



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE LEVES COM COM-
PÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS VEGETAIS**

Salvador

2024

ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE LEVES COM COM-
PÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS VEGETAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

Salvador

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete

Sinay Neves, Escola Politécnica - UFBA.

A779 Arruda Filho, Adilson Brito de.
Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com compósitos cimentícios reforçados com tecidos vegetais / Adilson Brito de Arruda Filho. – Salvador, 2024.

153 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lopes Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho.

Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal da Bahia - Escola Politécnica, 2024.

1. Compósitos cimentícios. 2. Comportamento mecânico. 3. Abacaxi. 4. Juta. I. Lima, Paulo Roberto Lopes. II. Carvalho, Ricardo Fernandes. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 624.1833

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Adilson e Célia, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todos os momentos de minha vida.

ADILSON BRITO DE ARRUDA FILHO

DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE LEVES COM COM- PÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS VEGETAIS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em 13 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



PAULO ROBERTO LOPES LIMA
Data: 07/02/2025 10:41:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Paulo Roberto Lopes Lima
Orientador
PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente



RICARDO FERNANDES CARVALHO
Data: 06/02/2025 17:23:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Coorientador
PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente



FRANCISCO GABRIEL SANTOS SILVA
Data: 05/02/2025 17:39:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Francisco Gabriel Santos Silva
PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente



CLEBER MARCOS RIBEIRO DIAS
Data: 07/02/2025 09:37:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Cleber Marco Ribeiro Dias
PPEC-UFBA

Documento assinado digitalmente



LEILA CRISTINA MENEGHETTI VALVERDES
Data: 05/02/2025 16:25:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professora. Dra. Leila Cristina Meneghetti
USP

Documento assinado digitalmente



SAULO ROCHA FERREIRA
Data: 30/01/2025 20:55:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Professor Dr. Saulo Rocha Ferreira
UFLA

AGRADECIMENTOS

A Deus e Jesus, que sempre iluminaram meus caminhos, permitindo que superasse todos os obstáculos e conseguisse realizar este trabalho.

Aos professores Dr. Paulo Roberto Lopes Lima e Dr. Ricardo Fernandes Carvalho, meus orientadores, sem os quais não teria conseguido realizar este trabalho, por toda atenção, dedicação e compreensão, principalmente pelo apoio e orientação nos momentos difíceis.

Às minhas alunas Sande Batista, Mariana Nunes, Marina Oliveira, Rafaela Viana e Yndiane Dourado, e meu aluno João Victor Gomes, por toda ajuda e contribuição, a participação e o incentivo de vocês foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Aos professores do PPEC, em especial aos professores Dr. Daniel Vêras Ribeiro e Dra. Dayana Bastos Costa pela confiança e apoio em diversos momentos.

Às técnicas do PPEC Daniele Mota e Caroline Santos por toda ajuda, incentivo e apoio que foram essenciais durante a realização desta jornada.

À Universidade Estadual de Feira de Santana, e aos professores Dra. Mônica Leite, Dra. Cintia Fontes, Dra. Geany Peruch, Dr. Renato Souza, Dr. Alan Garcia e principalmente Dr. Geraldo Belmonte, não somente pelo apoio e disponibilidade para a realização dos ensaios nos laboratórios do Labotec 1 e Labotec 2, mas especialmente pelas conversas e incentivos durante esta jornada.

Aos técnicos da UEFS Adriano, Thais, Mirela, Wellington, Katia, Mariana, Sr. Nilson e principalmente Marta de Jesus por todo apoio na realização dos ensaios da pesquisa.

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, por ter permitido o meu afastamento para cursar o doutorado, em especial aos colegas Prof. Luciano Rocha, Prof. Cleidson Guimarães, Prof. Renê Souza, Prof. Humberto Teixeira, Prof. Mário Sérgio, Prof. Jaildo Pereira, Prof. Adson Mota e o ex-professor Francisco Gabriel, o incentivo e ajuda de cada um de vocês foi fundamental para realização desta pesquisa.

