



FERNANDA CAROLINA RESENDE

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DO FRUTO
DA SERINGUEIRA COMO ELEMENTO DE REFORÇO EM
COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**LAVRAS - MG
2025**

FERNANDA CAROLINA RESENDE

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DO FRUTO DA SERINGUEIRA
COMO ELEMENTO DE REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Orientador

Prof. Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade
Coorientador

**LAVRAS – MG
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Catalogação da Biblioteca Universitária da UFLA

Resende, Fernanda Carolina.

Potencial de utilização do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios / Fernanda Carolina Resende. - 2025.

97 p. : il.

Orientador(a): Saulo Rocha Ferreira.

Coorientador(a): Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Compósitos cimentícios. 2. Elemento de reforço. 3. Endocarpo. 4. Seringueira. 5. Resíduos Vegetais. I. Ferreira, Saulo Rocha. II. Andrade, Rodolfo Giacomim Mendes. III. Título.

FERNANDA CAROLINA RESENDE

**POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DO FRUTO DA SERINGUEIRA
COMO ELEMENTO DE REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

**POTENTIAL FOR USE OF RUBBER TREE FRUIT ENDOCARP AS A
REINFORCEMENT ELEMENT IN CEMENTITIOUS COMPOSITES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 29 de janeiro de 2025.

Dr. Saulo Rocha Ferreira UFLA

Dr. José Benedito Guimarães Júnior UFLA

Dr. Lorrán de Sousa Arantes UFLA

Dra. Samantha Coelho Pinheiro UEA

Dr. Otávio Augusto Paiva UEA

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira

Orientador

Prof. Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade

Coorientador

LAVRAS – MG

2025

*À minha querida mãe, por ser o meu maior exemplo de vida.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade concedida, por toda o aprendizado e por ter me amparado em todos os obstáculos encontrados ao longo desta jornada. À Ele minha eterna gratidão, pois sem o Teu amor e a Tua misericórdia a concretização deste trabalho não seria possível.

À minha querida mãe, Rosa, por todo o amor e todo o apoio incondicional ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira e ao meu coorientador Prof. Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade, por todos os ensinamentos proporcionados e todas as contribuições para a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório e aos alunos de iniciação científica, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado!

À Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade proporcionada.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais.

Aos laboratórios de estruturas, de microscopia e ao departamento de química da Universidade Federal de Lavras. E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista o meu muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

*“O conhecimento é o antídoto do medo”
(Ralph Waldo Emerson)*

RESUMO

O concreto é amplamente empregado na construção civil, devido à sua versatilidade e resistência à compressão. Contudo, sua baixa resistência à tração e flexão, representam uma limitação, que pode comprometer sua aplicação e durabilidade. Dessa forma, a incorporação de elementos de reforço, como fibras metálicas, sintéticas ou naturais, na matriz cimentícia, tem sido avaliada como uma solução eficaz para melhorar as propriedades mecânicas e a resistência a fissuração desse material. A seringueira é uma árvore muito conhecida, por sua produção de látex. Seu fruto é composto por um endocarpo lenhoso e aparentemente resistente, que pode apresentar potencial para ser empregado na produção de compósitos cimentícios. Portanto, este estudo teve como objetivo investigar o potencial de utilização do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios. O resíduo utilizado neste estudo foi coletado no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Para quantificar os teores de extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose presentes no material, foi realizada a caracterização química dos endocarpos em sua forma natural. Com o objetivo de melhorar a compatibilidade química com a matriz cimentícia, os endocarpos foram submetidos a tratamentos específicos, envolvendo a lavagem em água quente a 80°C e a imersão em solução alcalina de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Adicionalmente, com o intuito de melhorar a aderência do endocarpo à matriz cimentícia, parte dos endocarpos foram revestidos com o polímero XSBR. Para avaliar a eficiência dos tratamentos, foi realizada a análise de calorimetria semi-adiabática. A capacidade de absorção de água, o teor de umidade e a densidade do resíduo, foram avaliados por meio de uma adaptação da norma ASTM D2395-17. A adesão dos endocarpos à matriz cimentícia foi avaliada por meio de ensaios de flexão realizados em compósitos cimentícios, contendo endocarpos tratados e naturais. Para analisar o potencial do endocarpo como elemento de reforço na matriz cimentícia, foram produzidos concretos com incorporação de 1% de endocarpos revestidos com o polímero XSBR, fibras de aço e macrofibras de polipropileno, que posteriormente foram submetidos a ensaios de flexão e compressão. Os resultados da análise química indicaram que o material apresentou em média, 5,72% de extrativos, 23,74% de lignina, 1,37% de cinzas e 69,17% de holocelulose. Os resultados obtidos no ensaio de calorimetria mostraram que os tratamentos aplicados aos endocarpos, foram eficientes para melhorar a hidratação do cimento. A capacidade de absorção de água, o teor de umidade e a densidade do endocarpo natural, foram de 74,51%, 5,24 % e 0,80 g/cm³, respectivamente. A elevada capacidade de absorção de água do endocarpo impactou negativamente a hidratação do cimento na interface matriz-endocarpo dos compósitos. Os resultados dos ensaios de flexão dos compósitos cimentícios indicaram que, o revestimento com o polímero XSBR, melhorou a adesão do endocarpo à matriz cimentícia. Os ensaios de compressão e flexão realizados no concreto evidenciaram que, mesmo em baixa concentração, o endocarpo apresentou potencial para ser utilizado como elemento de reforço na matriz cimentícia.

Palavras-chave: compósitos cimentícios; elemento de reforço; resíduos vegetais; endocarpo; seringueira.

ABSTRACT

Concrete is widely used in civil construction due to its versatility and compressive strength. However, its low tensile and flexural strength represent a limitation that can compromise its application and durability. Thus, the incorporation of reinforcing elements, such as synthetic or natural metal fibers, in the cement matrix has been evaluated as an effective solution to improve the mechanical properties and crack resistance of this material. The rubber tree is a well-known tree for its latex production. Its fruit is composed of a woody and apparently resistant endocarp, which may have potential to be used in the production of cementitious composites. Therefore, this study aimed to investigate the potential use of the endocarp of the rubber tree fruit as a reinforcing element in cementitious composites. The residue used in this study was collected on the campus of the Federal University of Lavras (UFLA). To quantify the contents of total extractives, lignin, ash and holocellulose present in the material, the chemical characterization of the endocarps in their natural form was performed. In order to improve chemical compatibility with the cement matrix, the endocarps were subjected to specific treatments, involving washing in hot water at 80°C and immersion in an alkaline solution of calcium hydroxide (Ca(OH)₂). Additionally, in order to improve endocarp adhesion to the cement matrix, part of the endocarps were coated with the XSBR polymer. To evaluate the efficiency of the treatments, semi-adiabatic calorimetry analysis was performed. The water absorption capacity, moisture content and density of the residue were evaluated through an adaptation of the ASTM D2395–17 standard. The adhesion of the endocarps to the cement matrix was evaluated through flexural tests performed on cementitious composites containing treated and natural endocarps. To analyze the potential of the endocarp as a reinforcing element in the cement matrix, concretes were produced with the incorporation of 1% of endocarps coated with the XSBR polymer, steel fibers and polypropylene macrofibers, which were subsequently subjected to flexural and compression tests. The results of the chemical analysis indicated that the material presented on average 5.72% extractives, 23.74% lignin, 1.37% ash and 69.17% holocellulose. The results obtained in the calorimetry test showed that the treatments applied to the endocarps were efficient in improving the cement hydration. The water absorption capacity, moisture content and density of the natural endocarp were 74.51%, 5.24% and 0.80 g/cm³, respectively. The high water absorption capacity of the endocarp negatively impacted the cement hydration at the matrix-endocarp interface of the composites. The results of the flexural tests of the cementitious composites indicated that the coating with the XSBR polymer improved the adhesion of the endocarp to the cementitious matrix. The compression and flexural tests performed on the concrete showed that, even at low concentrations, the endocarp showed potential to be used as a reinforcement element in the cementitious matrix.

Keywords: cementitious composites; reinforcement element; vegetable waste; endocarp; rubber tree.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa sobre o uso do endocarpo do fruto da seringueira, como elemento de reforço, para a produção de compósitos cimentícios tem impactos significativos em diferentes áreas. Socialmente, promove a adoção de práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil e pode gerar novas oportunidades de emprego e renda para comunidades envolvidas na coleta e processamento desse resíduo. Tecnicamente, os resultados demonstraram que o endocarpo do fruto da seringueira apresentou potencial para ser utilizado como elemento de reforço em compósitos cimentícios, desde que tratados adequadamente, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Economicamente, a incorporação de resíduos naturais, como elemento de reforço no concreto pode reduzir os custos de produção desse material, se comparado ao uso de fibras sintéticas ou metálicas. Culturalmente, o estudo reforça a valorização de recursos naturais brasileiros, além de incentivar a conscientização sobre a importância do reaproveitamento de resíduos naturais, que seriam descartados na natureza.

IMPACT INDICATORS

The research into the use of rubber tree fruit endocarp as a reinforcing element for the production of cement composites has significant impacts in different areas. Socially, it promotes the adoption of more sustainable practices in the construction industry and can generate new employment and income opportunities for communities involved in the collection and processing of this waste. Technically, the results demonstrated that rubber tree fruit endocarp had the potential to be used as a reinforcing element in cement composites, provided it is treated appropriately, contributing to the development of more sustainable materials. Economically, the incorporation of natural waste as a reinforcing element in concrete can reduce the production costs of this material, when compared to the use of synthetic or metallic fibers. Culturally, the study reinforces the appreciation of Brazilian natural resources, in addition to encouraging awareness of the importance of reusing natural waste that would otherwise be discarded in nature.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

- Figura 1 – Mecanismo de transferência de tensões no concreto reforçado com fibras após a formação de fissuras.....20
- Figura 2 – Curvas de tensão x deformação obtidas no ensaio de tração para o concreto convencional (sem adição de fibras) e para o concreto reforçado com fibras, evidenciando o efeito das fibras no comportamento mecânico do material.....21
- Figura 3 – Árvore de seringueira (*Hevea brasiliensis*) presentes no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA).....31
- Figura 4 -Aspectos morfológicos da árvore de seringueira: Inflorescências (A) e Folhas pecioladas (B).....31
- Figura 5 – Estrutura morfológica do fruto da seringueira, destacando seus componentes anatômicos característicos: epicarpo, endocarpo e semente.....32
- Figura 6 - Endocarpo do fruto da árvore de seringueira (*Hevea brasiliensis*).....33

SEGUNDA PARTE

- Figura 1 - Fibras de aço (A) e macrofibras de polipropileno (B).....47
- Figura 2 – Mapa de localização geográfica das árvores de seringueira no campus da UFLA.....48
- Figura 3 – Medida do comprimento do endocarpo do fruto da seringueira (*Hevea brasiliensis*).....48
- Figura 4 – Fração retida acumulada (%) do agregado miúdo (areia) após a realização do ensaio de distribuição granulométrica, pelo método do peneiramento.....49
- Figura 5 – Amostra do endocarpo do fruto da seringueira, com a concavidade voltada para cima, sendo esmagada durante a realização do teste de resistência à compressão axial.....51
- Figura 6 – Endocarpos do fruto da seringueira logo após a impregnação com o polímero de estireno-butadieno carboxilado (XSBR) (A) e posteriormente acondicionados em sala climatizada, com temperatura de 18°C e UR de 66%, para secagem.....52
- Figura 7 – Termopar instalado no centro de uma caixa de isopor contendo pasta de cimento, para a realização do ensaio de calorimetria semi-adiabática, onde foi avaliado o comportamento térmico das pastas cimentícias com e sem adição do endocarpo do fruto da seringueira (A) e ensaio de calorimetria semi-adiabática, das pastas de cimento com e sem endocarpos, sendo realizado, em ambiente climatizado (B).....54

Figura 8 – Representação esquemática de como foi realizado o corte para obtenção de amostras do endocarpo do fruto da seringueira para a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (A) e amostras sendo preparadas para receber o recobrimento com ouro (Au) (B).....	55
Figura 9 – Moldagem dos corpos de prova de argamassa, para a realização do ensaio de resistência mecânica à tração na flexão, com as concavidades dos endocarpos do fruto da seringueira, voltadas para cima (CC) e para baixo (CB).....	57
Figura 10 – Representação esquemática do perfil longitudinal do corpo de prova de argamassa, contendo um endocarpo com a concavidade voltada para cima (CC).....	58
Figura 11 – Representação esquemática do perfil longitudinal do corpo de prova de argamassa, contendo um endocarpo com a concavidade voltada para baixo (CB).....	58
Figura 12 – Abatimento dos concretos: Referência (A), Endocarpo com XSBR (B), Macrofibras de polirpropileno (C) e Fibras de aço (D).....	61
Figura 13 – Moldagem dos corpos de prova para ensaios de compressão (A) e flexão (B).....	62
Figura 14 – Processo de cura dos corpos de prova para ensaios de flexão (A) e compressão (B).....	62
Figura 15 – Processo de faceamento (A) e verificação da planicidade dos corpos de prova para ensaios de compressão (B).....	63
Figura 16 – Máquina de ensaios, eletromecânica, utilizada para determinação da resistência mecânica à compressão e flexão do concreto (A) e ensaio de resistência à compressão axial, em execução.....	63
Figura 17 – Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos do concreto.....	64
Figura 18 – Curvas obtidas no ensaio de calorimetria semi-adiabática de pastas cimentícias de referência e contendo endocarpos naturais, lavados em água quente, tratados com solução de hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR.....	68
Figura 19 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com solução de hidróxido de cálcio e revestido com o polímero XSBR.....	70
Figura 20 – Curva representativa da relação carga x deslocamento para o ensaio de compressão axial do endocarpo natural.....	72
Figura 21 – Micrografia da superfície externa do endocarpo do fruto da seringueira.....	73
Figura 22 – Micrografia da superfície interna do endocarpo do fruto da seringueira.....	73

Figura 23 – Micrografia da superfície lateral do endocarpo do fruto da seringueira.....	74
Figura 24 – Imagem obtida na análise de micrografia de força atômica (AFM) da superfície externa do endocarpo do fruto da seringueira.....	74
Figura 25 – Imagem obtida na análise de microscopia de força atômica (AFM) da superfície interna do endocarpo do fruto da seringueira.....	75
Figura 26 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 7 dias de cura.....	76
Figura 27 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 14 dias de cura.....	77
Figura 28 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 28 dias de cura.....	77
Figura 29 – Interface entre a matriz cimentícia e o endocarpo, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos previamente tratados com solução de hidróxido de cálcio, aos 14 dias de cura.....	78
Figura 30 – Curvas obtidas no ensaio de termogravimetria (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) da matriz cimentícia e das interfaces entre matriz cimentícia e endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com solução de hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR.....	81
Figura 31 – Curva de derivada termogravimétrica (DTG) da interface entre a matriz cimentícia e o endocarpo revestido com o polímero XSBR.....	81
Figura 32 – Curvas típicas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.....	83
Figura 33 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referência.....	84
Figura 34 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de macrofibras de polipropileno.....	84
Figura 35 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR..	85
Figura 36 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de fibras de aço.....	85

Figura 37 – Curvas típicas de tensão x deformação obtidas no ensaio de tração na flexão (3 pontos), aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos produzidos com 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.....	87
Figura 38 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto referência.....	88
Figura 39– Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de macrofibras de polipropileno.....	89
Figura 40 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de endocarpos revestidos com o polímero XSBR....	89
Figura 41 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de fibras de aço.....	90

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE

Tabela 1 – Propriedades das fibras de aço e das macrofibras de polipropileno, utilizadas no desenvolvimento deste estudo.....	47
Tabela 2 – Normas utilizadas para a obtenção da composição química do endocarpo do fruto da seringueira, a partir da quantificação dos teores de extrativos totais, lignina e cinzas.....	50
Tabela 3 – Propriedades físicas do polímero de estireno-butadieno carboxilado (XSBR), fornecidas pela empresa fabricante.....	53
Tabela 4 – Descrição de todos os compósitos de argamassa que foram produzidos neste estudo.....	57
Tabela 5 – Traço, calculado em volume, adotado para a produção dos concretos.....	59
Tabela 6 – Propriedades físicas do aditivo incorporador de ar com ação plastificante da marca Quartzolit, fornecidas pelo fabricante.....	60
Tabela 7 – Composição química do endocarpo do fruto da árvore de seringueira.....	65
Tabela 8 – Propriedades físicas do endocarpo do fruto da árvore de seringueira.....	66
Tabela 9 – Resistência média à compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.....	86
Tabela 10 – Resistência média à tração na flexão (3 pontos), aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.....	91

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo geral.....	18
1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1 Compósitos cimentícios reforçados com fibras.....	20
2.2 Bioconcreto.....	24
2.3 Desafios encontrados na produção de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais ou resíduos.....	25
2.4 Tratamentos aplicados para melhoria das propriedades das fibras vegetais em compósitos cimentícios.....	27
2.5 Seringueira.....	30
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
REFERÊNCIAS.....	35

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

1 INTRODUÇÃO.....	45
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.1 Endocarpo do fruto da seringueira como bioagregado e potencial elemento de reforço.....	49
2.1.1 Propriedades químicas.....	49
2.1.2 Densidade básica, absorção de água e umidade do endocarpo.....	50
2.1.3 Avaliação das propriedades mecânicas do endocarpo.....	50
2.1.4 Tratamentos dos endocarpos.....	51
2.1.4.1 Lavagem em água quente.....	51
2.1.4.2 Imersão em solução alcalina.....	52
2.1.4.3 Impregnação com o polímero XSBR.....	52
2.1.5 Calorimetria semi-adiabática.....	53
2.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	54
2.1.7 Microscopia de força atômica (AFM).....	55
2.1.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	56
2.2 Produção dos compósitos cimentícios com adição de endocarpos.....	56
2.2.1 Produção dos corpos de prova de argamassa com adição de endocarpos tratados e não tratados.....	56

2.2.1.2 Avaliação da adesão do endocarpo à matriz cimentícia.....	58
2.2.1.3 Análise Termogravimétrica (TGA) da interface endocarpo – matriz cimentícia..	58
2.2.2 Produção dos concretos.....	59
2.2.2.1 Dosagem dos concretos.....	59
2.2.2.2 Moldagem dos concretos.....	60
2.2.2.3 Slump dos concretos.....	60
2.2.2.4 Produção dos corpos de prova de flexão e compressão.....	61
2.2.2.5 Faceamento dos corpos de provas submetidos ao ensaio de compressão axial.....	62
2.2.2.6 Ensaio mecânico de resistência à compressão axial.....	63
2.2.2.7 Ensaio mecânico de resistência à tração na flexão (3 pontos).....	64
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1 Caracterização química do endocarpo da seringueira.....	65
3.2 Propriedades físicas do endocarpo da seringueira.....	66
3.3 Calorimetria semi-adiabática.....	67
3.4 FTIR.....	70
3.5 Compressão axial do endocarpo natural.....	71
3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia de força atômica (AFM).....	72
3.7 Avaliação da adesão do endocarpo à matriz cimentícia, a partir do ensaio de flexão em 3 pontos dos compósitos de argamassa.....	76
3.8 Termogravimetria.....	80
3.9 Compressão do concreto aos 28 dias.....	82
3.10 Ensaio de resistência à tração na flexão (3 pontos) do concreto, aos 28 dias.....	86
4 CONCLUSÃO.....	92
AGRADECIMENTOS.....	93
REFERÊNCIAS.....	94

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A crescente busca pela adoção de práticas sustentáveis na construção civil tem sido impulsionada pelo elevado consumo de recursos não renováveis e também pela alta demanda por materiais como o cimento, cuja produção contribui significativamente para a emissão de gases do efeito estufa (AMARAL et al., 2022)

Apesar de sua resistência à compressão, os materiais à base de cimento apresentam limitações consideráveis quando submetidos a esforços de tração e flexão, exibindo um comportamento frágil que pode levar à fissuração da matriz cimentícia. Assim, é imprescindível melhorar suas propriedades mecânicas, a fim de otimizar o desempenho e a durabilidade das estruturas (YUAN et al., 2020; EUGÊNIO et al., 2024).

Para superar essa limitação, a incorporação de fibras na matriz cimentícia tem se mostrado uma estratégia eficaz, pois aumenta a tenacidade do material e melhora seu desempenho pós-fissuração (FARRAPO et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2018; VAIRAGADE et al., 2023; EUGÊNIO et al., 2024).

Fibras de aço, vidro e polipropileno são comumente empregadas como elementos de reforço em compósitos cimentícios. No entanto, os elevados custos e impactos ambientais associados à produção desses materiais têm impulsionado a busca por alternativas mais sustentáveis e economicamente viáveis (LAVERDE et al., 2022; GARCÍA et al., 2024). Nesse contexto, as fibras vegetais têm se destacado como uma alternativa promissora às fibras sintéticas, devido às suas vantagens, como renovabilidade, biodegradabilidade e baixo impacto ambiental (WANG et al., 2023; GAMAGE et al., 2024).

Provenientes de fontes naturais, essas fibras demandam menos energia em seu processamento, apresentam uma relação custo-benefício atrativa, baixo peso específico e propriedades mecânicas adequadas para diferentes aplicações (AHMAD et al., 2022; HAMADA et al., 2023; AHMAD et al., 2023). Além disso, o uso dessas fibras contribui para o reaproveitamento de resíduos agrícolas e florestais que, de outra forma, seriam encaminhados para aterros sanitários, reforçando ainda mais seu caráter sustentável (EUGÊNIO et al., 2024).

Embora as fibras vegetais representem uma alternativa promissora, elas requerem tratamentos específicos para melhorar sua durabilidade, resistência mecânica e aderência à matriz cimentícia. Sob essa perspectiva, diferentes tratamentos têm sido avaliados, incluindo a

lavagem com água quente, a imersão em soluções alcalinas e impregnação com polímeros, como o estireno-butadieno carboxilado (XSBR) (FERREIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2018; FERREIRA et al., 2020; ALENCAR et al., 2023; GARCÍA et al., 2024).

O setor agroindustrial abrange uma ampla variedade de culturas agrícolas, possibilitando o reaproveitamento de resíduos industriais, florestais e agrícolas, como casca de arroz (AMANTINO et al., 2022), madeira (DA GLÓRIA et al., 2024), endocarpo da macaúba (ANDRADE, 2022), entre outros. Dentre essas culturas, destaca-se a seringueira (*Hevea brasiliensis*), uma espécie nativa da região amazônica, amplamente conhecida por sua produção de látex, principal matéria-prima utilizada na fabricação da borracha (EKCHAWENG et al., 2017; SANT'ANNA et al., 2021).

Além do látex, a seringueira também gera outros subprodutos, como seus frutos, que muitas vezes são subutilizados. O fruto da seringueira é composto por uma cápsula do tipo tricoca, com um endocarpo de estrutura aparentemente resistente, contendo três sementes (OLIVEIRA, 2012; LAGE, 2013; SOUZA, 2014). Estudos indicam que as sementes do fruto da seringueira podem ser reaproveitadas para a produção de biocombustíveis, suplementos alimentares, barras de cereal e ração para peixes (GONÇALVES, 2016; UNICENTRO, 2022). No entanto, até o momento, não foram encontrados, na literatura, métodos específicos de reaproveitamento para o endocarpo do fruto da seringueira.

Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar o uso do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios, visando à melhoria do desempenho desses materiais, especialmente em relação à resistência pós-fissuração, garantindo maior eficiência e durabilidade. Além disso, buscou-se fornecer uma possível aplicação a esse resíduo, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e com maior eficiência para aplicações na construção civil.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial de uso do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios.

1.2 Objetivos específicos

- a) Analisar as propriedades químicas, físicas e mecânicas do endocarpo, com o intuito de compreender suas características e avaliar sua influência no desempenho dos compósitos cimentícios;
- b) Verificar a influência do endocarpo nos processos de hidratação da matriz cimentícia, antes e após a aplicação de tratamentos superficiais;
- c) Investigar as características anatômicas do endocarpo, a fim de compreender seu processo de ancoragem na matriz cimentícia;
- d) Avaliar o desempenho mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com endocarpo, com o objetivo de verificar sua eficácia como elemento de reforço.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

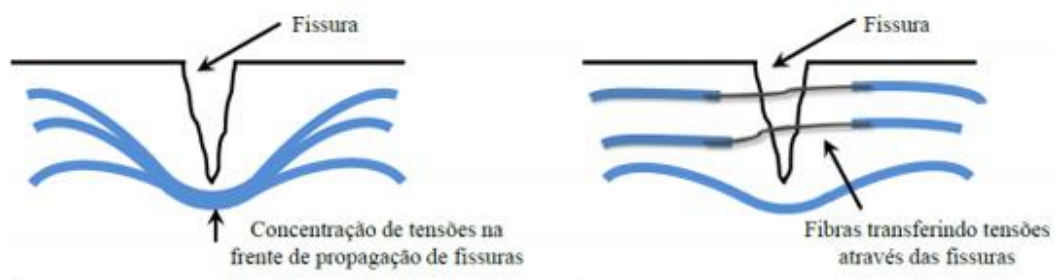
2.1 Compósitos cimentícios reforçados com fibras

Compósitos cimentícios, como o concreto, são amplamente utilizados na construção civil, devido à sua elevada resistência à compressão e excelente rigidez. No entanto, sua baixa resistência à tração e à flexão, associada à fragilidade decorrente da limitada capacidade de deformação, pode comprometer a segurança e durabilidade das estruturas (BRANDT, 2008; NEVILLE, 2013; METHA & MONTEIRO, 2014; MUTHUKUMARANA et al., 2023). Nesse contexto, pesquisas têm avaliado o uso de elementos de reforço - como fibras metálicas, sintéticas e naturais - na matriz cimentícia, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, especialmente a resistência à tração e à flexão, a tenacidade e a resistência à fissuração (DISCHER et al., 2023; LI et al., 2023).

Estudos encontrados na literatura evidenciam que a incorporação de fibras como elemento de reforço em materiais cimentícios tem se mostrado uma estratégia eficaz para otimizar o desempenho pós-fissuração desses materiais (SAVASTANO JR. et al., 2005; AGOPYAN et al., 2005; NAAMAN et al., 2008; JANG et al., 2018; FARES et al., 2024).

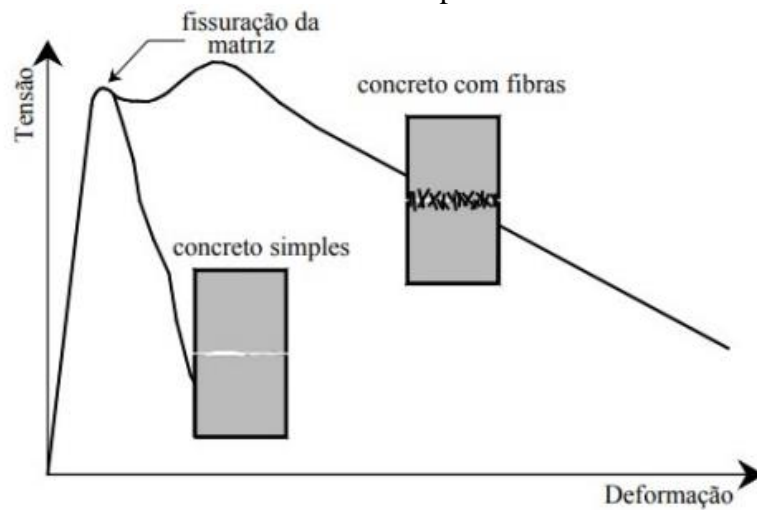
Os Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras (FRCCs, na sigla em inglês), se destacam por apresentar maior resistência à tração e à flexão, maior ductilidade e um comportamento pós-fissuração aprimorado (NEVILLE, 2013; TOLEDO FILHO et al., 2016; ALBERTI et al., 2022; DISCHER et al., 2023). Nesse sentido, as fibras atuam como “pontes” de transferência de tensões entre as fissuras, reduzindo sua abertura e, conseqüentemente, melhorando a resposta do material na fase pós-pico das curvas de tensão-deformação, conforme observado nas Figuras 1 e 2 (SILVA et al., 2009; FERREIRA et al., 2018; SALUM et al., 2020; RAMLINGAM et al., 2024).

Figura 1 – Mecanismo de transferência de tensões no concreto reforçado com fibras após a formação de fissuras.



Fonte: Salum et al. (2020).

