõe estudos de compósitos poliméricos (Lavanya *et al.*, 2011). Kumar *et al.* (2024) fabricou e estudou compósitos de fibra de bambu com resina epóxi para painéis de revestimentos.

O amido, que também pode ser aplicado como ligante na indústria do papel, é um biopolímero com carga nutritiva, muito utilizada em alimentos (Sun *et al.*, 2013). A biocompatibilidade, de acordo com (Lackner; Mukherjee; Koller, 2023) é alcançada quando a substância interage com tecidos vivos sem causar danos ao sistema biológico. Por também possuir essa habilidade, o amido também é muito aplicado na

indústria farmacêutica como envelope de fármacos e liberação controlada dos ativos (Sarder *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2013). O principal subproduto da indústria do amido é o glúten, proteína separada da farinha, além de polímero acessível, é muito utilizado na indústria alimentícia e farmacêutica como agente de encapsulamento (Ni *et al.*, 2023).

Assim como o amido e o glúten, a goma guar, goma xantana, goma ágar, os alginatos e as carrageninas, compartilham a similaridade quanto à aplicação em indústria farmacêutica, especialmente como veículos na condução de fármacos. Apesar da similaridade, esses biopolímeros possuem origens diferentes: goma guar é originado de sementes *Cyamopsis tetragonolobus*, a goma xantana a partir de bactérias *Xanthomonas*, já os alginatos, goma ágar e as carrageninas a partir de algas marinhas (Imenson 2009; Varghese *et al.*, 2020; Sedayu *et al.*, 2019). Além das aplicações farmacêuticas, esses biopolímeros também são comumente utilizados na indústria alimentícia como espessantes, estabilizantes e gelatinantes.

A goma guar e a goma xantana, por exemplo, são muito comuns em produtos lácteos, como espessantes e estabilizantes de requeijão, iogurtes e pudins (Imeson 2009). Tahmouzi *et al.* (2023), por exemplo, defende que a goma guar possui viscosidade em meio aquoso oito vezes melhor que outras gomas e ainda pouca quantidade é eficaz, deixando-a ainda mais econômica. No geral, os biopolímeros podem ser usados com as mesmas funções, mas em quantidades diferentes em produtos diferentes, desde alimentos a cosméticos. Por exemplo, alginatos e carrageninas podem atuar como emulsificantes tanto em molhos quanto em pastas de dente (Varghese *et al.*, 2020, Imenson 2009; Sedayu *et al.*, 2019).

Outros polissacarídeos também se destacam, a quitina é uma proteína animal natural abundante advinda de crustáceos, como camarão e caranguejo. Anualmente se produzem cerca de 8 milhões de toneladas de resíduo de crustáceos ricos em quitina (Ngasotter; Sampath; Xavier, 2022). Suas características únicas de aminopolissacarídeo estáveis também são biodegradáveis, biocompatíveis e antioxidantes (Ngasotter *et al.*, 2022; El Kinidri *et al.*, 2018). A quitosana é sua principal derivação, na qual a quitina passa por processo de desacetilação em condições alcalinas, tornando o polímero solúvel em meio ácido (Daraghmech *et al.*, 2011; Rinaudo, 2006).

Ambas as aplicações são muito parecidas e com custo-benefício alto e incluem: indústria alimentícia, agricultura, biomedicina, suturas e curativos. Entretanto, a quitosana por ser mais solúvel, é mais versátil do que a quitina e preferida em aplicações ambientais. Por exemplo, no contexto de tratamentos de efluentes, a quitina é mais utilizada com objetivos físicos, como retenção de partículas; já a quitosana mais como agente químico, como adsorvente de metais pesados (Abdou; Nagy; Elsabee, 2008; El Knidri *et al.*, 2018; Rinaudo, 2006).

A aplicação em filme e embalagens comestíveis também se estende dentre diferentes biopolímeros. Embalagens biodegradáveis de PLA e PHA já podem ser encontrados no mercado em alguns países, muito devido as propriedades físicas tão comparáveis aos plásticos não biodegradáveis (Saba *et al.*, 2017; Sedayu; Cran; Bigger, 2019). O PLA é muito atrativo pois, além de ser polimerizado a partir da fermentação de biomassa, é versátil, biocompatível, biodegradável, termoplástico consideravelmente estável, com propriedades físicas comparáveis e superiores aos polietilenos e polipropilenos (Bavaliya *et al.*, 2024; Saba *et al.*, 2017). Características similares são dadas para o PHA, na qual são extraídos da fermentação de biomassa de bactérias, acumulados para estoque e sintetizada para chegar na forma dos paletes (Ilyas *et al.*, 2020). PLA e PHA são amplamente usados como bioplásticos, mas o PHA, de acordo com Stabnikov e Ivanov (2016) é o bioplástico mais disponível para indústria da construção.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2022), os poliuretanos biodegradáveis (PU vegetal) são resinas que possuem propriedades elastoméricas e termoplásticas de acordo com sua síntese. O PU vegetal originado da mamona vem ganhando destaque por sua acessibilidade e custo-benefício e é apenas sintético devido aos processos químicos para polimerização do óleo de rícino. Apesar da sua industrialização, - que requerer segurança para não inserir aditivos tóxicos como isocianato - os polióis à base de mamona são biobaseadas e biodegradáveis (Rayung; Ghani; Hasanudin, 2024). Eles são muito utilizadas na biomedicina como material adesivo e implantes, resinas adesivas para painéis, e espumas (Sawpan, 2018; Sun, Xiuzhi Susan, 2013).

Comparados com outros biopolímeros como carragenina, goma ágar e amido, os poliésteres podem ser mais eficientes para embalagens, já que esse filmes, como cita Mostafavi e Zaiem (2020) sobre o ágar, são relativamente pobres em estabilidade térmica, elasticidade e barreira de gás. Para melhorar tais propriedades o que muito se faz é misturar os biopolímeros com outros materiais. A mistura de dois ou mais polímeros é comum para elevar propriedades, efeitos, durabilidade e expandir a utilização desses novos materiais (Sarder *et al.*, 2022; Bavaliya, 2024).

Sanyang *et al.*, (2016) combinou amido da cana com PLA para desenvolvimento de filmes biodegradáveis, materiais verdes como substituintes plásticos, que mostraram ter melhor resistência à tração, permeabilidade e barreira d'água, do que filmes somente com amido. Embalagens descartáveis biodegradáveis foram propostos pelo estudo de Hosokawa *et al.*, (2016), com compósitos elaborados de derivados de PHA e fibras naturais de sisal e coco. Os resultados mostraram que as fibras não melhoraram os produtos comparados com puro PHA, mas diminuíram o custo do material. A formação de compósitos também é mencionada por Li *et al.* (2021), que apesar do amplo uso de biopolímeros como a carragenina e goma xantana na produção de materiais de impressão 3D, a incorporação de mais de um biopolímero traria efeitos positivos no reforço do material.

Outro produto de impressão 3D, filamentos de celulose microcristalina com base de cimento foram estudados por Long *et al.* (2019), proposto para a impressão de compósitos sustentáveis. Além de obterem reologia, capacidade de construção e resistências adequadas para impressão 3D, obtiveram impactos ambientais benéficos. As argamassas contendo 1% de celulose microcristalina indicaram poder reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 7%.

Outros estudos também enxergam o potencial dos biopolímeros em materiais de construção. O livro "*Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*" (2016) destaca algumas funcionalidades. Dentre eles: biopolímeros como barreiras verdes, tintas e revestimento, aditivos de misturas cimentícias, como plastificante, potencializador de hidratação e aditivo de reparo. Eles também podem ser utilizados como geotêxtis, geomembranas e estabilizador de solo sustentável (Pacheco-Torgal *et al.*, 2016; Stabnikov e Ivanov, 2016).

Mais adiante, Boukhatem, Bouarab, Yahia, (2021); González-Aviña *et al.* (2024) e Ortiz-Álvarez *et al.* (2021) investigaram o uso de biopolímeros como modificador de viscosidade em misturas de materiais à base de cimento, demonstrando ganhos de trabalhabilidade e estabilidade. Além disso, também há um crescente interesse e aplicação prática dos geopolímeros como ligantes em concreto (Srividya *et al.*, 2022). Apesar de serem uma subclasse dos materiais ativados de forma alcalina - que podem ser sintetizados a partir de subprodutos cinzas volantes e a escória de alto-forno -, os concretos geopoliméricos são uma alternativa eficaz dos cimentos convencionais como Cimento Portland (Srividya *et al.*, 2022).

Geopolímeros também se destacam em estudos atuais para aplicação em técnicas de melhoramento de solo. Moazami *et al.*, (2025), estudou a aplicação de geopolímeros de resíduo de carbureto de cálcio com pó de vidro reciclado, para melhoria de leitos rodoviários. O geopolímero melhorou significativamente a capacidade de carga em comparação com o solo não tratado e demonstram a eficácia do cimento geopolimérico como uma alternativa sustentável, redutora de custos comparados com tratamentos tradicionais.

Com múltiplas combinações possíveis descritas por Dallaev *et al.* (2025), os compósitos biopoliméricos permitem o aprimoramento de materiais em suas propriedades, custo e biodegradabilidade, fortalecendo os biopolímeros como possíveis soluções inovadoras e sustentáveis para a substituição de materiais convencionais. Materiais e métodos biotecnológicos inseridos na construção civil oferecem benefícios econômicos e ambientais significativos em relação às opções tradicionais, sendo considerado vantajoso (Pacheco-Torgal *et al.*, 2016; Stabnikov e Ivanov, 2016). Assim como a produção de bioplásticos, que cresceu 16% entre 2022 e 2023, também vêm aumentando os estudos que buscam inserir de forma efetiva os conceitos de sustentabilidade na construção civil (Plastics Europe, 2023). Na presente pesquisa, pretende-se aprofundar a investigação sobre os potenciais e aplicações dos biopolímeros no setor da construção civil.

## 1.5 Potencial sustentável da construção civil contemporânea

Diante da atual ênfase do impacto ambiental da construção civil, há um interesse global em alinhar essa indústria a práticas sustentáveis. Entretanto, apesar do ideal, a adoção efetiva da economia circular continua pouco representativa, considerando que somente 2% do investimento global em P&D da construção civil é destinado a alternativas sustentáveis (GCCA, 2024). Esse fato evidencia que a prática de uma construção sustentável é cada vez mais urgente, necessitando integração dos modelos presentes e futuros. Nesse contexto, de acordo com Farias e Marinho (2020), a avaliação de uma construção sustentável se apoia em três parâmetros primordiais: o parâmetro ambiental, funcional e econômico.

A Ellen MacArthur Foundation (2021) cita o trio de estratégias que interceptam esse conjunto de indicadores de sustentabilidade: melhorar o uso das construções existentes; *design* de novos espaços que eliminam resíduos; reutilizar e reciclar Materiais. Esse trio, implementado juntos, colaboram para alcançar uma construção inserida na economia circular. Além dessa proposta, Silva *et al.* (2024) também inclui estratégias parecidas como alguns dos passos cruciais para alcançar sustentabilidade: a utilização de materiais sustentáveis – que fluem entre reutilização, redução e reciclagem; a otimização do consumo energético e de água; e a gestão eficiente de resíduos.

Na prática, a empresa holandesa *StoneCycling* já usou 15 t de resíduos de demolição em tijolos para fachada de um prédio (Ellen MacArthur Foundation, 2023). Com células fotovoltaicas, edifícios como o *The Edge*, um dos edifícios mais sustentáveis do mundo, geram 110% da energia demandada (McKinsey, 2023).

Na produção de tintas, em que a maioria de seus aglomerantes são petroquímicos, os biopolímeros possuem potencial de diminuir o impacto ambiental das tintas, diminuindo sua toxicidade, além de providenciar excelente adesão, características de formação de filmes, melhora na rigidez, no tempo de cura e compatibilidade com outros materiais como poliésteres, poliuretanos e resinas epóxis (Karak, 2016). Essa abordagem resulta em materiais híbridos que não apenas mantêm os benefícios ecológicos, mas também usam da tecnologia para exibirem alta resistência térmica e química – apesar de baixa resistência mecânica em condições

extremas - e até atividade antibacteriana quando modificados com nanopartículas de prata (Karak, 2016).

A qualidade e durabilidade desses produtos da construção também não podem ser isolados, uma vez que implica na diminuição de reparos e em sua longevidade (Farias; Marinho, 2020). Para tornar mais comum essas práticas, há a necessidade de maior incentivo governamental, capacitação técnica dos profissionais e melhores ferramentas de projeto. Políticas públicas robustas e incentivos fiscais podem desempenhar um papel significativo na promoção dessas práticas (Silva *et al.*, 2024).

Chen *et al.* (2023) ressalta que o uso de materiais sustentáveis na construção, como bioplásticos, resíduos e bioconcretos é uma forma eficaz de diminuir a pegada de carbono das construções. Assim, o potencial sustentável mencionado no seguinte trabalho explora a redução ou da substituição do uso de materiais convencionais na construção civil por alternativas com biopolímeros. Mas para isso, a transformação está atrelada à amplas variáveis que se manifestam na ética, na economia, no planejamento e nas prioridades da obra. Essas facetas precisam dialogar com os estudos vigentes sobre materiais inovadores. Assim, as evidências abordadas nesse estudo avaliam a amplitude das possíveis soluções verdes dentro da construção civil.

## **2. METODOLOGIA**

Como definido no conceito de revisão científica, independente da abordagem adotada, é de suma importância a definição clara da questão do problema para início de pesquisa. De acordo com a Prática Baseada em Evidências (Santos, 2007), uma vez que a questão de pesquisa é formulada, o próximo passo então é busca pelas evidências, para depois avaliar a aplicação do que foi elegível, como resumido na Figura 1.

Para então conduzir da pesquisa, a questão do problema foi levantada de acordo com o processo PICO (Problema, Intervenção, Comparação e Resultado), apresentada na Tabela 3. Nela se apresenta os fatos para o processo de criação da pergunta. Culminou-se, então, na proposta: “Quais são os estudos e aplicações dos

biopolímeros para uma Construção Civil sustentável, e no contexto da engenharia contemporânea, quais são suas limitações e prospecções?”.