Ao Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular – Thaba, da Universidade do Estado da Bahia – UNEB, em especial aos engenheiros Rubens Barros e Eduardo Costa, e arquitetos Lícia Andrade e Fred Fontes, que sempre me incentivaram a progredir nos estudos, e proporcionaram as condições necessárias para que eu iniciasse esta jornada.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Mandioca e Floricultura do município de Cruz das Almas – Bahia, em especial aos pesquisadores Dr. Everton Hilo de Souza e Dra. Fernanda Vidigal Duarte Souza pela parceria na produção das fibras das folhas do abacaxizeiro.

Ao Senhor Raimundo Viana Silva, pela grande ajuda na preparação dos feixes de fibras de abacaxi.

Ao Senhor Vinicius Pereira Baltazar da Silveira, por todas as contribuições durante a pesquisa, na preparação das fibras e no desenvolvimento de diversos aparatos utilizados no preparo das fibras e na realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Ensaio em Durabilidade dos Materiais - LEDMa, pelo apoio na realização dos ensaios durante a pesquisa.

Ao Núcleo de Tecnologia da Preservação e da Restauração – NTPR, em especial ao Sr. Allard Monteiro do Amara, pelo apoio na realização dos ensaios durante a pesquisa.

Ao Centro de Tecnologia Mineral, em especial ao Prof. Dr. Otávio Gomes por todo apoio na realização das micrografias das fibras de abacaxi.

Aos colegas Mercurie Janeai, Ingrid Araújo, Silas Andrade, Tiago Assunção, Catharine Brandão, Cristina Pérez, Ruan Moura, Nilson Amorim, Igor Parente, Vanessa Campos e Rafael Nascimento da UFBA, além de Camila Dantas, Naiane Cruz e Dimas Leite da UEFS, que estiveram presentes ajudando e colaborando nas diversas fases desta pesquisa.

Aos amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo principal desenvolver Painéis Sanduíche Leves com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e do caule da juta, com núcleo em material leve como Poliestireno Extrudado (XPS), que submetido aos ensaios físicos e mecânicos, mostrem-se resistentes aos esforços de compressão, tração e flexão, além de promover o conforto térmico. A utilização de tecidos de fibras vegetais na conformação das faces dos painéis sanduíche em compósitos cimentícios, melhora o alinhamento e direcionamento das fibras, elevando o desempenho mecânico dos painéis na direção e sentido dos esforços solicitantes. As fibras, feixes e tecidos de abacaxi foram submetidos aos tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido, para reduzir a absorção de água e a variação dimensional das fibras naturais, melhorando o desempenho dos compósitos. Para analisar a interface entre a matriz cimentícia e a fibra foram realizados ensaios de arrancamento dos feixes e tecidos de fibras de abacaxi, in natura e tratados, com comprimentos embebidos iguais a 10, 20 e 30 mm. Para reduzir a delaminação que os painéis sanduíche estão sujeitos devido às diferentes propriedades dos materiais empregados no núcleo e na face, esta pesquisa estudou quatro configurações na interface núcleo-face, sendo a configuração com ranhuras em paralelo a que obteve melhor desempenho mecânico. Também foram moldados painéis variando o número de camadas de reforço na face de 1 a 5, a fim de analisar a influência do número de camadas de reforço na face sobre o desempenho dos painéis sanduíche. Com os resultados dos ensaios nas fibras, feixes, tecidos, placas e painéis sanduíche, verificou-se que o tipo de fibra utilizado na confecção do tecido de reforço e o tipo de interface entre o núcleo e as faces dos painéis sanduíche são fatores preponderantes no comportamento, desempenho e no padrão de fissuração dos painéis sanduíche. Ao final desta pesquisa os Painéis Sanduíche apresentaram comportamento mecânico e térmico adequados para serem utilizadas como elementos estruturais, semiestruturais e de vedação.