Figura 2 – Curvas de tensão x deformação obtidas no ensaio de tração para o concreto convencional (sem adição de fibras) e para o concreto reforçado com fibras, evidenciando o efeito das fibras no comportamento mecânico do material.



Fonte: Drun et al. (2022).

O desempenho dos FRCCs depende de diversos fatores, como a geometria e a forma das fibras, a dosagem utilizada, sua orientação e distribuição na matriz, bem como a interação fibra-matriz (METHA & MONTEIRO, 2014; FERREIRA et al., 2018; WANG et al., 2024). Esses parâmetros influenciam diretamente as propriedades mecânicas do material, tanto em termos de resistência quanto de ductilidade, e devem ser cuidadosamente controlados para garantir a eficiência e a durabilidade do compósito (METHA & MONTEIRO, 2014; DAI et al., 2024).

A geometria e a forma das fibras exercem grande influência no desempenho mecânico dos FRCCs. Essa influência pode ser representada pelo fator de forma, que corresponde à relação entre o comprimento e o diâmetro médio das fibras. De modo geral, quanto maior o fator de forma, maior será a capacidade de resistência pós-fissuração do compósito, devido à maior interação mecânica entre as fibras e a matriz. Ao se aumentar o comprimento da fibra ou diminuir sua seção transversal, eleva-se o valor do fator de forma (FIGUEIREDO, 2011; NEVILLE, 2013; METHA & MONTEIRO, 2014).

Além disso, a forma das fibras também influencia a ancoragem e a interação com a matriz cimentícia. Fibras onduladas, com ganchos ou com superfície rugosa garantem melhor adesão à matriz, aumentando a resistência ao descolamento e aprimorando o comportamento do compósito quando submetido a carregamentos, em comparação, por exemplo, às fibras retas (NEVILLE, 2013; METHA & MONTEIRO, 2014; XIE et al., 2021; RAMLINGAM et al., 2024).

Outro parâmetro que influencia a capacidade de reforço dos FRCCs é a dosagem de fibras utilizada. Quanto maior o teor de fibras incorporadas ao compósito, maior será a quantidade de elementos atuando como “pontes” de transferência de tensões, o que resulta em um aumento na capacidade de reforço pós-fissuração do material (FIGUEIREDO, 2011; METHA & MONTEIRO, 2014). No entanto, concentrações elevadas de fibras podem comprometer a trabalhabilidade da mistura, levando à maior segregação e à redução da fluidez. Dessa forma, para mitigar esses efeitos adversos e garantir maior homogeneidade, é recomendado a utilização de superplastificantes, antes da incorporação das fibras ao concreto (NEVILLE, 2013; METHA & MONTEIRO, 2014; SAFIUDDIN et al., 2021; IFTEKAR et al., 2021; MUTHUKUMARANA et al., 2023).

A orientação e distribuição das fibras no concreto também impactam o seu desempenho mecânico. Estudos indicam que, quando as fibras estão alinhadas paralelamente à direção da carga aplicada, o concreto apresenta maior tenacidade e resistência à tração. Esse comportamento é superior em comparação ao concreto reforçado com fibras dispostas de forma aleatória, no qual a eficiência na transferência de tensões é menor (NEVILLE, 2013; AMRAN et al., 2022; MUTHUKUMARANA et al., 2023).

Além disso, as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios reforçados com fibras (FRCCs) também dependem diretamente da qualidade da interface entre as fibras e a matriz. Essa zona de transição interfacial (ZTI), desempenha um papel fundamental na transferência de tensões da matriz para as fibras, controlando a formação e propagação de fissuras no material (PI et al., 2021; ZHENG et al., 2024).

A microestrutura da ZTI entre as fibras e a matriz apresenta características únicas que a tornam particularmente vulnerável. Por ser mais porosa e menos densa em comparação às demais regiões do compósito, essa zona tende a concentrar tensões sob a aplicação de cargas externas, favorecendo o desenvolvimento de microfissuras. Essas microfissuras podem se propagar rapidamente para a matriz, comprometendo a integridade do material. Portanto, o fortalecimento dessa região e a melhoria de sua microestrutura, bem como de seu desempenho na transferência de tensões, são aspectos fundamentais para o desenvolvimento dos FRCCs (ZHANG et al., 2023; ZHENG et al., 2024).

De acordo com as suas dimensões, as fibras podem ser classificadas em microfibras, com comprimento entre 6 – 20 mm, e macrofibras, com comprimento superior a 30 mm. Quanto aos tipos de fibras utilizadas na produção dos FRCCs, destacam-se as fibras de aço, sintéticas e naturais (TABRIZIKAHOU et al., 2024). As fibras de aço são amplamente empregadas como elemento de reforço em compósitos cimentícios, devido à sua elevada resistência mecânica e à

capacidade de melhorar a resistência do material. Essas fibras geralmente apresentam diâmetros entre 0,2 e 1 mm, comprimentos variando de 10 a 60 mm e fator de forma entre 40 e 80 (MAGBOOL et al., 2021; ZHANG et al., 2023).

As fibras de polipropileno são fibras orgânicas de baixo custo que se destacam em comparação a outras fibras sintéticas. Elas apresentam elevada tenacidade, alta resistência mecânica, além de boa resistência à corrosão e à abrasão. A ausência de grupos reativos em sua estrutura molecular confere a elas estabilidade química e as torna inertes. Essas propriedades, aliadas à simplicidade do seu processo de fabricação, permitem que elas sejam amplamente utilizadas em diferentes áreas da engenharia (TAPKIN et al., 2013; LI et al., 2023).

Já as fibras naturais podem ser divididas em três grupos principais: fibras de origem animal, como seda e lã; fibras minerais, como o amianto e fibras vegetais, derivadas de plantas, como cânhamo, juta, sisal, coco, entre outras (AHMAD et al., 2022; GURMU et al., 2024). O emprego dessas fibras em compósitos cimentícios tem aumentado devido às suas propriedades vantajosas, como baixa densidade, biodegradabilidade, renovabilidade e baixo impacto ambiental, tornando-as uma opção sustentável para o reforço em matrizes cimentícias (BEG et al., 2024; OLADELE et al., 2024).

Kundu et al. (2018) analisaram o impacto da incorporação de 1% de fibras de juta nas propriedades físicas e mecânicas de blocos de concreto utilizados para pavimentação. No estudo, as superfícies das fibras foram tratadas com hidróxido de sódio e estireno-butadieno carboxilado (XSBR) para melhorar sua interação com a matriz cimentícia. Os resultados indicaram que as amostras contendo fibras de juta modificadas apresentaram um aumento de 30% na resistência à compressão, 49% na resistência à flexão e 166% da tenacidade à flexão, em comparação às amostras de referência.

Revathi et al. (2023) investigaram as propriedades mecânicas do concreto com a incorporação de 40% de escória de cobre e diferentes teores de fibras de coco: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0 %. Os resultados demonstraram que a mistura contendo 1% de fibras de coco e 40% de escória de cobre apresentou o melhor desempenho em termos de resistência à compressão, resistência à tração, resistência à flexão e absorção de impacto.

Ahmed et al. (2024) analisaram as propriedades mecânicas do concreto reforçado com fibras de polipropileno, em diferentes teores: 0%, 0,5%, 0,75% e 1,0%. Os resultados indicaram que a adição de 1,0% de fibras de polipropileno proporcionou um aumento de até 180% na capacidade do material de resistir a cargas após o ponto de fratura. Este resultado pode ser atribuído ao efeito de “ponte” proporcionado pelas fibras, que retardou a propagação das fissuras. Além disso, foi observado também um aumento de 69,2% na tenacidade à flexão com

esse mesmo teor de fibras, indicando uma melhora na absorção de energia do material, resultado de uma boa interação entre as fibras e a matriz cimentícia.

Gu et al. (2024) investigaram o comportamento à flexão de vigas de concreto com adição de fibras de aço e agregados reciclados. O estudo utilizou fibras de aço, nos teores de 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% e agregados reciclados nas proporções de 0%, 30%, 50% e 100%. Os resultados indicaram que a incorporação de até 1,0% de fibras de aço proporcionou um aumento na resistência à flexão das vigas. Entretanto, volumes superiores a 1,0% resultaram em uma redução na taxa de crescimento da capacidade de carga dessas vigas. Esse comportamento foi atribuído ao agrupamento das fibras, que comprometeu sua aderência à matriz cimentícia. Com base nesses resultados, os autores recomendaram limitar o teor de fibras de aço a 1,0% na produção de concretos com agregados reciclados, a fim de maximizar o desempenho do compósito.

Além de sua aplicação como elementos de reforço em compósitos cimentícios, os resíduos vegetais também se destacam pelo potencial de uso como bioagregados na produção de bioconcretos. Essa abordagem permite a substituição parcial dos agregados convencionais, como a areia de quartzo e a rocha granulítica, contribuindo para a redução do consumo de recursos não renováveis. Além disso, a inclusão de resíduos vegetais pode melhorar propriedades específicas do concreto, como o isolamento térmico e acústico, graças à sua estrutura porosa e baixa densidade. Dessa forma, o uso dos resíduos vegetais como bioagregados representa uma alternativa promissora para a adoção de práticas mais sustentáveis na construção civil.

2.2 Bioconcreto

Os bioconcretos são materiais compósitos formados por um ligante mineral e agregados de origem vegetal (bioagregados) (AMANTINO et al., 2022; AYATI et al., 2024; ANDRADE et al., 2024). Os bioagregados podem ser provenientes de diferentes fontes de biomassa, permitindo o reaproveitamento de resíduos vegetais como casca de coco (KANOJIA et al., 2017), cânhamo (JAMI et al., 2019; AYATI et al., 2024), madeira (DA GLÓRIA et al., 2024), casca de arroz (AMANTINO et al., 2022), bambu (ANDREOLA et al., 2024), endocarpo do fruto da macaúba (ANDRADE et al., 2024), entre outros.

Quando incorporados à matriz cimentícia, esses resíduos reduzem a massa específica do concreto e melhoram suas propriedades de isolamento térmico e acústico. Com relação às suas aplicações na construção civil, os bioconcretos apresentam grande versatilidade, podendo ser

utilizados, por exemplo, como elementos de vedação não estruturais (CHABANNES et al., 2014) e também para a produção de painéis (DA GLORIA et al., 2021; BUFALINO et al., 2023).

Tangadagi et al. (2021) conduziu um estudo sobre o uso da casca de coco em substituição parcial do agregado graúdo na produção de bioconcretos. Nesta pesquisa, foram adotados os seguintes percentuais de substituição: 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os resultados obtidos indicaram que a substituição de até 20% do agregado graúdo por casca de coco não comprometeu a resistência mecânica do bioconcreto, comprovando que esse material pode ser utilizado na produção de concretos leves e ecologicamente corretos.

Amantino et al. (2022) analisaram os efeitos da incorporação de bioagregados de casca de arroz na produção de bioconcreto. Neste estudo, foram utilizados 5% e 10% de casca de arroz, em substituição ao agregado miúdo (areia) e 8% de cinzas de casca de arroz, em substituição ao cimento. A partir dos resultados encontrados, verificou-se que os bioconcretos produzidos com casca de arroz apresentaram baixa densidade e bom desempenho térmico, em comparação ao concreto convencional, demonstrando seu potencial para aplicação na confecção de painéis de vedação e de componentes isolantes.

Andrade (2022) avaliou o potencial de utilização do endocarpo da macaúba em substituição ao agregado graúdo na produção de bioconcretos. Foram realizadas substituições em massa e em volume, nas proporções de 25%, 50% e 100%. Os resultados indicaram que a substituição de 25% do volume de agregado graúdo por endocarpos de macaúba produziu bioconcretos com resistência à compressão de aproximadamente 30MPa, demonstrando potencial para uso estrutural na construção civil.

Um ponto crucial para o uso de resíduos vegetais em compósitos cimentícios, seja como elemento de reforço ou como bioagregado, está diretamente relacionado às propriedades e características da própria biomassa. Propriedades físicas, como a absorção de água, podem comprometer a resistência e durabilidade desses compósitos. Da mesma forma, a composição química dos resíduos vegetais pode afetar a hidratação da matriz cimentícia, uma vez que a presença de componentes como extrativos e hemicelulose pode interferir no processo de hidratação, atrasando ou até mesmo inibindo sua cura adequada.

2.3 Desafios encontrados na produção de compósitos cimentícios reforçados com fibras ou resíduos vegetais

O desempenho dos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais está diretamente relacionado às propriedades químicas e mecânicas dessas fibras, as quais são influenciadas por diferentes fatores, como a origem das fibras, os métodos de extração empregados, as práticas de cultivo adotadas, as condições de colheita e a idade das fibras (TOLEDO FILHO et al., 2003; AGOPYAN et al., 2005; LAVERDE et al., 2022).

Com relação à sua composição química, as fibras vegetais são constituídas, em sua maior parte, por celulose, hemicelulose e lignina, além de pequenas proporções de extrativos, cinzas, pectina e ceras. Essas substâncias determinam não apenas as propriedades intrínsecas das fibras, mas também a sua interação com a matriz cimentícia (VAISANEN et al., 2016; CECHIN, 2017; CASTRO, 2021).

Um dos principais desafios relacionados ao uso de resíduos vegetais em compósitos cimentícios é sua incompatibilidade química com o cimento, pois componentes como extrativos, lignina, hemicelulose, ceras, entre outros, são capazes de interferir no processo de hidratação do cimento (OLIVEIRA, 2019; FERREIRA et al., 2020; AHMAD et al., 2020).

Os extrativos são apontados como os principais responsáveis por ocasionar interferências na hidratação do cimento. No entanto, a hemicelulose também reduz de maneira significativa o tempo de pega do cimento. Quando solubilizada em água, a hemicelulose é hidrolisada e convertida em ácido carboxílico. Os produtos oriundos dessa degradação são capazes de reduzir a velocidade de hidratação e inibir a pega do cimento (BERALDO, 2014; OLIVEIRA et al., 2019).

A alcalinidade da matriz cimentícia é um dos fatores que afeta a compatibilidade química dos resíduos vegetais com o cimento. Nas primeiras etapas do processo de hidratação, os compostos de silicato de cálcio C_2S e C_3S são hidratados, formando o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), também conhecido como gel de tobermorita, responsável por conferir resistência mecânica à matriz cimentícia. Esse processo também resulta na formação de cristais de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), os quais elevam o pH da matriz cimentícia para aproximadamente 12,5 (STANCATO, 2006; CHAND et al., 2021).

O ambiente altamente alcalino favorece a degradação das fibras por meio de um processo conhecido como mineralização. A mineralização de fibras vegetais e de outros materiais lignocelulósicos ocorre quando esses materiais são inseridos na matriz cimentícia. Nesse cenário, os produtos da hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), penetram nas paredes celulares e no lúmen das fibras. Esse processo, provoca a hidrólise alcalina da celulose, reduzindo seu grau de polimerização, o que enfraquece as fibras e as tornam mais suscetíveis à degradação. Além disso, a exposição prolongada ao ambiente alcalino

também causa a degradação química da lignina e da hemicelulose, componentes estruturais fundamentais das fibras vegetais. Essas alterações reduzem significativamente sua eficiência como elemento de reforço e compromete tanto o desempenho mecânico quanto a durabilidade dos compósitos cimentícios (AGOPYAN et al., 2005; ARDANUY et al., 2015; ZERROUKI et al., 2022; LAVERDE et al., 2022).

A natureza hidrofílica dos resíduos vegetais também é um fator que compromete o desempenho dos compósitos cimentícios, uma vez que a interação das fibras com a água presente nos poros da matriz pode ocasionar o inchaço e a delaminação dessas fibras, além de criar condições favoráveis à proliferação de fungos e bactérias, o que acelera a degradação do material (DITTENBER et al., 2012). Além disso, as constantes variações volumétricas das fibras, decorrentes do ganho e da perda de água, comprometem sua adesão à matriz cimentícia, resultando em uma transferência inadequada de tensões interfaciais. Esse comportamento afeta negativamente o desempenho mecânico do compósito, reduzindo sua durabilidade ao longo do tempo (PACHECO-TORGAL et al., 2011; LAVERDE et al., 2022)

No entanto, esses problemas podem ser superados por meio da aplicação de tratamentos específicos nos resíduos vegetais, como lavagem em água, tratamentos alcalinos e impregnação com polímeros. Essas técnicas contribuem para a melhoria das propriedades dos compósitos, incluindo a resistência e a durabilidade, resultando em materiais mais eficientes e com melhor desempenho físico e mecânico.

2.4 Tratamentos aplicados para melhoria das propriedades das fibras vegetais em compósitos cimentícios

A aplicação de tratamentos em fibras vegetais para incorporação em matrizes cimentícias é uma etapa fundamental para aprimorar o desempenho e a durabilidade dos compósitos. Esses tratamentos contribuem para melhorar a resistência dos resíduos vegetais frente à degradação química e biológica, prolongando a vida útil do material. Além disso, essas modificações também melhoram a adesão entre as fibras vegetais e a matriz cimentícia, promovendo uma transferência eficiente de cargas, o que resulta em melhores propriedades mecânicas, especialmente sob esforços de tração direta (FERREIRA et al., 2020; GARCÍA et al., 2024).

Outro benefício importante desses tratamentos é a capacidade de melhorar a compatibilidade química dos resíduos vegetais com a matriz cimentícia. Esse efeito é alcançado através por meio da remoção de compostos orgânicos, como extrativos e hemicelulose, que

podem interferir negativamente no processo de hidratação do cimento (VO et al., 2016; CARDOSO et al., 2022).

Métodos como a imersão em água fria ou quente (a 80°C) e os tratamentos alcalinos se destacam entre as técnicas empregadas para alcançar esses resultados. O tratamento com água consiste na lavagem dos resíduos vegetais para remover impurezas e compostos solúveis, como extrativos, melhorando sua compatibilidade com a matriz cimentícia (FERREIRA et al., 2015; VO et al., 2016; DA GLÓRIA et al., 2021; ANDRADE, 2022; CARDOSO et al., 2022).

Da Glória et al. (2021) produziram bioconcretos utilizando aparas de madeira, partículas de bambu e casca de arroz como bioagregados. Para melhorar a compatibilidade com a matriz de cimento, os bioagregados foram submetidos a cinco ciclos de lavagem em água quente a 80°C, por 1 hora. Os resultados demonstraram que o tratamento foi eficaz na remoção de extrativos hidrossolúveis presentes nos resíduos vegetais, melhorando significativamente sua compatibilidade química com a matriz cimentícia.

Lima et al. (2011) avaliaram a viabilidade do uso de resíduos de *Pinus spp.* na produção de painéis cimento-madeira. Para melhorar a interação com a matriz, os resíduos foram imersos em água fria por 48 horas. Os resultados mostraram que o tratamento proporcionou um aumento na resistência à compressão do material compósito, em comparação com os painéis produzidos com madeira sem tratamento.

No tratamento alcalino, o material é imerso em uma solução aquosa contendo hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), em determinada concentração. Seu objetivo é remover parcialmente os constituintes amorfos presentes no resíduo vegetal - dentre eles, a lignina e a hemicelulose - para melhorar sua rugosidade e, conseqüentemente, a adesão com a matriz cimentícia (BRASILEIRO, 2013; PICKERING et al., 2016; GARCÍA et al., 2024).

Marvila et al. (2020) avaliaram o desempenho de argamassas de revestimento contendo fibras de açai. Para melhorar a interação entre o resíduo fibroso e a matriz, as fibras foram submetidas a um tratamento prévio com imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH) por 30 minutos. Após esse processo, as fibras foram lavadas com ácido clorídrico (HCl) para neutralização do pH e, posteriormente, enxaguadas em água corrente. O resultado obtido após a análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicou aumento da rugosidade superficial das fibras tratadas, o que resultou em melhor aderência fibra-matriz, comprovando a eficiência do tratamento.

Aquino et al. (2022) investigaram os efeitos da incorporação de fibras da palha de milho em argamassas mistas de cimento e cal, destinadas ao assentamento de blocos e revestimentos. Para melhorar a interação com a matriz, as fibras vegetais foram imersas em solução de

hidróxido de sódio (NaOH) a 10% por 10 minutos. Os resultados demonstraram que o tratamento foi eficaz, promovendo uma melhoria significativa na adesão fibra-matriz.

Além dos tratamentos tradicionais, um método promissor para aprimorar o desempenho dos compósitos cimentícios é o revestimento das fibras vegetais com o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR). Esse revestimento é eficaz devido à boa compatibilidade do polímero com matrizes cimentícias e fibras vegetais. Ele reduz a absorção de água pelas fibras e melhora a interação fibra-matriz, aprimorando o desempenho dos compósitos (GUIMARÃES et al., 2024; FERREIRA et al., 2020).

De acordo com a literatura, o XSBR atua nos dois principais mecanismos de ancoragem das fibras à matriz: a ancoragem química e a mecânica. A ancoragem química é influenciada por grupos funcionais presentes na superfície das fibras, como hidroxilas (-OH). Estes grupos funcionais podem interagir com o hidróxido de cálcio do cimento hidratado, fortalecendo a adesão entre as fibras e a matriz (JO et al., 2014; SILVA et al., 2011).

A ancoragem mecânica, por sua vez, é intrínseca aos materiais. A modificação das fibras pode aumentá-la ou reduzi-la, conforme a alteração da rugosidade e da variação dimensional. Essas mudanças favorecem a interação entre a superfície das fibras e os produtos da hidratação do cimento, contribuindo para a densificação da zona de transição interfacial (ZTI) e, conseqüentemente, para melhorar a ancoragem das fibras na matriz cimentícia, o que resulta em melhores propriedades mecânicas dos compósitos (JO et al., 2014; FERREIRA et al., 2020).

Kundu et al. (2012) avaliaram a aplicação de fibras de juta tratadas com solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e posteriormente modificadas quimicamente com XSBR na produção de tubos de concreto para sistemas de esgoto. Os resultados mostraram que a modificação química não apenas conferiu hidrofobicidade às fibras, como também melhorou a adesão interfacial entre as fibras e a matriz cimentícia, resultando em melhorias nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Ferreira et al. (2020) relataram resultados semelhantes ao investigarem o efeito da impregnação do XSBR em diferentes fibras naturais, como curauá, juta e sisal. O estudo evidenciou que o tratamento reduziu significativamente a absorção de água pelas fibras e melhorou a ligação entre as fibras e a matriz por meio de pontos de ancoragem.

Dessa forma, os tratamentos aplicados aos resíduos vegetais são essenciais para assegurar a durabilidade dos compósitos cimentícios, pois promovem a remoção de componentes que comprometem a hidratação do cimento e melhoraram a adesão das fibras vegetais à matriz.

2.5 Seringueira (*Hevea brasiliensis*)

O Brasil possui uma ampla diversidade de plantas, com aproximadamente 56.200 espécies catalogadas, das quais 43% são exclusivas do território nacional (INSTITUO BRASIL FLORESTAL, 2024). Essa vasta diversidade representa um grande potencial, ainda pouco explorado, para o desenvolvimento de compósitos cimentícios com incorporação de resíduos vegetais.

A Seringueira (*Hevea brasiliensis*) (Figura 3), árvore tropical, pertencente ao gênero *Hevea* e a família *Euphorbiaceae*, é um exemplo notável da biodiversidade brasileira (UTHUP et al., 2011; BERTHELOT et al., 2014; CROS et al., 2019). Nativa da região amazônica, é comumente encontrada nos estados do Amazonas, Acre, Rondônia e Pará. O cultivo dessa espécie é de grande relevância para a indústria, pois dela se extrai o látex, principal matéria-prima para a produção de borracha e fabricação de produtos como pneus, brinquedos, calçados e luvas cirúrgicas (ASSELTA et al., 2012; EKCHAWENG et al., 2017; SANT'ANNA et al., 2021).

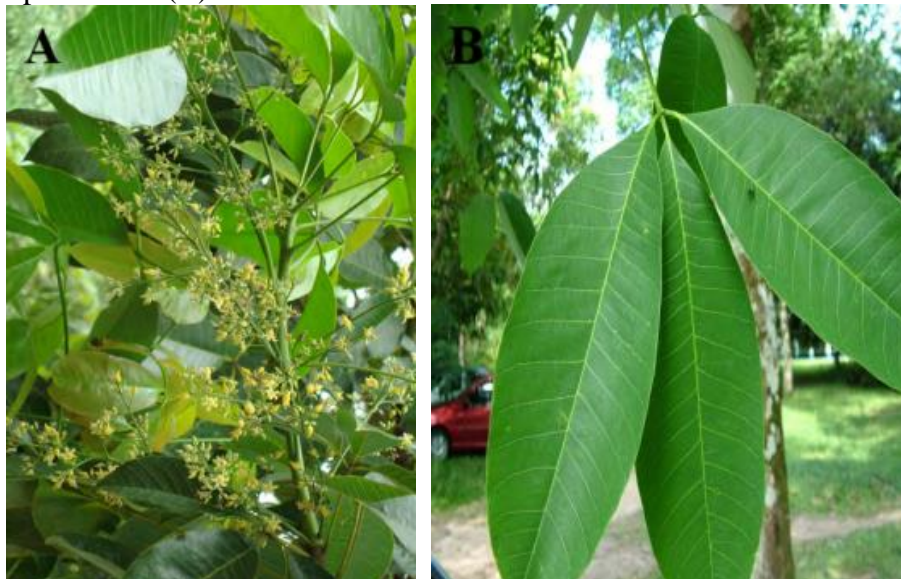
A seringueira é facilmente reconhecida por seu padrão característico de desfolhamento e pela capacidade de produzir látex. A espécie possui porte ereto, com altura variando entre 20 e 30 metros e tronco com diâmetro entre 30 e 60 centímetros (BICALHO, 2006; BOTELHO, 2016). Suas folhas (Figura 4B) são longamente pecioladas, trifolioladas e dispostas de forma espiralada. As flores (Figura 4A) são pequenas, unissexuadas, de coloração amarelada e agrupadas em cachos (ASSELTA et al., 2012).

Figura 3 – Árvores de seringueira (*Hevea brasiliensis*) presentes no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA).



Fonte: Da autora (2024).

Figuras 4 – Aspectos morfológicos da árvore de seringueira: Inflorescências (A) e Folhas pecioladas (B).



Fonte: Alvarenga (2021).

O fruto da seringueira (Figura 5) apresenta uma cápsula do tipo tricoca, de consistência lenhosa e forma subglobosa, contendo, em média, três sementes. O pericarpo é lenhoso e possui deiscência explosiva. O epicarpo (casca) é composto por uma fina película esverdeada, que se desprende após o amadurecimento dos frutos. O mesocarpo e o endocarpo (Figura 4) não se distinguem nitidamente. As sementes da seringueira são ovais, ligeiramente achatadas, de

coloração marrom e pesam cerca de 3,5 a 6,0 g. A maturação dos frutos ocorre entre os meses de fevereiro e março. Em média, cada árvore de seringueira produz de 250 a 500 frutos (SOUZA et al., 2010; OLIVEIRA, 2012; LAGE, 2013; SOUZA, 2014).

Figura 5 –Estrutura morfológica do fruto da seringueira, destacando seus componentes anatômicos característicos: epicarpo, endocarpo e semente.



Fonte: Da autora (2024).

O endocarpo do fruto da seringueira (Figura 6) é um material lenhoso, de tonalidade clara e aparentemente resistente. Ele é revestido por uma casca (epicarpo) esverdeada, que foi removida para a produção dos compósitos.

Figura 6 – Endocarpo do fruto da árvore de seringueira (*Hevea brasiliensis*).



Fonte: Estadão (2023).

Embora seja nativa da região amazônica, o cultivo da seringueira tem se expandido para outras áreas do país, incluindo os estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Atualmente, o Brasil conta com cerca de 180 mil hectares destinados ao cultivo da seringueira, sendo que aproximadamente 133 mil hectares estão concentrados no estado de São Paulo, que se destaca como o maior produtor nacional (SOMAIN et al., 2016; CAIS, 2022).