**Tabela 3 - Avaliação da questão do problema através do processo PICO.**

Problema	Uso exacerbado de polímeros não renováveis na construção civil.
Intervenção	Polímeros desenvolvidos a partir de resíduos, matéria-prima renovável, reutilizada ou reciclada, que emitem menos GEE.
Comparação	Materiais poliméricos sintéticos, plásticos e resinas sintéticas, agregados convencionais, cimento, já tradicionalmente utilizados.
Resultado	Materiais à base de biopolímeros que reduzem o consumo de matérias-primas, diminuem emissão de GEE e impactos ambientais, possibilitam substituição de materiais convencionais por alternativas equivalentes ou superiores.

Partindo para o acesso às evidências, o portal de acesso escolhido foi Periódicos CAPES, garantindo abrangência, confiabilidade e acessibilidade. A partir do portal de acesso, *Web of Science* e *Scopus* foram as duas bases de dados selecionadas para elevar a qualidade de revisão, pelo reconhecimento científico e internacionalização, além de possuírem interfaces online que permitissem a busca de dados pelo método Booleano e facilitar a filtragem dos critérios na busca.

Com o problema e as bases de dados definidas, foram realizadas três estratégias de busca, utilizando as principais palavras-chave que se relacionam à questão principal do tema, que inclui: *Biopolymer*, *Civil Construction*, *Civil Engineering* e *Construction Material*. Em vista de refinar a busca, a pesquisa foi realizada por meio da combinação de palavras-chave com operadores booleanos. Para a combinação, empregou-se os operadores *AND*, *OR* ou *NOT*, que seguem a lógica de pesquisa Booleana de mapeamento com inclusão, união ou exclusão de termos (Galvão; Ricarte, 2019; Santos; Pimenta; Nobre, 2007). Assim, a estratégia de busca foi adotar as três seguintes combinações booleanas: “*Biopolymer AND Civil AND Construction*”; “*Biopolymer AND Civil AND Engineering*”; e “*Biopolymer AND Construction AND Material*”.

A Figura 3 apresenta a quantificação registrada em cada estágio da pesquisa, conforme as diretrizes e diagramas indicado pelo modelo PRISMA de 2020 (Page *et al.*, 2022). Com os primeiros resultados, foram identificados 507 estudos na base Scopus e 1.238 na *Web of Science* (Clarivate), por meio de três buscas distintas mencionadas acima.

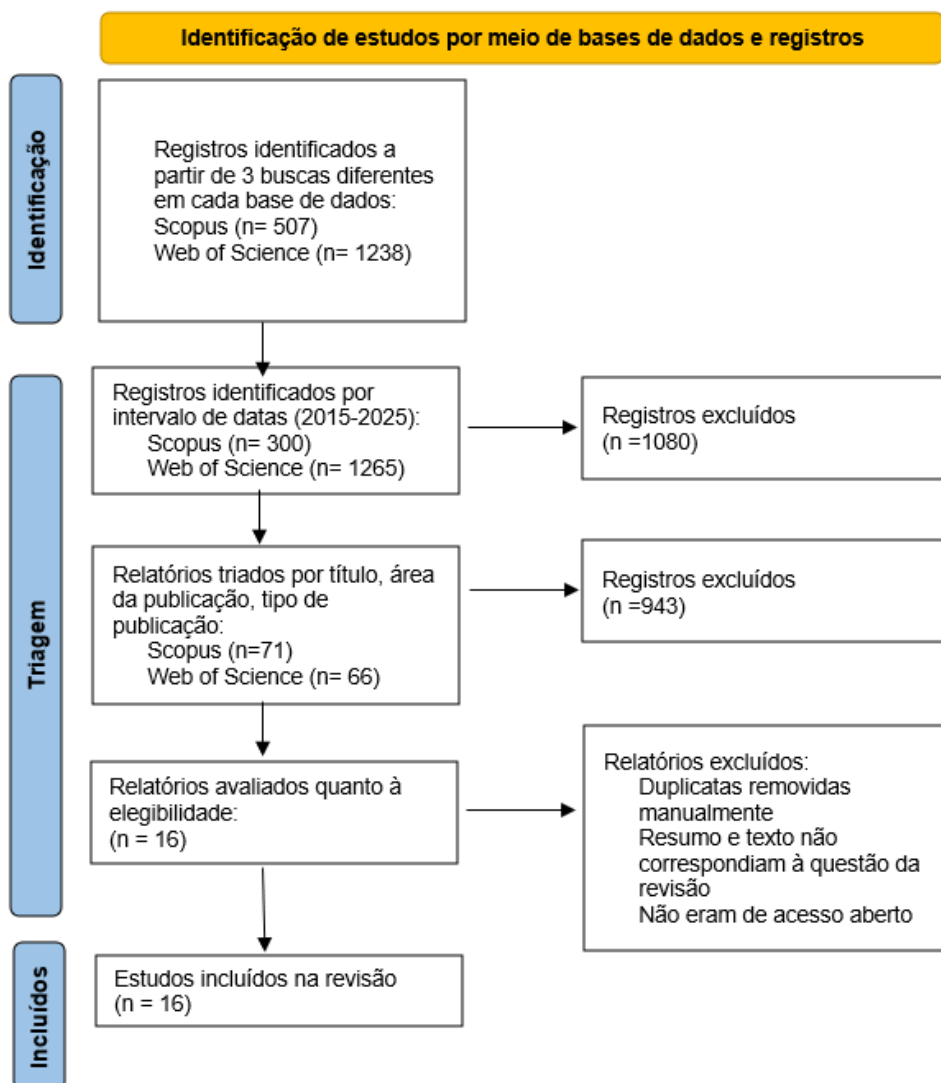


Figura 3 - Fluxograma modelo PRISMA 2020. Adaptado de Page *et al.* (2022).

A triagem se iniciou através do ano de publicação, na qual foram filtrados os documentos de 2015 a 2025, atualizando para 1.565 resultados. Em seguida, publicações e títulos foram filtrados pelas áreas de conhecimento de interesse; foram excluídas áreas como medicina, farmácia, engenharia de tecidos, engenharia elétrica,

embalagem de alimentos, tratamento de água, agricultura e microbiologia. Nessa etapa, também foram filtrados os tipos de arquivos, selecionando somente artigos publicados em revistas, excluindo arquivos tipo revisão e Conferência ou Congresso, levando para 137 o número de resultados. É relevante mencionar a viabilidade da quantificação exata nas filtragens, de cada exclusão, foi possível apenas quantificar após todos esses filtros terem sido aplicados.

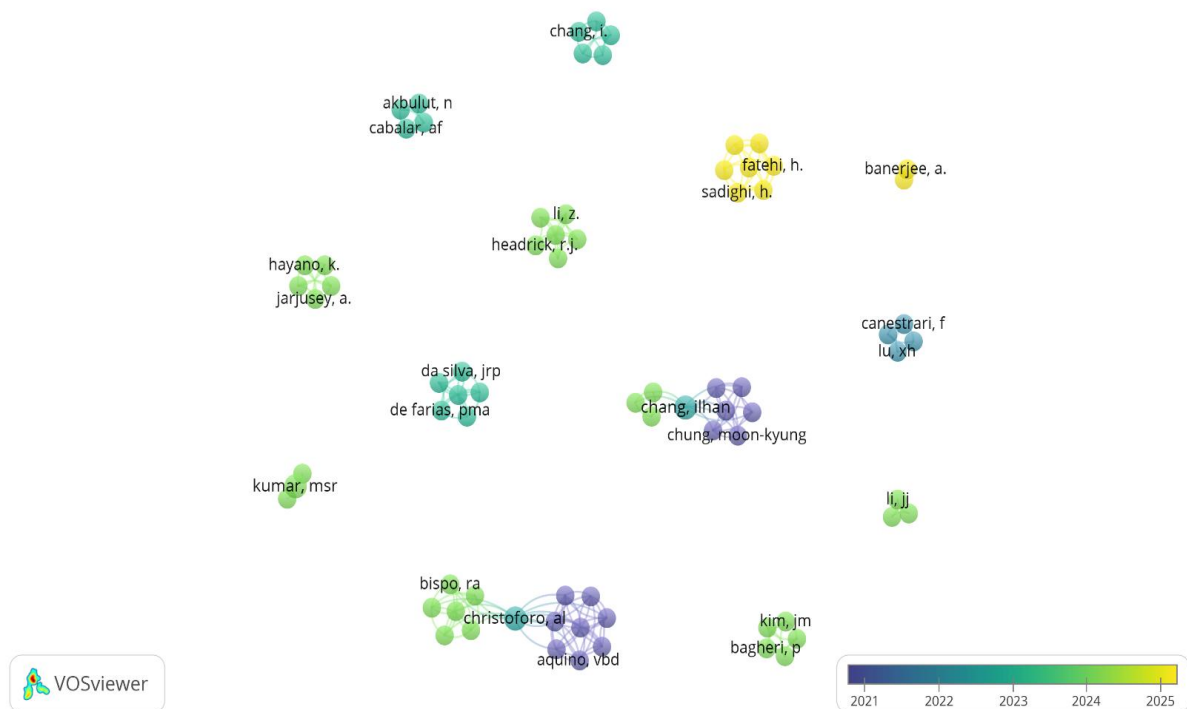
Por fim, as duplicatas foram removidas manualmente. Apesar do modelo PRISMA (2020) realizar a exclusão de duplicatas primeiro, as interfaces das plataformas levaram o usuário a aplicar, primeiro, os filtros mencionados. Essa inversão, no entanto, não impactou na rastreabilidade dos passos seguintes. Juntamente à exclusão das duplicatas, os escopos e resumos das publicações foram verificados e a acessibilidade do material. Assim, os 16 resultados, encaixados no problema dessa revisão, foram selecionados elegíveis para análise qualitativa aplicadas à essa pesquisa.



chave se torna um nó, cujo tamanho é influenciado pela frequência que aparece. Da mesma forma para as redes de conexões, que são representadas pelas linhas, suas espessuras e quantidade aumentam conforme as correlações entre as palavras de um mesmo artigo aumentam. A partir disso, formam-se os *clusters*, representados pelos agrupamentos de diferentes cores desses nós e redes de conexões, organizados de acordo com similaridades e força de associação entre as palavras-chave.

Portanto, o mapa permite visualizar possíveis tendências através da variação dos nós na amostra da pesquisa, como exemplo “pegada de carbono”, “resíduo”, “sustentabilidade”, “desafios” se conectam pelo menos com dois *clusters*, demonstrando interesses mútuos nessas produções acadêmicas. Isso indica provável surgimento de novos estudos no tema de sustentabilidade e economia circular para diminuição da pegada de carbono. Apesar de alguns termos terem poucas conexões ou local mais isolado no mapa, isso não significa que são irrelevantes. Palavras como “adesivos” aparecem mais consolidados em *cluster* à direita com menos conexões, mas isso se relaciona mais com a falta de similaridade com outros termos da amostra. Nesse caso, “adesivos” apresenta conexão com o termo “resíduo”, podendo ser identificado como uma subárea no contexto dessas ocorrências simultâneas.

Em seguida, a Figura 5 abaixo contempla as coocorrências dos autores e as relações entre as produções nesse contexto. Nesse mapa, é possível observar que dois autores – Chang e Christoforo - participam de ao menos dois trabalhos diferentes (Cazella *et al.*, 2024; Fatehi *et al.*, 2024; Kwon *et al.*, 2023; Seo *et al.*, 2021; Silva, VU *et al.*, 2021). Além disso, Valli e Kumar (2024) possuem dois trabalhos independentes nos artigos selecionados, apesar de não ter sido destacado isso no mapa. Por mais independentes que sejam os outros autores, suas pesquisas convergem para um mesmo tema de biopolímeros como mostrado na Figura 4, identificando uma conexão ao menos de ideias. Ainda na Figura 5, há uma escala que distribui a cor aos nós de acordo com o ano de publicação do artigo. Os autores com publicações mais recentes se aproximam do amarelo, os mais azulados representam os mais antigos



**Figura 5 - Mapeamento da Coocorrência dos Autores.**

Ambas as análises, também complementares à RSL, permitem orientar e comparar as linhas de pesquisa de acordo com os nós, como exemplo da lignina com menos conexões com a termos de geotecnia do que a goma xantana, observada pela proximidade dos agrupamentos, mas não significa que a lignina não é importante na pesquisa. Há também alguns temas que possuem termos parecidos em diferentes clusters, como “solos tratados com biopolímeros” e “solos tratados”, apesar de parecidos estão com cores e tamanhos diferentes. Isso possivelmente acontece pelos diferentes contextos que o algoritmo aglomera os termos, com ligações mais fortes em certos agrupamentos mais similares do que outros.

Já na Figura 6 abaixo, apresenta o mapa de correlação dos países das instituições dos artigos selecionados. O cluster central formado pela Austrália, Coréia do Sul, China, EUA e Irã, mostra que são líderes nas colaborações internacionais, observado pela proximidade dos nós. Devido ao tamanho dos nós, Coréia do Sul e EUA lideram como as mais frequentes dentre as publicações. Os outros países em azul, tiveram pesquisas com menos integração internacional, sugerindo maior independência nas pesquisas. Por outro lado, o Brasil e a Índia, também tiveram seus nós um pouco

maiores por terem mais volume de publicações, três e duas vezes, respectivamente. Seguidos por Turquia, Japão e Itália que representaram somente um artigo de pesquisa independente.

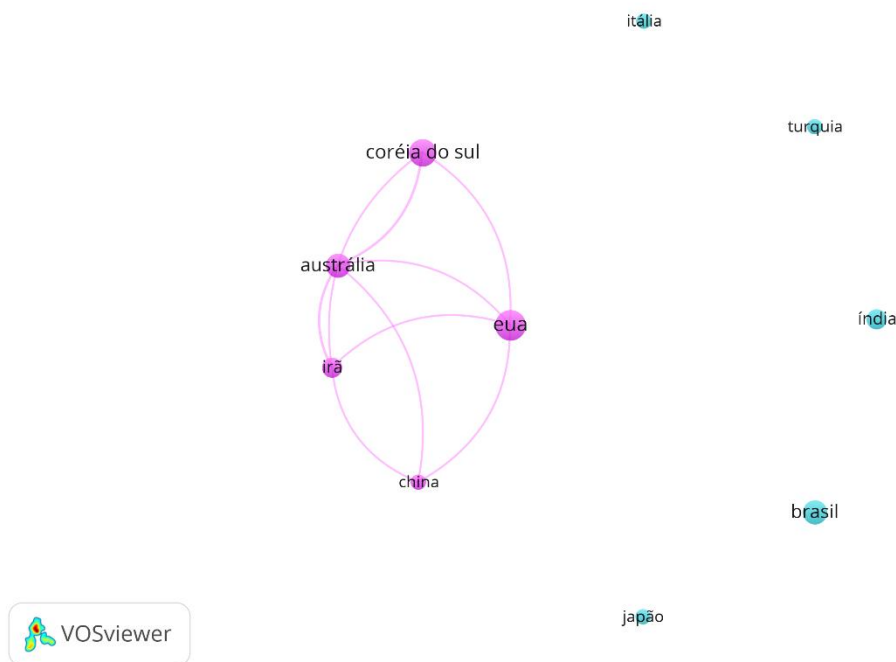


Figura 6 - Mapa de correlações dos países das instituições dos autores.