Palavras-Chave: Compósitos cimentícios. Comportamento mecânico. Abacaxi. Juta.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT SANDWICH PANELS WITH CEMENTITIOUS COMPOSITES REINFORCED WITH PLANT FABRICS

The main objective of this research is to develop lightweight sandwich panels with external faces in cementitious composites reinforced with natural fiber fabrics extracted from pineapple leaves and jute stems, with a core in lightweight material such as Extruded Polystyrene (XPS), which, when subjected to physical and mechanical tests, are resistant to compression, traction and flexural stresses, in addition to promoting thermal comfort. The use of vegetable fiber fabrics in the conformation of the faces of the sandwich panels in cementitious composites improves the alignment and direction of the fibers, increasing the mechanical performance of the panels in the direction and sense of the stresses. The pineapple fibers, bundles and fabrics were subjected to autoclaving, alkaline and hybrid treatments to reduce water absorption and dimensional variation of the natural fibers, improving the performance of the composites. To analyze the interface between the cementitious matrix and the fiber, pullout tests were performed on bundles and fabrics of pineapple fibers, in natura and treated, with embedded lengths equal to 10, 20 and 30 mm. To reduce the delamination that sandwich panels are subject to due to the different properties of the materials used in the core and face, this research studied four configurations at the core-face interface, with the configuration with parallel grooves being the one that obtained the best mechanical performance. Panels were also molded with varying the number of reinforcement layers on the face from 1 to 5, in order to analyze the influence of the number of reinforcement layers on the face on the performance of the sandwich panels. With the results of the tests on the fibers, bundles, fabrics, plates and sandwich panels, it was verified that the type of fiber used in the production of the reinforcement fabric and the type of interface between the core and the faces of the sandwich panels are preponderant factors in the behavior, performance and cracking pattern of the sandwich panels. At the end of this research, the Sandwich Panels showed adequate mechanical and thermal behavior to be used as structural, semi-structural and sealing elements.

Key words: Cementitious composites. Mechanical behavior. Pineapple. Jute.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Massa específica, absorção de água e variação dimensional das fibras. .	23
Tabela 2. Índices de cristalinidade das fibras de abacaxi.	27
Tabela 3. Ensaio de tração nas fibras de abacaxi – Média (Desv. Padrão).	29
Tabela 4. Ensaio de tração nos feixes de abacaxi – Média (Desvio. Padrão).	31
Tabela 5. Ensaio de tração nos tecidos de abacaxi – Média (Desvio. Padrão).	32
Tabela 6. Tensões de falha das fibras, feixes e tecidos de abacaxi.	38
Tabela 7. Características físicas do cimento, sílica ativa e da cinza volante.	43
Tabela 8. Composição química principal do cimento, sílica ativa, cinza volante.	44
Tabela 9. Características físicas da areia.	45
Tabela 10. Absorção por imersão.	47
Tabela 11. Resistência à compressão e flexão em três pontos.	48
Tabela 12. Resultados do ensaio arrancamento nos feixes de abacaxi.	54
Tabela 13. Resultados do ensaio arrancamento nos tecidos de abacaxi.	58
Tabela 14. Resultados médios e desvios-padrões. Ensaio de Tração Direta.	70
Tabela 15. Número de fissuras nos compósitos – Ensaio de tração direta.	72
Tabela 16. Resultados médios e desvios-padrões. Ensaio de flexão em quatro pontos.	75
Tabela 17. Número de fissuras nos compósitos – Ensaio de flexão em 4 pontos.	76
Tabela 18. Índices de Tenacidade.	78
Tabela 19. Valores médios da área, deformação específica na ruptura, tensão e módulo de elasticidade.	91
Tabela 20. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos nas placas na direção do urdume e da trama.	93
Tabela 21. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos dos painéis.	95