Em relação aos subprodutos oriundos do seu cultivo, estudos recentes têm explorado o uso das sementes do fruto da seringueira para a produção de biocombustíveis, suplementos alimentares, barras de cereal e ração para peixes (GONÇALVES, 2016; UNICENTRO, 2022). Contudo, até o momento, não existem pesquisas focadas no reaproveitamento do endocarpo do fruto da seringueira. Portanto, compreender as propriedades e o comportamento desse material é fundamental para identificar possíveis formas de reaproveitá-lo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão apresentada neste capítulo, foram obtidas informações relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, evidenciando que o uso do endocarpo do fruto da seringueira como bioagregado e potencial elemento de reforço desempenha um papel importante na redução do consumo de recursos não renováveis, no reaproveitamento de resíduos e na mitigação de impactos ambientais. É importante destacar que, até o momento, não foram encontrados registros na literatura sobre a utilização do endocarpo do fruto da seringueira na produção de compósitos cimentícios. Essa lacuna evidencia o caráter inovador deste estudo e reforça sua relevância, ao explorar um material com potencial ainda inexplorado para aplicações na construção civil.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR., H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre–cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 527 – 536, 2005.
- AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 333, p. 127353, 2022.
- AHMAD, J.; ZHOU, Z.; DEIFALLA, A. F. Structural properties of concrete reinforced with bamboo fibers: a review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 844 – 865, 2023.
- AHMAD, M. R.; CHEN, B. Influence of type of binder and size of plant aggregate on the hygrothermal properties of bio-concrete. **Construction and Building Materials**, v. 251, 2020.
- AHMED, I.; MUDA, Z. C.; AMRAN, M.; SYAMSIR, A.; AMAECHI, C. V.; AL-QADAMI, E. H. H.; HUENCHUAN, M. A. D.; AVUDAIAPPAN, S. Modelling and optimisation of the structural performance of lightweight polypropylene fibre-reinforced LECA concrete. **Results in Engineering**, v. 24, p. 103149, 2024.
- ALBERTI, M. G.; GÁLVEZ, J. C.; ENFEDAQUE, A.; PICAZO, A.; RAMÍREZ, W. J. Mixed mode fracture of polyolefin fibre reinforced concrete. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 122, p. 103560, 2022.
- ALENCAR, M. A. S.; RAMBO, M. K. D.; BOTELHO, G. L. G. T.; BARROS, P. M. M.; SERGIO, R. L.; BORGES, M. S.; BERTUOL, D. Feasibility study of incorporation of bamboo plant fibers in cement matrices. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 2, 2023.
- ALVARENGA, A. de P. Seringueira (Apostila). **EPAMIG**. 67 p. 2021. Disponível em: <<https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/silvicultura/livros/APOSTILA%20SERINGUEIRA.pdf>> Acessado em: 14 ago. 2023 às 14:30.
- AMANTINO, G. M.; HASPARYK, N. P.; TIECHER, F.; FILHO, R. D. T. Assessment of bio-aggregate concretes properties with rice residue. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 2022.
- AMARAL, L. M. do; RODRIGUES, C. de S.; POGGIALI, F. S. J. Hornification on vegetable fibers to improve fiber-cement composites: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 48, p. 103947, 2022.
- AMRAN, M.; FEDIUK, R.; ABDELGADER, H. S.; MURALI, G.; OZBAKKALOGLU, T.; LEE, Y. H.; LEE, Y. Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103638, 2022.
- ANDRADE, G. M. de. **Utilização do endocarpo da macaúba como agregado gráúdo alternativo para a produção de bioconcreto**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 63, 2022.
- ANDRADE, G. M. de; ANDRADE, R. G. M. de; ARAUJO, O. M. O. de; LOPES, R. T.; GUIMARAES, T. C.; FERREIRA, S. R. Macauba (*Acrocomia aculeata*) endocarp as a coarse aggregate for bio-concretes. **Construction and Building Materials**, v. 451, p. 138667, 2024.
- ANDREOLA, V. M.; DA GLORIA, M. Y. R.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. A comprehensive experimental study on the physical performance and durability of bamboo bio-concrete. **Sustainability**, v. 16, p. 5334, 2024.

AQUINO, L. A. S. de; SILVA, T. R. C.; MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G. de. Agro-industrial waste from corn straw fiber: Perspectives of application in mortars for coating and laying blocks based on Ordinary Portland cement and hydrated lime. **Construction and Building Materials**, v. 353, 2022.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v.79, p. 115 – 128, 2015.

ASSELTA, F. O.; LIMA, M. A. de; CASTRO, M. S. de. **Características das culturas da seringueira e do cacau e informações sobre o plantio das culturas em uma mesma área**. Consórcio de seringueira e cacauzeiro, Universidade de São Paulo, USP. 2012.

AYATI, B.; GUTIERREZ, A.; CHANDLER, A. Mechanical and hygrothermal properties of hemp-silica bio-composites. **Construction and Building Materials**, v. 425, p. 136077, 2024.

BEG, M. D. H.; PICKERING, K. L.; AKINDOYO, J. O.; GAUSS, C. Recyclable hemp hurd fibre-reinforced PLA composites for 3D printing. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 33, p. 4439 – 4447, 2024.

BERALDO, A. **Compuesto biomassa vegetal cemento**. Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. Universitat Politècnica de València, 2014.

BERTHELOT, K.; LECOMTE, S.; ESTEVEZ, Y.; PERUCH, F. *Hevea brasiliensis* REF (Hev b 1) and (Hev b 3): An overview on rubber particle proteins. **Biochimie**, v. 106, p. 1 – 9, 2014.

BICALHO, K. C. **Identidade genética entre clones de seringueira *Hevea spp.*, de diferentes procedências, baseada em marcadores RAPD**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Agronomia. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 66. 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/2372>> Acesso em: 03 nov. 2022.

BRANDT, A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, p. 3 – 9, 2008.

BOTELHO, J. L. P. **A seringueira (*Hevea brasiliense*): Aspectos técnico-culturais e econômicos do processo produtivo**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Departamento de Ciências Agrárias. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR, p. 108. 2016. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/44869>> Acesso em: 03 nov. 2022.

BRASILEIRO, G. A. M. **Produção, caracterização e avaliação da durabilidade de compósitos cimentícios com partículas de coco**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão - SE, p. 169. 2013. Disponível em: <<http://ri.ufs.br/handle/riufs/11603>> Acesso em: 24 out. 2022.

BUFALINO, L.; SOUZA, T. M. de; LIMA, N. N.; SÁ, V. A. de; TONOLI, G. H. D.; FERREIRA, C. A.; JUNIOR, H. S.; SOUSA, R. B. de; ZIDANES, U. L.; PROTÁSIO, T. de P.; LIMA, M. D. R. L.; MENDES, L. M. Contrasting the major characteristics of pinewood and Amazon hardwoods to provide high-quality cement-bonded particleboards. **Construction and Building Materials**, v. 394, p. 132219, 2023.

CAIS, C. **Produtores de borracha natural apostam em maior produtividade**. Diário da Região. 2022. Disponível em: <<https://www.diariodaregiao.com.br/economia/agronegocio/produtores-de-borracha-natural-apostam-em-maior-produtividade-1.955499>> Acesso em: 06 nov. 2022.

CARDOSO, M. G. S.; OLIVEIRA, D. N. P. S. de; BUFALINO, L.; SOUZA, T. M. de. Tratamentos físicos e químicos de fibras residuais de *Cocos nucifera* L. visando aplicação e compósitos cimentícios. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, 2022.

CASTRO, V. G. Inibição á pega do cimento. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o futuro [online]**, p. 23 – 36, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.7476/9786587108612.0003>> Acesso em: 26 nov. 2022.

CECHIN, L. **Análise da viabilidade de produção de painéis de cimento reforçados com biomassa vegetal e escória de alto-forno**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 160, 2017. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2835>> Acesso em: 27 nov. 2022.

CHABANNES, M.; BÉNÉZET, J. C.; CLERC, L.; GARCIA-DIAZ, E. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 428 – 438, 2014.

CHAND, G. Microstructural study of sustainable cements produced from industrial by-products, natural minerals and agricultural wastes: A critical review on engineering properties. **Cleaner Engineering and Technology**, v.4, 2021.

CROS, D.; MBO-NKOULOU, L.; BELL, J. M.; OUM, J.; MASSON, A.; SOUMAHORO, M.; TRAN, D. M.; ACHOUR, Z.; LE GUEN, V.; CLEMENT-DEMANGE, A. Within-family genomic selection in rubber tree (*Hevea brasiliensis*) increases genetic gain for rubber production. **Industrial Crops & Products**, v, 138, 2019.

DA GLORIA, M. Y. R. da; ANDREOLA, V. M.; SANTOS, D. O. J. dos; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 34, p. 101696, 2021.

DA GLORIA, M. Y. R. da; CALDAS, L. R.; BARROS, J. A. O.; TOLEDO FILHO, R. D. A comprehensive approach for designing low carbon wood bio-concretes. **Materials**, v. 17, p. 2742, 2024.

DAI, F.; ZHOU, C.; GAI, W.; WEI, M.; LIU, Y.; ZHANG, Q. Influence of fiber type on the mechanical performance and fracture mechanism of fiber reinforced concrete under coupled static-dynamic compression. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111433, 2024.

DISCHER, M. G.; FONTES, A. S.; ARAÚJO, M. L. V. A utilização do concreto estrutural com adição de fibras não metálicas na construção civil: uma prospecção tecnológica. **Cadernos de Prospecção**, v. 16, n. 3, p. 745 – 760, 2023.

DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. **Composites: Part A**, v. 43, p. 1419 – 1429, 2012.

DRUN, A. G.; FERRARI, V. J. Efeito da adição de micro e macrofibras de polipropileno (PP) às fibras de aço sobre o comportamento mecânico do concreto. **Revista Tecnológica**, v. 30, n. 1, p. 176 – 196, 2022.

EKCHAWENG, K.; KHUNJAN, U.; CHURNGCHOW, N. Molecular cloning and characterization of three novel subtilisin-like serine protease genes from *Hevea brasiliensis*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v. 97, p. 79 – 95, 2017.

- ESTADÃO. **Seringueira para que serve essa planta?** 2023. Disponível em: < <https://agro.estadao.com.br/summit-agro/seringueira-para-que-serve-essa-planta>> Acesso em: 10 dez. 2024.
- EUGENIO, T. M. C.; HENRIQUES, A. B.; MENDES, R. F. Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134667, 2024.
- FARES, A. M. H.; BAKIR, B. B. Parametric study on the flexural behavior of steel fiber reinforced concrete beams utilizing nonlinear finite element analysis. **Structures**, v. 65, p. 106688, 2024.
- FARRAPO, C. L.; FONSECA, C. S.; PEREIRA, T. G. T.; TONOLI, G. H. D.; JUNIOR, H. S.; MENDES, R. F. Cellulose associated with PET bottle waste in cement based composites. **Materials Research**, v. 20, n. 5, p. 1380 – 1387, 2017.
- FERREIRA, S. R.; SILVA, F. de A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. T. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730 – 740, 2015.
- FERREIRA, S. R.; PEPE, M.; MARTINELLI, E.; SILVA, F. de A.; FILHO, R. D. T. Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. **Composites Part B**, v. 140, p. 183 – 196, 2018.
- FERREIRA, S. R.; NETO, A. R. S.; SILVA, F. de A.; SOUZA JUNIOR, F. G. de; TOLEDO FILHO, R. D. The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120770, 2020.
- FIGUEIREDO, A. Concreto com fibras. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo. IBRACON, 2011, p. 1328 – 1365.
- GAMAGE, N.; PATRISIA, Y.; GUNASEKARA, C.; LAW, D. W.; HOUSHYAR, S.; SETUNGE, S. Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. **Construction and Building Materials**, v. 427, p. 136275, 2024.
- GARCÍA, G.; CABRERA, R.; ROLÓN, J.; PICHARDO, R.; THOMAS, C. Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111267, 2024.
- GONÇALVES, S. **Semente de seringueira é usada na produção de suplementos alimentares**. G1 AM. 2016. Disponível em: < <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/03/semente-de-seringueira-e-usada-na-producao-de-suplementos-alimentares.html#:~:text=Semente%20de%20seringueira%20%C3%A9%20usada,de%20suplementos%20alimentares%20%7C%20Amazonas%20%7C%20G1&text=Pesquisador%20diz%20que%20semente%20%C3%A9,pode%20gerar%20empregos%20em%20Mau%C3%A9s.&text=Antes%20desperdi%C3%A7ada%20a%20semente%20da,com%20a%20alimenta%C3%A7%C3%A3o%20no%20Amazonas.>> Acesso em: 06 nov. 2022.
- GU, Z.; WANG, J.; GAO, D.; ZHAO, J. Effects of steel fibers on the flexural behavior of recycled concrete beam: Testing and analysis. **Journal of Building Engineering**, v. 85, p. 108718, 2024.
- GUIMARÃES, T. C.; DIAS, M. C.; ARAÚJO, O. M. O. de; LOPES, R. T.; KOENDERS, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; TONOLI, G. H. D.; ANDRADE, R. G. M. de; FERREIRA, S. R. The influence of cellulose microcrystals and nanofibrils in XSBR polymers on the mechanical properties of jute textile-reinforced cementitious composites. **Cellulose**, v. 31, p. 3961 – 3979, 2024.

GURMU, D. N.; GEBRELIBANOS, H. M.; TEFERA, C. A.; SIRAHBIZU, B. Experimental investigation the effect of bamboo micro filler on performance of bamboo-sisal-E-glass fiber-reinforced epoxy matrix hybrid composites. **Heliyon**, v. 10, p. 40176, 2024.

HAMADA, H. M.; SHI, J.; JAWAHERY, M. S. A.; MAJDI, A.; YOUSIF, S. T.; KAPLAN, G. Application of natural fibres in cement concrete: A critical review. **Materials Today Communications**, v. 35, p. 105833, 2023.

IFTEKAR, G.; TANTRAY, M. A. Characteristic influence of carbon fibers on fresh state, mechanical properties and microstructure of carbon fiber based self compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 38, p. 3181 – 3189, 2021.

INSTITUTO BRASIL FLORESTAL. **Brasil tem a maior diversidade de plantas do mundo.** Animals Magazine. 2024. Disponível em: < <https://brasilflorestal.org/brasil-tem-a-maior-diversidade-de-plantas-do-mundo/>> Acesso em: 15 dez. 2024.

JANG, S. J.; YUN, H. D. Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete. **Composite Structures**, v. 185, p. 203- 211, 2018.

JAMI, T.; KARADE, S. R.; SINGH, L. P. A review of the properties of hemp concrete for green building applicarions. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, p. 117852, 2019.

JO, B. W.; CHAKRABORTY, S.; YOON, K. W. A hypothetical model based on effectiveness of combined alkali and polymer latex modified jute fibre in controlling the setting and hydration behaviour of cement. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 1 – 9, 2014.

KANOJIA, A.; JAIN, S. K. Performance of coconut shell as coarse aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 150 – 156, 2017.

KUNDU, S. P.; CHAKRABORTY, S.; ROY, A.; ADHIKARI, B.; MAJUMDER, S. B. Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties. **Construction and Buinding Materials**, v. 37, p. 841 – 850, 2012.

KUNDU, S. P.; CHAKRABORTY, S.; CHARKRABORTY, S. Effectiveness of the surface modified jute fibre as fibre reinforcement in controlling the physical and mechanical properties of concrete paver blocks. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 554 – 563, 2018.

LAGE, P. **Relações das características morfo-anatômicas da casca, estado nutricional e variações crimáticas sazonais com a produção de látex em clones de seringueira em Nepomuceno, MG.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Agronomia. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 101, 2013. Disponível em: < <http://www.apabor.org.br/SiteNovo/pdf/LagePatricia.pdf>> Acesso em: 03 nov. 2022.

LAVERDE, V.; MARIN, A.; BENJUMEA, J. M.; ORTIZ, M R. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. **Constructuin and Building Materials**, v. 340, p. 127729, 2022.

LI, J.; YANG, L.; HE, L.; GUO, R.; LI, X.; CHEN, Y.; MUHAMMAD, Y.; LIU, Y. Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review. **Journal of Road Engineering**, v. 3, p. 35 – 70, 2023.

LIMA, A. J. M. de; IWAKIRI, S.; LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. Utilização de resíduos de *Pinus spp.*; metacaulim de alta reatividade e resíduo de cerâmica calcinada em compósitos cimento-madeira. **Madera y Bosques**, v. 17, n. 2, p. 47 – 65, 2011.

MAGBOOL, H. M.; ZEYAD, A. M. The effect of various steel fibers and volcanic pumice powder on fracture characteristics of Self-Compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 312, p. 125444, 2021.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; COSTA, J. M.; XAVIER, G. C.; CARMO, D. de F. do; MONTEIRO, S. N. Durability of coating mortars containing açai fibers. **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, p. e00406, 2020.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, 2014, 751 p.

MUTHUKUMARANA, T. V.; ARACHCHI, M. A. V. H. M.; SOMARATHNA, H. M. C. C.; RAMAN, S. N. A review on the variation of mechanical properties of carbon fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 366, p. 130173, 2023.

NAAMAN, A. E.; KIM, D. J.; EL-TAWIL, S. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, p. 917 – 928, 2008.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre, 2013, 466 p.

OLADELE, I. O.; AKINWEKOMI, A. D.; BICHANG, D. O.; MAKINDE-ISOLA, B. A.; AJAYI, D. O.; OMOTOSHO, T. F.; ADEBANJO, M. B. Eggshell bio-derived hydroxyapatite particle-wool/polyester staple fibers hybrid reinforced epoxy bio-composites for biomedical services. **Hybrid Advances**, v. 7, p. 100312, 2024.

OLIVEIRA, A. P. de. **Determinação da viabilidade e do vigor em sementes de serigueira**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Agronomia. Universidade Federal de Goiás. Goiânia – GO, p. 63. 2012. Disponível em: < <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/3208> > Acesso em: 03 nov. 2022.

OLIVEIRA, D. N. P. S. de. **Painéis de cimento portland produzidos com fibras do mesocarpo do açai**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal do Amapá. Macapá - AP, p.78. 2019. Disponível em: <<http://repositorio.unifap.br/jspui/handle/123456789/392>> Acesso em: 21 out. 2022.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 575 – 581, 2011.

PI, Z.; XIAO, H.; LI, H. Influence of interfacial microstructure on pullout behavior and failure mechanism of steel fibers embedded in cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 304, p. 124688, 2021.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites: Part A**, v. 83, p. 98 – 112, 2016.

RAMLINGAM, M.; AYYASAMY, M.; PRABAKARAN, M.; KIM, I. S. Development of a novel DNA-shaped steel fiber and its performance on fresh and hardened concrete. **Construction and Building Materials**, v. 451, p. 138689, 2024.

REVATHI, S.; DINESH, M.; SUBA SRI VARSAN, S. G. Mechanical properties of concrete incorporating coconut fibers and copper slag. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

SAFIUDDIN, M.; ABDEL-SAYED, G.; HEARN, N. Absorption and strength properties of short carbon fiber reinforced mortar composite. **Buildings**, v. 300, n. 11, 2021.

SALUM, L. P. S.; SILVA, F. de A.; CASTOLDI, R. de S. Viabilidade do uso de fibra de sisal como reforço para o concreto. **Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC – RIO**. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2020/download/relatorios/CTC/CIV/CIVLet%C3%ADcia%20Picone%20Soares%20Salum.pdf> Acessado em: 20 dez. 2024.

SANT'ANNA, I. de C.; CRUZ, C. D.; GOUVÊA, L. R. L.; JUNIOR, E. J. S.; FREITAS, R. S. de.; GONÇALVES, P. de S. Genetic diversity analyses of rubber tree genotypes based on UPOV descriptors. **Industrial Crops & Products**, v. 165, 2021.

SAVASTANO JR., H.; WARDEN, P. G.; COUTTS, R. S. P. Microstructure and mechanical properties of waste fibre–cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 27, p. 583 – 592, 2005.

SILVA, F. de A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 721 – 730, 2009.

SILVA, F. de A.; MOBASHER, B.; SORANAKOM, C.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behavior of sisal fiber cement based composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 814 – 823, 2011.

SOMAIN, R.; DROULERS, M. A seringueira agora é paulista. **Revista Franco-Brésilienne de Géographie**, n. 27, 2016. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/10906#:~:text=Hist%C3%B3ria%20da%20seringueira%20em%20S%C3%A3o%20Paulo,-2%20Martinez%2C%20A.%20A.&text=5%E2%80%9CA%20introdu%C3%A7%C3%A3o%20da%20cultura,com%20sementes%20enviadas%20pelo%20Mal>> Acesso em: 01 de nov. 2022.

SOUZA, A. D.; OLIVEIRA, R. S. de; FURTADO, E. L.; KAGEYAMA, P. Y.; FREITAS, R. G. S.; FERRAZ, P. A. **Seringueira**. Frutíferas e Plantas Úteis na Vida Amazônica. 316 p. 2010. Disponível em: <<http://www.cifor.org>> Acesso em: 03 de nov. 2022.

SOUZA, G. A. de. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de seringueira [Hevea brasiliensis (WILLD. EX ADR. DE JUSS) MUELL. - ARG.] durante o desenvolvimento e o armazenamento**. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Departamento em Fisiologia Vegetal. Universidade Federal de Viçosa – MG, p. 152. 2014. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6827>> Acesso em: 01 de nov. 2022.

STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, p. 234. 2006. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257149>> Acesso em: 17 out. 2022.

TABRIZIKAHOU, A.; KUCZMA, M.; CZADERSKI, C.; SHAHVERDI, M. From experimental testing to computational modeling: A review of shape memory alloy fiber-reinforced concrete composites. **Composites Part B**, v. 281, p. 111530, 2024.

TANGADAGI, R. B.; MANJUNATHA, M.; PREETHI, S.; BHARATH, A.; RESHMA, T. V. Strength characteristics of concrete using coconut shell as a coarse aggregate – A sustainable approach. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 3845 – 3851, 2021.

TAPKIN, S. Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 399 – 410, 2013.

TEIXEIRA, R. S.; TONOLI, G. H. D. SANTOS, S. F.; RAYÓN, E.; AMIGÓ, V.; JUNIOR, H. S.; ROCCO LAHR, F. A. Nanoindentation study of the interfacial zone between cellulose fiber and cement matrix in extruded composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 85, p. 1 – 8, 2018.

TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 185 – 196, 2003.

TOLEDO FILHO, R. D.; FERREIRA, S. R.; MARTINELLI, E.; PEPE, M.; SILVA, F de A. Inverse identification of the bond behavior for jute fibers in cementitious matrix. **Composites Part B**, v. 95, p. 440 – 452, 2016.

UNICENTRO. Pesquisa sobre semente de seringueira terá continuidade graças a parceria universidade-empresa. 2022. Disponível em:
<<https://www3.unicentro.br/noticias/2022/08/18/pesquisa-sobre-semente-da-seringueira-tera-continuidade-gracas-a-parceria-universidade-empresa/>> Acesso em: 05 nov. 2022.

VAIRAGADE, V. S.; DHALE, S. Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review. **Hybrid Advances**, v. 3, p. 100035, 2023.

VAISANEN, T.; HAAPALA, A.; LAPPALAINEN, R.; TOMPPU, L. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. **Waste Management**, v. 54, p. 62 – 73, 2016.

VO, L. T. T.; NAVARD, P. Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 161 – 176, 2016.

XIE, C.; CAO, M.; KHAN, M.; YIN, H.; GUAN, J. Review on different testing methods and factors affecting fracture properties of fiber reinforced cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 273, p. 121766, 2021.

WANG, W.; ZHANG, Y.; MO, Z.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K.; XU, Z. D. A critical review on the properties of natural fibre reinforced concrete composites subjected to impact loading. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107497, 2023.

WANG, M.; LI, L.; MA, J.; WU, J.; DU, X. Study on the damage and fracture behaviors of fiber-reinforced cementitious composites by peridynamic simulation. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, v. 134, p. 104758, 2024.

YUAN, T.F.; LEE, J. Y.; YOON, Y.S. Enhancing the tensile capacity of no-slump high-strength high-ductility concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, p. 103458, 2020.

ZERROUKI, R.; BENAZZOUK, A.; COURTY, M.; HAMED, H. B. Potential use of matakaolin as a partial replacement of preformulated lime binder to improve durability of hemp concrete under cyclic wetting/drying aging. **Construction and Building Materials**, v. 333, 2022.

ZHANG, P.; WANG, C.; GAO, Z.; WANG, F. A review on fracture properties of steel fiber reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 67, p. 105975, 2023.

ZHANG, K.; YUAN, Q.; HUANG, T.; ZUO, S.; YAO, H. Utilization of novel stranded steel fiber to enhance fiber–matrix interface of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 369, p. 130525, 2023.

ZHENG, Y.; LV, X.; HU, S.; ZHUO, J.; WAN, C.; LIU, J. Mechanical properties and durability of steel fiber reinforced concrete: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 82, p. 108025, 2024.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

ANÁLISE DO POTENCIAL DO ENDOCARPO DO FRUTO DA SERINGUEIRA COMO REFORÇO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

RESUMO

A incorporação de materiais alternativos para a melhoria das propriedades do concreto tem ganhado destaque no campo da engenharia civil, especialmente no que se refere ao uso de fibras e bioagregados. Embora o concreto seja amplamente utilizado por sua alta resistência à compressão, ele apresenta limitações em relação às resistências à tração e à flexão, o que pode comprometer sua durabilidade e desempenho mecânico. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos naturais, como o endocarpo do fruto da seringueira, surge como uma alternativa promissora para a produção de compósitos cimentícios com propriedades mecânicas aprimoradas. Portanto, este estudo investigou o potencial do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios. O resíduo foi coletado na Universidade Federal de Lavras e caracterizado quimicamente, para a quantificação dos teores de extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose. Para melhorar a compatibilidade química com a matriz cimentícia, os endocarpos foram submetidos a tratamentos, incluindo lavagem em água quente a 80°C e imersão em solução de hidróxido de cálcio. Parte dos endocarpos foi revestida com o polímero XSBR, para melhorar sua adesão à matriz cimentícia. A eficiência dos tratamentos foi avaliada por calorimetria semi-adiabática e propriedades como a capacidade de absorção de água, teor de umidade e densidade dos endocarpos foram analisadas. Ensaios de flexão foram realizados para avaliar a adesão dos endocarpos à matriz cimentícia. Em seguida, concretos foram produzidos incorporando 1% de endocarpos revestidos com XSBR, fibras de aço e macrofibras de polipropileno e posteriormente submetidos a ensaios mecânicos de tração na flexão e compressão. Os resultados da caracterização química indicaram que o endocarpo contém 5,72% de extrativos, 23,74% de lignina, 1,37% de cinzas e 69,17% de holocelulose. A calorimetria indicou que os tratamentos aplicados aos endocarpos contribuíram para melhorar a hidratação do cimento. No entanto, a elevada capacidade de absorção de água do endocarpo impactou negativamente na interface matriz-endocarpo, prejudicando a adesão. Por outro lado, os ensaios de flexão indicaram que o revestimento com XSBR foi eficiente para melhorar a interação do endocarpo com a matriz cimentícia. Os ensaios de tração na flexão e compressão dos concretos mostraram que, mesmo em baixa concentração, o endocarpo possui potencial para ser utilizado como elemento de reforço na matriz cimentícia.

Palavras-chave: elemento de reforço; seringueira; endocarpo; compósito cimentício; resíduos vegetais.

ABSTRACT

The incorporation of alternative materials to improve concrete properties has gained prominence in the field of civil engineering, especially with regard to the use of fibers and bioaggregates. Although concrete is widely used due to its high compressive strength, it has limitations in terms of tensile and flexural strength, which can compromise its durability and mechanical performance. In this context, the use of natural waste, such as the endocarp of the rubber tree fruit, appears as a promising alternative for the production of cementitious composites with improved mechanical properties. Therefore, this study investigated the potential of the endocarp of the rubber tree fruit as a reinforcing element in cementitious composites. The waste was collected at the Federal University of Lavras and chemically characterized to quantify the contents of total extractives, lignin, ash and holocellulose. To improve chemical compatibility with the cementitious matrix, the endocarps were subjected to treatments including washing in hot water at 80°C and immersion in calcium hydroxide solution. Part of the endocarps was coated with XSBR polymer to improve their adhesion to the cementitious matrix. The efficiency of the treatments was evaluated by semi-adiabatic calorimetry and properties such as water absorption capacity, moisture content and density of the endocarps were analyzed. Flexural tests were performed to evaluate the adhesion of the endocarps to the cementitious matrix. Then, concretes were produced incorporating 1% of XSBR-coated endocarps, steel fibers and polypropylene macrofibers and subsequently subjected to mechanical tensile tests in flexural and compression. The results of the chemical characterization indicated that the endocarp contains 5.72% extractives, 23.74% lignin, 1.37% ash and 69.17% holocellulose. Calorimetry indicated that the treatments applied to the endocarps contributed to improving cement hydration. However, the high water absorption capacity of the endocarp negatively impacted the matrix-endocarp interface, impairing adhesion. On the other hand, flexural tests indicated that the XSBR coating was efficient in improving the interaction of the endocarp with the cement matrix. The flexural and compression tensile tests of the concretes showed that, even at low concentrations, the endocarp has the potential to be used as a reinforcement element in the cement matrix.