### 3.2 Análises qualitativas

A seguir, na Tabela 4 abaixo, estão apresentadas as revistas, ano, instituição, editora e a língua de publicação dos artigos dessa revisão. Os autores e seus países também foram levantados. Percebe-se a repetição somente de dois autores (Valli; Kumar, 2024) e a repetição somente de duas revistas. As mais publicadas foram: *Construction and Building Materials* e *Polymers*, respectivamente. Vale mencionar também que somente um artigo em português foi avaliado, tendo a língua inglesa como a predominante.

Além disso, pode-se resumir que países orientais lideram em quantidade as publicações selecionadas para esse estudo sobre biopolímeros aplicados à construção civil. Isso reflete a maior busca dessa região por alternativas sustentáveis com suas pesquisas publicadas em acesso aberto. Considerando as instituições dos primeiros autores, é possível notar o destaque de certas Universidades mesmo com diferentes autores no mesmo país, como a Universidade de Griffith na Austrália.

As Editoras nas quais os artigos fazem parte, há a predominância da Elsevier, seguida pela MDPI, duas grandes editoras internacionais. Quanto à interdisciplinaridade, através da variedade de revistas publicadas, desde as áreas de engenharia de materiais a revistas de sustentabilidade, é possível perceber redes interdisciplinares, destacando a importância da união dessas disciplinas para chegar em resultados mais abrangentes e que conversam mais com diferentes contextos.

**Tabela 4 - Informações gerais sobre os artigos selecionados para a revisão sistemática.**

<b>Autor(es)</b>	<b>Ano</b>	<b>Revista</b>	<b>País</b>	<b>Instituição*</b>	<b>Editora</b>	<b>Língua</b>
Bagheri <i>et al.</i>	2024	<i>Polymers</i>	Austrália	Griffith University	MDPI	Inglês
Cabalar <i>et al.</i>	2023	<i>Sustainability</i>	Turquia	Gaziantep University	MDPI	Inglês
Cazella <i>et al.</i>	2024	<i>Journal of Cleaner Production</i>	Brasil	São Paulo State University	Elsevier	Inglês
Silva <i>et al.</i>	2023	<i>Matéria</i>	Brasil	Universidade Federal de Pernambuco	UFRJ	Português
Fatehi <i>et al.</i>	2024	<i>Construction and Building Materials</i>	Austrália	Griffith University	Elsevier	Inglês
Gaudenzi <i>et al.</i>	2022	<i>Materials and Structures</i>	Itália	Università Politecnica delle Marche	Springer Nature	Inglês
Ghosh & Banerjee	2025	<i>Journal of Materials in Civil Engineering</i>	USA	South Dakota State University	American Society of Civil Engineers (ASCE)	Inglês
Jarjusey <i>et al.</i>	2024	<i>Results in Engineering</i>	Japão	Yokohama National University	Elsevier	Inglês
Kwon <i>et al.</i>	2023	<i>Construction and Building Materials</i>	Coréia do Sul	Myongji University	Elsevier	Inglês
Li <i>et al.</i>	2024	<i>Construction and Building Materials</i>	USA	Jackson State University	Elsevier	Inglês

Miao <i>et al.</i>	2024	<i>Cleaner Materials</i>	USA	Stanford University	Elsevier	Inglês
Seo <i>et al.</i>	2021	<i>Construction and Building Materials</i>	Coréia do Sul	Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology	Elsevier	Inglês
Silva <i>et al.</i>	2021	<i>Construction and Building Materials</i>	Brasil	Universidade Federal de São Paulo	Elsevier	Inglês
Valli & Kumar	2024	<i>High Temperature Materials and Processes</i>	Índia	Noorul Islam Centre for Higher Education	De Gruyter Brill	Inglês
Valli & Kumar	2024	<i>Materials Research Express</i>	Índia	Noorul Islam Centre for Higher Education	IOP Publishing Lt	Inglês
Wang <i>et al.</i>	2025	<i>Polymers</i>	China	Hohai University	MDPI	Inglês

*Nota:*

1. As instituições indicadas na tabela referem-se à afiliação do primeiro autor de cada artigo.

A Tabela 5 abaixo destaca as diferenciações técnicas entre os estudos. As publicações foram divididas primeiramente a partir do principal tipo de biopolímero utilizado. Apesar de em alguns estudos, como o de Li *et al.* (2023), possuírem mais de um biopolímero – goma xantana, goma guar e alginato de cálcio -, o principal considerado foi aquele com maior frequência. O segundo critério de classificação foram as 3 áreas principais de possível aplicação mencionados pelos autores: Materiais de Construção, Geotecnia e Pavimentação.

A coluna de função de aplicação da Tabela 5 associa as características do material substituído pelo biopolímero com as técnicas de aplicação utilizadas e mencionadas pelos autores para concluir as funcionalidades do material que possuem objetivos distintos. A função de estabilizante foi a mais implementada, exclusivamente para soluções geotécnicas, com o objetivo com estabilização de solos para técnicas construtivas. Aditivos selantes, adesivos, aglomerantes e ligantes formaram duplas em quantidade. A função adesiva por sua vez, foi implementada exclusivamente pelo PU vegetal.

Ademais, os diferentes PU vegetais estudados por Cazella *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2021) possuem a mesma origem do óleo de mamona, cuja aplicações foram exclusivamente para Materiais de Construção. A função adesiva é explicada pela utilização desses PUs para a produção de painéis particulados (Cazella *et al.*, 2024;

Silva *et al.*, 2021). O que também é interessante classificar, os painéis estudados tiveram como contribuição sustentável materiais reutilizados e reciclados.

Dessa forma, as pesquisas também podem ser classificadas de acordo com os 3Rs, três ações que são objetivos da sustentabilidade e da economia circular: Redução, Reutilização e Reciclagem (BRASIL, 2010; Geissdoerfer *et al.*, 2017). A redução total ou parcial de material poluente ou tóxico foi consolidado em todos os estudos. A reutilização de material industrial ou natural foram, em sua maioria, para aplicação em Materiais de Construção. Os estudos de Cazella *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2021) utilizaram PET reciclado e madeira reciclada, respectivamente, como matéria base para os painéis particulados. Um exemplo de material reciclado para a Geotecnia, tem-se a pesquisa de Li (2024) cujo material base é a areia de vidro reciclada para estabilização de solo, reduzindo o uso do cimento.

Finalmente, a Tabela 5 também explicita a relação da escala de estudo dos artigos selecionados pela revisão. Todos passaram pela fase experimental com ensaios laboratoriais, mas somente duas pesquisas – Kwon *et al.* (2023) e Seo *et al.* (2021) - tiveram estudos em escala real de engenharia com simulação em campo e resultados obtidos também em campo. Dentro dos artigos considerados, a maior parcela ainda permanece em escala laboratorial, com investigações preliminares para aplicação construtiva. Cabalar *et al.* (2023) foi o único artigo que apresentou escala computacional de antecipações de resultados utilizando a Inteligência Artificial, o que aumenta a transparência dos dados e conseqüentemente a replicação do estudo (Peng, 2011).

**Tabela 5 - Classificação dos estudos dos artigos selecionados para a revisão sistemática.**

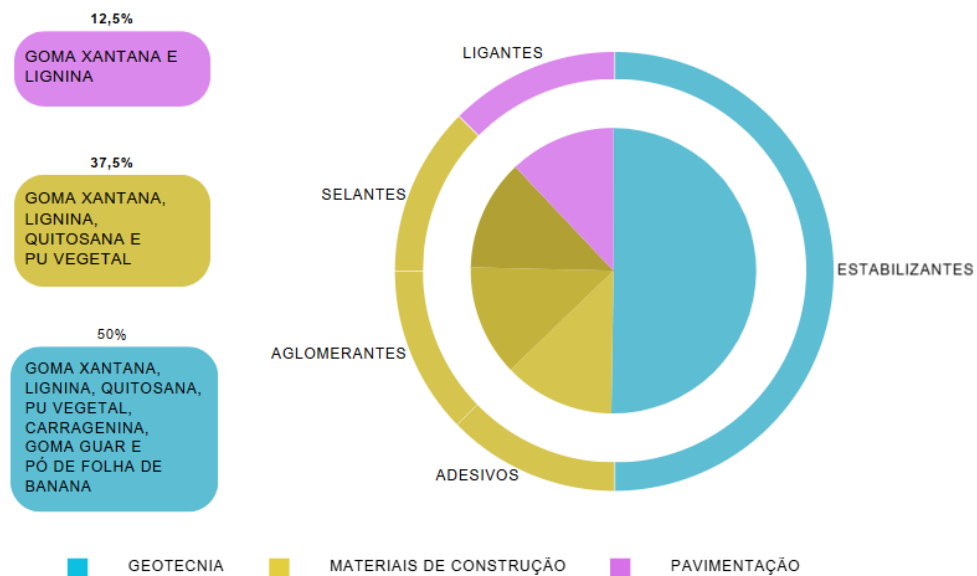
Autor(es)	Principal Biopolímero	Área de Aplicação	Função de Aplicação	Escala do Estudo	Redução, Reutilização ou Reciclagem
Cabalar <i>et al.</i>	Goma Xantana (GX)	Pavimentação	Ligante	Experimental/ Computacional	Redução
Kwon <i>et al.</i> ,		Geotecnia	Estabilizante	Real	Redução

Li <i>et al.</i>		Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução Reutilização e Reciclagem
Seo <i>et al.</i>		Geotecnia	Estabilizante	Real	Redução
Valli & Kumar		Materiais de Construção	Selante	Experimental	Redução
Valli & Kumar		Materiais de Construção	Selante	Experimental	Redução
Bagheri <i>et al.</i>		Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução e Reutilização
Gaudenzi <i>et al.</i>	Lignina	Pavimentação	Ligante	Experimental	Redução e Reutilização
Miao <i>et al.</i>		Materiais de Construção	Aglomerante	Experimental	Redução e Reutilização
Silva <i>et al.</i>	Quitosana	Materiais de Construção	Aglomerante	Experimental	Redução e Reutilização
Wang <i>et al.</i>		Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução e Reciclagem
Cazella <i>et al.</i>	Poliuretano Vegetal	Materiais de Construção	Adesivo	Experimental	Redução, Reutilização e Reciclagem
Silva <i>et al.</i>		Materiais de Construção	Adesivo	Experimental	Redução, Reutilização e Reciclagem
Fatehi <i>et al.</i>	Carragenina (CA)	Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução
Ghosh & Banerjee	Goma Guar (GG)	Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução
Jarjusey <i>et al.</i>	Pó de Folha de Banana	Geotecnia	Estabilizante	Experimental	Redução e Reutilização

Dentro da classificação das áreas de aplicação, a Figura 7 a seguir, apresenta o gráfico das distribuições das funções aplicadas, além de mostrar os respectivos biopolímeros por área. A geotecnia comporta a área mais estudada com 50% (8) dos estudos da revisão, seguido pelos Materiais de Construção com 37,5% (6) dos artigos que incluem estudo de materiais cimentícios e painéis particulados. Já a pavimentação comporta 12,5% (2) dos estudos sobre produção de misturas asfálticas para pavimentação rodoviária.

Diante da Tabela 5 e da Figura 7, é possível observar que dois tipos de biopolímeros, a lignina e a goma xantana foram abordados atendendo à diferentes

soluções para as três diferentes aplicações: geotecnia, pavimentação e materiais de construção. A implementação tanto da lignina, goma xantana, quanto dos outros biopolímeros, foi de maneira a exercer as funções alinhadas às áreas de aplicação. A funcionalidade que foi mais representativa, estabilizante, está interligada à área de geotecnia; a função de ligante à pavimentação. Já a área de materiais de construção obteve três diferentes funções de biopolímeros: aditivos selantes, adesivos e aglomerantes.



**Figura 7 - Gráfico da distribuição dos tipos de biopolímeros e das funções implementadas por área de aplicação.**

Devido a carga experimental da escala dos estudos, conforme apresentado na Tabela 5, a relação entre materiais estudados e os ensaios realizados está organizado na Tabela 6 abaixo. A grande maioria da literatura investigou o comportamento de diferentes concentrações de biopolímeros, comparando-as também com misturas convencionais que não levam biopolímeros, resultando diferentes corpos de prova. Essa estratégia permitiu que os estudos avaliem as quantidades ótimas de biopolímeros, e discutam o potencial substitutivo das misturas a partir das comparações com as diferentes concentrações. Em seguida, nos itens 3.1.1, 3.1.2 e 3.1.3, serão apresentados as discussões e os principais pontos sobre essas

comparações, considerando à natureza dos ensaios e os resultados obtidos com suas contribuições.