Tabela 22. Número de fissuras e espaçamento médio das fissuras para cada tipo de painel.....	96
Tabela 23. Número e espaçamento das fissuras no ensaio de flexão em quatro pontos.	98
Tabela 24. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos dos painéis sanduíche.	99
Tabela 25. Índices de Tenacidade.	100
Tabela 26. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos dos painéis.....	113
Tabela 27. Resultados experimentais do ensaio térmico.	118
Tabela 28. Valores de condutividade térmica e calor específico.....	118
Tabela 29. Condutividade térmica e calor específico de materiais utilizados na construção de paredes.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Colheita e desfibramento das folhas do abacaxizeiro.	12
Figura 2. Fibras de abacaxi antes (A) e após (B) secagem em estufa.....	12
Figura 3 - Fibras lavadas e dispostas no varal para secagem.	13
Figura 4 - A e B: "Batedeira"; C: Mecha após passar pela "batedeira"; D: Feixes de fibras.	14
Figura 5. Tecido de feixes de fibras de abacaxi – A) ilustração; B) Diâmetro (mm) do feixe de fibras de abacaxi e do fio de algodão; C) Foto do tecido; D) Espaçamento (mm) do urdume e da trama.....	15
Figura 6. Autoclavagem das fibras de abacaxi.....	15
Figura 7. Tratamento com hidróxido de cálcio.....	16
Figura 8. Fibras imersas em água para determinação da absorção.	17
Figura 9. Medição do diâmetro da fibra de abacaxi.....	18
Figura 10. Medição do diâmetro da fibra através de microscópio.	20
Figura 11. Máquina de ensaios universal – Shimadzu.	21
Figura 12. Esquema do corpo de prova com fibra e feixes.	22
Figura 13. Corpos de prova com tecido de abacaxi, largura 40 mm, comprimentos ensaiados: 30, 50 e 70 mm. Ensaio de tração no tecido fibra vegetal.	22
Figura 14. Gráfico de absorção de água em função do tempo.....	24
Figura 15. Gráfico da variação dimensional em função do tempo.....	25
Figura 16. Análise termogravimétrica das fibras de abacaxi.	26
Figura 17. Difrátogramas de raios X das fibras de abacaxi.	27
Figura 18. Fibra de abacaxi após passar no tratamento: A) em autoclave; B) Alcalino; C) Híbrido.....	28

Figura 19. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração na fibra in natura.....	28
Figura 20. Curva Tensão x Deformação Específica do ensaio de tração no feixe de fibras in natura.	30
Figura 21. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração no tecido de fibras in natura.	32
Figura 22. Fases do comportamento do tecido de feixes de abacaxi in natura submetido à tração.....	34
Figura 23. Esquema de ruptura de corpo de prova de tecidos de feixes de fibras naturais.	34
Figura 24. Tecido antes e após o ensaio de tração direta.....	35
Figura 25. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha - fibras de abacaxi in natura...36	
Figura 26. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Fibras de abacaxi.	37
Figura 27. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Feixes de abacaxi.....	37
Figura 28. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Tecidos de abacaxi.....	37
Figura 29. Distribuição dos tamanhos de partículas do cimento, da sílica ativa e da cinza volante.	44
Figura 30. Distribuição dos tamanhos de partícula da areia.	45
Figura 31. Absorção de água matriz x raiz do tempo.....	47
Figura 32. Moldagem de corpos de prova para ensaio de arrancamento dos feixes.	49
Figura 33. Moldagem de corpos de prova para ensaio de arrancamento dos tecidos.	49
Figura 34. Aparato para fixação do corpo de prova.	51
Figura 35. Curva Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento no feixe.....	52

Figura 36. Curvas Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento nos feixes....	53
Figura 37. Ensaio de arrancamento nos feixes com 10 mm de embebimento.	55
Figura 38. Ensaio de arrancamento nos feixes com 20 mm de embebimento.	55
Figura 39. Ensaio de arrancamento nos feixes com 30 mm de embebimento.	56
Figura 40. Curvas Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento nos tecidos..	57
Figura 41. Curvas Tensão x Deslocamento. Ensaio de flexão em 4 pontos nos compósitos reforçados com tecidos de feixes de sisal.....	62
Figura 42. Primeira camada de argamassa.....	64
Figura 43. Moldagem das placas cimentícias reforçadas com tecidos de abacaxi. ..	65
Figura 44. Representação do aparato metálico.....	66
Figura 45. Preparação dos corpos de prova.	66
Figura 46. Ensaio de tração direta.	67
Figura 47 - Ensaio de Flexão em 4 Pontos.	67
Figura 48. Curva Tensão x Deformação específica no ensaio de Tração Direta.	68
Figura 49. Curva Tensão x Deformação específica no ensaio de Tração Direta	70
Figura 50. Corpos de prova após ensaio de tração direta.....	72
Figura 51. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos	73
Figura 52. Curvas Tensão versus Deslocamento do ensaio de flexão e 4 pontos....	74
Figura 53. Corpos de prova após ensaio de flexão em 4 pontos.	76
Figura 54. Evolução das fissuras nos compósitos, no ensaio de flexão em 4 pontos.	77
Figura 55. Definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992), Lima (2004).....	78
Figura 56. Comparativo dos Índices de Tenacidade.	79