Keywords: reinforcement element; rubber tree; endocarp; cementitious composite; vegetable waste.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das principais fontes de impactos ambientais, contribuindo significativamente para a emissão de gases do efeito estufa, além do elevado consumo de recursos naturais (YUAN et al., 2020; EUGÊNIO et al., 2024). Os materiais cimentícios, em especial o concreto, apresentam boa capacidade de resistir a cargas de compressão. No entanto, quando submetidos a esforços de tração e flexão, apresentam um comportamento frágil, o que compromete o desempenho mecânico do material (NEVILLE, 2013; METHA & MONTEIRO, 2014).

Nesse contexto, a incorporação de elementos de reforço na matriz cimentícia tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar a tenacidade e o desempenho pós-fissuração do material. Embora fibras de aço e de polipropileno sejam comumente utilizadas com essa finalidade, estudos têm avaliado o uso de resíduos vegetais como uma alternativa promissora, devido às suas características de renovabilidade, biodegradabilidade e baixo impacto ambiental (LAVERDE et al., 2022; VAIRAGADE et al., 2023; WANG et al., 2023; GARCÍA et al., 2024).

No entanto, para a utilização de resíduos vegetais em compósitos cimentícios, é necessário submetê-los a tratamentos específicos que visam remover compostos capazes de interferir na hidratação do cimento, além de melhorar sua adesão à matriz, garantindo maior durabilidade e desempenho do material. Dentre esses tratamentos, destacam-se a lavagem em água quente a 80°C, a imersão em solução alcalina de hidróxido de cálcio e a impregnação com o polímero XSBR (FERREIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2020; ANDRADE, 2022).

O Brasil dispõe de uma ampla variedade de biomassas com potencial para aplicação em compósitos cimentícios, entre elas o fruto da seringueira, árvore nativa da região amazônica, conhecida pela produção de látex. O fruto da seringueira possui um endocarpo lenhoso que abriga três sementes. Essas sementes têm sido utilizadas na produção de biocombustíveis, suplementos alimentares e ração para peixes. No entanto, até o momento, não foram encontrados na literatura registros de aplicações para o endocarpo do fruto da seringueira (GONÇALVES, 2016; LAGE et al., 2013; SOUZA, 2014; SANT'ANNA et al., 2021; UNICENTRO, 2022).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios, visando não apenas o aprimoramento das propriedades mecânicas desses compósitos, como a resistência pós-

fissuração, mas também oferecer uma aplicação sustentável para esse resíduo, contribuindo para a inovação e a sustentabilidade no setor da construção civil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

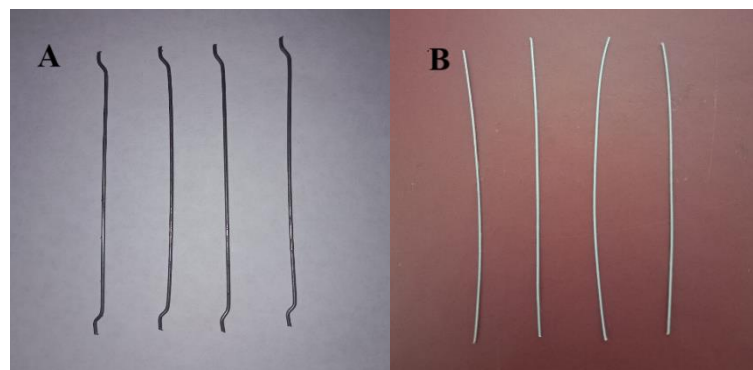
Para a produção dos compósitos cimentícios, foram utilizados os seguintes materiais: endocarpo do fruto da seringueira; cimento Portland CSN Tipo V-ARI; areia de quartzo, com módulo de finura igual a 2,30, utilizada como agregado miúdo; rocha granulítica, com dimensões entre 9,5 e 19 mm, empregada como agregado graúdo; água proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Lavras; aditivo incorporador de ar com ação plastificante, da marca Quartzolit; látex de estireno-butadieno carboxilado (XSBR NTL – 218 TB) disponibilizado pela empresa Nitriflex; fibras de aço Dramix 3D 80/60, com ganchos nas extremidades (Figura 1A), doadas pela empresa Belgo Arames (Sabará, Minas Gerais) e macrofibras de polipropileno (Figura 1B), cedidas pela empresa ConCresolos (Lavras, Minas Gerais). A areia de quartzo e a rocha granulítica foram obtidas de fornecedores locais. As características das fibras, conforme informações fornecidas pelos fabricantes, estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades das fibras de aço e das macrofibras de polipropileno, utilizadas no desenvolvimento deste estudo.

Tipo de fibra	Comprimento	Diâmetro	Fator de forma	Resistência à tração
Fibras de aço	60 mm	0,75 mm	80	1225 MPa
Fibras de PP	52 mm	0,35 mm	75	570 – 660 MPa

Fonte: Da autora (2025).

Figura 1 - Fibras de aço (A) e macrofibras de polipropileno (B).



Fonte: Da autora (2025).

O endocarpo do fruto da seringueira foi coletado no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA) (Figura 2), localizado na cidade de Lavras, Minas Gerais, Brasil, com latitude

21°14'45'' sul e longitude: 44°59'59'' oeste. As coletas foram realizadas nos meses de fevereiro e março dos anos de 2022 e 2023. As impurezas presentes na superfície dos endocarpos foram removidas por meio de limpeza manual com guardanapos de papel.

Figura 2 – Mapa de localização geográfica das árvores de seringueiras no campus da UFPA.



Fonte: Google Maps (2025).

Para a produção dos compósitos, os endocarpos foram utilizados em seu tamanho original, sem redução de suas dimensões. Cada endocarpo apresentou comprimento de aproximado de 50 milímetros, como apresentado na Figura 3.

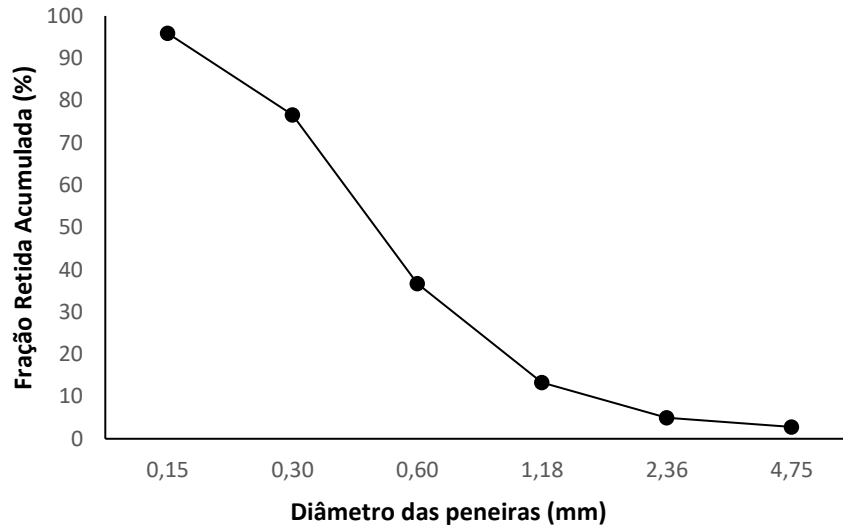
Figura 3 – Medida do comprimento do endocarpo do fruto da seringueira (*Hevea brasiliensis*).



Fonte: Da autora (2025).

A distribuição granulométrica do agregado miúdo (Figura 4) foi obtida através do método de peneiramento, utilizando peneiras da série normal, com diâmetros de 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,60mm, 0,30mm e 0,15mm. Essa análise foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 17054 (ABNT, 2022).

Figura 4 – Fração retida acumulada (%) do agregado miúdo (areia) após a realização do ensaio de distribuição granulométrica, pelo método do peneiramento.



Fonte: Da autora (2025).

2.1 Endocarpo do fruto da seringueira como bioagregado e potencial elemento de reforço

1.2.1 Propriedades químicas

Foi realizada a caracterização química dos endocarpos naturais com o objetivo de quantificar os teores de extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose presentes no material. Para o preparo das amostras utilizadas nesta análise, os endocarpos foram, inicialmente, quebrados em pedaços menores com um auxílio de um martelo e, em seguida, triturados em um moinho de facas do tipo Willye, modelo STAR FT 50, fabricado pela empresa Fortinox Indústria, Comércio e Serviços Ltda., localizada na cidade de Piracicaba, São Paulo. Posteriormente, as partículas foram classificadas em peneiras sobrepostas, utilizando-se a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Na Tabela 2, estão apresentadas as normas empregadas para a realização desses ensaios. O teor de holocelulose foi determinado por diferença.

Tabela 2 – Normas utilizadas para a obtenção da composição química do endocarpo do fruto da seringueira, a partir da quantificação dos teores de extrativos totais, lignina e cinzas.

Análises	Normas
Extrativos Totais	NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2017)

Fonte: Da autora (2025).

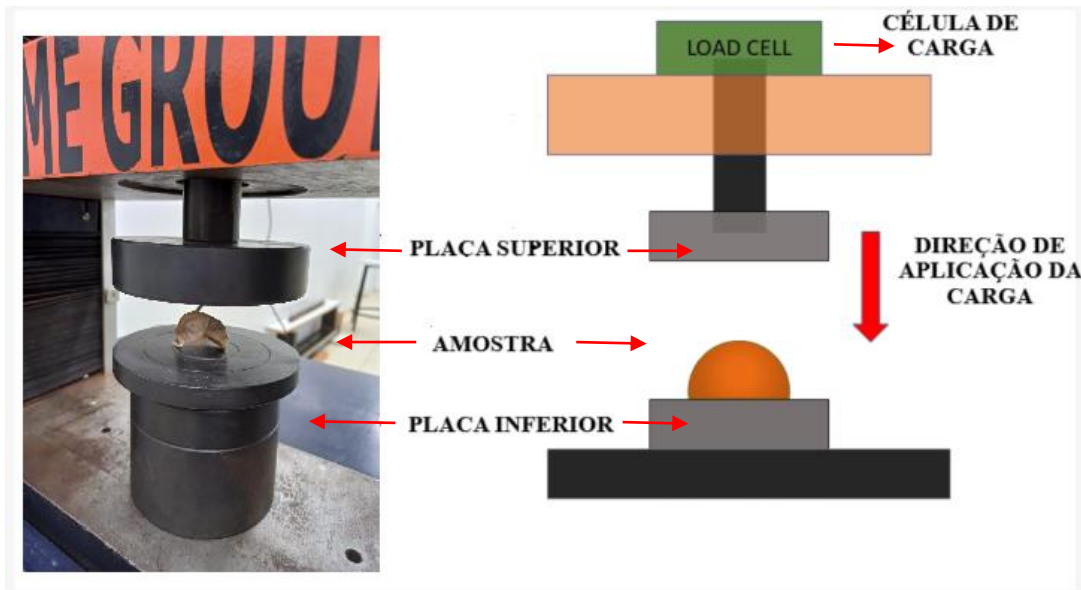
2.1.2 Densidade básica, absorção de água e umidade do endocarpo

Para a determinação da capacidade de absorção de água em 24 h, do teor de umidade e da densidade básica do endocarpo, utilizou-se uma versão adaptada da norma ASTM D2395–17 (2017), na qual, os endocarpos naturais foram submersos em água até atingirem o ponto de saturação e logo em seguida tiveram seus valores de massa e volume saturado anotados. Posteriormente, o material foi levado à estufa a 105°C por 72h, momento em que a massa seca foi registrada.

2.1.3 Avaliação das propriedades mecânicas do endocarpo

Para a realização dos testes de resistência à compressão, cada amostra de endocarpo foi posicionada na placa inferior da máquina, com sua concavidade voltada para cima, conforme detalhado na Figura 5. Ao todo, foram avaliadas 10 amostras de endocarpos naturais, em suas dimensões reais. A resistência à compressão do material foi avaliada em uma máquina de ensaios eletromecânica, desenvolvida pelo grupo AROTEC, fabricada na cidade de Pequim, República Popular da China, equipada com uma célula de carga de 20 KN e operando com taxa de deslocamento de 0,08 mm/s, conforme a metodologia adotada por Ferreira et al., (2022) e Andrade (2022).

Figura 5 – Amostra do endocarpo do fruto da seringueira, com a concavidade voltada para cima, sendo esmagada durante a realização do teste de resistência à compressão axial.



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2022).

2.1.4 Tratamentos dos endocarpos

Conforme descrito na literatura, a presença de extrativos na composição de resíduos vegetais pode retardar ou até mesmo inibir a hidratação do cimento, comprometendo o desempenho dos compósitos cimentícios (BERALDO et al., 2011; ANDRADE et al., 2024). Logo, com o objetivo de mitigar essas interferências e melhorar a compatibilidade química, bem como a adesão dos endocarpos à matriz cimentícia, foram aplicados tratamentos específicos, incluindo lavagem em água quente a 80°C, imersão em solução alcalina de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e impregnação com o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR).

2.1.4.1 Lavagem em água quente

A lavagem em água quente foi realizada utilizando um banho maria com controlador de temperatura, no qual os endocarpos foram mantidos em água quente a 80°C por 1 hora, na proporção de 100 gramas de endocarpos por litro de água, conforme a metodologia adotada por Ferreira et al. (2018), Da Glória et al. (2021), Silveira et al., (2024) e Andrade et al. (2024). Foram realizados, ao todo, 3 ciclos de lavagem em água quente. Ao final desse processo, os

endocarpos foram secos em estufa a 105°C por 24 h e, em seguida, armazenados para posterior utilização.

2.1.4.2 Imersão em solução alcalina

A solução alcalina de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), foi preparada em um béquer com capacidade de 1000 mL, utilizando-se a concentração de 1,85 g de hidróxido de cálcio por litro de água. Os endocarpos permaneceram imersos nesta solução por 50 minutos, à temperatura de 22 °C, conforme metodologia adotada por Ferreira et al. (2015) e Andrade (2022). Após a imersão, os endocarpos foram secos em estufa a 40°C por 24 horas e, em seguida, armazenados para uso posterior.

2.1.4.3 Impregnação com o polímero XSBR

Com o objetivo de melhorar a aderência do resíduo vegetal à matriz cimentícia, a superfície dos endocarpos foi revestida com o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR). Para esse procedimento, utilizou-se o látex XSBR NTL – 218 TB, fornecido pela empresa Nitriflex. As amostras de endocarpos naturais foram imersas no polímero por aproximadamente 20 segundos e, em seguida, acondicionadas em sala climatizada, para secagem, a temperatura de 18°C e UR 66%, durante 7 dias (Figuras 6A e 6B).

Figura 6 – Endocarpos do fruto da seringueira logo após a impregnação com o polímero de estireno-butadieno carboxilado (XSBR) (A) e posteriormente acondicionados em sala climatizada, com temperatura de 18°C e UR de 66%, para secagem (B).



Fonte: Da autora (2024).

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas do polímero XSBR, conforme informações fornecidas pela empresa Nitriflex.

Tabela 3 – Propriedades físicas do polímero de estireno-butadieno carboxilado (XSBR), fornecidas pela empresa fabricante.

Propriedades físicas do polímero XSBR	
Aspecto	Líquido branco
Odor	Característico
Teor de sólidos	52,51%
pH	7,52
Densidade	1,57 g/cm ³

Fonte: Nitriflex (2025).

2.1.5 Calorimetria semi-adiabática

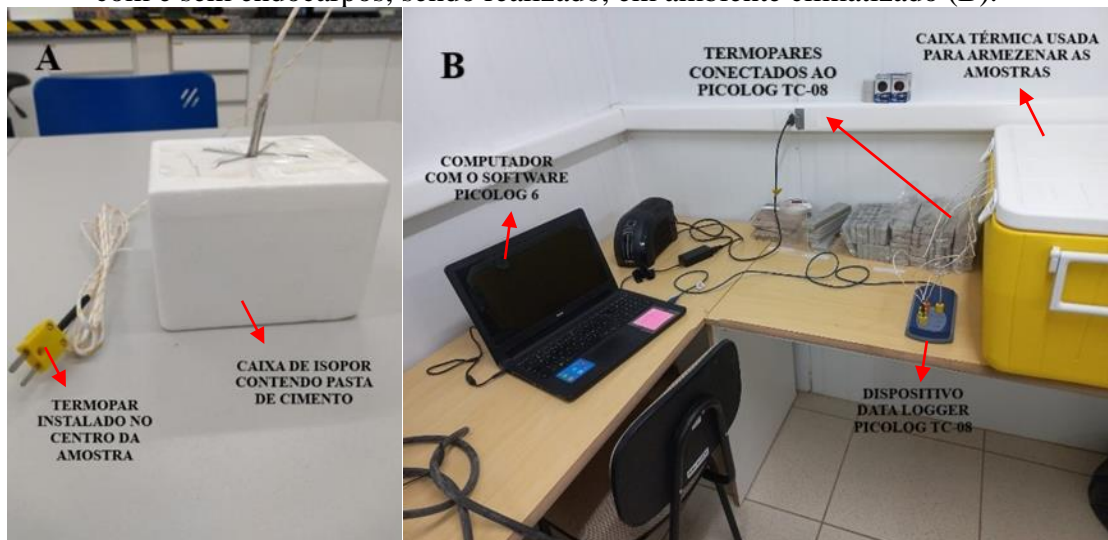
Para avaliar o impacto da adição do endocarpo do fruto da seringueira no processo de hidratação do cimento, foi realizado o ensaio de calorimetria semi-adiabática, com base em uma adaptação da norma NBR 12006 (ABNT, 1990). Ao todo, foram preparadas 5 pastas de cimento, com e sem a adição de endocarpos. Para a produção das pastas, foram utilizados 2% de endocarpos inteiros, em sua forma natural, lavados em água quente, tratados com hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR.

O teor de endocarpos, foi calculado com base na massa de cimento utilizada. Para a produção de cada pasta utilizou-se aproximadamente 500 g de cimento e um fator água/cimento de 0,4, de acordo com a metodologia adotada por Ferreira et al., (2022) e Andrade et al., (2024). Após o preparo, as misturas foram homogeneizadas por aproximadamente 1 minuto, utilizando um vórtex manual operando a 5600 rpm.

Em seguida, as pastas de cimento foram transferidas para caixas de poliestireno expandido (EPS), com dimensões de 12,5 cm x 10 cm x 5,6 cm e volume de 418 cm³, da marca Isopor. No centro geométrico de cada amostra, foi instalado um termopar do tipo K 32 AWG (Figura 7A). Posteriormente, as caixas foram lacradas com fita adesiva e acondicionadas em uma caixa térmica, da marca Coleman, com capacidade de 50L e abertura para a passagem dos termopares. É importante ressaltar que, a caixa térmica desempenhou um papel essencial na redução da troca de calor com o ambiente externo, garantindo medições mais precisas e representativas do comportamento térmico das pastas cimentícias.

Para a medição das temperaturas, os termopares foram conectados a um dispositivo multicanal Data Logger PicoLog TC-08, fabricado pela empresa Pico Technology, localizada em Cambridgeshire, Reino Unido. O registro das temperaturas foi realizado pelo software PicoLog 6, instalado em um microcomputador conectado ao Data Logger PicoLog TC-08 (Figura 7B). O ensaio foi conduzido em ambiente climatizado, com temperatura de 20°C e UR 64%. Foram realizadas medições a cada 20 segundos, durante um período de 48 h.

Figura 7 – Termopar instalado no centro de uma caixa de isopor contendo pasta de cimento, para a realização do ensaio de calorimetria semi-adiabática, onde foi avaliado o comportado térmico das pastas cimentícias com e sem adição do endocarpo do fruto da seringueira (A) e ensaio de calorimetria semi-adiabática, das pastas de cimento com e sem endocarpos, sendo realizado, em ambiente climatizado (B).



Fonte: Da autora (2024).

2.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

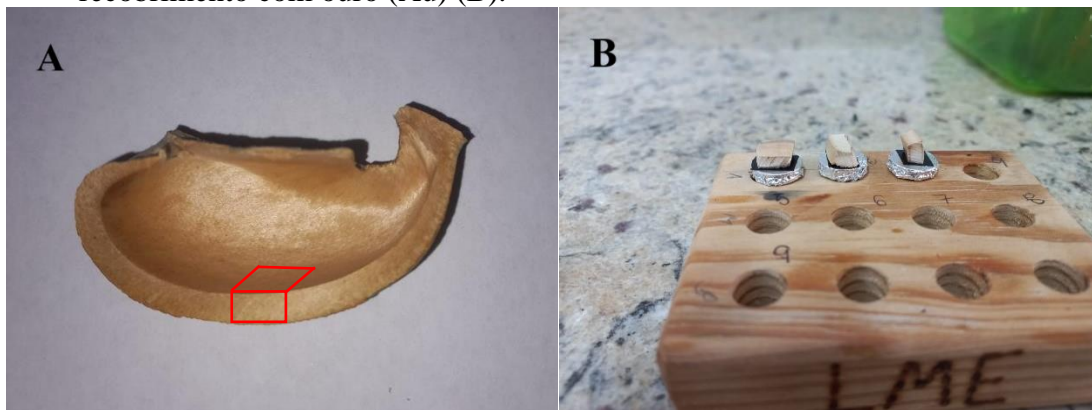
A análise da morfologia e da estrutura superficial do endocarpo do fruto da seringueira foi realizada utilizando o microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP, fabricado pela empresa Carl Zeiss, localizada em Oberkochen, Alemanha.

Para a obtenção das amostras de endocarpo, foi utilizado o procedimento adotado por Flores-Johnson et al., (2018), de forma adaptada. As amostras foram retiradas a partir de cortes realizados na seção longitudinal, alinhados ao plano equatorial do endocarpo, de modo a garantir a representatividade das diferentes regiões analisadas (Figura 8A).

Após o corte, as amostras foram fixadas em stubs metálicos com o auxílio de fita adesiva dupla-face de carbono. Antes da fixação, todos os stubs foram recobertos com folhas de

alumínio, com o objetivo de assegurar uma condutividade elétrica adequada e minimizar a acumulação de cargas nas superfícies das amostras, melhorando a qualidade das imagens obtidas. Ao todo foram avaliadas 3 amostras, correspondentes às faces externa, interna e lateral do endocarpo, conforme mostrado na Figura 8B. Para melhorar a condutividade elétrica do material, todas as amostras foram revestidas com uma fina camada de ouro (Au). As análises foram conduzidas com o microscópio operando a uma tensão de 15 KV, distância de trabalho de aproximadamente 11 mm, sem aplicação de inclinação.

Figura 8 – Representação esquemática de como foi realizado o corte para obtenção de amostras do endocarpo do fruto da seringueira para a realização da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) (A) e amostras sendo preparadas para receber o recobrimento com ouro (Au) (B).



Fonte: Da autora (2024).

2.1.7 Microscopia de força atômica (AFM)

Para avaliar a rugosidade superficial do endocarpo do fruto da seringueira foi utilizado o microscópio de força atômica (AFM), modelo Nanosurf FlexAFM. Para a realização dessa análise, foram retiradas amostras do endocarpo, conforme o procedimento descrito no item 2.1.6, que posteriormente foram fixadas em uma lâmina de vidro com o auxílio de fita adesiva dupla-face. A análise foi conduzida sob as seguintes condições: temperatura ambiente, modo de força dinâmica, velocidade de varredura de 190 KHz, 2s/linha, 256 pontos/linha, amplitude de vibração de 6V, cantilever modelo Dyn190AI, raio de curvatura inferior a 10nm e constante elástica de 48N/m. Foram analisadas regiões de 60x60 μm de área. O tratamento dos dados obtidos e a geração das imagens, foram realizados por meio do software Gwyddion 64bits, permitindo a extração de parâmetros quantitativos de rugosidade e visualização da topografia superficial do material.

2.1.8 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Para identificar os grupos funcionais presentes na amostra e obter informações complementares acerca da composição química do endocarpo, foi realizada a análise de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Para o preparo das amostras, os endocarpos foram fragmentados em pequenos pedaços, com o auxílio de um martelo e, posteriormente, triturados, em moinho de facas do tipo Willye, modelo STAR FT 50, fabricado pela empresa Fortinox Ind. Comércio e Serviços Ltda, localizada na cidade de Piracicaba, São Paulo. Foram analisadas amostras do endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com hidróxido de cálcio e revestido com o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR). A análise foi conduzida utilizando um espectrômetro FT-IR modelo Varian 600-IR, com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para realização de medidas por reflectância total atenuada (ATR), com ângulo de incidência de 45°. As amostras foram escaneadas no intervalo de 675 a 4000 cm^{-1} , com 32 varreduras realizadas e resolução de 4 cm^{-1} , de acordo com a metodologia adotada por Ferreira et al., (2015); Andrade et al., (2022) e Guimarães et al., (2023).

2.2 Produção dos compósitos cimentícios com adição de endocarpos

Neste estudo, foram produzidos dois tipos distintos de compósitos cimentícios. O primeiro consistiu em uma argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados. O segundo, por sua vez, envolveu a produção de um concreto contendo endocarpos revestidos com o polímero XSBR, fibras de aço e macrofibras de polipropileno. As especificações dos materiais utilizados, bem como os procedimentos adotados para a produção dos compósitos, serão apresentados nas seções subsequentes.

2.2.1 Produção dos corpos de prova de argamassa com adição de endocarpos tratados e não tratados

Para a produção dos compósitos de argamassa, foram utilizados endocarpos em sua forma natural, lavados em água quente, tratados com solução de hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR. Também foram produzidos corpos de prova sem a adição de endocarpos, para efeitos de comparação, conforme apresentado na Tabela 4.

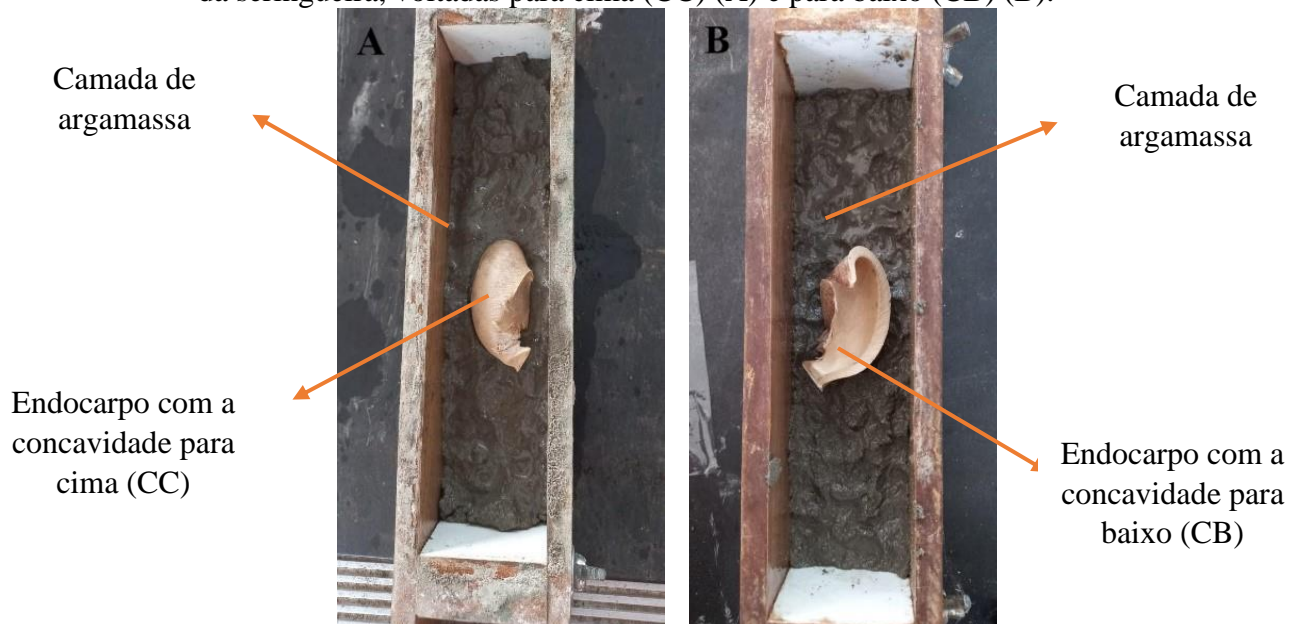
Tabela 4 – Descrição de todos os compósitos de argamassa que foram produzidos neste estudo.