**Tabela 6 - Relação das propriedades e ensaios avaliados por material.**

<b>Autor(es)</b>	<b>Material Estudado</b>	<b>Ensaio Realizados</b>
Cabalar <i>et al.</i> , 2023	Brita Tipo I + GX (0 - 5%)	UCS; CBR; granulometria
Kwon <i>et al.</i> , 2023	Solo Areno-argiloso + GX (0 -1%)	UCS; Compactação; Caracterização física; LA; Observações visuais, térmicas e ópticas
Li <i>et al.</i> , 2024	BP1= RGS + GX (2%) BP2= RGS + GA (2,5%) BP3 = RGS + AC (0,4%)	UCS; Triaxial (CD); SEM
Seo <i>et al.</i> , 2021	BP1 = BPST + GX (0,6%) + amido (1,4%) BP2 = BPST + GX (0,35%) + $\beta$ -glucana (0,15%) BP3 = BPST + GX (0,05%) + amido (0,45%)	UCS; D; Caracterização Física; Teor de ar e MOE
Valli & Kumar, 2024	CXT = OPC 53 + SP + AT + GX (2:1 XG:C)	<i>Slump test; Marsh cone; Vicat;</i> Resistência a compressão e à flexão, Rebound Hammer; UPV; UV-VIS; PMI; E-factor, EI e RME
Valli & Kumar, 2024	CXT = OPC 43 + SP + AT + GX (1:2 XG:C)	<i>Slump Test; Marsh cone; Tempo de pega;</i> Resistência à compressão e flexão
Bagheri <i>et al.</i> , 2024	Solo siltico + Lignina (1- 3%)	UCS; Triaxial UU; <i>Flume Test</i>
Gaudenzi <i>et al.</i> , 2022	BA = Betume (70%) + Lignina (30%) MA = 85% agregados + 0,6% RAP + 5,8% BA	BBS; ITS; ITSM; ITFT e SCB
Miao <i>et al.</i> , 2024	BCS + lignina + DMSO	UCS; D; Saturação de Vazios
Silva <i>et al.</i> , 2023	Concreto CPV + Quitosana (0 - 0,4%)	Resistência compressão e tração; MOE; SEM; DRX; FTIR

Wang <i>et al.</i> , 2025	Solo caulinita e areia + quitosana + ácido acético	UCS, Triaxial CD; MOE; Tempo e temperatura de cura; Concentração ácida e SEM
Cazella <i>et al.</i> , 2024	Madeira Pinus + PET (30 -50%) + CPUR (5 - 10%)	TP; MOE; MOR; D; W; Inchamento e $W_{ab}$ .
Silva <i>et al.</i> , 2021	Painéis MD/HD = Pinus ou Eucalipto + PU vegetal (PUI/PUK) ou UF	MOR; MOE; TP; <i>Pull-out</i> ; Densidade, $W_{ab}$ , Inchamento, ACV, MIP, SEM
Fatehi <i>et al.</i> , 2024	Solo (caulinita + areia) + CA (0,5 – 1%)	UCS, FTIR, <i>wet-dry cycles</i> e SEM
Ghosh & Banerjee, 2025	Solo expansivo + cimento (3 – 6%) cimento 3% cimento + 1,5% goma guar Solo + 1,5% goma guar	UCS, MR Triaxial; LA; <i>Swell test</i> , <i>shrinkage test</i> , <i>freeze-thaw test</i> , pH e SEM
Jarjusey <i>et al.</i> , 2024	Solo argiloso + BLP + CV	UCS, Cone index, $W_{ab}$ , pH, XRF, cálculo de perda de massa, D, W, teor de carbono e SEM

Nota: AT – Ácido Tartárico; AC – Alginato de Cálcio ACV – Avaliação do Ciclo de Vida; BBS – *Bitumen Bond Strength*; BA – Bioaglomerante; BLP – Pó de folha da banana; BP1 ao BP3 – Biopolímero 1 ao Biopolímero 3; BCS – Compósito Solo-Polímero; BPST – Solo tratado à base de biopolímeros; CBR – Índice de Suporte Califórnia; CV - cinza volante; CPUR - resina de poliuretano à base de óleo de mamona; CTX – Cimento-Goma Xantana-Ácido Tartárico; D – Densidade; DRX - Difração de Raios-X; E-factor – Fator Ecológico; EI- Intensidade Energética; FTIR - Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier; GA – Goma Agar; GX - Goma Xantana; ITS – Resistência à Tração Indireta ; ITSM – Módulo de Rigidez à Tração Indireta; ITFT – Ensaio de fadiga por tração indireta; LA – Limites de Atteberg; MA – Material Asfáltico; MD – Densidade média; HD – Densidade alta; OPC – Cimento Portland Comum; RGS – Areia de Vidro Reciclado; UF – Ureia-Formaldeído; UCS – Resistência à Compressão não-Confinada; SP- Superplastificante; SCB – Ensaio de flexão semicircular; UV-VIS - Espectroscopia na Região do Ultravioleta-Visível, SEM - Microscopia Eletrônica de Varredura; MOE – Módulo de Elasticidade; MOR – Módulo de Rigidez, PMI – Intensidade de Massa do Processo; RME – Eficiência de Massa da Reação; W – Umidade;  $W_{ab}$  – Absorção de água.

### 3.2.1 Soluções aplicadas à Geotecnia

Como demonstrado previamente na Tabela 4, os artigos foram separados por três principais áreas de aplicação. Dessa forma, a discussão das contribuições dos artigos também acompanhará esses segmentos. As soluções propostas para geotecnia estão majoritariamente ligadas às técnicas de melhoramento de solo e são contempladas

pela utilização de diferentes biopolímeros: GX, lignina, quitosana, CA, pó de folha de banana e GG, como apresentado na Figura 7.

Para todos os estudos geotécnicos, os ensaios de caracterização de solo e resistência à compressão não confinada se fazem presentes, confirmando a importância desses testes para padronização da metodologia e classificação (ASTM D2166, 2016; ASTM D6913, 2017). Apesar dos testes terem sido conduzidos de acordo com normas internacionais, é importante destacar que o Brasil também dispõe de normativas específicas que avaliam os mesmos parâmetros, como aquelas aplicáveis aos ensaios de compressão não confinada, ASTM D2166 (2016), equivalente à ABNT NBR 12025 (2021); para a análise granulométrica, seguiram ASTM D6913 (2017), equivalente à ABNT NBR 7181 (2018); assim como para os limites de Atterberg, relacionada ao BS EM ISO 17892 (2017), são equivalentes às ABNT NBR 6459 (2016) para o Limite de Liquidez e a ABNT NBR 7180 (2016) para o Limite de Plasticidade.

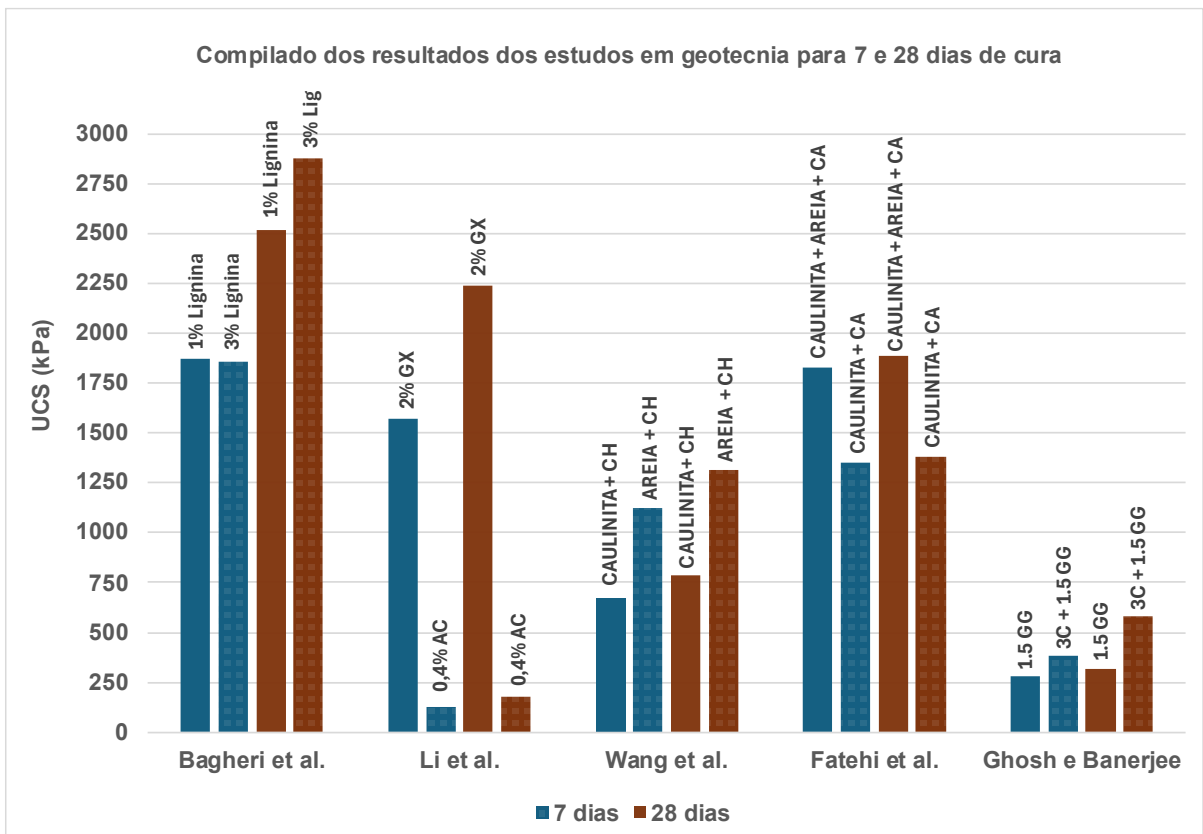
Os artigos trazem experimentos laboratoriais, e contam com dois artigos em escala real e validação em campo. Os dois utilizaram a GX para estabilização de talude (Seo *et al.*, 2021) e mitigação de erosão de barragem (Kwon *et al.*, 2023). Kwon *et al.* (2023) aplicou a mistura tratada com biopolímero (BPST) e a não tratada em volta de cada bueiro das barragens construídas. A pesquisa demonstrou que 1% de XG mitigou significativamente a erosão interna da barragem de terra e a fez resistir sem erosão relevante por cerca de 40 minutos a mais do que a barragem sem tratamento, que colapsou rapidamente.

Além disso, a pesquisa avaliou capturas de imagem e sensores térmicos para acompanhar o desenvolvimento da erosão interna, podendo afirmar que o BSPT diminuiu, a condutividade de água, aumentou a plasticidade, as propriedades mecânicas e contribuiu para manutenção da vegetação. Essas contribuições da GX sugerem ser causadas pela formação de uma melhor ponte entre as partículas, formação de hidrogéis de GX, além de terem evidências de ser extremamente longa e resistente a diferentes circunstâncias no ambiente, como calor, alto teor de sódio, ácido ou alcalino (Kumar; Yadav; Raj, 2024).

Seo *et al.* (2021) analisou um BSPT a partir de uma mistura de GX,  $\beta$ -glucana e amido, aplicado diretamente no talude através do método de *spray* molhado. Os autores consideraram duas formas de inserir o biopolímero: em pó ou em solução. Os resultados obtidos com o BSPT em solução foram de melhor homogeneização, melhor estabilidade superficial, aumento da resistência à compressão, maior qualidade dos dados, além de promover crescimento da vegetação para mitigar ainda mais a erosão. No entanto a pré-hidratação da solução, embora mais eficiente, pode gerar custos adicionais, e a proporção da mistura para a aplicação *spray* variar conforme tipo de biopolímero estabilizante e tipo de solo. Seo *et al.* (2021) não discutiu sobre microestrutura e impacto ambiental.

Demais estudos incluíram abordagens sobre o impacto ambiental e avaliaram, complementarmente, da durabilidade do material. A exemplo de Ghosh e Banerjee (2025), Fatehi *et al.* (2023), e Wang *et al.* (2022). Ghosh e Banerjee (2025) estudaram a inserção da GG em compósito solo-cimento com redução de 48% de CO<sub>2</sub>, mesmo utilizando entre 0 e 6% de cimento. Para avaliar a durabilidade, o material foi submetido a perda de massa e a ciclos controlados de congelamento e descongelamento, simulando laboratorialmente condições reais. A microestrutura também foi avaliada por microscopia de varredura, assim como inchamento e retração. Esses ensaios permitem relacionar a longevidade com as forças das ligações e os parâmetros de resistência, uma vez que a goma guar, como outros biopolímeros são biodegradáveis e suscetíveis à deterioração (Kumar; Yadav; Raj, 2024). Assim, os estudos obtiveram um compósito que previne mais a degradação e a expansão do solo, comparado com solo estabilizado apenas com cimento.

Os resultados dos testes mecânicos do estudo de Ghosh e Banerjee (2025) assim como Fatehi *et al.* (2023), Wang *et al.* (2022), Bagheri *et al.* (2024) e Li *et al.* (2024) estão adaptados no gráfico abaixo (Figura 8). Esses estudos em geotecnia fizeram testes de resistência mecânica para mais dias de cura, incluindo 7 dias e aproximadamente 28 dias. Mesmo sendo uma adaptação aproximada dos resultados gráficos, que desconsidera os diferentes tipos de solos e suas proporções, a comparação destaca as diferenças da resistência entre os tipos de biopolímeros.



**Figura 8 - Gráfico dos resultados de resistência à compressão adaptados de Bagheri *et al.* (2024), Li *et al.* (2024), Wang *et al.* (2022), Fatehi *et al.* (2023), Ghosh e Banerjee (2025).**

Nesse contexto, Fatehi *et al.* (2023), utilizou a CA para melhorar as propriedades do solo. De acordo com a Figura 8, os resultados apresentaram, para o solo mais fino de caulinita, um aumento de até 3,5 vezes da resistência à compressão comparado com o solo puro em 7 dias (420 KPa); para caulinita com areia, ocorreu cerca do mesmo aumento comparado com solo sem biopolímero de aproximadamente 320 kPa. Apesar dessa semelhança, os valores absolutos da resistência da mistura com areia (K1S3) foram maiores aproximadamente 35%. Já a diferença entre ambos os solos tratados com biopolímero para 7 e 28 dias não foi discrepante.

No estudo de Fatehi *et al.* (2023) também foram realizadas análises da condição das amostras nos ciclos de umedecimento e secagem, a carragenina manteve 80% da resistência à compressão original após cinco ciclos, demonstrando alta durabilidade. Ocorreu também um aumento da resistência ao cisalhamento; da coesão e do ângulo de atrito, e tendo CA mais eficaz do que a GX para solos finos (Fatehi *et al.*, 2023).

Com resultados parecidos na durabilidade, Bagheri *et al.* (2024), - que aplicou lignina e solo de baixa plasticidade para mitigar erosão – observou que solo tratado com biopolímero ficou 4h mais preservado do que solos normais nos testes de saturação, e resistiram às simulações de chuvas 2x mais, confirmando que a lignina possibilita uma melhor aglutinação entre as partículas. Os resultados do teste de resistência apresentados na Figura 8 mostram que a lignina (em 3%) atingiu o maior valor absoluto, comparado com os outros polímeros; e ao aumentar o teor de lignina no solo aumenta consideravelmente após 28 dias de cura, em compensação aos níveis similares entre 1% e 3% de lignina nos primeiros 7 dias.