Figura 57. Diferentes tipos de painel – a) PSCCJ-R; b) PSCCJ-//; c) PSCCJ-#; d) PSCCJ- Ø	84
Figura 58. A) Esquema do corpo de prova com fibra; B) Ensaio de tração direta na fibra.	86
Figura 59. A) Esquema do corpo de prova do feixe; B) Corpo de prova do feixe.....	87
Figura 60. A) Esquema do corpo de prova de tecido; B) Corpo de prova de tecido; C) Ensaio de Tração.	87
Figura 61. Processo de moldagem dos compósitos.....	88
Figura 62. Ensaio de flexão em quatro pontos: A) placa; B) núcleo; C) painel sanduíche	89
Figura 63. Curvas Tensão x Deformação Específica – na fibra e no fio.....	90
Figura 64. Curva Tensão x Deformação Específica – no tecido.....	90
Figura 65. Curvas Tensão x Deslocamento: A) núcleo; B) placas com reforço na direção da trama e do urdume.	92
Figura 66. Curva Tensão x Deslocamento no ensaio de flexão em quatro pontos nos painéis.....	93
Figura 67. a) Comparação entre curvas carga x deslocamento b) Comparativo dos índices de tenacidade	95
Figura 68. Comparativo do número de fissuras abertas para os painéis – a) PSCCJ – R; b) PSCCJ – //; c) PSCCJ – #; d) PSCCJ – Ø.....	96
Figura 69. Curvas de Tensão x Deslocamento no ensaio de flexão em quatro pontos nos painéis sanduíche.....	97
Figura 70. Evolução de fissuras no ensaio de flexão em quatro pontos.	98
Figura 71. Índices de Tenacidade de acordo com cada configuração de painel sanduíche.....	100

Figura 72. Eficiência do compósito: A) na razão entre tensão máxima média e sua massa unitária; B) na razão entre rigidez média e sua massa unitária.	101
Figura 73. Painel sanduiche.....	106
Figura 74. Seção Longitudinal do Painel Sanduiche	106
Figura 75. Seção transversal do painel Detalhe das ranhuras no núcleo	106
Figura 76. Ensaio de Flexão em 4 pontos.....	107
Figura 77. Ensaio de compressão no painel sanduiche	108
Figura 78. Esquema da câmara térmica.	109
Figura 79. A) Câmara térmica, o painel sanduiche e fonte de calor; B) Sensores de temperatura.....	109
Figura 80. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos.	110
Figura 81. Ilustração da viga composta por materiais diferentes	110
Figura 82. Curva Tensão X Flecha no ensaio de flexão do painel sanduiche, do núcleo e da face	111
Figura 83. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos no painel sanduiche.....	112
Figura 84. Evolução das fissuras na face inferior dos Painéis Sanduiche.	114
Figura 85. Fissuras na parte superior do Painel Sanduiche.....	114
Figura 86. Fissuras no núcleo do Painel Sanduiche.	115
Figura 87. Fissuras nos Painéis Sanduiche após ensaio de flexão em 4 pontos	115
Figura 89. Ensaio de Compressão nos Painéis Sanduiche: A) Primeira fissura na face; B) Delaminação Núcleo-Face e Delaminação Fibra-Matriz.....	116
Figura 88. Curva Tensão x Deformação Específica no ensaio de compressão axial.	116
Figura 90. Resultado do teste de conforto térmico.....	117

Figura 91. Termografia da lateral do painel sanduiche após 1 h do início do ensaio.