Referência, sem adição de endocarpos
Endocarpo natural com a concavidade para cima (CC) e para baixo (CB)
Endocarpo lavado em água quente com a concavidade para cima (CC) e para baixo (CB)
Tratado com hidróxido de cálcio com a concavidade para cima (CC) e para baixo (CB)
Revestido com o polímero XSBR com a concavidade para cima (CC) e para baixo (CB)

Fonte: Da autora (2025).

A argamassa foi produzida adotando-se a relação 1:3 (cimento:areia) e o fator a/c (água/cimento) de 0,50. Na região central de cada corpo de prova, foi adicionado um endocarpo. Foram utilizados endocarpos com as concavidades voltadas para cima (CC) e para baixo (CB), conforme mostrado nas Figuras 9A e 9B. Para cada tratamento estudado, foram produzidos 18 corpos de prova, com dimensões de 160 mm de comprimento x 40 mm de largura x 40 mm de altura.

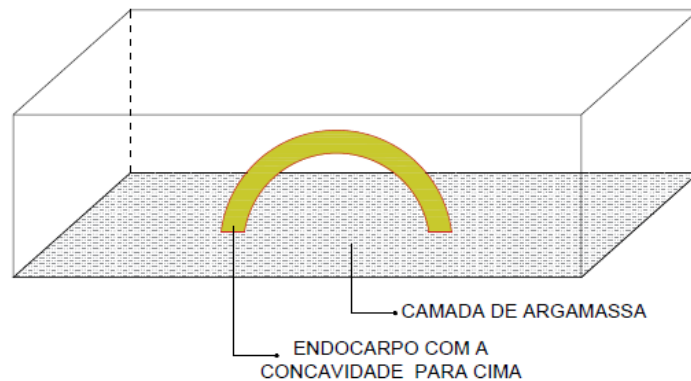
Figura 9 - Moldagem dos corpos de prova de argamassa, para a realização do ensaio de resistência mecânica à tração na flexão, com as concavidades dos endocarpos do fruto da seringueira, voltadas para cima (CC) (A) e para baixo (CB) (B).



Fonte: Da autora (2023).

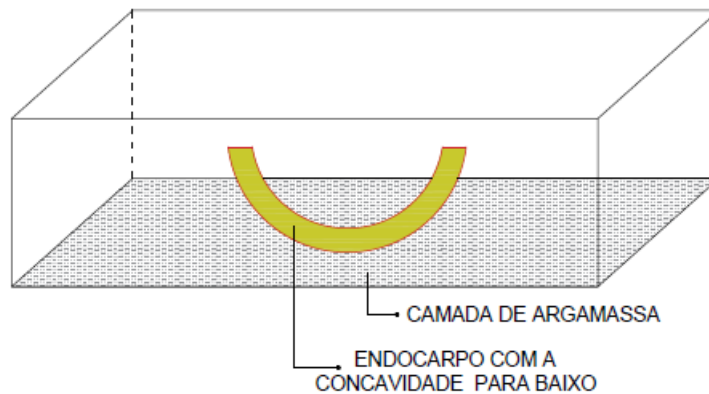
As Figuras 10 e 11 apresentam esquemas detalhados da posição dos endocarpos no interior dos compósitos de argamassa.

Figura 10 – Representação esquemática do perfil longitudinal do corpo de prova de argamassa, contendo um endocarpo com a concavidade voltada para cima (CC).



Fonte: Da autora (2025).

Figura 11 – Representação esquemática do perfil longitudinal do corpo de prova de argamassa, contendo um endocarpo com a concavidade voltada para baixo (CB).



Fonte: Da autora (2025)

2.2.1.2 Avaliação da adesão do endocarpo à matriz cimentícia

Para avaliar a adesão do endocarpo à matriz cimentícia, foi realizado o ensaio mecânico de resistência à tração na flexão em 3 pontos. Este ensaio foi conduzido em uma máquina de ensaios eletromecânica, equipada com célula de carga de 20kN, da marca Arotec, produzida em Pequim, República Popular da China. Foi adotado um vão de 140 mm e taxa de deslocamento de 0,2 mm/min. Para cada tratamento avaliado, foram realizadas três repetições. Os corpos de prova foram avaliados após 7, 14 e 28 dias de cura.

2.2.1.3 Análise Termogravimétrica (TGA) da interface endocarpo – matriz cimentícia

Para avaliar a presença dos produtos de hidratação do cimento na interface entre o endocarpo e a matriz cimentícia dos compósitos estudados, foi realizada a análise de termogravimetria (TGA). Para fins de comparação, também foi realizada uma análise termogravimétrica apenas da matriz cimentícia (referência). As amostras foram obtidas a partir da interface matriz-endocarpo dos compósito cimentícios, a qual foi cuidadosamente desbastada com o auxílio de uma espátula metálica. Para interromper o processo de hidratação do cimento, adicionou-se acetona sobre as amostras.

A análise foi conduzida utilizando o equipamento NETZSCH STA 449 F5 Jupiter, a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, em uma faixa de temperatura de 40°C a 1000°C, sob fluxo de nitrogênio de 10 mL/min, conforme metodologia adotada por Guimarães et al., (2024), Silveira et al., (2024). Foram utilizados 10 mg de material, acondicionados em um cadinho de alumina aberto. Para a realização dessa análise, o material foi submetido a uma pré-secagem de 30 minutos a 40°C.

2.2.2 Produção dos concretos

2.2.2.1 Dosagem dos concretos

O traço utilizado para a produção dos concretos foi definido com base nos trabalhos desenvolvidos por Barbosa et al. (2008) e Andrade (2022). Os concretos foram produzidos com a substituição de 1% do volume de agregados graúdos por endocarpos revestidos com o polímero XSBR, macrofibras de polipropileno (PP) e fibras de aço. Para fins de comparação, também foi produzido um concreto de referência, sem nenhum tipo de substituição. O traço dos concretos está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Traço, calculado em volume, adotado para a produção dos concretos.

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Endocarpo	PP	Aço	a/c	Aditivo
Referência	1	2,6	2,70	-	-	-	0,6	0,9
1% Endoc. XSBR	1	2,6	2,67	0,03	-	-	0,6	0,9
1 % Fibras de PP	1	2,6	2,67	-	0,03	-	0,6	0,9
1% Fibras de aço	1	2,6	2,67	-	-	0,03	0,6	0,9

Fonte: Da autora (2025).

Com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura, foi adicionado um aditivo incorporador de ar com ação plastificante, da marca Quartzolit, na proporção de 0,9% em relação à massa de cimento. A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas do aditivo, conforme informado pelo fabricante.

Tabela 6 – Propriedades físicas do aditivo incorporador de ar com ação plastificante da marca Quartzolit, fornecidas pelo fabricante.

Propriedades físicas do aditivo Quartzolit	
Aspecto	Líquido marrom claro
Base de formulação	Surfactantes
Teor de sólidos	3,0 – 4,0%
pH	4,5 – 7,5
Massa específica	1,002 – 1,004 Kg/dm ³

Fonte: Quartzolit (2025).

2.2.2.2 Moldagem dos concretos

As moldagens dos concretos foram realizadas no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Todos os concretos foram produzidos em uma betoneira com capacidade de 400 L, da marca Sorrag, fabricada na cidade de Cláudio, Minas Gerais.

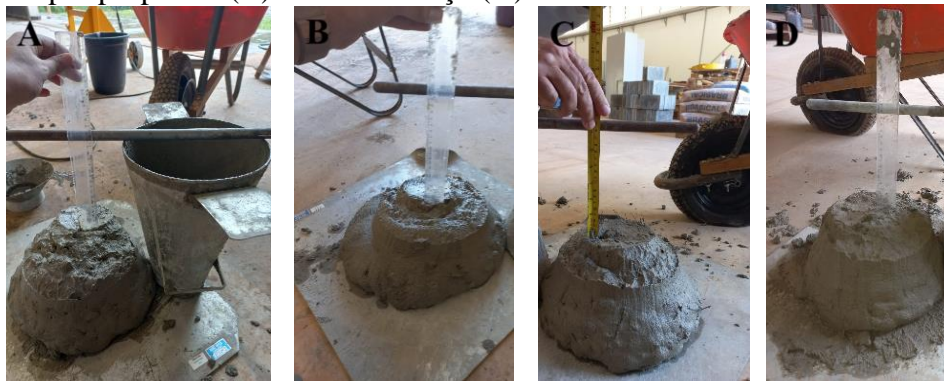
A metodologia adotada para a produção dos concretos seguiu as seguintes etapas:

- Mistura da brita com a água por 2 minutos;
- Adição do cimento;
- Mistura por mais 2 minutos;
- Adição da areia;
- Mistura por mais 2 minutos;
- Homogeneização e adição do aditivo, por aproximadamente 1 minuto;
- Mistura por mais 1 minuto;
- Quando necessário, adição de endocarpos ou fibras;
- Mistura final por mais 3 minutos.

2.2.2.3 Slump dos concretos

Após o preparo das misturas, foi realizado o ensaio de slump, para avaliar a consistência do concreto no estado fresco, conforme o procedimento descrito pela NBR 16889 (ABNT, 2020). Para a execução do ensaio, foi utilizado um molde em forma de tronco de cone, que foi preenchido com 3 camadas de concreto. Cada camada foi adensada manualmente com 25 golpes, utilizando uma haste metálica. Após o adensamento da última camada, a superfície foi nivelada, para remover o excesso de material. Em seguida, o molde foi retirado verticalmente e o abatimento foi determinado pela diferença entre a altura do molde e a altura final da amostra. Os concretos apresentaram valores de abatimento entre 17 e 19 cm, conforme ilustrado nas Figuras 12 A, B, C e D.

Figura 12 – Abatimento dos concretos: Referência (A), Endocarpo com XSBR (B), Macrofibras de polipropileno (C) e Fibras de aço (D).

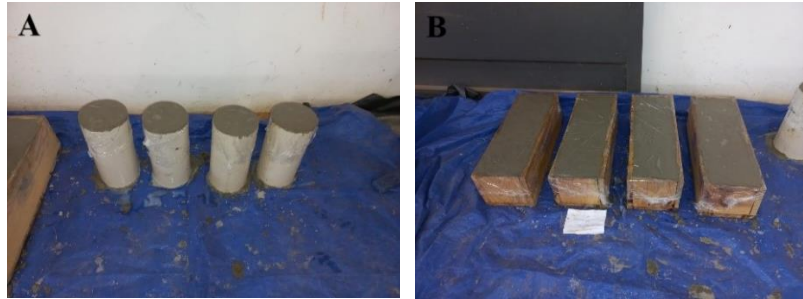


Fonte: Da autora (2024).

2.2.2.4 Produção dos corpos de prova de flexão e compressão

Antes de cada moldagem, os moldes foram cuidadosamente limpos e revestidos com uma fina camada de desmoldante da marca Vedacit. De acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), para a produção dos corpos de prova destinados aos ensaios de compressão, as misturas no estado fresco, foram dispostas em 3 camadas. Durante a moldagem, as camadas de concreto foram adensadas manualmente, com o auxílio de uma haste metálica, sendo aplicados 25 golpes em cada camada. Para a produção dos corpos de prova destinados aos ensaios de flexão, as misturas foram dispostas em 2 camadas e também adensadas manualmente, com a aplicação de 75 golpes em cada camada. Para garantir um acabamento uniforme, as superfícies dos moldes foram alisadas com uma espátula. Em seguida, todos os corpos de prova foram recobertos com plástico filme, a fim de evitar a perda de umidade. Para cada tipo de concreto, foram moldados 4 corpos de prova para compressão (Figura 13A) e 4 para flexão (Figura 13B).

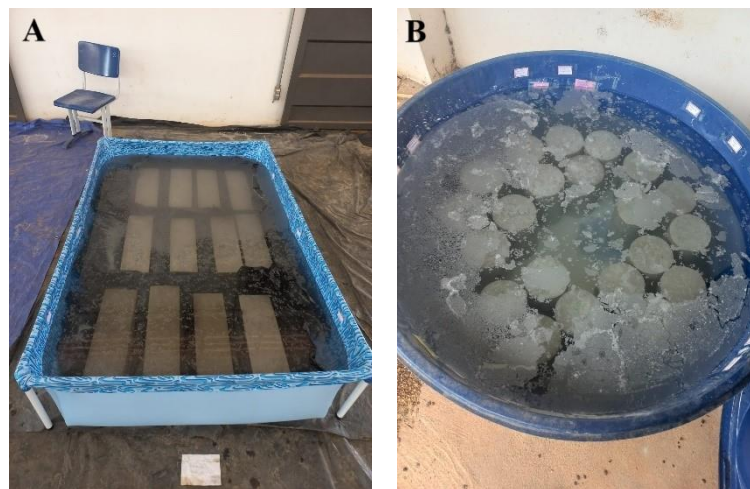
Figura 13– Moldagem dos corpos de prova para ensaios de compressão (A) e flexão (B).



Fonte: Da autora (2024).

Ao todo, foram produzidos 16 corpos de prova para compressão, com dimensões de 15 cm de diâmetro x 30 cm de altura e 16 corpos de prova para flexão, com dimensões de 50 cm de comprimento x 15 cm de largura x 15 cm de altura. Após o período inicial de cura, de 48 h, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e devidamente armazenados em solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) por um período de 28 dias (Figuras 14A e 14B).

Figura 14 – Processo de cura dos corpos de prova para ensaios de flexão (A) e compressão (B).

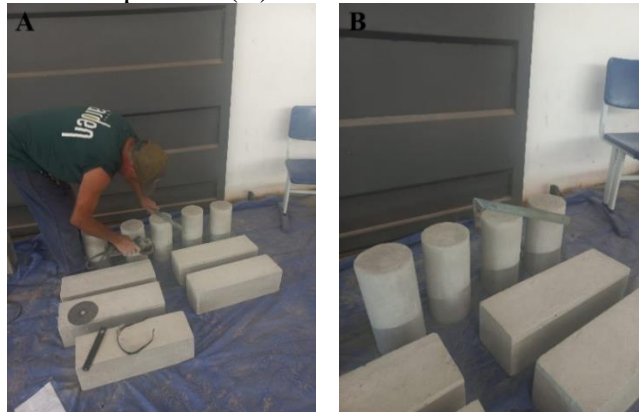


Fonte: Da autora (2024).

2.2.2.5 Faceamento dos corpos de provas submetidos ao ensaio de compressão axial

Os corpos de prova destinados aos ensaios de compressão foram faceados (Figura 15A) com o auxílio de uma lixadeira da marca Makita. Para verificar a planicidade das faces dos corpos de prova (Figura 15B), foi utilizado um esquadro metálico da marca Stanley.

Figura 15 – Processo de faceamento (A) e verificação da planicidade dos corpos de prova para ensaios de compressão (B).

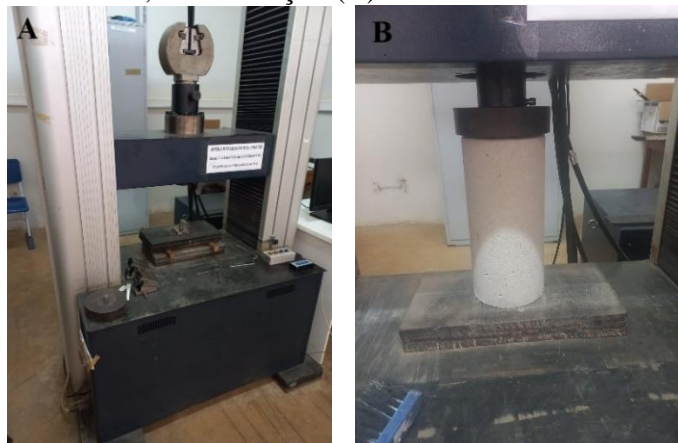


Fonte: Da autora (2024).

2.2.2.6 Ensaio mecânico de resistência à compressão axial

A resistência mecânica do concreto foi avaliada aos 28 dias, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018), por meio do ensaio de compressão axial (Figura 16B). Esse ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios eletromecânica, equipada com célula de carga de 300 KN e operando a uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min, fabricada pela empresa Time Group, na República Popular da China (Figura 16A). Dois dias antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retirados da água, para permitir a remoção do excesso de umidade. Os ensaios foram realizados no mesmo local em que os concretos foram moldados. Para cada tratamento, foram realizadas 4 repetições.

Figura 16 – Máquina de ensaios, eletromecânica, utilizada para determinação da resistência mecânica à compressão e flexão do concreto (A) e ensaio de resistência à compressão axial, em execução (B).



Fonte: Da autora (2024).

2.2.2.7 Ensaio mecânico de resistência à tração na flexão (3 pontos)

A resistência mecânica do concreto à tração na flexão em 3 pontos (Figura 17) foi avaliada aos 28 dias. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios eletromecânica, equipada com célula de carga de 300 KN, fabricada pela empresa Time Group, na República Popular da China. Foi adotada uma taxa de deslocamento de 0,2 mm/min e um vão de 420 mm. Dois dias antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retirados da água, para permitir a remoção do excesso de umidade. Os ensaios foram realizados no mesmo local em que os concretos foram moldados. Para cada tratamento, foram realizadas 4 repetições.

Figura 17 – Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos do concreto.



Fonte: Da autora (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização química do endocarpo da seringueira

A Tabela 7 apresenta os valores médios obtidos na caracterização química do endocarpo do fruto da seringueira, referente aos teores de extrativos totais, lignina insolúvel, holocelulose e cinzas.

Tabela 7 – Composição química do endocarpo do fruto da árvore de seringueira.

Biomassa	Extrativos Totais (%)	Lignina Insolúvel (%)	Holocelulose (%)	Cinzas (%)
<i>Endocarpo</i>	5,72 ± 1,30	23,74 ± 0,90	69,17 ± 0,69	1,37 ± 0,08

Fonte: Da autora (2025).

O endocarpo do fruto da seringueira apresentou um teor de extrativos de 5,72%. Esse valor é semelhante ao encontrado por Andrade (2022) para o endocarpo da macaúba (3,72%) e por Miranda et al. (2024) ao caracterizarem resíduos de feijão (8,16%). De acordo com a literatura, os extrativos estão relacionados à inibição da pega e da hidratação do cimento, o que pode ocasionar a incompatibilidade química entre os resíduos lignocelulósicos e a matriz cimentícia (IWAKIRI et al., 2005; BERALDO, 2011;). Portanto, a baixa concentração de extrativos no endocarpo do fruto da seringueira representa uma característica favorável, pois minimiza o risco de interferência na hidratação do cimento, viabilizando sua utilização na produção de compósitos cimentícios.

O teor de lignina insolúvel obtido neste estudo foi de 23,74%. Esse valor está próximo aos descritos na literatura para outros materiais lignocelulósicos. Dias et al. (2023), por exemplo, encontraram um teor médio de 26,81% para o mandacaru, enquanto Furtini et al. (2023) obtiveram um valor de 23,81% para o resíduo de miriti. Segundo a literatura, aproximadamente 30% da estrutura dos vegetais é composta por lignina. A lignina desempenha um papel fundamental na proteção do material contra agentes patogênicos e na conferência de resistência e rigidez à parede celular dos resíduos vegetais. Essas propriedades são essenciais para o bom desempenho dos compósitos cimentícios reforçados com resíduos vegetais (LOURENÇO et al. 2017).

O teor de holocelulose apresentado pelo material foi de 69,17%, valor semelhante aos reportados por Furtini et al. (2023), ao caracterizarem partículas de pinus (66,43%) e resíduos

de miriti (69,91%). Conforme relatado na literatura, a holocelulose contém grupos hidroxilas (-OH) em sua estrutura, os quais conferem natureza hidrofílica aos resíduos vegetais, aumentando sua capacidade de absorção de água. Essa característica pode interferir negativamente nas propriedades de resistência mecânica e durabilidade dos compósitos cimentícios. Assim, teores menores de holocelulose são preferíveis para a produção desses materiais (FIORELLI et al., 2018; GOMES et al., 2023)

O valor encontrado para o teor de cinzas foi de 1,37%, inferior ao reportado por Veloso et al. (2021), para o resíduo do cacau (3,70%) e por Gomes et al. (2023), para o resíduo de trigo (10,74%). De modo geral, em termos de composição química, o endocarpo do fruto da seringueira demonstrou ser um material promissor para aplicação na produção de compósitos cimentícios.

3.2 Propriedades físicas do endocarpo da seringueira

A Tabela 8 apresenta os valores médios das propriedades físicas do endocarpo do fruto da seringueira, referentes à densidade básica, teor de umidade e absorção de água em 24 h.

Tabela 8 – Propriedades físicas do endocarpo do fruto da árvore de seringueira

Biomassa	Densidade básica – ρ (g/cm³)	Umidade - U (%)	Absorção de água – AA (%)
<i>Endocarpo</i>	0,80 ± 0,01	5,24 ± 0,18	74,51 ± 0,60

Fonte: Da autora (2025).

O valor obtido para a densidade básica do endocarpo do fruto da seringueira foi de 0,80 g/cm³. Esse valor é inferior ao encontrado por Andrade (2022) para o endocarpo da macaúba (1,23 g/cm³) e superior ao relatado por Silveira et al. (2024) para o mandacaru (0,34 g/cm³). De acordo com a norma ASTM D2395 (2017) e considerando o contexto da produção de compósitos cimentícios, o endocarpo do fruto da seringueira pode ser classificado como um agregado de baixa densidade, visto que seu valor representa aproximadamente 30% da densidade média do agregado graúdo (2,65 g/cm³) utilizado neste estudo. Conforme Veloso et al. 2021 e Teixeira, 2017, a baixa densidade de resíduos lignocelulósicos é considerada vantajosa por contribuir para a leveza do produto final.

O teor de umidade do endocarpo foi de 5,24%, valor semelhante aos encontrados na literatura para outros resíduos lignocelulósicos. Zubiolo et al. (2021), por exemplo, encontraram

valores próximos ao caracterizar o sabugo de milho (8,3%) e o caule de girassol (9,8%). Dias et al. (2021) relataram o valor de 5,82% para a fibra de sisal.

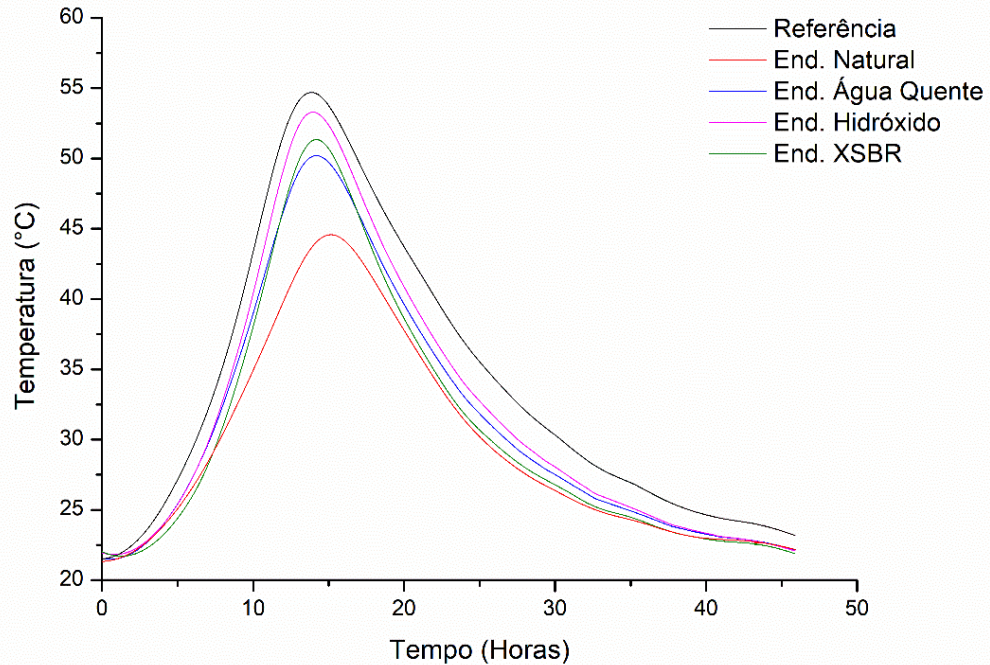
A capacidade de absorção de água do endocarpo em 24h foi de 74,51%, valor superior ao obtido por Andrade (2022) para o endocarpo da macaúba (9,05%) e inferior ao reportado por Andreola (2017) para partículas de bambu (109,14%). Esse resultado pode ser atribuído ao elevado teor de holocelulose presente na estrutura do resíduo, conforme discutido anteriormente.

Segundo a literatura, elevados teores de absorção de água podem comprometer a adesão entre os resíduos vegetais e a matriz cimentícia, enfraquecendo as zonas de transição interfacial (ZTI) e reduzindo a resistência mecânica dos compósitos (LAVARDE et al., 2022). Para mitigar esse efeito, uma alternativa viável é a impregnação dos resíduos vegetais com revestimentos hidrofóbicos, capazes de diminuir a absorção de água e de melhorar a qualidade da zona de transição interfacial nos compósitos cimentícios.

3.3 Calorimetria semi-adiabática

A Figura 18 apresenta as curvas de calorimetria da pasta de cimento e das pastas contendo endocarpo natural, tratados com água quente, com solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e revestidos com polímero XSBR. O ensaio de calorimetria é amplamente utilizado para avaliar os efeitos da incorporação de resíduos vegetais nas reações de hidratação do cimento, uma vez que a presença de determinados compostos químicos nesses resíduos pode ocasionar atrasos no processo de hidratação. Este efeito é evidenciado pela redução da temperatura máxima registrada na curva de calorimetria e pelo aumento do tempo necessário para que essa temperatura seja atingida (OLIVEIRA, 2019).

Figura 18 – Curvas obtidas no ensaio de calorimetria semi-adiabática de pastas cimentícias de referência e contendo endocarpos naturais, lavados em água quente, tratados com solução de hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR.



Fonte: Da autora (2025).

Todas as curvas obtidas a partir do ensaio de calorimetria apresentaram os diferentes estágios das reações de hidratação do cimento, incluindo os períodos de indução (ou dormência), aceleração, desaceleração e reação lenta. O período de indução da pasta de referência encerrou-se aproximadamente 30 minutos após o início do ensaio e a temperatura máxima foi alcançada após 13 horas e 40 minutos. Dentre todas as amostras, a pasta contendo endocarpos naturais foi a que apresentou o maior atraso na hidratação do cimento, com término do período de indução em torno de 1 hora e 20 minutos. Este atraso pode ser visualizado, no gráfico, pelo deslocamento horizontal da curva para a direita e pela redução da altura do pico.

O deslocamento horizontal da curva para a direita indica um retardo no início das reações de hidratação do cimento. A redução da altura do pico evidencia uma menor taxa de hidratação, sugerindo uma menor formação dos principais produtos de hidratação do cimento, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Em conjunto, esses parâmetros indicam que a hidratação da pasta de cimento contendo endocarpos naturais ocorreu de maneira mais lenta e com menor intensidade térmica.

Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos químicos nos materiais lignocelulósicos, como extrativos e hemicelulose, que têm potencial para interferir nas reações de hidratação do cimento (LEE et al., 2022; MIRANDA et al., 2022).

Em relação aos tratamentos avaliados, vale a pena destacar que o tratamento com imersão do endocarpo em solução alcalina de hidróxido de cálcio, foi o que demonstrou o melhor desempenho, seguido pela impregnação com polímero XSBR e, por fim, pela lavagem em água quente. Todos os tratamentos avaliados demonstraram comportamento semelhante ao da amostra de referência, indicando sua eficácia em melhorar a compatibilidade dos resíduos vegetais com a matriz cimentícia.

Os resultados obtidos neste estudo, estão em conformidade com os dados reportados na literatura. Andrade (2022) realizou o ensaio de calorimetria semi-adiabática em pastas de cimento contendo endocarpos de macaúba, em diferentes condições: natural, lavados em água quente (por 1 e 5 ciclos) e tratados com solução de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Para fins de comparação, também foram produzidas pastas sem adição de endocarpos. Os resultados mostraram que os endocarpos naturais promoveram o maior atraso na hidratação do cimento, com início do período de indução após 3 h de ensaio. Já os endocarpos tratados com água quente e solução de hidróxido de cálcio apresentaram baixa interferência nas reações de hidratação do cimento, confirmando a eficácia desses tratamentos.