Wang *et al.* (2022) investigou o uso de quitosana (CH) reciclada como estabilizador de solo. O biopolímero contribuiu para melhora das propriedades mecânicas dos dois solos avaliados. De acordo com a Figura 8, a “AREIA+CH” obteve maiores valores do que “CAULINITA+CH”, tanto para 7 quanto para 28 dias. Apesar disso, ao relacionar o UCS à diferentes proporções de CH, o biopolímero com caulinita aumentou os resultados aproximadamente 7 vezes só com 1,5% de CH (solo sem tratamento com 310 kPa), se sobressaindo aos resultados da areia com 1,5% CH com aproximadamente 1500 kPa. Os autores também comparam o UCS de ambos os solos com GX, AC e CA, e eles concluíram que a caulinita com CH (>0,5%) performou melhor que todos. Já a areia com CH só ficou atrás da GX, contradizendo a comparação de Fatehi *et al.* (2023), já que GX não foi o melhor para solos finos e CA não se destacou.

Já o estudo de Li *et al.* (2024) avaliou além da GX, a goma ágar e o AC como estabilizante de misturas de areia de vidro reciclado. Os resultados mostraram através de testes UCS, que a GX obteve o maior ganho de resistência quando comparado ao AC, como mostrado na Figura 8. Apesar disso, os três biopolímeros aumentaram a coesão do material. As propriedades também foram influenciadas pelo tempo de cura, evidenciado, por exemplo, pela evolução da resistência mecânica ao longo do período analisado. Entretanto, o estudo não realiza testes de durabilidade e, mesmo sem muito desenvolvimento sobre impacto ambiental, os autores utilizam vidro reciclado para diminuir a exploração da areia, alinhado com práticas da economia circular.

Jarjusey *et al.* (2024) aborda uma concepção um pouco diferente, o estudo compara a utilização de biomassas agrícolas residuais: pó da folha da Banana (BLP) casca da Laranja e cinzas volantes (CV). Os autores propõem que o BLP, já utilizado como aditivo alimentar, cosmético e fertilizante, pode melhorar a capacidade de retenção de água do solo, sem alterar propriedades do solo. Porém resultados mostraram que capacidade de absorção de água do BLP foi inferior ao OBP. O BLP e FA, inibem parcialmente a degradação orgânica, melhorando sua densidade e resistência, sem comprometer a compactação do solo. O BLP eleva o índice de cone para aproximadamente 1,5 MPa - valor suficiente para suportar maquinário pesado - comparado com valor insuficiente o material com BLP, CV e OBP menor que 0,2 MPa. O estudo conclui que a mistura OBP, apesar de absorver melhor a água, devido à sua natureza gelatinizante, dificulta a compactação do solo e não gera ganhos substanciais de resistência mesmo com o aumento da dosagem.

Como sugerido pelos autores desse segmento, é necessário investigar mais desempenhos em campo para explorar variáveis reais como condições climáticas e de degradação (Seo *et al.*, 2024), como também é necessário ampliar as análises ambientais e de ciclo de vida e entender a contribuição além do contexto geotécnico (Li *et al.*, 2024). Ademais, as limitações de biopolímeros geotécnicos tangenciam a grande variabilidade do tipo de solo e das condições ambientais que limitam a padronização dos resultados (Kwon *et al.*, 2023, Jarjusey *et al.*, 2024)

### **3.2.2 Soluções aplicadas a Materiais de Construção**

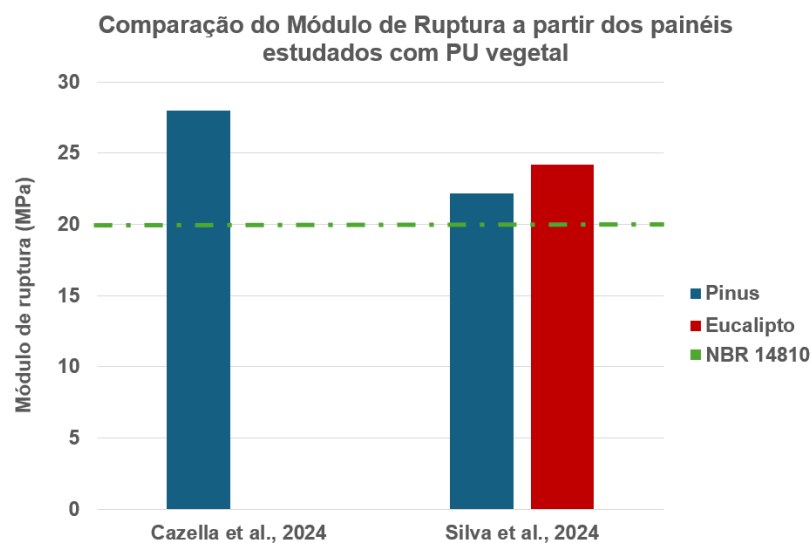
Nesse segmento, serão discutidos os autores que trouxeram soluções limpas utilizando biopolímeros atrelados à compósitos, ou de materiais cimentícios ou de painéis particulados. Assim como na Figura 7, dentre os materiais de construção, foram encontrados artigos que utilizaram a quitosana, o PU vegetal, a lignina e a goma xantana como potenciais ingrediente sustentáveis para as soluções construtivas com menos impactos ambientais (Cazella *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2021; Miao *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023; Valli; Kumar, 2024a, b).

Os estudos revisados convergem em alguns aspectos, sendo eles: reaproveitamento de resíduos industriais; redução de adesivos e aglomerantes

convencionais; e desempenhos técnicos equivalentes ou superiores aos materiais substituídos (Cazella *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2021; Miao *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023; Valli; Kumar, 2024a, b). A similaridade também enquadra a inserção dos materiais na economia circular, com propostas sustentáveis. Mesmo com essas similaridades, cada estudo possui particularidades que destacam a participação do biopolímero para com a solução limpa e a aplicação final, podendo ser comparáveis, mas não idênticas.

Os artigos que apresentaram aplicações de painéis particulados reaproveitaram diferentes tipos de resíduos da indústria para elaboração do estudo. Cazella *et al.* (2024) utilizou garrafa PET reciclada, madeira *Pinus* subproduto de serrarias e utilizou a resina PU do óleo da mamona (CPUR) como adesivo. Silva *et al.* (2021) avaliou painéis que também possuíam resíduos industriais de *Pinus* e *Eucalyptus*, aplicadas com um PU do óleo de mamona (PUI) e PU com mistura de óleos vegetais (PUK). Em ambos os estudos, os painéis foram avaliados de acordo com as normas ABNT NBR 14180-2 (2018) que padronizam as propriedades mensuradas para painéis particulados. Em seguida, eles são também respaldados sob a norma internacional ANSI A208.1 (2016) para conferir se os requisitos foram atingidos dentro dos padrões do mercado.

As propriedades avaliadas são: resistência à tração, módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), arrancamento densidade, inchamento, absorção de água, porosidade e microscopia. Além disso, o estudo de Silva *et al.* (2021) também avaliou a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para comparar com painéis produzidos dentro da economia linear. Os resultados de Cazella *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2021) provaram a eficiência do reaproveitamento de material industrial com biopolímero PU para painéis particulados. O gráfico mostrado abaixo (Figura 9), exemplifica uma das propriedades avaliadas, o MOR. Nele há a comparação dos resultados máximos absolutos - devido à variada quantidade de amostras e materiais usados pelos autores – com o valor mínimo da norma para a categoria P6.



**Figura 9 – Gráfico da comparação do MOR obtidos a partir dos painéis estudados com PU vegetal (Adaptado de Cazella *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2021).**

Como mostrado na Figura 9, o painel estudado por Cazella *et al.* (2024), composto por 50% PET reciclado, 50% *Pinus*, e 10% CPUR, obteve melhores desempenhos físicos e mecânicos além de serem classificados na categoria da ABNT NBR 14180-2 (2018) e ANSI A208.1 (2016) como painéis mais resistentes (P6). Apesar de afirmar que os painéis de Eucalipto + PU são mais resistentes, com menos inchamento, e melhor isolamento térmico, Silva *et al.* (2021) evidenciou, através do ACV, que painéis de *Pinus* obtiveram reduções de até 95% nas cargas ambientais em cenários com madeira reciclada e PU vegetal, em comparação a painéis convencionais. Todas as alternativas foram consideradas ambientalmente amigável comparadas ao uso de madeira virgem e adesivos sintéticos.

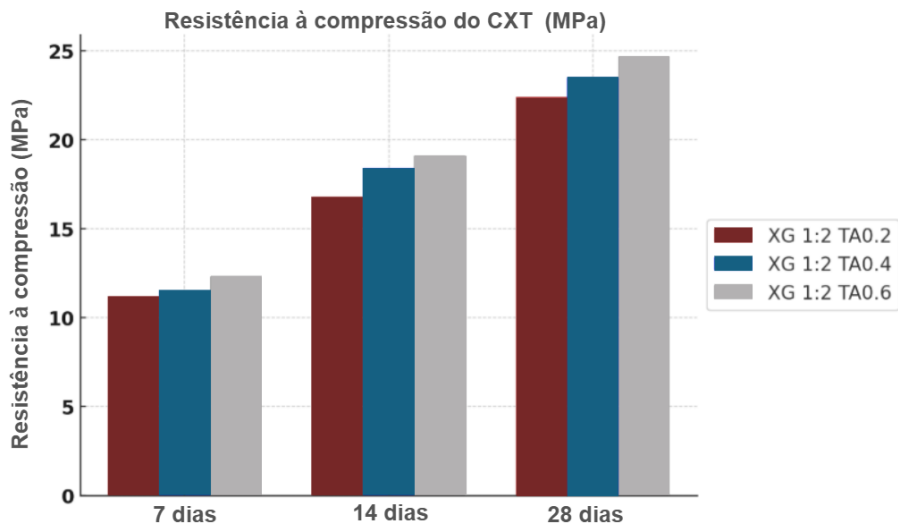
Continuamente, outros estudos também reaproveitaram resíduos industriais, mas nesse caso, para desenvolver materiais substituintes do concreto. Miao *et al.* (2024) estudou a aplicabilidade de resíduos de lignina, tanto da indústria do papel (lignina alcalina) quanto da indústria do bioetanol (lignina de hidrólise). Silva *et al.* (2023) reutilizou resíduos da indústria de frutos do mar para produção de concreto. A metodologias das pesquisas de Miao *et al.* (2024) e Silva *et al.* (2023) se assemelham quanto aos testes de caracterização do material cimentício de acordo com as normas técnicas, como observa-se na Tabela 5. Os autores realizaram testes de trabalhabilidade (ASTM C143), tempo de pega (ASTM C191), fluidez. Resistência à

compressão e flexão (ASTM C39; ASTM C78; ABNT NBR 5739, 2018; ABNT NBR 7222, 2018).

Miao *et al.* (2024) reutilizou resíduos de dois tipos de lignina, aumentando a aplicabilidade do biocompósito em ambientes externos devido à hidrofobicidade do biopolímero. Foram avaliadas propriedades como resistência à compressão, densidade seca, saturação de vazios e proporção biopolímero/solo. Os compósitos desenvolvidos apresentaram resistência à compressão entre 1,6 e 8,1 MPa para lignina de hidrólise e entre 3,2 e 6,8 MPa para alcalina. De acordo com ASTM C129, esses valores são adequados apenas para aplicações não estruturais, como divisórias e telhas. Entre as duas fontes, a lignina de hidrólise se mostrou um ligante mais eficiente, destacando-se como opção promissora. De ponto de vista ambiental, o autor afirma que uso da lignina abre oportunidades para diminuição da pegada de carbono relacionada com a queima da produção de cimento e da queima da lignina inutilizada. Além disso, o estudo reconhece a necessidade da investigação microscópica futuras para avaliar a ligação interfacial entre o aglomerante e o agregado, que não foi feito nesse estudo.

Valli e Kumar (2024) exploram a incorporação da GX em compósitos de material cimentício de reparo. Um estudo realiza os testes de caracterização e resistência, segundo normas ASTM, comparando diferentes proporções de CXT representado pelo gráfico adaptado abaixo (Figura 10). O gráfico mostra que o desenvolvimento mais rápido da resistência ocorreu entre 7 e 14 dias, tendo 50% da resistência final à compressão é atingida já nos primeiros 7 dias.

Os autores ainda ampliam em outro estudo a análise para simulação laboratorial de fissuras em concreto, acrescentada uma perspectiva de sustentabilidade e custo por meio de métricas como intensidade de massa e energia e fator ambiental. Esses trabalhos destacam que biopolímeros obtiveram melhor desempenho do que o material cimentício convencional para selagem estruturais, melhorando características de trabalhabilidade e tempo de pega, interação microscópica, controle de fissuração e melhora entre 22% e 28% na resistência dos testes de simulação. Ainda, é um material economicamente acessível - mesmo para níveis industriais - e eficaz para reparos.



**Figura 10 - Gráfico da resistência à compressão adaptado do estudo de Valli e Kumar (2024).**

Já o estudo de Silva *et al.* (2023), investigou o uso da quitosana como aditivo para produção de concretos. As propriedades avaliadas incluíram resistência à compressão – indicadas na Tabela 7 abaixo -, resistência à tração na flexão, absorção de água, porosidade e análises microestruturais. Os resultados evidenciaram que a quitosana favoreceu a formação de uma matriz mais interligada, com aumento da resistência mecânica. Além disso, a quitosana quando adsorvida no cimento, adsorvem-se às partículas e retarda a hidratação inicial delas, funcionando como retardadora de pega. O que promove uma melhora na trabalhabilidade. Mas teores elevados de quitosana (0,4%) acarretaram perda de desempenho devido ao aumento de vazios.

**Tabela 7 - Resistência à compressão das amostras adaptados de Silva *et al.* (2023).**

Amostras	Resistência à compressão (MPa)			
	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias
Padrão	29,1	41,3	47,3	47,2
0,1% CH	31,1	42,0	46,5	48,8
0,3% CH	39,1	44,5	46,2	44,8
0,4% CH	37,9	42,5	43,5	43,0

Embora as pesquisas nesse segmento apresentarem resultados positivos, elas possuem limitações comuns, especialmente ligados à escalabilidade dos ensaios. Essa ausência de ensaios em escala real impacta também na discussão da durabilidade a longo prazo, envelhecimento e validação em campo, como sugerido para estudos futuros por Miao *et al.* (2024) e Valli e Kumar (2024). A viabilidade sustentável, energia e o custo só foram abordados por Valli e Kumar (2024) e Cazella *et al.* (2024). Valli e Kumar (2024) confirma a vantagem econômica e Cazella *et al.* (2024) reconhece que o custo da resina vegetal de mamona ainda é um obstáculo. Apesar de todos mencionarem qualitativamente aspectos ambientais, Silva *et al.* (2021) foi o único a apresentar a avaliação do ciclo de vida (ACV) e, a grande maioria não estende o processo para escala industrial.