.....117

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ASTM – American Society for Testing Materials

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

EPS – Poliestireno Expandido

LVDT – Transformador Diferencial Variável Linear

PPGECEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

PVC – Policloreto de vinila

THABA – Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular

UEFS – Universidade Estadual de Feira de Santana

UFBA – Universidade Federal da Bahia

UNEB – Universidade do Estado da Bahia

XPS - Poliestireno Extrudado

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA	iii
DEDICATÓRIA	iv
BANCA EXAMINADORA	v
RESUMO	viii
ABSTRACT.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	2
1.2 Problema e hipótese da pesquisa	3
1.3 Objetivos:.....	4
1.3.1 Geral:.....	4
1.3.2 Específicos:.....	4
1.4 Estrutura da tese:	5
2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TECIDOS EM FIBRAS DE ABACAXI PARA USO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Metodologia	10
2.2.1 Materiais	10
2.2.2 Obtenção e beneficiamento da fibra de abacaxi	11
2.2.3 Produção do tecido de fibras de abacaxi	14
2.2.1 Tratamento das fibras	15
2.2.1 Caracterização física do reforço	16
2.2.2 Comportamento mecânico do reforço.....	20
2.3 Resultados e Discussões	23
2.3.1 Propriedades físicas das fibras de abacaxi.....	23
2.3.2 Ensaio de tração direta nas fibras.....	28
2.3.3 Ensaio de tração direta nos feixes	30
2.3.4 Ensaio de tração direta nos tecidos	32
2.4 ANÁLISE da confiabilidade do reforço - probabilidade de ruptura do reforço ...	35

2.4.1	Efeito do tipo de arranjo – fibras únicas, feixes de fibras e tecidos – na variabilidade dos resultados nos ensaios de tração direta.....	35
2.5	Conclusões.....	39
3	INTERAÇÃO ENTRE REFORÇO E MATRIZ.....	40
3.1	Introdução.....	40
3.2	Metodologia	42
3.2.1	Materiais	42
3.2.2	Produção da Matriz.....	46
3.2.3	Métodos de ensaios.....	47
3.2.4	Ensaio de Arrancamento – (Pull-out) nos feixes	48
3.3	Resultados e Discussões	51
3.3.1	Ensaio de Arrancamento – (Pull-out) nos feixes	51
3.3.2	Ensaio de arrancamento nos Tecidos.....	56
3.4	Conclusões	59
4	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS VEGETAIS.....	60
4.1	Introdução.....	60
4.2	Metodologia	63
4.2.1	Materiais	63
4.2.2	Produção dos compósitos.....	63
4.2.3	Ensaio de tração direta	65
4.2.4	Ensaio de flexão em quatro pontos.....	67
4.3	Resultados e Discussões	68
4.3.1	Ensaio de tração direta	68
4.3.2	Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos.....	72
4.4	Conclusões.....	79
5	DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE COM FACES CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDOS DE JUTA E NÚCLEO EM XPS.....	80
5.1	Introdução.....	80
5.2	Materiais e Métodos	83
5.2.1	Materiais	83
5.2.2	Métodos	84
5.3	Resultados e Discussões	89
5.3.1	Ensaio de Tração nas fibras, fios e tecidos	89

5.3.2	Ensaio de flexão em quatro pontos no núcleo e nas faces.....	92
5.3.3	Ensaio de flexão em quatro pontos - painéis sanduíche com as quatro configurações na interface núcleo-face.....	93
5.3.4	Ensaio de flexão em quatro pontos - painéis sanduíche com diferentes números de camadas de reforço na face.....	97
5.4	Conclusões.....	101
6	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE REFORÇADOS COM TECIDO DE ABACAXI	103
6.1	Introdução.....	103
6.2	Materiais e Métodos	104
6.2.1	Materiais	105
6.2.2	Métodos	105
6.3	Resultados e Discussões	110
6.3.1	Avaliação do comportamento mecânico da placa cimentícia, do núcleo e do painel sanduíche.	110
6.3.2	Avaliação do comportamento térmico da face, do núcleo e do painel sanduíche.....	117
6.4	Conclusões.....	119
7	CONCLUSÕES.....	121
7.1	Conclusões.....	121
7.1.1	Produção e caracterização de tecidos em fibras de abacaxi para uso em compósitos cimentícios	121
7.1.2	Interação entre reforço e matriz.....	122
7.1.3	Compósitos cimentícios reforçados com tecidos vegetais.....	122
7.1.4	Desenvolvimento de painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS.....	122
7.1.5	Produção e caracterização de painéis sanduíche reforçados com tecido de abacaxi.....	123
7.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	124
	REFERÊNCIAS.....	125