Da Glória et al. (2021) investigaram a influência da adição de aparas de madeira na hidratação do cimento, por meio de ensaios de calorimetria. Foram analisadas misturas com aparas de madeira em seu estado natural e lavadas em água quente a 80°C por até 9 vezes. As misturas contendo aparas de madeira naturais e lavadas apenas 1 vez em água quente, permaneceram no estágio de indução até o fim do ensaio, indicando quase completa inibição da hidratação do cimento, nessas condições. Os autores relacionaram esse resultado a quantidade de extrativos presentes na madeira, destacando que apenas um ciclo de lavagem não foi suficiente para remover esses compostos adequadamente. No entanto, foi observado que cinco ciclos de lavagem em água quente foram eficazes para melhorar a compatibilidade do resíduo com a matriz cimentícia.

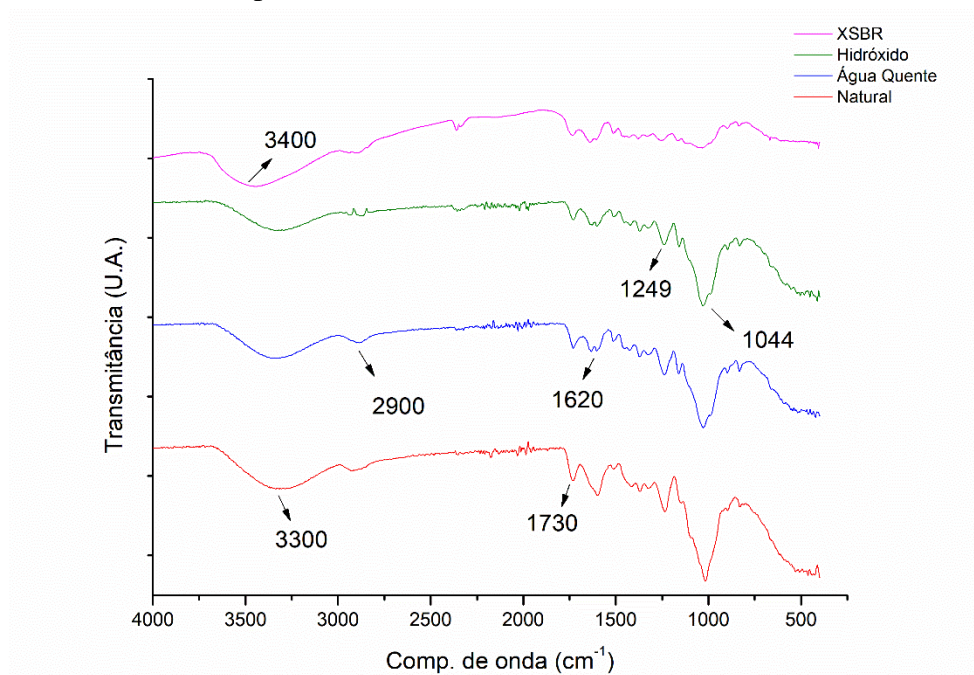
Em resumo, todos os tratamentos aplicados ao endocarpo do fruto da seringueira - lavagem em água quente, imersão em solução de hidróxido de cálcio e impregnação com o polímero XSBR – demonstraram potencial para aplicação em resíduos vegetais utilizados na produção de compósitos cimentícios. Em tópicos posteriores, serão apresentados os resultados da análise de adesão entre o endocarpo e a matriz cimentícia, após a aplicação destes

tratamentos. Com base nesses resultados, será mencionado o tratamento escolhido para a produção dos concretos desenvolvidos neste estudo.

3.4 FTIR

A Figura 19 apresenta os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do endocarpo do fruto da seringueira nas seguintes condições: natural, lavado em água quente, tratado com solução alcalina de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e revestido com o polímero XSBR.

Figura 19 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) do endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com solução de hidróxido de cálcio e revestido com o polímero XSBR.



Fonte: Da autora (2024).

De acordo com a Figura 19, a banda localizada em 1044 cm^{-1} , atribuída ao estiramento do grupo C-O e a vibração do grupo C-H da celulose (FERREIRA et al. 2015), apresentou redução de intensidade, após a impregnação do endocarpo com o polímero XSBR. Essa diminuição pode ser atribuída à formação de interações químicas entre os grupos funcionais do polímero, especialmente os carboxílicos, e os grupos hidroxila da celulose e hemicelulose presentes no resíduo vegetal. A ocorrência dessas ligações contribui para uma melhor adesão química entre a superfície do endocarpo e a matriz cimentícia, além de reduzir a absorção de

água do material, estabilizando a interface e minimizando interferências nas reações de hidratação do cimento.

As bandas situadas na faixa de 3400 cm^{-1} a 3400 cm^{-1} , associadas ao estiramento dos grupos hidroxilas (-OH), também apresentaram diminuição de intensidade após a impregnação com o polímero XSBR, reforçando a hipótese de interação entre os grupos funcionais do polímero e os grupos hidroxila do resíduo vegetal.

Nos endocarpos tratados com água quente e solução alcalina de hidróxido de cálcio, observou-se uma redução nas bandas em 1249 cm^{-1} e 1730 cm^{-1} , correspondentes, respectivamente, ao estiramento C-O dos grupos acetilados da hemicelulose e ao estiramento axial dos grupos carboxílicos da lignina (ABREU, 2011; GOMES et al., 2023). Essa diminuição pode ser atribuída à remoção parcial de hemicelulose e lignina, o que contribui para o aumento da rugosidade superficial do material, favorecendo sua ancoragem mecânica à matriz cimentícia.

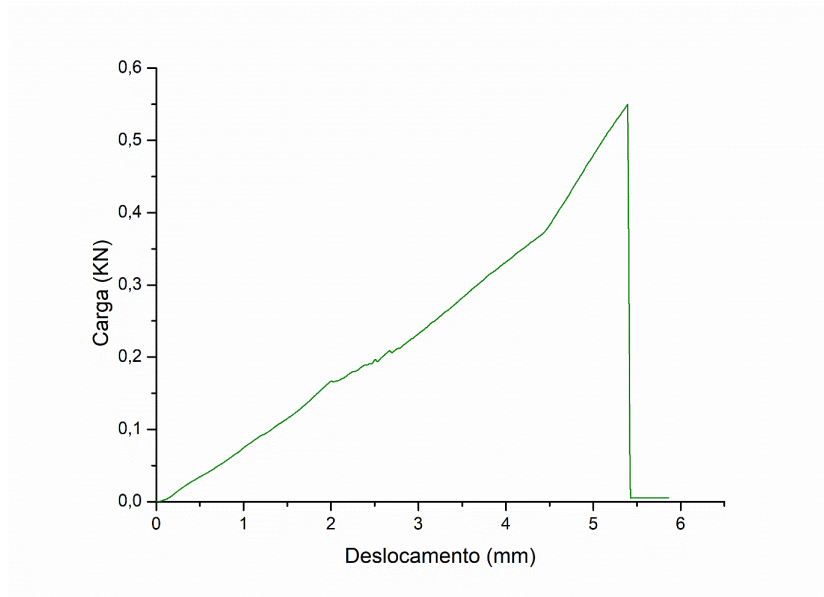
A banda observada na região de 1620 cm^{-1} , associada às ligações C=C presentes nos anéis aromáticos da lignina (ANDRADE, 2022), também apresentou redução de intensidade após a aplicação dos tratamentos, indicando uma diminuição no teor de lignina. A remoção desse componente promove uma maior exposição de grupos funcionais na superfície do endocarpo, o que favorece sua interação com a matriz cimentícia e melhora a adesão interfacial no compósito.

Dessa forma, os resultados obtidos na análise de FTIR demonstraram que os tratamentos aplicados foram eficazes em promover modificações na composição química da superfície do endocarpo. Essas alterações estão diretamente relacionadas à melhoria da adesão entre o resíduo lignocelulósico e a matriz cimentícia, seja por meio de interações químicas promovidas pela impregnação do material com o XSBR ou pelo aumento da rugosidade e da disponibilidade de grupos reativos, após os tratamentos de lavagem em água quente e imersão em solução alcalina de hidróxido de cálcio.

3.5 Compressão axial do endocarpo natural

A Figura 20 apresenta a curva típica de carga x deslocamento do endocarpo natural, após a realização do ensaio mecânico de compressão axial.

Figura 20 – Curva representativa da relação carga x deslocamento para o ensaio de compressão axial do endocarpo natural.



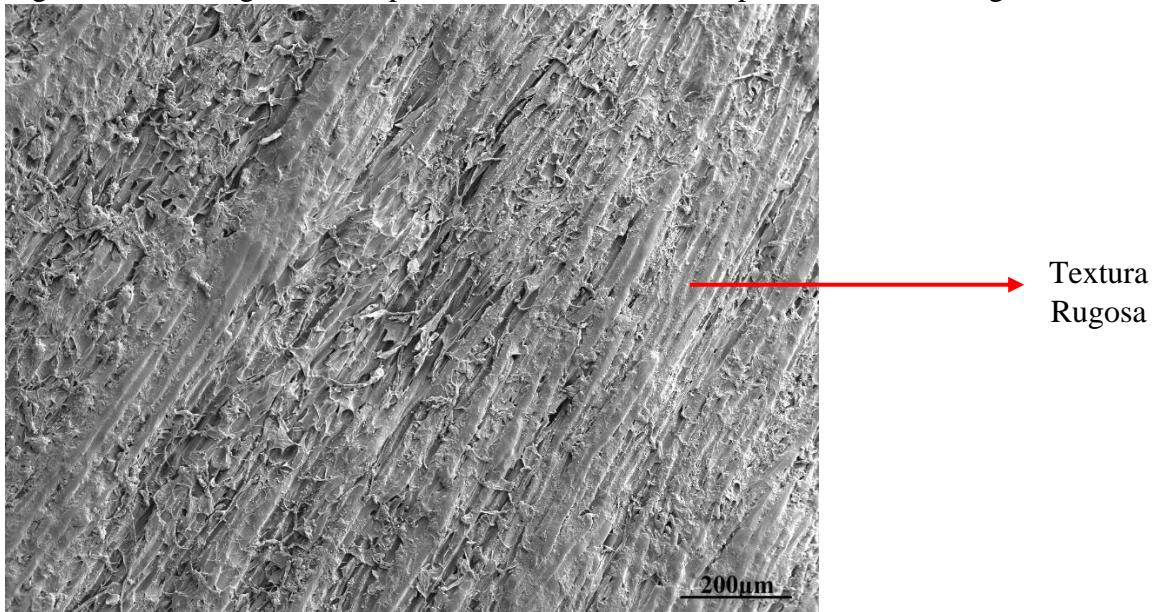
Fonte: Da autora (2024).

De acordo com o resultado apresentado, o endocarpo do fruto da seringueira apresentou um comportamento de ruptura frágil, suportando uma carga máxima de 0,550 kN. Esse valor foi inferior ao encontrado por Andrade (2022) para o endocarpo da macaúba, que atingiu uma carga máxima de 2,17 kN no ensaio de compressão. A comparação entre esses valores foi realizada apenas de forma ilustrativa, uma vez que, ambos são materiais lignocelulósicos. Porém, por se tratar de materiais com geometrias, curvaturas e espessuras distintas e sabendo que esses parâmetros influenciam diretamente na resistência do material, fica inviável afirmar que esta comparação é válida. Para uma comparação mais precisa, seria necessário, em trabalhos futuros, realizar o corte de amostras em formatos cúbicos e com dimensões padronizadas, para posterior avaliação da resistência à compressão. Ainda assim, deverá ser considerado a orientação das fibras que compõem esses materiais, já que ela também influencia nas suas propriedades mecânicas.

3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microscopia de força atômica (AFM)

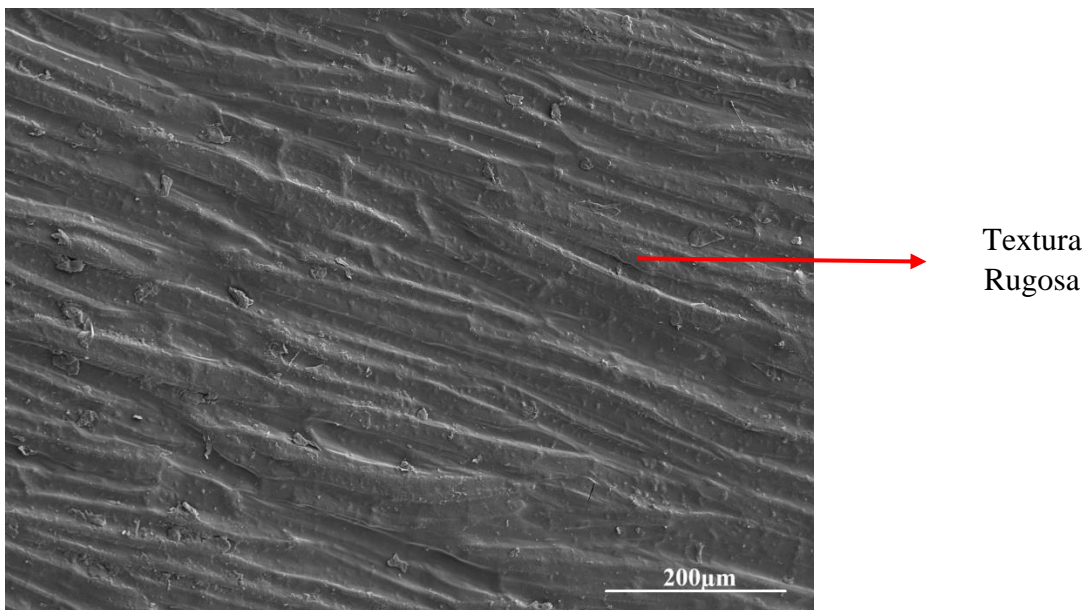
As Figuras 21, 22 e 23 apresentam as micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), referentes às faces externa, interna e lateral do endocarpo do fruto da seringueira.

Figura 21 – Micrografia da superfície externa do endocarpo do fruto da seringueira.



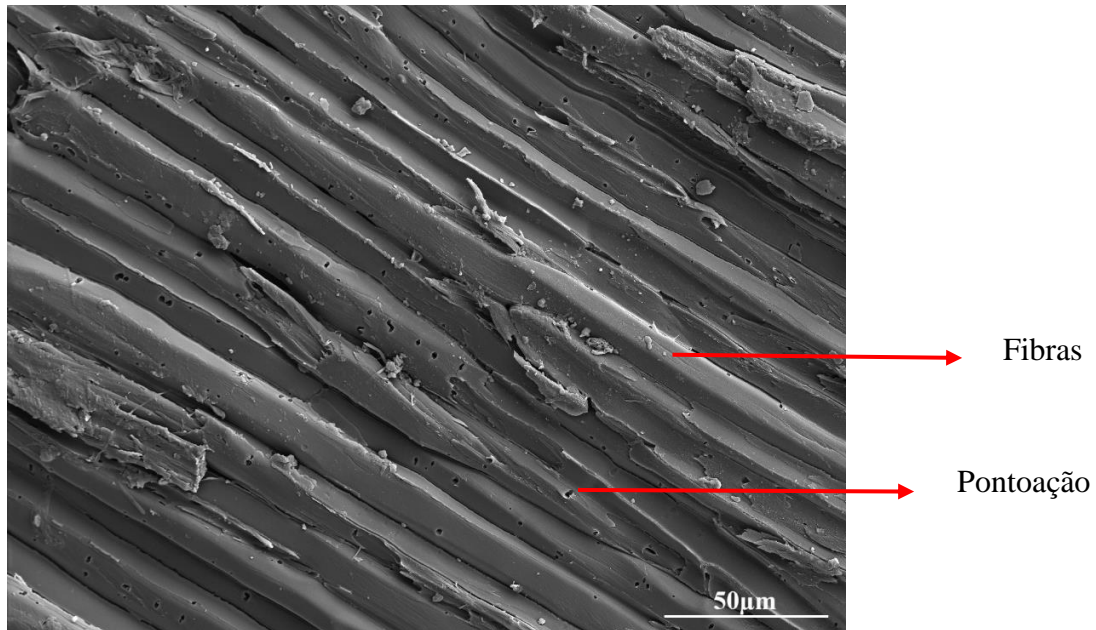
Fonte: Da autora (2024).

Figura 22 – Micrografia da superfície interna do endocarpo do fruto da seringueira.



Fonte: Da autora (2024).

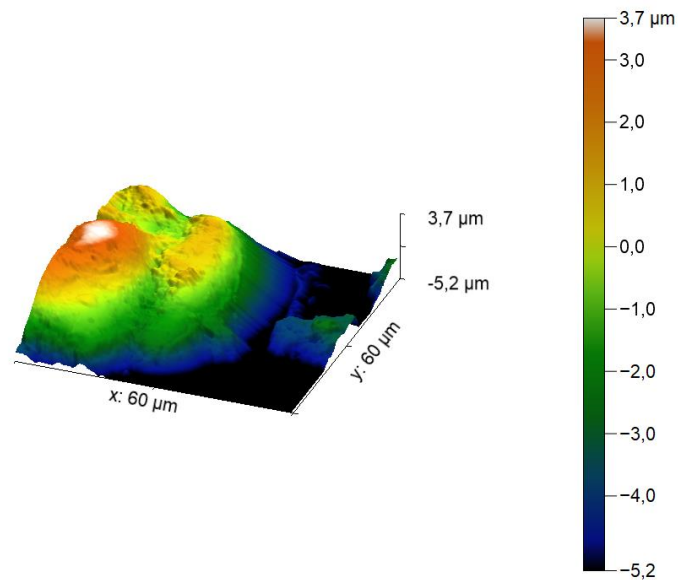
Figura 23 – Micrografia da superfície lateral do endocarpo do fruto da seringueira.



Fonte: Da autora (2024).

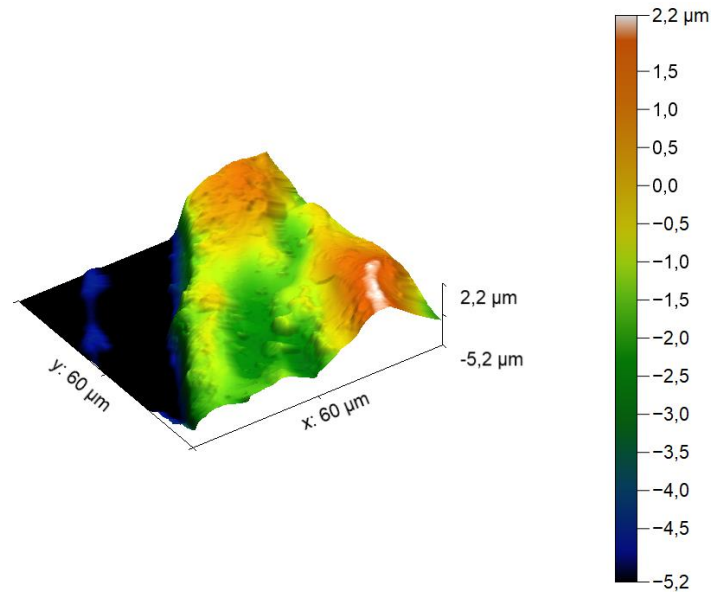
As Figuras 24 e 25 apresentam imagens em 3D das faces externa e interna do endocarpo do fruto da seringueira, obtidas por meio da microscopia de força atômica (AFM).

Figura 24 – Imagem obtida na análise de microscopia de força atômica (AFM) da superfície externa do endocarpo do fruto da seringueira.



Fonte: Da autora (2024).

Figura 25 – Imagem obtida na análise de microscopia de força atômica (AFM) da superfície interna do endocarpo do fruto da seringueira.



Fonte: Da autora (2024).

A caracterização morfológica e topográfica das superfícies do endocarpo do fruto da seringueira foi realizada por meio das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia de força atômica (AFM), permitindo uma análise multiescala da estrutura superficial do material. As micrografias obtidas por MEV revelaram que o endocarpo apresenta uma microestrutura lignocelulósica complexa, composta por um arranjo de fibras com geometrias irregulares e presença de pontoações intercelulares. Observou-se, ainda, que tanto a superfície interna, quanto a externa apresentam textura rugosa, sendo esta característica mais acentuada na face externa do material. Essa observação foi corroborada pelos resultados obtidos nas análises de AFM, que evidenciaram a presença de topografias com picos e vales pronunciados em ambas as superfícies, confirmando sua morfologia irregular. Os valores de rugosidade média obtidos foram de $42,47 \mu\text{m}$ para a face externa e $14,78 \mu\text{m}$ para a face interna, demonstrando quantitativamente a maior irregularidade da superfície externa.

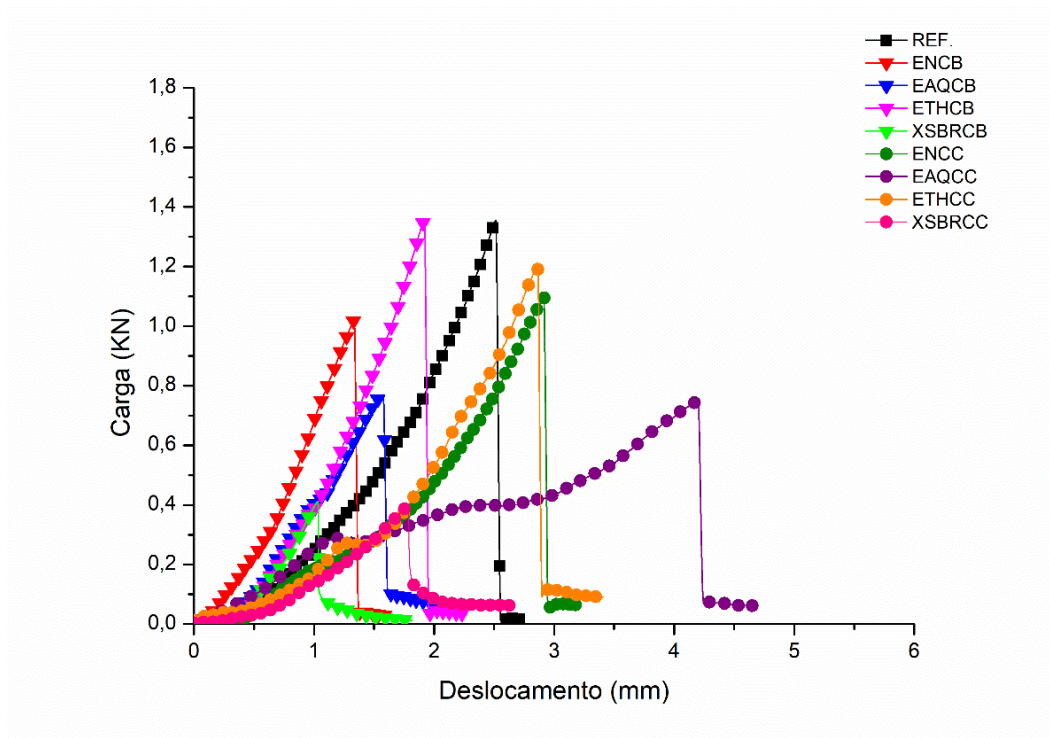
A maior rugosidade observada, na face externa, é compatível com a percepção tátil do material e exerce influência direta na aplicação do endocarpo na produção de compósitos cimentícios, uma vez que superfícies mais rugosas tendem a promover uma melhor ancoragem mecânica e, conseqüentemente, um aumento da adesão interfacial entre o elemento de reforço e a matriz (GHUMATKAR et al., 2016). Esse efeito contribui para melhorar a resistência interfacial entre os materiais e também o desempenho mecânico dos compósitos, especialmente

sob esforços de tração, nos quais a coesão entre os componentes é fundamental. Dessa forma, a combinação dos dados obtidos por MEV e AFM, possibilitou não apenas caracterizar detalhadamente a superfície do endocarpo, mas também ter uma compreensão mais aprofundada de seu potencial de interação como elemento de reforço em matrizes cimentícias.

3.7 Avaliação da adesão do endocarpo à matriz cimentícia, a partir do ensaio de tração na flexão em 3 pontos dos compósitos de argamassa

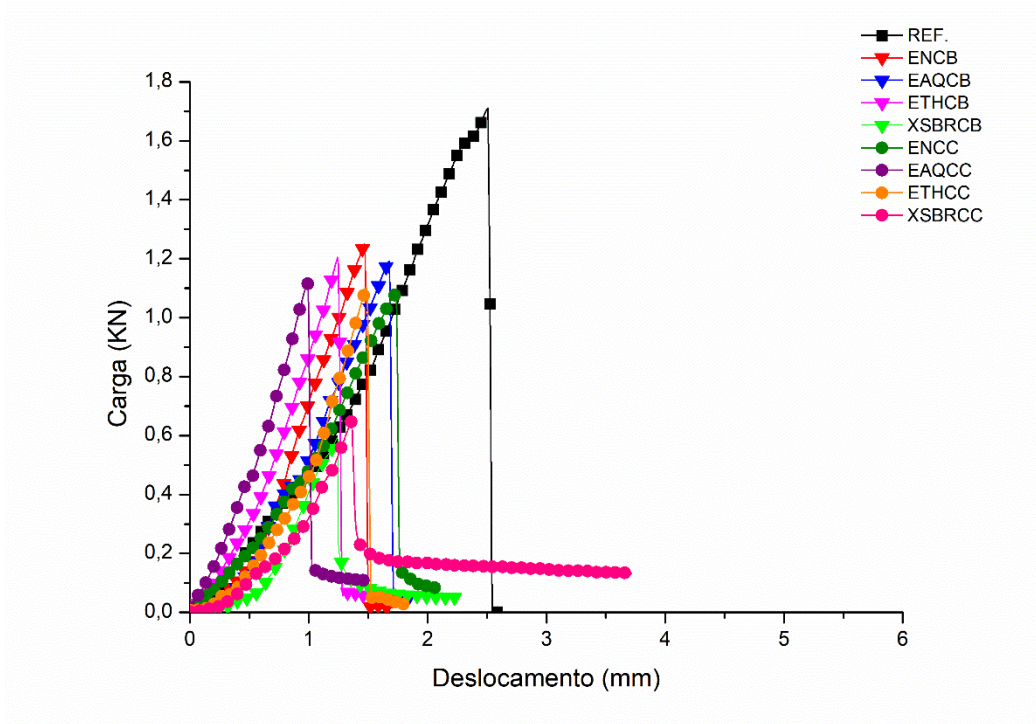
As Figuras 26, 27 e 28 apresentam as curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, realizados aos 7, 14 e 28 dias de cura, para os corpos de prova de argamassa produzidos com endocarpos naturais (ENCB e ENCC), lavados em água quente (EAQCB e EAQCC), tratados com hidróxido de cálcio (ETHCB e ETHCC) e revestidos com o polímero XSBR (XSBRCB e XSBRCC), considerando as concavidades voltadas para baixo (CB) e para cima (CC).

Figura 26 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 7 dias de cura.



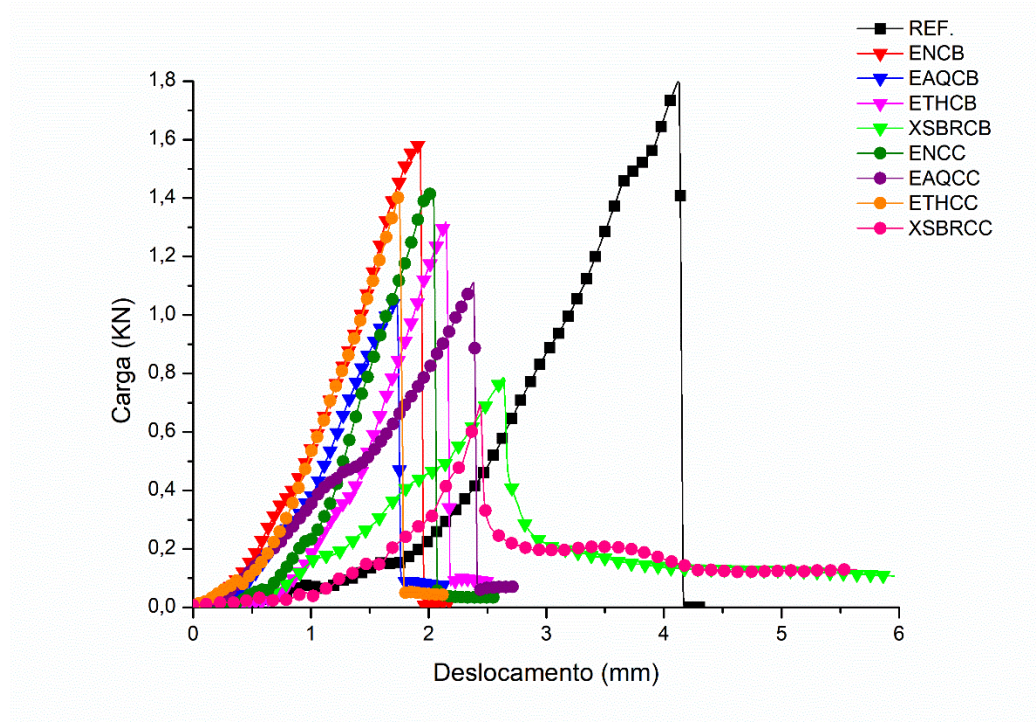
Fonte: Da autora (2025).