### **3.2.3 Soluções aplicadas à Pavimentação**

Os dois trabalhos abordam a aplicação de biopolímeros na área de pavimentação (Cabalar *et al.*, 2023; Gaudenzi *et al.*, 2022). Eles convergem no propósito de substituir (parcial ou totalmente) insumos de origem fóssil e cimentícios por biopolímeros em camadas de pavimento. Cabalar *et al.* (2023) investigam diferentes proporções de GX como aglomerante em mistura com agregados convencionais para subleitos. Gaudenzi *et al.* (2022) estudou um bioaglomerante com 30% lignina incorporado no material asfáltico com 0,6% de RAP e 85% de aglomerantes, reduzindo em aproximadamente 15% o betume fresco.

Ambos avaliam propriedades mecânicas, porém Cabalar *et al.* (2023) avaliou através do UCS, respaldadas pela norma ASTM D2166 (2016) e Gaudenzi *et al.* (2022) aplicou testes internacionais que reportam a interação e aderência entre ligante e agregado. Entretanto, Cabalar *et al.* (2023) avaliariam propriedades de agregados comuns, caracterização física ASTM D2487 (2020) e Capacidade de Suporte com Índice de Suporte California (CBR) ASTM D1883 (2021). As respectivas normas se assemelham com as brasileiras ABNT NBR 6502 para classificação de solos, e ABNT NBR 9895 para ensaios CBR. Já Gaudenzi *et al.* (2022), realizou ensaios mais específicos para materiais asfálticos como ensaio de aderência BBS, tração indireta,

módulo de rigidez, ensaio de fadiga, resistência fratura por SCB e envelhecimento acelerado. Para ensaios como BBS, foram adotados os procedimentos AASHTO TP-91 (2011), que permanecem internacionais.

Cabalar *et al.* (2023) obteve resultados que estão compilados na Tabela 8 abaixo. A resistência à compressão (UCS) traduz que quanto maior a porcentagem de GX na amostra, e o tempo de cura, maior a performance. As amostras aumentaram entre 120% e 300% o valor da resistência comparado com as amostras sem biopolímero. Os índices CBR aumentaram em até 300% com 5% GX, tendo o menor aumento apenas para 32 dias. Antecipações estatísticas, mostraram bons resultados, mostrando a qualidade dos dados e a melhor representatividade na replicação do estudo.

**Tabela 8 - Resultados resumidos adaptados de Calabar et al. (2023).**

<b>Período</b>	<b>Amostra</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>UCS - qu (kPa)</b>
4 dias	Sem GX	10,5	110
	5% GX	38,2	360
8 dias	Sem GX	12,1	160
	5% GX	46,5	660
16 dias	Sem GX	15,7	270
	5% GX	60,0	890
32 dias	Sem GX	24,6	460
	5% GX	73,3	1020

Para Gaudenzi *et al.* (2022), as misturas performaram semelhantemente às misturas asfálticas convencionais, como mostrado pelo teste de resistência à tração indireta (ITS) na Figura 11 abaixo. A amostra de referência M50/70 só com betume obteve 1,42 MPa e 1,53 MPa, para não envelhecido (4h no forno) e envelhecido (5 dias no forno), respectivamente, enquanto a amostra M70/100\_S com bioaglomerante com lignina da Suécia obteve 1,45 MPa e 1,53 MPa para as mesmas condições. Uma afinidade parecida ocorreu com o resultado de aderência, sugerindo melhor afinidade entre ligante-agregado, principalmente para M100/150\_B. Por causa da hidrofobicidade, maiores teores de lignina foram mais resistentes à umidade. Além

disso, a lignina compensa o menor teor de betume nos testes de rigidez e fadiga, contribuindo na elevação da rigidez com o envelhecimento, e diminuindo a sensibilidade à altas temperaturas. O envelhecimento também proporciona maior estabilidade à mistura asfáltica nos resultados de resistência à fratura, que foram inferiores no estado fresco.

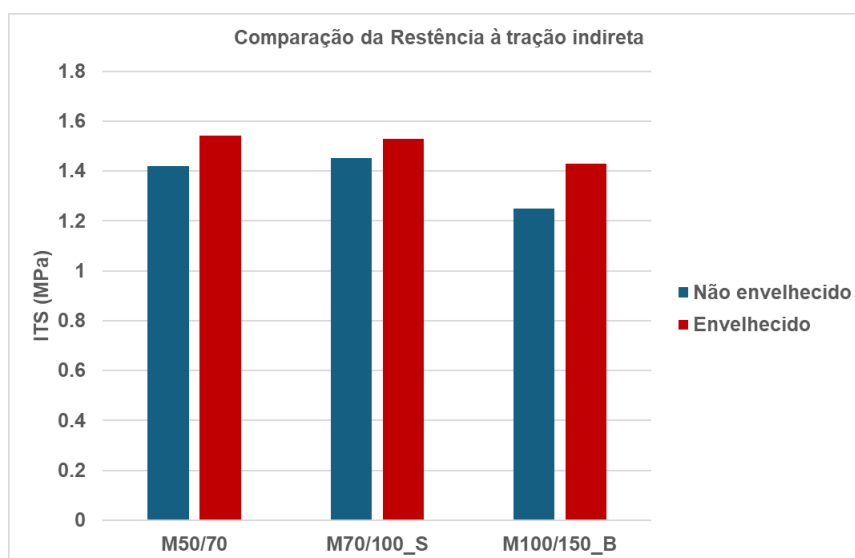


Figura 11 - Gráfico dos resultados adaptados de Gaudenzi *et al.* (2022).

Os resultados limitam -se, porém, ao ambiente de laboratório, ou seja, sem o impacto de condições ambientais reais (chuva, tráfego, temperatura). O custo, viabilidade econômica e ciclo de vida não foram discutidos detalhadamente. Entretanto, Gaudenzi *et al.* (2022) abordou mais sobre envelhecimento do que Cabalar *et al.* (2023), destacando a preocupação com a durabilidade. Benefícios quanto à sustentabilidade ficam claros nos dois estudos, por demonstrarem menor dependência de ligante asfáltico e cimento, diminuindo o impacto de emissões de GEE na construção de pavimentos.

#### 4. CONCLUSÃO

A análise sistemática resultou na seleção de 16 artigos científicos recentes que tratam da aplicação de biopolímeros na construção civil, os quais foram classificados de acordo com suas principais características. Os estudos identificados concentram-se em três áreas de aplicação — geotecnia, materiais de construção e pavimentação — e evidenciam diferentes funções e tipos de biopolímeros. Entre os mais investigados, destacam-se a goma xantana e a lignina, que se apresentaram como os compostos mais representativos nas pesquisas.

Na geotecnia, bons resultados na mitigação da erosão demonstraram potencial para redução de cimentantes químicos, como o emprego da quitosana, que foi efetiva em aumentar a resistência do solo em até 7 vezes e ainda contribui como materiais reutilizado da indústria dos crustáceos. Nos materiais de construção, biopolímeros contribuíram significativamente utilizar menores quantidade aditivos não renováveis e cimentos, como a lignina e a goma xantana, que demonstraram possuir propriedades semelhantes aos convencionais. Entre eles é possível estabelecer que, a goma xantana foi a que mais contribuiu na resistência mecânica e a lignina mais contribuiu para a sustentabilidade, reutilizando lignina e marcando maior dosagem no material. Na pavimentação, os biopolímeros atuaram como aditivos ligantes ao substituir materiais cimentícios e betuminosos, e obtiveram resultados equivalentes e superiores aos convencionais.

Sob a ótica ambiental, a temática, que é relativamente nova e incipiente no setor da construção civil, apresenta grande potencial ao inserir soluções sustentáveis em um modelo de economia circular, reduzindo emissões por meio do uso de materiais renováveis, biodegradáveis, reutilizados e reciclados. Apesar de emergente e vantajoso, a prática dos biopolímeros na indústria da construção ainda é incipiente e pouco consolidação. Os estudos carecem de simulações reais, padronização consistente, rigurosidade sobre durabilidade e abrangência sobre o ciclo de vida, que são propostos em estudos futuros.

#### 4.1 Desafios e perspectivas futuras

Dentre todas as soluções limpas selecionadas na pesquisa, entretanto, observou-se lacunas quanto a escala dos estudos. Majoritariamente condicionadas às simulações laboratoriais, apenas dois autores aplicaram a proposta em campo. Isso demonstra a emergência do tema ainda muito ligado ao laboratório, e sugere que, a partir desse ponto, futuros estudos poderão expor mais exemplos de aplicação real.

Ainda, a pouca prevenção de resultados – seja para diferentes tipos de material ou proporções de biopolímeros - tendência a prejudicar a utilização e produção em larga escala. Isso pois a grande variabilidade de solo e biopolímero existentes, tendem a especificar e limitar a região de impacto dessas novas técnicas. Como sugere o estudo de Cabalar *et al.* (2023) - o único estudo computacional - os resultados previstos com modelos de algoritmo com alta qualidade de dado mostraram contribuir significativamente para prever propriedades com diferentes proporções.

A falta de dados ao longo prazo cria lacunas sobre a durabilidade e a degradabilidade das misturas, uma vez que todos os estudos encontrados utilizam materiais de base biológica e biodegradáveis. Alguns estudos discutiram sobre a durabilidade do material em alguns testes com simulações em ciclos como Fatehi *et al.* (2024) e Bagheri *et al.* (2024), mas ainda falta a compreensão geral da durabilidade para tratar sobre custo e energia gasta em manutenção, seja em técnicas geotécnicas quanto em pavimentação.

Essa compreensão também tange a Avaliação do Ciclo de Vida que, realizada apenas por Silva *et al.* (2021). De acordo com o autor, as avaliações consideram todo o ciclo de vida para os impactos ambientais desde extração até uso e manutenção, demonstrando a ligação com a durabilidade. Apesar disso, todos os estudos nos quais reduzem e reciclam materiais ou atividades que impactam o ambiente, expõem de forma clara essa contribuição de se inserirem no contexto de economia circular.

Assim, há necessidade de maior consolidação nessas avaliações que conferem o veredito sobre a sustentabilidade dessas soluções. Entretando, essa carência está exposta e proposta para estudos futuros. A discussão, então, pode ser amplificada, principalmente, a partir do ponto de largada já anunciado dos estudos laboratoriais.

## 5. REFERÊNCIAS

- ABDOU, E. S.; NAGY, K. S. A.; ELSABEE, M. Z. Extraction and characterization of chitin and chitosan from local sources. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 99, n.º 5, p. 1359–1367, mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.051>.
- ABIPLAST (Brasil). **Brazilian Plastic Processed and Recycling Industry – 2023** Profile - Preview. 2023.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2018/2019. Technical Report. São Paulo, Brazil: **ABRELPE**, 2019. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/>.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2021. Technical Report. São Paulo, Brazil: **ABRELPE**, 2021. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/>.
- ABRECON - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A RECICLAGEM DE RCD. Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil. **Technical, Industry**. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 8 jun. 2022. DOI 10.11606/9786589190103.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: Solo - Ensaio de compressão não confinada em corpos de prova cilíndricos. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2166: *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*. **West Conshohocken, PA: ASTM International**, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6913: *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. **West Conshohocken, PA: ASTM International**, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). **West Conshohocken, PA: ASTM International**, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1883: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils. **West Conshohocken, PA: ASTM International**, 2021.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO TP 91: Standard method of test for determining asphalt binder strength by means of the binder bond strength (BBS) test. **AASHTO**. Washington, DC, 2011. p. 1-14.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502: Rochas e solos. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9895: Solo - Ensaio de expansão e índice de suporte California (ISC) com molde cilíndrico - Método de ensaio. **ABNT**. Rio de Janeiro, 2017.

BARNES, D. K. A.; GALGANI, F.; THOMPSON, R. C.; BARLAZ, M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, [s. l.], vol. 364, n.º 1526, p. 1985–1998, 27 jul. 2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>.

BAVALIYA, K. J.; VALA, N. S.; RAJ, M.; RAJ, L. A review on biodegradable composites based on poly (lactic acid) with various bio fibers. **Chemical Papers**, [s. l.], vol. 78, n.º 5, p. 2695–2728, abr. 2024. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03298-x>.

BEHÚNOVÁ, A.; KNAPČÍKOVÁ, L.; BEHÚN, M.; MANDIČÁK, T.; MÉSÁROŠ, P. Intelligent Designing and Increasing the Variability of Healthy Residential Buildings by Customizing Recycled Polyvinyl Butyral. **Sustainability**, [s. l.], vol. 13, n.º 16, p. 9073, 13 ago. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13169073>.

BILLMEYER, F. W. **Textbook of polymer science**. 3. ed. New York: Wiley, 1984(Wiley-Interscience publication).

BOUKHATEM, A.; BOUARAB, K.; YAHIA, A. Kappa ( $\kappa$ )-carrageenan as a novel viscosity-modifying admixture for cement-based materials – Effect on rheology, stability, and strength development. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], vol. 124, p. 104221, nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104221>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN ISO 17892-12: Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 12: Determination of Atterberg limits. **London: BSI**, 2017.

BRASIL. **Resolução CONAMA, n 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critério e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Planares** [recurso eletrônico]. Coordenação de André Luiz Felisberto França et al. Brasília, DF: MMA, 2022. 209 p.: il.; color.

BRASIL. **Lei N 12.305 Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, DF: [s. n.], de agosto de 2010.

CABALAR, A.; AKBULUT, N.; DEMIR, S.; YILDIZ, O. Use of a Biopolymer for Road Pavement Subgrade. **SUSTAINABILITY**, vol. 15, n.º 10, 18 mai. 2023. <https://doi.org/10.3390/su15108231>.

CAZELLA, P.; DE SOUZA, M.; RODRIGUES, F.; SILVA, S.; BISPO, R.; DE ARAUJO, V.; CHRISTOFORO, A. Polyethylene terephthalate (PET) as a recycled raw material for particleboards produced from pinus wood and biopolymer resin. **JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION**, vol. 447, 1 abr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141460>.