1 INTRODUÇÃO

Os painéis sanduíche pré-fabricados podem apresentar boas características estruturais, além do isolamento térmico, acústico e do baixo peso devido à utilização de núcleos em material leve. Com a utilização de faces finas e rígidas, e núcleo em material leve, os painéis sanduíche podem ser uma opção eficiente para construção de novas edificações e de reformas (FRAZÃO *et al.*, 2018).

As faces dos painéis sanduíche podem ser confeccionadas com diversos materiais, tais como placas metálicas, poliméricas, cerâmicas e principalmente em materiais compósitos, como as placas cimentícias reforçadas com fibras. As fibras naturais são um tipo de reforço barato que necessita apenas de um processamento com baixo grau de industrialização (SILVA, 2010). Os principais motivos de se reforçar matrizes frágeis com fibras naturais são o aumento da resistência à tração, flexão e o aumento da tenacidade, além de prevenir ou retardar o aparecimento de fissuras. A adição de fibras vegetais em matrizes cimentícias para produção de compósitos pode resultar em um material de construção resistente e durável embasado em recursos naturais renováveis (FERREIRA *et al.*, 2014).

O núcleo dos painéis sanduíche normalmente são confeccionados em materiais leves, como o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudado (XPS), madeira compensada, fibras naturais em forma de mantas ou buchas, etc. Este material leve mantém a distância constante entre as faces, permitindo aumentar o momento de inércia da estrutura, e sua rigidez em flexão, minimizando a massa do conjunto (GLÓRIA *et al.*, 2021).

A retomada dos estudos da utilização de fibras naturais vegetais na Bahia para produção de compósitos ocorreu na década de 1980 no CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) por meio do grupo de pesquisadores do THABA, Programa de Tecnologias de Habitação, atual Núcleo de Pesquisa e Extensão em Habitação Popular, da Universidade do Estado da Bahia – UNEB) que concentrou seus trabalhos nas fibras de sisal e coco (CERCHIARO, 2013).

De acordo com Lima (2004), estes estudos resultaram no desenvolvimento de telhas e pias artesanais, porém não possuíam a qualidade necessária para substituir o cimento-amianto. A partir da experiência do THABA/CEPED, vários outros centros

iniciaram seus estudos sobre o aproveitamento dos materiais vegetais na construção civil, como o bambu (GHAVAMI, 1989), as fibras de sisal e de coco (TOLEDO FILHO *et al.*, 1990), e fibras e resíduos vegetais (AGOPYAN, 1991; SAVASTANO *et al.*, 1997).

Glória (2021) produziu painéis sanduíches com faces constituídas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de sisal, e núcleos leves em serragem de madeira e cimento, conseguindo bom desempenho mecânico, superior aos das faces e núcleo separadamente, além de baixa densidade.

Frazão *et al.* (2018) desenvolveram dois tipos de painéis sanduíche com núcleo em concreto leve e faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal, sendo o primeiro com fibras curtas (comprimento de 50 mm) e outro com fibras longas (comprimento de 700 mm). Os painéis com faces reforçadas com fibras longas de sisal apresentaram desempenho superior aos painéis com faces reforçadas com fibras curtas, apresentando maior rigidez, maior resistência à flexão e comportamento de múltiplas fissuras.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um grande produtor de frutas. Uma das mais produzidas e consumidas é o abacaxi. As folhas do abacaxizeiro são normalmente descartadas após a colheita do fruto. Folhas ricas em fibras que podem ser extraídas para utilização na fabricação de fios, cordas, tecidos, etc. Esta folha possui aproximadamente 5 cm de largura, por até de 1,2 m comprimento.