Figura 27 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 14 dias de cura.



Fonte: Da autora (2025).

Figura 28 – Curvas típicas de carga x deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão em 3 pontos, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos tratados e não tratados, com as concavidades voltadas para cima e para baixo, aos 28 dias de cura.

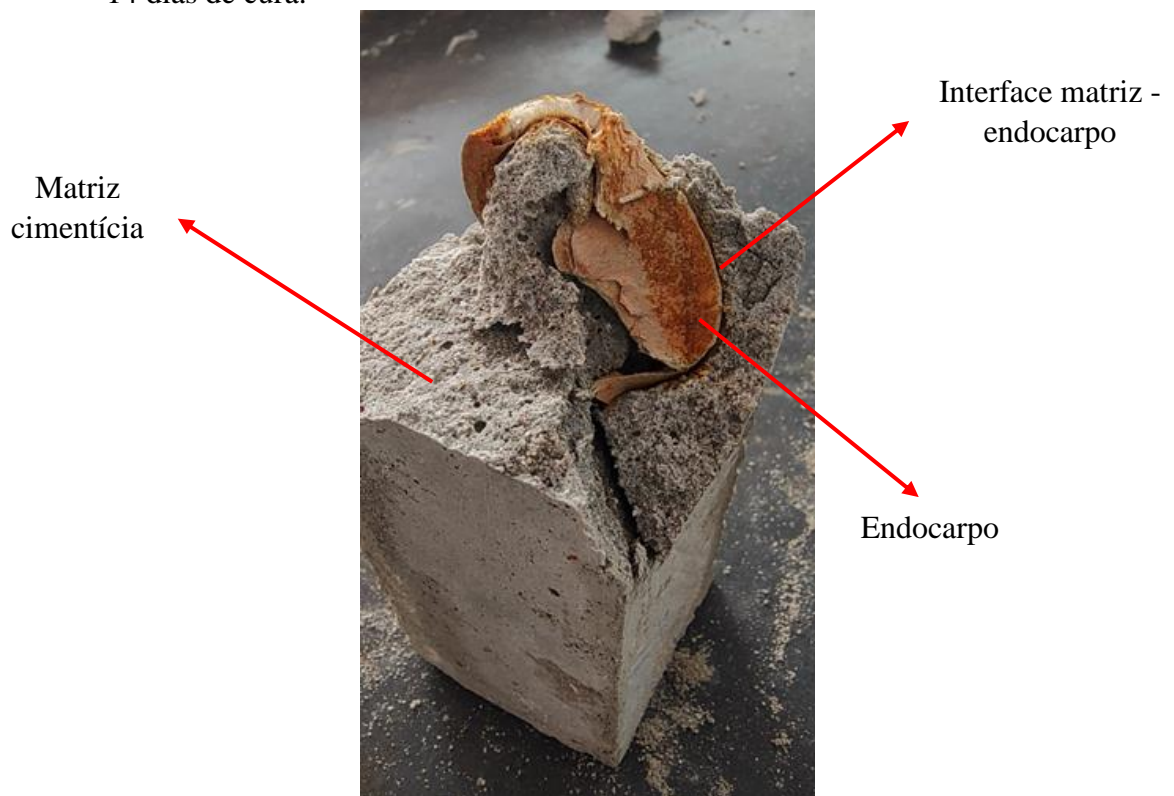


Fonte: Da autora (2025).

A análise das curvas aos 7, 14 e 28 dias mostra que todos os compósitos apresentaram um ganho progressivo de resistência ao longo do tempo. Como esperado, os compósitos ensaiados aos 28 dias exibiram os maiores valores de resistência, resultado do processo contínuo de cura durante esse período.

Em relação à adesão entre o endocarpo e a matriz cimentícia, os compósitos produzidos com endocarpos naturais, lavados em água quente e tratados com solução alcalina de hidróxido de cálcio, com as concavidades voltadas para cima (CC) e para baixo (CB), apresentaram padrões de ruptura semelhante ao do material de referência. Esses resultados indicam que, embora os tratamentos com água quente e imersão em solução alcalina tenham melhorado a compatibilidade química do endocarpo com a matriz, conforme evidenciado pelos resultados do ensaio de calorimetria, eles não foram eficientes para promover uma adesão interfacial eficaz entre esses materiais. Essa baixa adesão pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 – Interface entre a matriz cimentícia e o endocarpo, dos corpos de prova de argamassa contendo endocarpos previamente tratados com solução de hidróxido de cálcio, aos 14 dias de cura.



Fonte: Da autora (2025).

A análise da interface matriz – endocarpo no compósito cimentício (Figura 29), evidenciou a baixa adesão entre os materiais. Após o rompimento da matriz, foi possível

observar uma fina camada de pó sobre a superfície do endocarpo, possivelmente resultante de uma hidratação insuficiente do cimento na interface matriz-endocarpo. Essa baixa hidratação, pode ser atribuída à elevada capacidade de absorção de água do endocarpo (74%), que pode ter reduzido a quantidade de água disponível para a hidratação do cimento nessa região. Além disso, as variações volumétricas do material, decorrentes do ganho e da perda de água, podem ter comprometido ainda mais a adesão entre o endocarpo e a matriz.

Ferreira et al. (2015) ao estudarem o efeito dos tratamentos nas propriedades das fibras de sisal e na ligação dessas fibras com matrizes cimentícias, relataram que a elevada capacidade de absorção de água pelas fibras de sisal provoca o aumento do seu volume quando as fibras são adicionadas à matriz cimentícia fresca e a contração quando a matriz seca, resultando em uma diminuição parcial da ligação fibra-matriz.

Por outro lado, os compósitos produzidos com endocarpos revestidos com o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR), apresentaram um desempenho superior nas curvas de carga x deslocamento, destacando o potencial do endocarpo como elemento de reforço na matriz cimentícia. Entre todos os tratamentos avaliados, a impregnação com XSBR, foi a mais eficaz em melhorar a adesão entre o endocarpo a matriz, promovendo uma transferência mais eficiente das tensões interfaciais e resultando no melhor desempenho mecânico dos compósitos, principalmente quando submetidos a esforços de tração na flexão. Vale destacar que esse ensaio não se tratou de uma flexão convencional, mas sim com o intuito de avaliar a adesão do endocarpo à matriz cimentícia.

De acordo com a literatura, o polímero estireno-butadieno carboxilado (XSBR) tem demonstrado resultados promissores, devido à sua compatibilidade tanto com a matriz cimentícia quanto com resíduos vegetais. Sua eficiência pode estar relacionada a capacidade de reduzir a absorção de água dos resíduos vegetais e de melhorar sua interação química com a matriz cimentícia, devido à presença de grupos carboxila em sua composição (FERREIRA et al., 2015; FERREIRA et al., 2020; GUIMARÃES et al., 2024).

Ferreira et al., (2015) descreveram o mecanismo de atuação do XSBR. Segundo os autores, durante o processo de modificação superficial, a celulose presente no resíduo vegetal reage com o grupo carboxílico do polímero, formando uma ligação do tipo covalente. Outra parte do polímero interage com os íons cálcio presentes no cimento hidratado, estabelecendo uma ligação entre o polímero e a matriz cimentícia. Dessa forma, o XSBR atua como uma “ponte” entre a superfície do endocarpo e a matriz cimentícia, promovendo uma melhoria na adesão interfacial entre esses materiais. Diante dos resultados obtidos, a impregnação dos

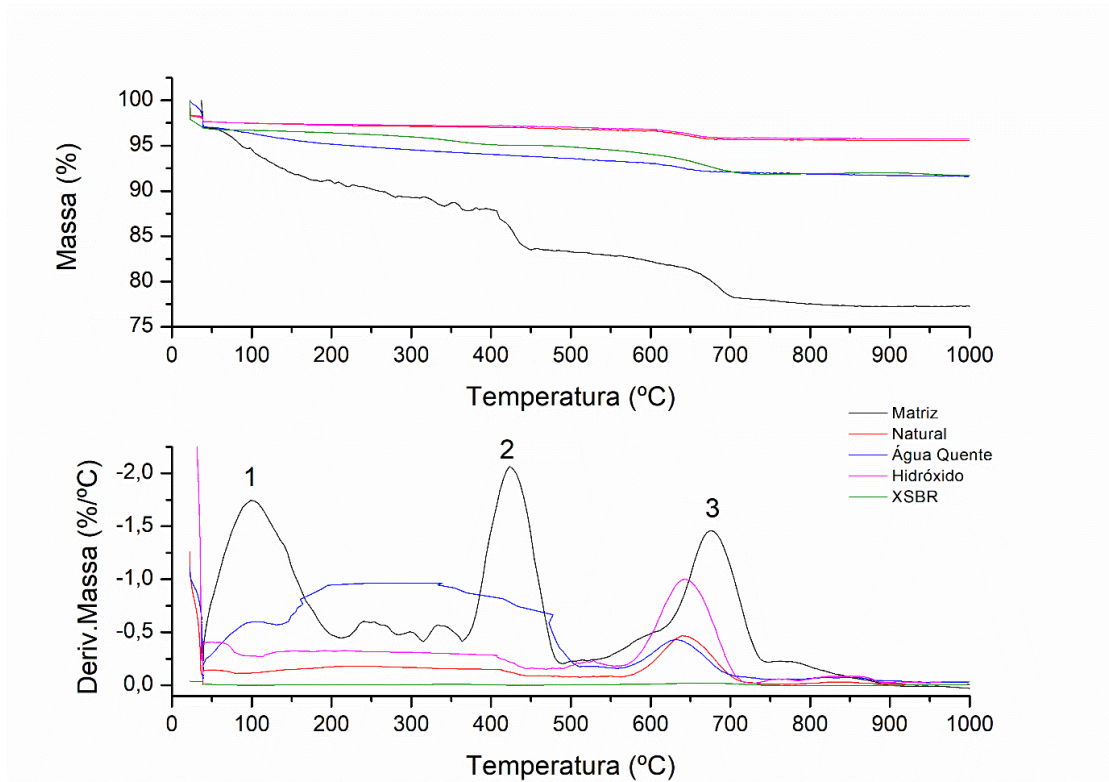
endocarpos com XSBR foi o tratamento escolhido, para a produção do concreto desenvolvido neste trabalho.

3.8 Termogravimetria

Amostras da matriz cimentícia e das interfaces entre o endocarpo e a matriz nos compósitos de argamassa foram avaliadas por meio da análise de termogravimetria (TG). A Figura 30 apresenta as curvas de TG e DTG da matriz cimentícia (referência) e das interfaces com o endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com hidróxido de cálcio e revestido com o polímero XSBR. A Figura 31 mostra a curva DTG da interface entre o endocarpo revestido com XSBR e a matriz cimentícia, em maior escala, para melhor visualização dos picos.

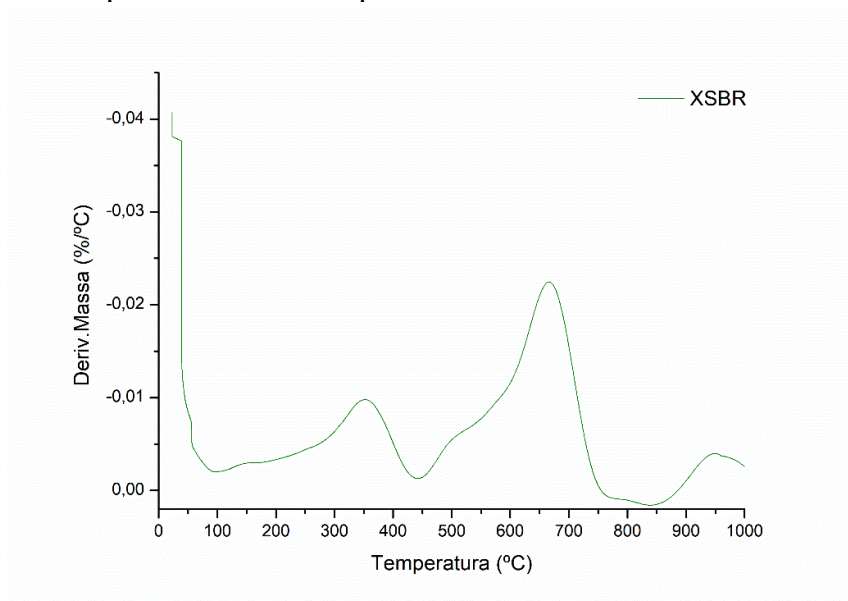
A análise termogravimétrica foi realizada expondo as amostras a uma variação de temperatura previamente estabelecida. Durante o aquecimento, compostos voláteis foram liberados e a degradação da amostra pôde ser observada por meio da redução da sua massa, indicando, por exemplo, a evaporação da água livre e a decomposição de determinados compostos. Ao derivar a curva de TG, essa perda de massa foi convertida em um pico característico, de fácil interpretação (FERREIRA et al., 2021).

Figura 30 – Curvas obtidas no ensaio de termogravimetria (TG) e derivadas termogravimétricas (DTG) da matriz cimentícia e das interfaces entre matriz cimentícia e endocarpo natural, lavado em água quente, tratado com solução de hidróxido de cálcio e revestidos com o polímero XSBR.



Fonte: Da autora (2024).

Figura 31 – Curva de deriva termogravimétrica (DTG) da interface entre a matriz cimentícia e o endocarpo revestido com o polímero XSBR.



Fonte: Da autora (2024).

Analisando as curvas de TG e DTG da matriz cimentícia, foram identificados três picos principais de perda de massa, os quais representam de forma característica os eventos associados ao processo de hidratação do cimento. O pico 1, localizado entre 50°C e 200°C, está relacionado à presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita. O pico 2, observado entre 400 e 480°C, corresponde à decomposição do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 . Já o pico 3, entre 600 e 730°C, é atribuído à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) (PETKOVA et al. 2012; MENEZES et al. 2020; FERREIRA et al., 2021).

Ao se analisar as curvas correspondentes às interfaces entre a matriz cimentícia e os endocarpos (naturais, lavados em água quente e tratados com solução de hidróxido de cálcio), observou-se a ausência dos picos 1 e 2, indicando que, nessas regiões, a hidratação da matriz não foi satisfatória. Essa ausência sugere que a formação de compostos hidratados, como C-S-H, etringita e Ca(OH)_2 , foi limitada nessas interfaces.

O pico presente na faixa de 600 a 730°C, identificado nessas mesmas interfaces, pode ser atribuído ao carbonato de cálcio, conforme já mencionado. No entanto, dada a deficiência de hidratação, a presença desse pico pode estar associada à carbonatação da matriz, ou seja, à reação entre o dióxido de carbono (CO_2) do ambiente e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) residual, levando à formação de (CaCO_3).

Na análise da DTG da interface entre a matriz cimentícia e o endocarpo revestido com o polímero XSBR, foi possível identificar um pico entre 300°C e 450°C, atribuído à degradação térmica do revestimento polimérico presente na interface matriz-endocarpo (FERREIRA et al. 2015).

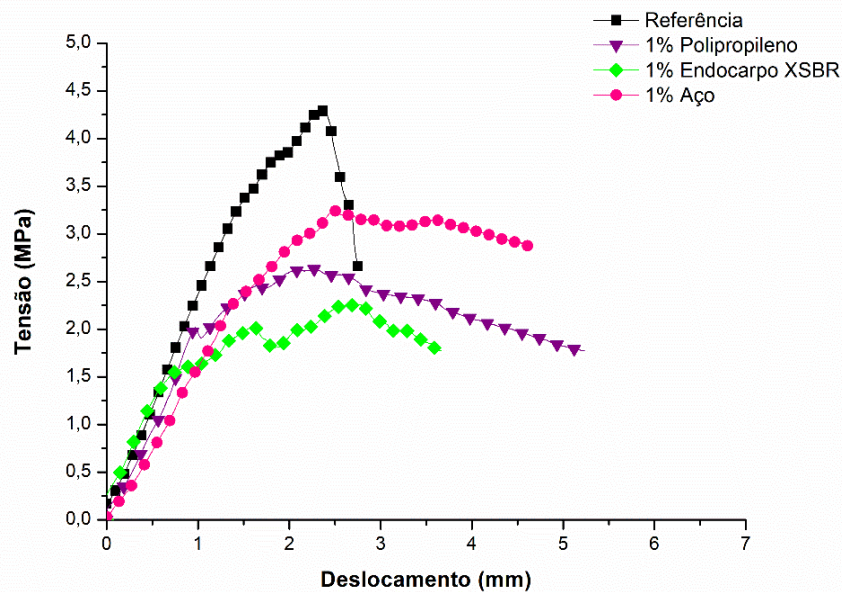
Ao se comparar os resultados dessa análise com os dados obtidos no ensaio de calorimetria, observa-se uma situação contraditória. A calorimetria indicou que os tratamentos avaliados melhoraram a hidratação do cimento, em relação ao uso dos endocarpos não tratados. No entanto, os dados da termogravimetria sugerem que essa melhora não se estendeu às regiões de interface. Essa aparente contradição pode ser atribuída à interferência do endocarpo, que parece afetar a hidratação apenas da zona de contato com a matriz, sem comprometer a hidratação da matriz como um todo.

3.9 Compressão do concreto aos 28 dias

A Figura 32 apresenta as curvas típicas de tensão x deslocamento, obtidas nos ensaios de compressão axial, realizados aos 28 dias de cura, para o concreto de referência e para os

concretos produzidos com 1% de incorporação de endocarpos revestidos com XSBR, 1% de macrofibras de polipropileno e 1% de fibras de aço.

Figura 32 – Curvas típicas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referênci e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.



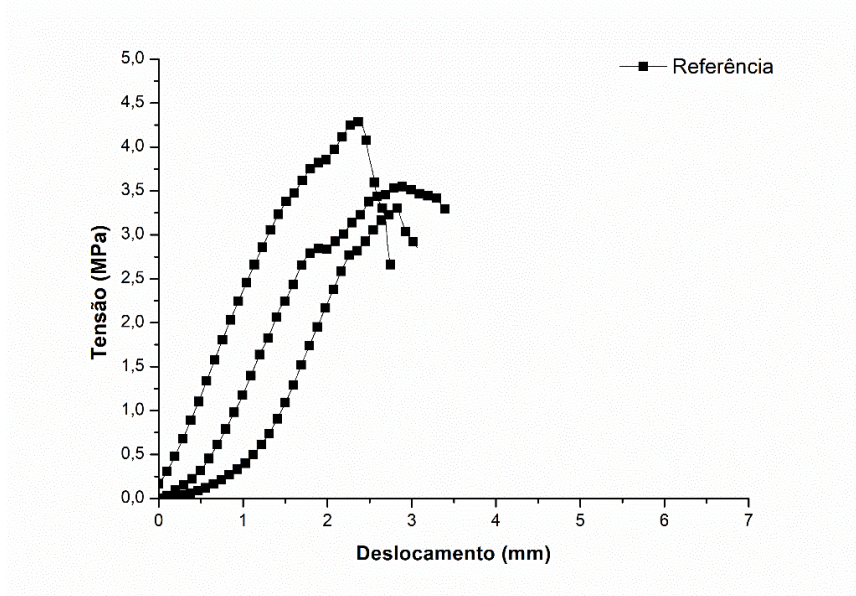
Fonte: Da autora (2025).

Analisando as curvas típicas de tensão versus deslocamento apresentadas na Figura 32, observou-se que todos os concretos apresentaram um comportamento elástico linear inicial, seguido por uma fase de não linearidade. O concreto de referência, sem adição de elementos de reforço, apresentou um padrão de ruptura frágil, caracterizado pela perda súbita de resistência após atingir a tensão máxima. Esse comportamento é típico de materiais frágeis, com baixa capacidade de redistribuição de tensões e absorção de energia após a fissuração.

Por outro lado, os concretos reforçados com fibras de aço, macrofibras de polipropileno e endocarpos revestidos com XSBR apresentaram um comportamento diferenciado. Após atingirem a resistência máxima, continuaram a se deformar, evidenciando a atuação dos elementos de reforço no controle da formação e propagação de fissuras. Esse comportamento pós-fissuração, indica que a incorporação de fibras e endocarpos ao concreto, contribuiu para melhorar sua resposta mecânica no estágio pós fissuração da matriz cimentícia, além de melhorar suas propriedades de ductilidade (capacidade de se deformar antes de romper) e tenacidade (capacidade de absorver energia), quando comparados ao concreto convencional (sem adição de elemento de reforço).

As Figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam as curvas de tensão x deslocamento, obtidas no ensaio de compressão axial, aos 28 dias de cura, para cada concreto avaliado.

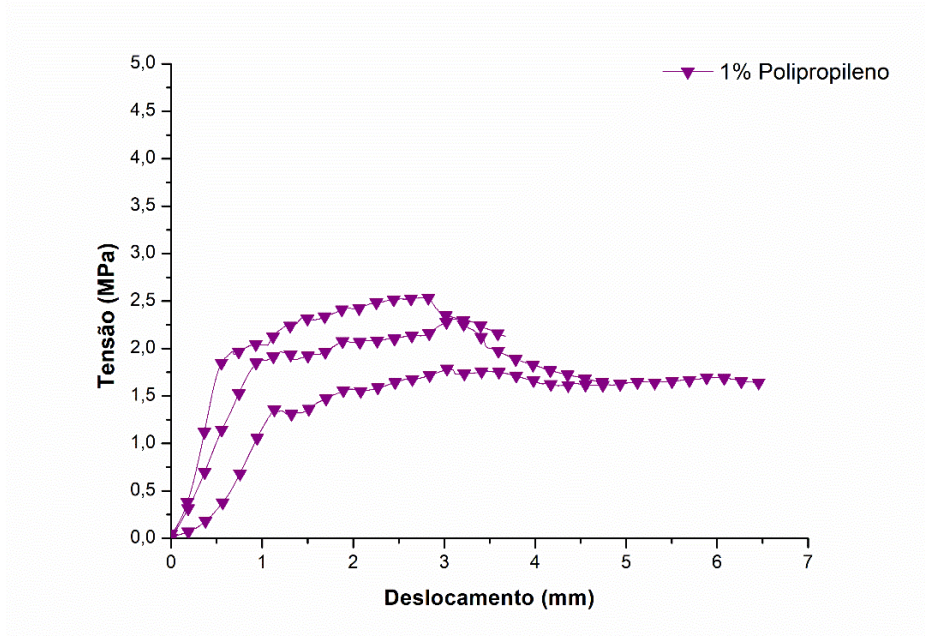
Figura 33 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referência.



Fonte: Da autora (2025).

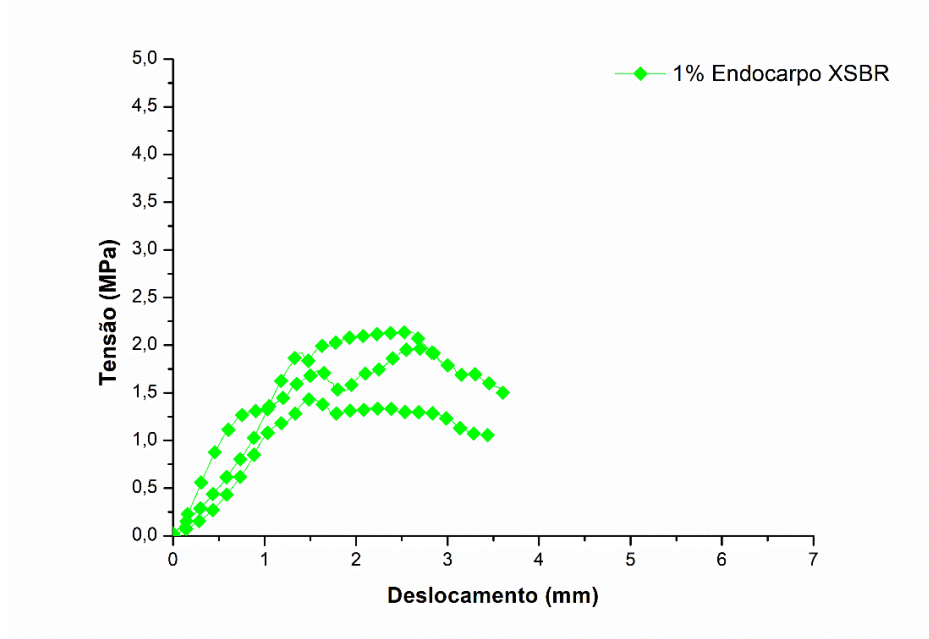
As curvas de tensão versus deslocamento do concreto de referência demonstram seu comportamento frágil após atingir a resistência máxima.

Figura 34 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de macrofibras de polipropileno.



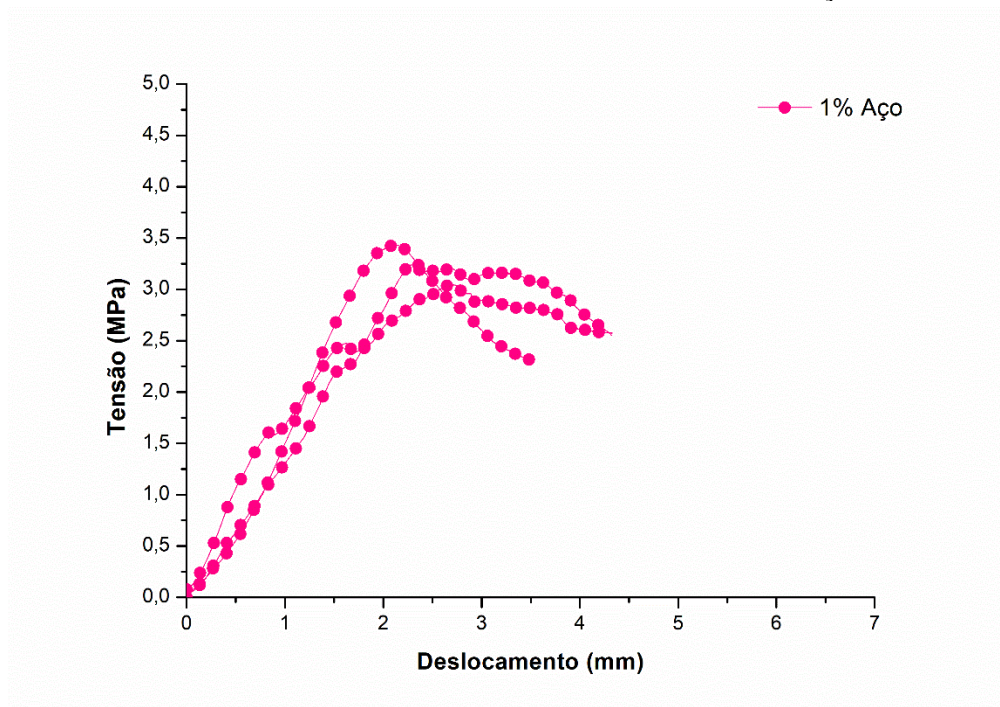
Fonte: Da autora (2025).

Figura 35 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR.



Fonte: Da autora (2025).

Figura 36 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de fibras de aço.



Fonte: Da autora (2025).

Avaliando as curvas de tensão versus deslocamento dos concretos com incorporação de macrofibras de polipropileno (Figura 34), endocarpos revestidos com XSBR (Figura 35) e fibras de aço (Figura 36), percebe-se que, em sua maioria, eles apresentaram um

comportamento pós-pico caracterizado pelo ganho de resistência e pelo aumento da capacidade de deformação, quando comparados à referência, evidenciando os benefícios da incorporação de elemento de reforço na matriz cimentícia. Andreola (2017), observou um comportamento pós-pico, com redução gradual da tensão e aumento da capacidade de deformação, em bioconcretos produzidos com partículas de bambu.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 9, observou-se uma redução na resistência à compressão dos concretos após a adição de endocarpos e fibras. O concreto com incorporação de endocarpos foi o que apresentou a maior diminuição de resistência, atingindo aproximadamente 54% de redução em comparação ao concreto de referência. Para o concreto contendo macrofibras de polipropileno, a redução foi de cerca de 38%.

Tabela 9 – Resistência média à compressão axial, aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.