CHEN, L.; HUANG, L.; HUA, J.; CHEN, Z.; WEI, L.; OSMAN, A. I.; FAWZY, S.; ROONEY, D. W.; DONG, L.; YAP, P.-S. Green construction for low-carbon cities: a

review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], vol. 21, n.º 3, p. 1627–1657, jun. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>.

SILVA, J.; SILVA, R.; SILVA, A.; FRANÇA, E.; HERNÁNDEZ, E.; DE FARIAS, P. Portland cement concrete doped with chitosan: mechanical and microstructural properties. **MATERIA-RIO DE JANEIRO**, [s. l.], vol. 28, n.º 2, 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0037>.

DALLAEV, R.; PAPEŽ, N.; ALLAHAM, M. M.; HOLCMAN, V. Biodegradable Polymers: Properties, Applications, and Environmental Impact. **Polymers**, [s. l.], vol. 17, n.º 14, p. 1981, 18 jul. 2025. <https://doi.org/10.3390/polym17141981>.

DARAGHMEH, N. H.; CHOWDHRY, B. Z.; LEHARNE, S. A.; AL OMARI, M. M.; BADWAN, A. A. Chitin. **Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology**. [S. l.]: Elsevier, 2011. vol. 36, p. 35–102. DOI 10.1016/B978-0-12-387667-6.00002-6.

DAYANANDA JAWALI, N.; SIDDARAMAIAH; SIDDESHWARAPPA, B.; JOONG HEE LEE. Polycarbonate/Short Glass Fiber Reinforced Composites — Physico-mechanical, Morphological and FEM Analysis. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, [s. l.], vol. 27, n.º 3, p. 313–319, fev. 2008. <https://doi.org/10.1177/0731684407083951>.

DESBRIÈRES, J.; GUIBAL, E. Chitosan for wastewater treatment. **Polymer International**, [s. l.], vol. 67, n.º 1, p. 7–14, jan. 2018. <https://doi.org/10.1002/pi.5464>.

DEVADAS, V. V.; KHOO, K. S.; CHIA, W. Y.; CHEW, K. W.; MUNAWAROH, H. S. H.; LAM, M.-K.; LIM, J.-W.; HO, Y.-C.; LEE, K. T.; SHOW, P. L. Algae biopolymer towards sustainable circular economy. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 325, p. 124702, abr. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124702>.

DIOGO, A. C. Polymers in Building and Construction. **Materials for Construction and Civil Engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 447–499. DOI 10.1007/978-3-319-08236-3\_10.

DOMENEK, S.; FEUILLOLEY, P.; GRATRAUD, J.; MOREL, M.-H.; GUILBERT, S. Biodegradability of wheat gluten-based bioplastics. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 54, n.º 4, p. 551–559, jan. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00760-4](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00760-4).

DONATO, R. K.; MIJA, A. Keratin Associations with Synthetic, Biosynthetic and Natural Polymers: An Extensive Review. **Polymers**, [s. l.], vol. 12, n.º 1, p. 32, 23 dez. 2019. <https://doi.org/10.3390/polym12010032>.

FARIAS, L. M.; MARINHO, J. L. A. Construções sustentáveis: Perspectivas sobre práticas utilizadas na construção civil. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], vol. 6, n.º 3, p. 16023–16033, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n3-466>.

EL KNIDRI, H.; BELAABED, R.; ADDAOU, A.; LAAJEB, A.; LAHSINI, A. Extraction, chemical modification and characterization of chitin and chitosan. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], vol. 120, p. 1181–1189, dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.08.139>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Building Prosperity: A Circular Economy for the Built Environment. Cowes, Reino Unido: **Ellen MacArthur Foundation**, 2023. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/building-prosperity>.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. *Building a world free from waste and pollution*. Cowes, Reino Unido. **Ellen MacArthur Foundation**, 2023. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/building-a-world-free-from-waste-and-pollution>.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics**. [S. l.], [20--]. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>.

FARIA, F. D. O.; VERCELHEZE, A. E. S.; MALI, S. Propriedades físicas de filmes biodegradáveis à base de amido de mandioca, álcool polivinílico e montmorilonita. **Química Nova**, [s. l.], vol. 35, n.º 3, p. 487–492, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000300009>.

FATEHI, H.; ONG, D.; YU, J.; CHANG, I. The Effects of Particle Size Distribution and Moisture Variation on Mechanical Strength of Biopolymer-Treated Soil. **POLYMERS**, vol. 15, n.º 6, mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15061549>.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **Logeion: Filosofia da Informação**, [s. l.], vol. 6, n.º 1, p. 57–73, 15 set. 2019. <https://doi.org/10.21728/logeion.2019v6n1.p57-73>.

GAUDENZI, E.; CARDONE, F.; LU, X.; CANESTRARI, F. Performance assessment of asphalt mixtures produced with a bio-binder containing 30% of lignin. **MATERIALS AND STRUCTURES**, [s. l.], vol. 55, n.º 8, out. 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02057-w>.

GCCA. **Global Cement R&D Investment Trends 2022**. Londres: Global Cement and Concrete Association, 2022. Disponível em: <https://gccassociation.org/>.

GCCA. GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. *Cement Industry Net Zero Progress Report 2024/25: an update of global action and progress of the GCCA and its member companies, as we advance on our net zero journey*. London: **Global Cement and Concrete Association**, 2024.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], vol. 143, p. 757–768, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

GEORGE, A.; SANJAY, M. R.; SRISUK, R.; PARAMESWARANPILLAI, J.; SIENGCHIN, S. A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], vol. 154, p. 329–338, jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, [s. l.], vol. 3, n.º 7, 7 jul. 2017. DOI 10.1126/sciadv.1700782. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>.

GONÇALVES, H. P. C.; PEREIRA, C. de S. S.; DE CARVALHO, J. T.; SILVA, H. S. T. Estudo da Conversão do Óleo de Mamona (*Ricinus communis* L) em Polímeros uma Revisão. **Revista Eletrônica TECCEN**, [s. l.], vol. 15, n.º 1, p. 30–37, 30 jun. 2022. <https://doi.org/10.21727/teccen.v15i1.3093>.

GONZÁLEZ-AVIÑA, J. V.; HOSSEINPOOR, M.; YAHIA, A.; DURÁN-HERRERA, A. New biopolymers as viscosity-modifying admixtures to improve the rheological properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], vol. 146, p. 105409, fev. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105409>.

GUPTA, S.; VARIYAR, P. S. Guar Gum: A Versatile Polymer for the Food Industry. **Biopolymers for Food Design**. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 383–407. DOI 10.1016/B978-0-12-811449-0.00012-8. D

HOSOKAWA, M. N.; DARROS, A. B.; MORIS, V. A. D. S.; PAIVA, J. M. F. D. Polyhydroxybutyrate Composites with Random Mats of Sisal and Coconut Fibers. **Materials Research**, [s. l.], vol. 20, n.º 1, p. 279–290, 22 dez. 2016. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0254>.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. **IEA**. Paris. 2018.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Direct emissions intensity of cement production in the Net Zero Scenario, 2015-2030. **IEA**. Paris, 2023.

ILYAS, R. A.; SAPUAN, S. M.; KADIER, A.; KALIL, M. S.; IBRAHIM, R.; ATIKAH, M. S. N.; NURAZZI, N. M.; NAZRIN, A.; LEE, C. H.; FAIZ NORRAHIM, M. N.; SARI, N. H.; SYAFRI, E.; ABRAL, H.; JASMANI, L.; IBRAHIM, M. I. J. Properties and Characterization of PLA, PHA, and Other Types of Biopolymer Composites. **Advanced Processing, Properties, and Applications of Starch and Other Bio-Based Polymers**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 111–138. DOI 10.1016/B978-0-12-819661-8.00008-1.

IMESON, A. (Ed.). **Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents**. 1.<sup>a</sup> ed. [S. l.]: Wiley, 2009. DOI 10.1002/9781444314724.

HASSAN, M.; BAI, J.; DOU, D.-Q. Biopolymers; Definition, Classification and Applications. **Egyptian Journal of Chemistry**, [s. l.], vol. 0, n.º 0, p. 0–0, 8 abr. 2019. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2019.6967.1580>.

JAHAN, N.; NAVEED, S.; ZESHAN, M.; TAHIR, M. A. How to Conduct a Systematic Review: A Narrative Literature Review. **Cureus**, [s. l.], 4 nov. 2016. DOI 10.7759/cureus.864.

JARJUSEY, A.; HAYANO, K.; KASSA, A. A.; RAIHAN, S.; MOCHIZUKI, Y. Insights into potential of banana leaf powder as a mud soil stabilizer. **Results in Engineering**, [s. l.], vol. 24, 2024. DOI 10.1016/j.rineng.2024.103166.

KANIUK, L.; STACHEWICZ, U. KANIUK, Ł.; STACHEWICZ, U. Development and Advantages of Biodegradable PHA Polymers Based on Electrospun PHBV Fibers for Tissue Engineering and Other Biomedical Applications. **ACS Biomaterials Science and Engineering**American Chemical Society, , 13 dez. 2021. **ACS Biomaterials Science and Engineering**, [s. l.], dez 2021.

KARAK, N. Biopolymers for paints and surface coatings. **Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 333–368. DOI 10.1016/B978-0-08-100214-8.00015-4. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081002148000154>.

KEDZIERSKI, M.; CIREDERF-BOULANT, D.; PALAZOT, M.; YVIN, M.; BRUZAUD, S. Continents of plastics: An estimate of the stock of microplastics in agricultural soils. **Science of The Total Environment**, [s. l.], vol. 880, p. 163294, 1 jul. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163294>.

KUMAR, S.; YADAV, B. D.; RAJ, R. A review on the application of biopolymers (xanthan, agar and guar) for sustainable improvement of soil. **Discover Applied Sciences**, [s. l.], vol. 6, n.º 8, p. 393, 22 jul. 2024. <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06087-7>.

KWON, Y.-M.; MOON, J.-H.; CHO, G.-C.; KIM, Y.-U.; CHANG, I. Xanthan gum biopolymer-based soil treatment as a construction material to mitigate internal erosion of earthen embankment: A field-scale. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 389, 2023. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2023.131716.

LACKNER, M.; MUKHERJEE, A.; KOLLER, M. What Are “Bioplastics”? Defining Renewability, Biosynthesis, Biodegradability, and Biocompatibility. **Polymers**, [s. l.], vol. 15, n.º 24, p. 4695, 13 dez. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15244695>.

LAVANYA, D.; KULKARNI, P.; DIXIT, M.; RAAVI, P. K.; KRISHNA, L. N. V. Sources of cellulose and their applications- A review. **International Journal of Drug Formulation and Research**, [s. l.], vol. 2, p. 19–38, 1 jan. 2011. .

LEWANDOWSKI, K.; SKÓRCZEWSKA, K. A Brief Review of Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Recycling. **Polymers**, [s. l.], vol. 14, n.º 15, p. 3035, 27 jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14153035>.

LI, Jingpeng; LU, Y.; WANG, H. Eco Polymeric Materials and Natural Polymer. **Polymers**, [s. l.], vol. 15, n.º 19, p. 4021, 8 out. 2023. <https://doi.org/10.3390/polym15194021>.

LI, J.; WEN, K.; ZHANG, B. Investigation of mechanical behavior of sustainable construction materials: Recycled glass sand stabilized with natural binder material - Biopolymers. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, vol. 418, 8 mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135359>.

LI, L.; NI, R.; SHAO, Y.; MAO, S. Carrageenan, and its applications in drug delivery. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], vol. 103, p. 1–11, mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.008>.

LI, N.; QIAO, D.; ZHAO, S.; LIN, Q.; ZHANG, B.; XIE, F. 3D printing to innovate biopolymer materials for demanding applications: A review. **Materials Today Chemistry**, [s. l.], vol. 20, p. 100459, jun. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100459>.

LIMA, Ana Carolina A. C. de; ROCHA, Gabrielle S. da; KONAGANO, Noemy Yuri H. **A utilização de plásticos na construção civil**. Belém: Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Sanitária, 2012.

MAÑOSA, J.; CALDERÓN, A.; SALGADO-PIZARRO, R.; MALDONADO-ALAMEDA, A.; CHIMENOS, J. M. Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder – A comprehensive overview. **Heliyon**, [s. l.], vol. 10, n.º 3, p. e25117, fev. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25117>.

- MARTINS, R. G.; SEVERO GONÇALVES, I.; DE MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V. Bioprocess Engineering Aspects of Biopolymer Production by the Cyanobacterium *Spirulina* Strain LEB 18. **International Journal of Polymer Science**, [s. l.], vol. 2014, p. 1–6, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/895237>.
- MASTROLITTI, S.; BORSELLA, E.; GIULIANO, A.; PETRONE, M. T.; BARI, I. D.; GOSSELINK, R.; VAN ERVEN, G.; ANNEVELINK, E.; TRIANTAFYLLIDIS, K. S.; STICHNOTHE, H. **Sustainable lignin valorization**. Technical Report. [S. l.]: IEA Bioenergy, 10 jan. 2021.
- MCKINSEY & COMPANY. **The economics of green construction: How circularity can make the built environment more sustainable**. McKinsey & Company, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/industries/real-estate/our-insights/how-circularity-can-make-the-built-environment-more-sustainable>.
- MIAO, B.; HEADRICK, R.; LI, Z.; SPANU, L.; LOFTUS, D.; LEPECH, M. Development of biopolymer composites using lignin: A sustainable technology for fostering a green transition in the construction sector. **CLEANER MATERIALS**, [s. l.], vol. 14, dez. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100279>.
- MNYANGO, J. I.; HLANGOTHI, S. P. Polyvinyl chloride applications along with methods for managing its end-of-life items: A review. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, [s. l.], p. 14777606241308652, 13 dez. 2024. <https://doi.org/10.1177/14777606241308652>.
- MOAZAMI, D.; POURABBAS BILONDI, M.; RAHNAMA, A.; ZARESEFAT, M.; MORETTI, L. Recycled glass powder and calcium carbide residue geopolymer to stabilise silty sand soil: Mechanical performances and statistical analysis. **Heliyon**, vol. 11, n.º 1, p. e41738, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41738>.
- MOSTAFAVI, F. S.; ZAEIM, D. Agar-based edible films for food packaging applications - A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], vol. 159, p. 1165–1176, set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.123>.
- MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, [s. l.], vol. 16, n.º 7, p. 698–699, jul. 2017. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
- NASER, A. Z.; DEIAB, I.; DARRAS, B. M. Poly(lactic acid) (PLA) and polyhydroxyalkanoates (PHAs), green alternatives to petroleum-based plastics: a review. **RSC Advances**, [s. l.], vol. 11, n.º 28, p. 17151–17196, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1RA02390J>.
- NECAS, J.; BARTOSIKOVA, L. Carrageenan: a review. **Veterinární medicína**, [s. l.], vol. 58, n.º 4, p. 187–205, 30 abr. 2013. <https://doi.org/10.17221/6758-VETMED>.
- NEGM, N. A.; HEFNI, H. H. H.; ABD-ELAAL, A. A. A.; BADR, E. A.; ABOU KANA, M. T. H. Advancement on modification of chitosan biopolymer and its potential applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], vol. 152, p. 681–702, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.196>.
- NGASOTTER, S.; SAMPATH, L.; XAVIER, K. A. M. Nanochitin: An update review on advances in preparation methods and food applications. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], vol. 291, p. 119627, set. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119627>.