Tratamento	Resistência média à compressão aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Referência	3,70	0,51
1% Polipropileno	2,29	0,38
1% Endocarpos	1,71	0,40
1% Aço	3,23	0,15

Da autora (2025).

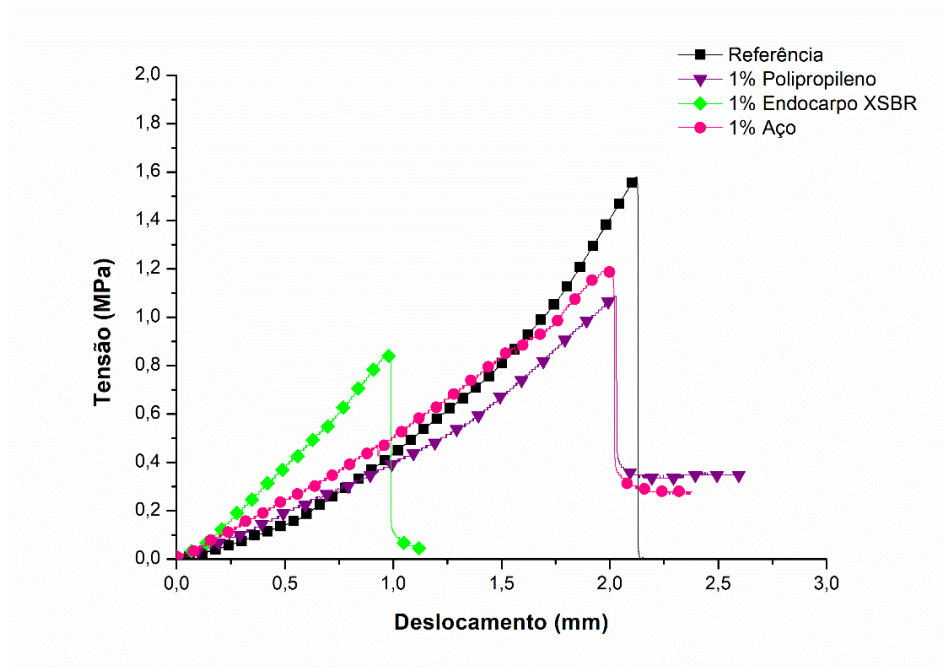
De acordo com a literatura, a redução da resistência do concreto após a adição de resíduos vegetais ou fibras sintéticas pode estar relacionada a diversos fatores, entre eles: a distribuição não homogênea das fibras na matriz, o aumento da porosidade, a baixa adesão entre as fibras e a matriz, além da redução na proporção de pasta de cimento em relação à quantidade de agregados. Borges et al. (2019) observaram um efeito semelhante ao produzir concretos com incorporação de fibras de polipropileno, sisal e rami. No estudo desenvolvido por estes autores, foi observada uma redução de aproximadamente 24,7% na resistência à compressão do concreto produzido com 0,5% de fibras de rami.

Apesar da diminuição de resistência observada, os resultados obtidos neste ensaio evidenciaram o potencial do uso desses materiais na melhoria do comportamento pós-fissuração da matriz cimentícia.

3.10 Ensaio de resistência à tração na flexão (3 pontos) do concreto, aos 28 dias

A Figura 37, apresenta as curvas típicas de tensão x deslocamento, referentes aos ensaios de tração na flexão (3 pontos), aos 28 dias de cura, para os concretos de referência e também para os concretos produzidos com 1% de incorporação de endocarpos revestidos com XSBR, 1% de macrofibras de polipropileno e 1% de fibras de aço.

Figura 37 – Curvas típicas de tensão x deformação obtidas no ensaio de tração na flexão (3 pontos), aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos produzidos com 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.



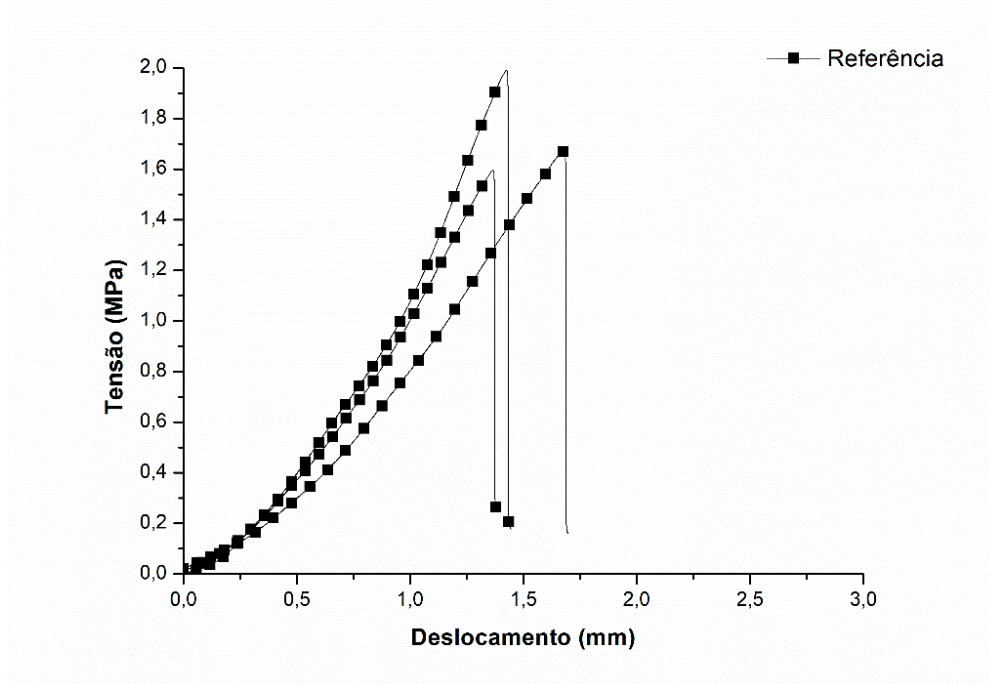
Fonte: Da autora (2025).

Analisando as curvas típicas de tensão versus deslocamento apresentadas na Figura 37, observou-se que, quando a carga é aplicada, os concretos apresentam um comportamento inicial linear e elástico. À medida que a carga aumenta, microfissuras começam a se formar na matriz cimentícia devido aos esforços de tração e flexão. No concreto de referência, as microfissuras se propagam mais rapidamente devido à ausência de elementos de reforço. Ao atingir sua resistência máxima, essas microfissuras se expandem, formando microfissuras que comprometem sua capacidade de suporte. Após a formação de microfissuras a resistência do concreto diminui substancialmente, culminado em sua ruptura. Portanto, quando submetido a esforços de tração e flexão, o concreto de referência exibiu um comportamento frágil, rompendo de forma abrupta.

Já nos concretos com elementos de reforço, assim que surgem as microfissuras, as fibras passam a atuar, limitando sua propagação. Após o concreto atingir sua resistência máxima, as microfissuras se expandem, formando microfissuras. Nesse estágio, a resistência começa a diminuir, mas, devido à presença das fibras, o concreto passa a se deformar de forma progressiva. Isso resulta em um comportamento mais dúctil e tenaz em comparação ao concreto sem fibras. Quando a propagação das microfissuras se intensifica, o concreto atinge sua ruptura. Contudo, diferentemente do concreto de referência, essa ruptura ocorre de forma mais gradual e controlada.

As Figuras 38, 39, 40 e 41 apresentam as curvas de tensão versus deslocamento obtidas nos ensaios de tração na flexão (3 pontos), realizados aos 28 dias de cura, para cada concreto avaliado.

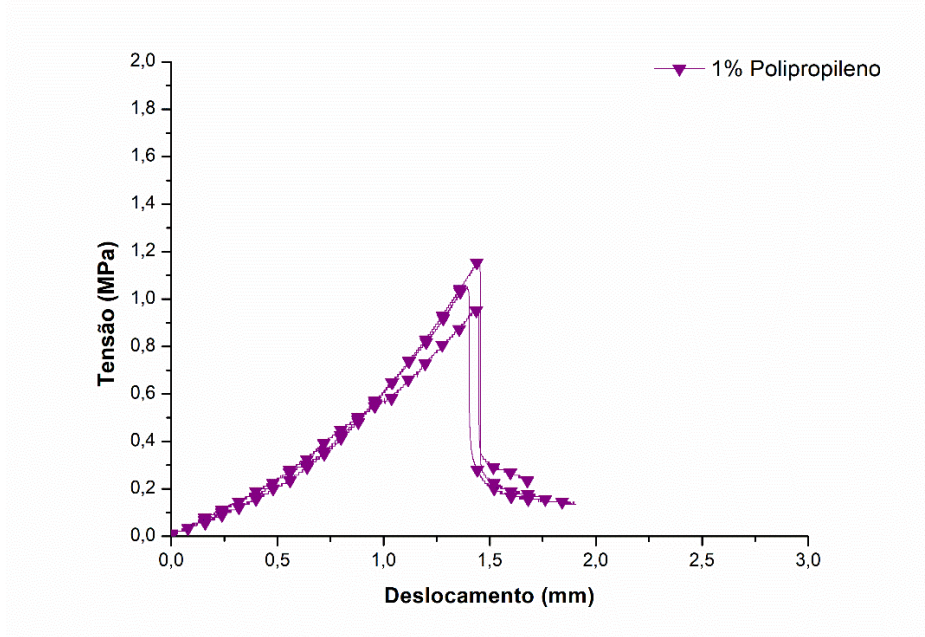
Figura 38 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto referência.



Fonte: Da autora (2025).

As curvas de tensão versus deslocamento do concreto de referência mostram sua ruptura abrupta após atingir a resistência máxima.

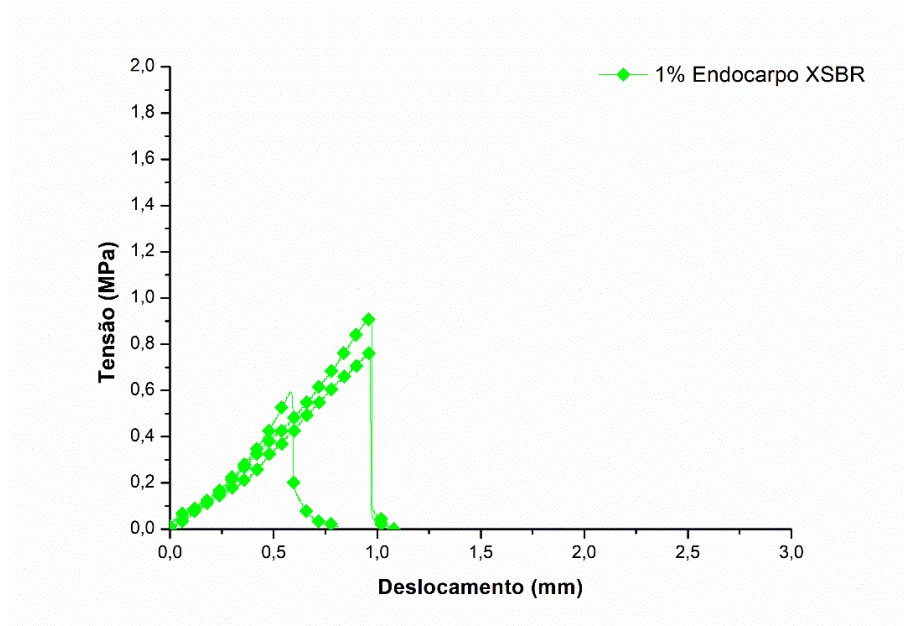
Figura 39– Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de macrofibras de polipropileno.



Fonte: Da autora (2025).

As curvas de tensão versus deslocamento do concreto com incorporação de 1% de macrofibras de polipropileno evidenciam, de forma clara, a atuação desse material como elemento de reforço na matriz cimentícia.

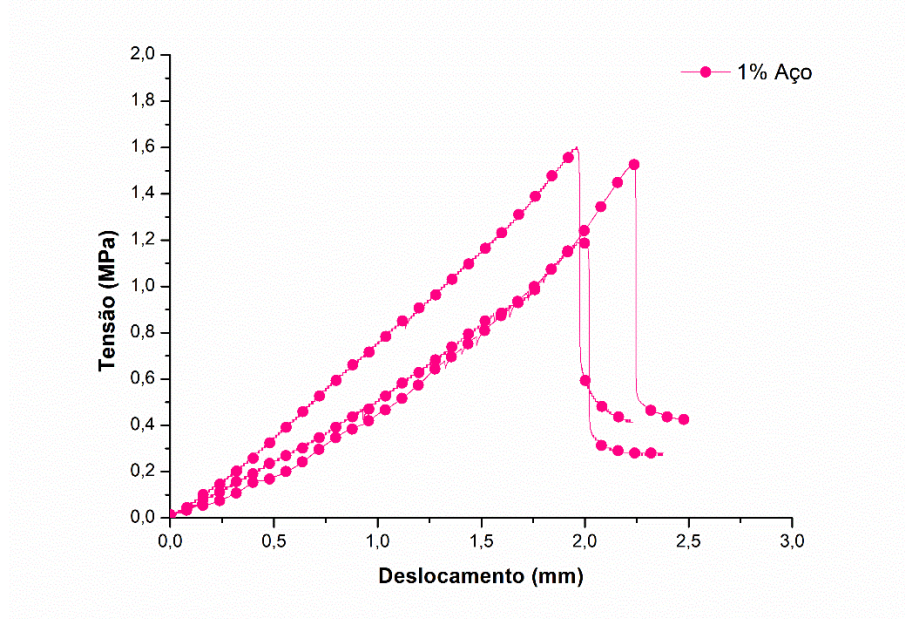
Figura 40 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de endocarpos revestidos com o polímero XSBR.



Fonte: Da autora (2025).

As curvas de tensão versus deslocamento do concreto com endocarpos revestidos com XSBR, embora de forma menos expressiva, também indicaram sua atuação como elemento de reforço na matriz cimentícia. Neste estudo, avaliou-se a incorporação de 1% de endocarpos, porém acredita-se que, com o aumento desse teor para 2%, esse comportamento se tornaria mais evidente. Essa hipótese é corroborada pelos resultados do ensaio de adesão, os quais evidenciaram o potencial dos endocarpos como elemento de reforço na matriz cimentícia.

Figura 41 – Curvas de tensão x deslocamento obtidas no ensaio mecânico de tração na flexão, aos 28 dias de cura, do concreto contendo 1% de fibras de aço.



Fonte: Da autora (2025).

As curvas de tensão versus deslocamento do concreto com incorporação de 1% de fibras de aço evidenciaram, de forma clara, sua eficácia como elemento de reforço na matriz cimentícia.

Assim como observado para o ensaio de compressão, também houve redução da resistência do concreto à tração na flexão (3 pontos) após a incorporação dos elementos de reforço. Essa diminuição foi mais evidente após a incorporação de macrofibras de polipropileno e endocarpos, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistência média à tração na flexão (3 pontos), aos 28 dias de cura, do concreto referência e dos concretos contendo 1% de endocarpos revestidos com XSBR, macrofibras de polipropileno e fibras de aço.

Tratamento	Resistência média à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Referência	1,73	0,20
1% Polipropileno	1,05	0,08
1% Endocarpos	0,78	0,13
1% Aço	1,45	0,23

Fonte: Da autora (2025).

A baixa resistência mecânica observada nos concretos, tanto à tração na flexão quanto à compressão, pode estar relacionada a um possível problema no lote do cimento utilizado neste estudo. Essa hipótese se fundamenta no fato de que a produção dos concretos seguiu rigorosamente todos os parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas.

Além de seu potencial como elemento de reforço, o endocarpo do fruto da seringueira, também pode apresentar potencial para uso como bioagregado na produção no bioconcretos. Essa aplicação é possível mesmo em baixos teores, considerando que a literatura não estabelece um limite mínimo específico para a incorporação de resíduos lignocelulósicos como bioagregados.

4 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o potencial de utilização do endocarpo do fruto da seringueira como elemento de reforço em compósitos cimentícios. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- O endocarpo do fruto da seringueira apresentou uma baixa concentração de extrativos (5,72%), característica favorável à sua aplicação em compósitos cimentícios;
- A elevada capacidade de absorção de água do endocarpo (74%) comprometeu sua adesão à matriz cimentícia;
- Os tratamentos de lavagem em água quente, imersão em solução alcalina de hidróxido de cálcio e impregnação com o polímero XSBR foram eficazes em melhorar a hidratação da matriz cimentícia, em comparação ao uso do endocarpo natural;
- A impregnação com o polímero XSBR foi o tratamento mais eficiente na melhoria da adesão do endocarpo à matriz cimentícia, se comparado aos demais métodos avaliados;
- A rugosidade superficial e a geometria complexa do endocarpo, com curvatura semelhante à helicoidal, favoreceram sua ancoragem à matriz cimentícia;
- Os concretos produzidos com endocarpos revestidos com XSBR, fibras de aço e macrofibras de polipropileno apresentaram um comportamento pós-fissuração com aumento de deformação, evidenciando a atuação desses materiais como elementos de reforço na matriz cimentícia.

Dessa forma, conclui-se que o endocarpo do fruto da seringueira apresentou potencial para ser aplicado como elemento de reforço em matrizes cimentícias. Acredita-se que a incorporação de teores superiores a 1% possa evidenciar de forma mais expressiva esse comportamento. Além disso, os endocarpos também podem apresentar potencial para uso como bioagregados na produção de bioconcretos, uma vez que até o momento, não foi estabelecido na literatura um limite mínimo para incorporação de resíduos lignocelulósicos com essa finalidade.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). A autora agradece às empresas ConCresolos e Belgo Arames, pela doação das macrofibras de polipropileno e das fibras de aço. Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais, ao Laboratório de Estruturas, ao Laboratório de Química e ao Laboratório de Microscopia, da Universidade Federal de Lavras, pelo auxílio na realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. L. de. Modificação química de resíduos lignocelulósicos para a preparação de compósito. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Departamento de Agroquímica. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 111, 2011.
- ANDRADE, G. M. de. Utilização do endocarpo da macaúba como agregado graúdo alternativo para a produção de bioconcreto. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 63, 2022.
- ANDRADE, G. M. de; ANDRADE, R. G. M. de; ARAUJO, O. M. O. de; LOPES, R. T.; GUIMARAES, T. C.; FERREIRA, S. R. Macauba (*Acrocomia aculeata*) endocarpo as a coarse aggregate for bio-concretes. **Construction and Building Materials**, v. 451, p. 138667, 2024.
- ANDREOLA, V. M. Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro – RJ, p. 118, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006: Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853: Madeira – Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido**. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C**. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **D2395-17: Standard Test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials**. In: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- BARBOZA, M. R., BASTOS, P. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v.36, p.32-36. 2008.

BERALDO, A. Compuesto biomassa vegetal cemento. **Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción**. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2011.

BORGES, A. P. S. N.; MOTTA, L. A. de C.; PINTO, E. B. Estudos das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais. **Revista Matéria**, v. 24, n. 2, 2019.

DA GLORIA, M. Y. R.; FILHO, R. D. T. Innovative sandwich panels made of wood bio-concrete and sisal fiber reinforced cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

DIAS, L. de S.; BESERRA, A. V. S.; SANTOS, R. A. dos; SOUSA, A. A. de; NETO, A. B. de L.; LANDIM, A. E. de F. G.; BARROZO, G. F.; SILVA, C. J. V. Incorporação de resíduos da produção de fibras de sisal em argamassa: Efeitos nas propriedades físicas e mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 03, 2021.

DIAS, M. C.; ZIDANES, U. L.; MASCARENHAS, A. R. P.; SETTER, C.; SCATOLINO, M. V.; MARTINS, M. A.; MORI, F. A.; BELGACEM, M. N.; TONOLI, G. H. D.; FERREIRA, S. R. Mandacaru cactus as a source of nanofibrillated cellulose for nanopaper production. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 235, p. 123850, 2023.

EUGENIO, T. M. C.; HENRIQUES, A. B.; MENDES, R. F. Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers. **Construction and Building Materials**, v. 411, p. 134667, 2024.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. de A.; LIMA, P. R. L.; FILHO, R. D. T. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730 – 740, 2015.

FERREIRA, S. R. et al. Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. **Composites Part B: Engineering**, v. 140, p. 183 – 196, 2018.

FERREIRA, S. R.; NETO, A. R. S.; SILVA, F. de A.; SOUZA JUNIOR, F. G. de; TOLEDO FILHO, R. D. The influence of carboxylated styrene butadiene rubber coating on the mechanical performance of vegetable fibers and on their interface with a cement matrix. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120770, 2020.

FERREIRA, S. R.; SILVA, L. E.; MCCAFFREY, Z.; BALLSCHMIEDE, C.; KOENDERS, E. Effect of elevated temperature on sisal fibers degradation and its interface to cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 272, 2021.

FERREIRA, S. R.; ANDRADE, R. G. de; ANDRADE, G. M. de; ARAÚJO, O. M. O. de; LOPES, R. T.; FAIRBAIRN, E. de M. R.; GRABOIS, T. M.; UCRANIANO, N. Bond behavior of a bio-aggregate embedded in cement-based matrix. *Materials*, v. 15, n. 17, p. 6151, 2022.

FIORELLI, J. *et al* Painéis multicamadas produzidos com resíduos agroindustriais e fibras vegetais da Amazônia. *Waste and Biomass Valorization*, v. 9, n. 7, p. 1151-1161, 2018.

FLORES-JOHNSON, E. A. et al. Microstructure and mechanical properties of hard *Acrocomia mexicana* fruit shell. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

FURTINI, A. C. C.; SANTOS, C. A. dos; MIRANDA, E. H. de N.; VILLARRUEL, D. C. V.; GOMES, D. A. C.; FERREIRA, G. C.; SILVA, M. G. da; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Using miriti petiole to produce particleboards. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 2, p. 149 – 162, 2023.

GARCÍA, G.; CABRERA, R.; ROLÓN, J.; PICHARDO, R.; THOMAS, C. Natural fibers as reinforcement of mortar and concrete: A systematic review from Central and South American regions. **Journal of Building Engineering**, v. 98, p. 111267, 2024.

GHUMATKAR, A.; BUDHE, S.; SEKHAR, R.; BANEJA, M. D.; MARROS, S. de. Influence of adherend surface roughness on the adhesive bond strength. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, p. 2356-2370, 2016.

GONÇALVES, S. **Semente de seringueira é usada na produção de suplementos alimentares**. G1 AM. 2016. Disponível em: < [GUIMARÃES, T. C.; DIAS, M. C.; ARAÚJO, O. M. O. de; LOPES, R. T.; KOENDERS, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; TONOLI, G. H. D.; ANDRADE, R. G. M. de; FERREIRA, S. R. The influence of cellulose microcrystals and nanofibrils in XSBR polymers on the mechanical properties of jute textile-reinforced cementitious composites. **Cellulose**, v. 31, p. 3961 – 3979, 2024.](https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/03/semente-de-seringueira-e-usada-na-producao-de-suplementos-alimentares.html#:~:text=Semente%20de%20seringueira%20%C3%A9%20usada,de%20suplementos%20alimentares%20%7C%20Amazonas%20%7C%20G1&text=Pesquisador%20diz%20que%20semente%20%C3%A9,pode%20gerar%20empregos%20em%20Mau%C3%A9s.&text=Antes%20desperdi%C3%A7ada%20a%20semente%20da,com%20a%20alimenta%C3%A7%C3%A3o%20no%20Amazonas.> Acesso em: 06 nov. 2022.</p>
</div>
<div data-bbox=)

GOMES, D. A. C.; MIRANDA, E. H. de N.; VELOSO, M. C. R. de A.; SILVA, M. G. da; FERREIRA, G. C.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Production and characterization of recycled low-density polyethylene/ amazon palm fiber composites. **Industrial Crops & Products**, v. 201, p. 116833, 2023.

IWAKIRI, S.; KEINERT JUNIOR, S.; ALBUQUERQUE, C. E. C. de; LATORRACA, J. V. de F.; MENDES, L. M. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: Ajir, 2005. v. 1, 247 p.

LAGE, P. **Relações das características morfo-anatômicas da casca, estado nutricional e variações crimáticas sazonais com a produção de látex em clones de seringueira em Nepomuceno, MG**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Agronomia. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 101, 2013. Disponível em: < <http://www.apabor.org.br/SiteNovo/pdf/LagePatricia.pdf>> Acesso em: 03 nov. 2022.

LAVERDE, V.; MARIN, A.; BENJUMEA, J. M.; ORTIZ, M. R. Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. **Construction and Building Materials**, v. 340, 2022.

LEE, G. W.; CHOI, Y. C. Effect of abaca natural fiber on the setting behavior and autogenous shrinkage of cement composite. **Journal of Building Engineering**, v. 56, p. 104719, 2022.

LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. Variabilidade da composição da lignina na biomassa. **Lignina: Tendências e Aplicações**, p. 65 – 98, 2017.

MENEZES, R. M. R. O.; COSTA, L. M.; TAVARES, L. R. C.; BEZERRA, A. C. da S.; AGUILAR, M. T. P. Effect of water content and particle size on the thermal decomposition of ground cement paste. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 01, 2020.

MIRANDA, E. H. de N.; SILVA, G. A. da; GOMES, D. A. C.; SILVEIRA, M. N. L. da; VITORINO, F. de C.; FERREIRA, S. R. Efeito de diferentes espécies de madeira e bambu na hidratação de matrizes à base de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. 04, 2024.

MIRANDA, E. H. de N.; GOMES, D. A. C.; ANDRADE, G. M. de; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Valorization of bean agricultural wastes for the production of polymeric composites. **Journal of Engineering Research**, v. 4, n. 14, 2024.

OLIVEIRA, D. N. P. S. de. **Painéis de cimento portland produzidos com fibras do mesocarpo do açaí**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal do Amapá. Macapá - AP, p.78. 2019. Disponível em: <<http://repositorio.unifap.br/jspui/handle/123456789/392>> Acesso em: 21 out. 2022.

PETKOVA, V.; STOYANOV, V.; PELOVSKI, Y. TG-DTG-DTA in studying white self-compacting cement mortars. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, p. 797 – 806, 2012.

SANT'ANNA, I. de C.; CRUZ, C. D.; GOUVÊA, L. R. L.; JUNIOR, E. J. S.; FREITAS, R. S. de.; GONÇALVES, P. de S. Genetic diversity analyses of rubber tree genotypes based on UPOV descriptors. **Industrial Crops & Products**, v. 165, 2021.

SILVEIRA, M. N. L.; MENALI, L. de O.; ZIDANES, U. L.; DIAS, M. C.; SOARES, J. R.; DA GLORIA, M. Y.; MORI, F. A.; KOENDERS, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; FERREIRA, S. R. Characterization of mandacaru (*Cereus jamacaru* DC.) and its use in lightweight bio-concrete. **Revista Matéria**, v. 29, n.4, 2024.

SOUZA, G. A. de. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de seringueira [Hevea brasiliensis (WILLD. EX ADR. DE JUSS) MUELL.-ARG.] durante o desenvolvimento e o armazenamento**. Tese (Doutorado em Fisiologia Vegetal) – Departamento em Fisiologia Vegetal. Universidade Federal de Viçosa – MG, p. 152. 2014. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/6827>> Acesso em: 01 de nov. 2022.

TEIXEIRA, J. N. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos a partir de materiais lignocelulósicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Departamento de Engenharia de Biomateriais. Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, p. 125, 2017.

UNICENTRO. Pesquisa sobre semente de seringueira terá continuidade graças a parceria universidade-empresa. 2022.

VAIRAGADE, V. S.; DHALE, S. Hybrid fibre reinforced concrete – A state of the art review. **Hybrid Advances**, v. 3, p. 100035, 2023.

VELOSO, M. C. R. de A.; VILELA, L. S.; JÚNIOR, L. M.; VALLE, M. L. A.; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 01, 2021.

WANG, W.; ZHANG, Y.; MO, Z.; CHOUW, N.; JAYARAMAN, K.; XU, Z. D. A critical review on the properties of natural fibre reinforced concrete composites subjected to impact loading. **Journal of Building Engineering**, v. 77, p. 107497, 2023.

YUAN, T.F.; LEE, J. Y.; YOON, Y.S. Enhancing the tensile capacity of no-slump high-strength high-ductility concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 106, p. 103458, 2020.

ZUBIOLO, C.; PEREIRA, L. L.; SANTANA, H. E. P.; FREITAS, L. S.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Caracterização de resíduos lignocelulósicos e avaliação de seus produtos de pirólise. **Recursos naturais: Energia de biomassa florestal**, p. 22 – 34, 2021.