NIE, Z.; PENG, K.; LIN, L.; YANG, J.; CHENG, Z.; GAN, Q.; CHEN, Y.; FENG, C. A conductive hydrogel based on nature polymer agar with self-healing ability and stretchability for flexible sensors. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], vol. 454, p. 139843, fev. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139843>.

NWANKWO, C. O.; BAMIGBOYE, G. O.; DAVIES, I. E. E.; MICHAELS, T. A. High volume Portland cement replacement: A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], vol. 260, p. 120445, nov. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120445>.

OKOLI, C. A Guide to Conducting a Standalone Systematic Literature Review. **Communications of the Association for Information Systems**, [s. l.], vol. 37, 2015. DOI 10.17705/1CAIS.03743. Disponível em: <https://aisel.aisnet.org/cais/vol37/iss1/43/>.

ORTIZ-ÁLVAREZ, N.; LIZARAZO-MARRIAGA, J.; BRANDÃO, P. F. B.; SANTOS-PANQUEVA, Y.; CARRILLO, J. Rheological properties of cement-based materials using a biopolymer viscosity modifying admixture (BVMA) under different dispersion conditions. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], vol. 124, p. 104224, nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104224>.

ÖZSOY, S.; GÜNDOĞDU, S.; SEZIGEN, S.; TASALP, E.; IKIZ, D. A.; KIDEYS, A. E. Presence of microplastics in human stomachs. **Forensic Science International**, [s. l.], vol. 364, p. 112246, nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2024.112246>.

PACHECO-TORGAL, F.; IVANOV, V.; KARAK, N.; JONKERS, H. (Eds.). **Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials**. Elsevier, 2016. DOI 10.1016/C2014-0-02075-8. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20140020758>.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITING, P.; MOHER, D. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Revista Panamericana de Salud Pública**, [s. l.], vol. 46, p. 1, 30 dez. 2022. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112>.

PATI, D.; LORUSSO, L. N. How to Write a Systematic Review of the Literature. **HERD: Health Environments Research & Design Journal**, [s. l.], vol. 11, n.º 1, p. 15–30, jan. 2018. <https://doi.org/10.1177/1937586717747384>.

PENG, R. D. Reproducible Research in Computational Science. **Science**, [s. l.], vol. 334, n.º 6060, p. 1226–1227, 2 dez. 2011. <https://doi.org/10.1126/science.1213847>.

PLASTICS EUROPE. Plastics – the fast Facts 2024. Industry Report. Belgium: **Plastics Europe**, de dezembro 2024. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>.

RAHMAN, Md. M.; AKHTARUL ISLAM, M. Application of epoxy resins in building materials: progress and prospects. **Polymer Bulletin**, [s. l.], vol. 79, n.º 3, p. 1949–1975, mar. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03577-1>.

- RAMADAN, S.; EL-KHOLY, S. A.; ELHAGRASSY, A. F. Comparative study on the effect of chitosan, chitosan nanoparticles, and SiO<sub>2</sub> loaded chitosan for the consolidation of the painted stone. **Journal of Cultural Heritage**, [s. l.], vol. 70, p. 312–322, nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.10.006>.
- RAVENSTIJN, J. Bioplastics in consumer electronics. **Industrial Biotechnology**, [s. l.], vol. 6, n.º 5, p. 252–263, out. 2010. <https://doi.org/10.1089/ind.2010.6.252>.
- RAYUNG, M.; GHANI, N. A.; HASANUDIN, N. A review on vegetable oil-based non isocyanate polyurethane: towards a greener and sustainable production route. **RSC Advances**, [s. l.], vol. 14, n.º 13, p. 9273–9299, 2024. <https://doi.org/10.1039/D3RA08684D>.
- REDDY, C. S. K.; GHAI, R.; KALIA, V. C. Polyhydroxyalkanoates: an overview. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 87, n.º 2, p. 137–146, 2003. [https://doi.org/doi:10.1016/s0960-8524\(02\)00212-2](https://doi.org/doi:10.1016/s0960-8524(02)00212-2).
- RINAUDO, M. Chitin and chitosan: Properties and applications. **Progress in Polymer Science**, [s. l.], vol. 31, n.º 7, p. 603–632, jul. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>.
- ROUSE, J. G.; VAN DYKE, M. E. A Review of Keratin-Based Biomaterials for Biomedical Applications. **Materials**, [s. l.], vol. 3, n.º 2, p. 999–1014, 3 fev. 2010. <https://doi.org/10.3390/ma3020999>.
- SABA, N.; JAWAID, M.; SULTAN, M. T. H.; ALOTHMAN, O. Y. Green Biocomposites for Structural Applications. In: JAWAID, M.; SALIT, M. S.; ALOTHMAN, O. Y. (eds.). **Green Biocomposites**. Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1–27. DOI 10.1007/978-3-319-49382-4\_1. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-49382-4\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-49382-4_1).
- SANTOS, C. M. D. C.; PIMENTA, C. A. D. M.; NOBRE, M. R. C. The PICO strategy for the research question construction and evidence search. **Revista Latino-Americana de Enfermagem**, [s. l.], vol. 15, n.º 3, p. 508–511, jun. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0104-11692007000300023>.
- SANYANG, M. L.; SAPUAN, S. M.; JAWAID, M.; ISHAK, M. R.; SAHARI, J. Development and characterization of sugar palm starch and poly(lactic acid) bilayer films. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], vol. 146, p. 36–45, ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.051>.
- SARDER, R.; PINER, E.; RIOS, D. C.; CHACON, L.; ARTNER, M. A.; BARRIOS, N.; ARGYROPOULOS, D. Copolymers of starch, a sustainable template for biomedical applications: A review. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], vol. 278, p. 118973, fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118973>.
- SAWPAN, M. A. Polyurethanes from vegetable oils and applications: a review. **Journal of Polymer Research**, [s. l.], vol. 25, n.º 8, p. 184, ago. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10965-018-1578-3>.
- SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Government Report. Brasília, Brasil: Ministério do Meio Ambiente, 2022.

- SEDAYU, B. B.; CRAN, M. J.; BIGGER, S. W. A Review of Property Enhancement Techniques for Carrageenan-based Films and Coatings. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], vol. 216, p. 287–302, jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.021>.
- SEO, S.; LEE, M.; IM, J.; KWON, Y.; CHUNG, M.; CHO, G.; CHANG, I. Site application of biopolymer-based soil treatment (BPST) for slope surface protection: in-situ wet-spraying method and strengthening effect verification. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, vol. 307, 8 nov. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124983>.
- SHAH, A. U. M.; SULTAN, M. T. H.; JAWAID, M.; CARDONA, F.; ABD. RAHIM ABU TALIB. A Review on the Tensile Properties of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composites. **BioResources**, [s. l.], vol. 11, n.º 4, p. 10654–10676, 1 set. 2016. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.Shah>.
- SILVA, R. G. P. D.; LAFAYETTE, K. P. V. Utilização de resíduos da construção civil e fibras como tecnologias alternativas de tratamento de solos, visando materiais mais sustentáveis para áreas de risco uma revisão sistemática da literatura. **Revista de Geociências do Nordeste**, [s. l.], vol. 10, n.º 2, p. 188–205, 15 ago. 2024. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n2ID34628>.
- SILVA, V.; NASCIMENTO, M.; OLIVEIRA, P.; PANZERA, T.; REZENDE, M.; SILVA, D.; AQUINO, V.; LAHR, F.; CHRISTOFORO, A. Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards. **CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS**, vol. 285, 24 mai. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>.
- SINGH, R.; GAUTAM, S.; SHARMA, B.; JAIN, P.; CHAUHAN, K. D. Biopolymers and their classifications. **Biopolymers and their Industrial Applications**. [S. l.]: Elsevier, 2021. p. 21–44. DOI 10.1016/b978-0-12-819240-5.00002-x.
- SRIVIDYA; KANNAN RAJKUMAR P.R.; SIVASAKTHI M.; SUJITHA A.; JEYALAKSHMI R. A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], vol. 16, p. e00812, jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00812>.
- STABNIKOV, V.; IVANOV, V. Biotechnological production of biopolymers and admixtures for eco-efficient construction materials. **Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 37–56. DOI 10.1016/B978-0-08-100214-8.00003-8. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081002148000038>.
- SUN, S.; LUO, Y.; CAO, S.; LI, W.; ZHANG, Z.; JIANG, L.; DONG, H.; YU, L.; WU, W.-M. Construction and evaluation of an exopolysaccharide-producing engineered bacterial strain by protoplast fusion for microbial enhanced oil recovery. **Bioresource Technology**, [s. l.], vol. 144, p. 44–49, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.098>.
- SUN, X. S. Overview of Plant Polymers. **Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics**. [S. l.]: Elsevier, 2013. p. 1–10. DOI 10.1016/B978-1-4557-2834-3.00001-X. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978145572834300001X>.

TAHIR, Z.; KHAN, M. I.; ASHRAF, U.; RDN, A. I.; MUBARIK, U. Industrial Application of Orange Peel Waste; A Review. **International Journal of Agriculture and Biosciences**, [s. l.], vol. 12, n.º 2, p. 71–76, 2023.

<https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2023.046>.

TAHMOUZI, S.; MEFTAHIZADEH, H.; EYSHI, S.; MAHMOUDZADEH, A.; ALIZADEH, B.; MOLLAKHALILI-MEYBODI, N.; HATAMI, M. Application of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) gum in food technologies: A review of properties and mechanisms of action. **Food Science & Nutrition**, [s. l.], vol. 11, n.º 9, p. 4869–4897, set. 2023a. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3383>.

TAMOŠAITIENĖ, J.; PARHAM, S.; SARVARI, H.; CHAN, D. W. M.; EDWARDS, D. J. A Review of the Application of Synthetic and Natural Polymers as Construction and Building Materials for Achieving Sustainable Construction. **Buildings**, [s. l.], vol. 14, n.º 8, p. 2569, 20 ago. 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14082569>.

TURNER, A.; FILELLA, M. Polyvinyl chloride in consumer and environmental plastics, with a particular focus on metal-based additives. **Environmental Science: Processes & Impacts**, [s. l.], vol. 23, n.º 9, p. 1376–1384, 2021.

<https://doi.org/10.1039/D1EM00213A>.

TAYE, A.; KALITA, U.; DUTTA, P. P.; HALOI, D. From Waste to Wrap: Pistachio Shell Powder–Reinforced Chitosan Biocomposite for Eco-Friendly Packaging.

**Packaging Technology and Science**, [s. l.], vol. 38, n.º 9, p. 761–774, set. 2025. <https://doi.org/10.1002/pts.70002>.

UNEP. **Building Materials and the Climate: Constructing a New Future**.

Erscheinungsort nicht ermittelbar: United Nations, 2023.

VALLI, S.; KUMAR, M. Effectiveness of Xanthan Gum-based composite in repairing cracks in reinforced concrete structures. **MATERIALS RESEARCH EXPRESS**, [s. l.], vol. 11, n.º 9, 1 set. 2024a. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad719d>.

VALLI, S.; KUMAR, M. Innovative approaches to enhancing crack repair: Performance optimization of biopolymer-infused CXT. **HIGH TEMPERATURE MATERIALS AND PROCESSES**, [s. l.], vol. 43, n.º 1, 19 ago. 2024b.

<https://doi.org/10.1515/htmp-2024-0046>.

VAZQUEZ, A.; PIQUE, T. M. Biotech admixtures for enhancing portland cement hydration. **Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials**. [S. l.]: Elsevier, 2016. p. 81–98. DOI 10.1016/B978-0-08-100214-8.00005-1. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081002148000051>.

VARGHESE, S. A.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S.; PARAMESWARANPILLAI, J. Natural polymers and the hydrogels prepared from them. **Hydrogels Based on Natural Polymers**. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 17–47. DOI 10.1016/b978-0-12-816421-1.00002-1. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128164211000021>.

WORLD ECONOMIC FORUM; MCKINSEY & COMPANY. **Circularity in the Built Environment: Maximizing CO<sub>2</sub> Abatement and Business Opportunities**. Report. [S. l.]: World Economic Forum, Centre for Nature and Climate / Centre for Energy

and Materials, 5 dez. 2023. Disponível em:  
<https://www.weforum.org/publications/circularity-in-the-built-environment-maximizing-co2-abatement-and-business-opportunities/>.

WANG, T.; ZHANG, M.; FANG, Z.; LIU, Y.; GAO, Z. Rheological, Textural and Flavour Properties of Yellow Mustard Sauce as Affected by Modified Starch, Xanthan and Guar Gum. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], vol. 9, n.º 5, p. 849–858, mai. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1673-6>.

WANG, X.; LIU, P.; WU, Q.; ZHENG, Z.; XIE, M.; CHEN, G.; YU, J.; WANG, X.; LI, G.; KAPLAN, D. Sustainable Antibacterial and Anti-Inflammatory Silk Suture with Surface Modification of Combined-Therapy Drugs for Surgical Site Infection. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [s. l.], vol. 14, n.º 9, p. 11177–11191, 9 mar. 2022. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00106>.

ZHANG, M.; JIA, R.; MA, M.; YANG, T.; SUN, Q.; LI, M. Versatile wheat gluten: functional properties and application in the food-related industry. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], vol. 63, n.º 30, p. 10444–10460, 29 nov. 2023. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2078785>.