Outra fibra bastante utilizada é a juta, uma fibra vegetal que se desenvolve em climas úmidos e tropicais, e foi introduzida no Brasil pelos japoneses. Ela é obtida da parte lenhosa do caule que possui 2 cm de diâmetro, com altura de 3 a 4 metros. Os tecidos de juta são produzidos para diversas aplicações tais como decoração, artesanato, fabricação de sacolas, etc. podendo ser produzidos com até três metros de largura (MIRANDA, 2016).

O uso de fibras da folha do abacaxizeiro (chamadas a partir deste ponto de: fibras de abacaxi) e fibras de juta, para reforçar componentes na construção civil pode aumentar a demanda pelas fibras e, conseqüentemente, agregará valor às mesmas. Esse aumento do consumo aliado ao valor agregado proporcionará aos produtores

melhores condições para manter-se nas regiões produtoras, evitando a migração dos pequenos agricultores para os grandes centros urbanos.

O comportamento estrutural de placas cimentícias reforçadas com fibras naturais carece ainda de mais estudos, para que possam ser desenvolvidos elementos com o desempenho mecânico adequado para serem utilizados como elementos de vedação, elementos estruturais ou semiestruturais, tais como, elementos de cobertura com grandes dimensões, calhetões, por exemplo, formas em substituição aos blocos cerâmicos e placas de polietileno expandido (EPS) na confecção de lajes pré-moldadas. E com desenvolvimento dos compósitos sanduíche poderão ser fabricados painéis e montantes para utilização na construção de paredes, divisórias, rufos, calhas, painéis e estrutura para forro, entre outros.

O desenvolvimento de Painéis Sanduíche, com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais da fibra de abacaxi e de fibra de juta, com núcleo em material leve como o polietileno expandido (EPS), o poliestireno extrudado (XPS), além de ter uma grande importância para o desenvolvimento tecnológico, tem também importante papel no desenvolvimento socioeconômico. Por causa do baixo custo de produção e beneficiamento, e da disponibilidade do material, o emprego destes compósitos sanduíches poderá reduzir o custo das habitações, tornando-se uma alternativa adequada para utilização em programas de habitação popular. Esta pesquisa também possui grande importância ecológica, uma vez que visa à utilização de materiais naturais e biodegradáveis, como forma de substituição do amianto e fibras sintéticas, entre outros.

Este trabalho estuda novas formas para uso dos tecidos de fibras de juta, bem como o desenvolvimento inédito de um tecido a partir das fibras de abacaxi, procurando incorporá-los às matrizes cimentícias, buscando solucionar problemas no processo de moldagem, compatibilização entre o tecido e a argamassa, espaçamento da malha e a conexão com o núcleo no desenvolvimento de painéis sanduíche.

1.2 PROBLEMA E HIPÓTESE DA PESQUISA

Já existem estudos com a utilização de fibras curtas, de mechas alinhadas de fibras longas, na conformação dos compósitos cimentícios, que podem ser utilizados nas faces dos painéis sanduíche com bons resultados mecânicos.

O problema desta pesquisa é:

A utilização de tecidos de fibras naturais vegetais, como tecidos de juta, ou um tecido inédito desenvolvido a partir das fibras da folha do abacaxizeiro, como reforço na conformação de faces cimentícias de painéis sanduíche possibilitará um melhor desempenho no comportamento mecânico destes painéis?

Como hipótese para esta questão temos:

A utilização das fibras de juta e das fibras da folha do abacaxizeiro, em arranjos de tecidos, como reforço na conformação de faces cimentícias de painéis sanduíche, proporcionará melhor alinhamento e direcionamento das fibras, desta forma eleva-se o desempenho mecânico dos compósitos na direção e sentido dos esforços solicitantes, conseguindo o aumento da tenacidade, ganho de resistência pós-fissuração, melhoria no processo de fissuração, com menor espaçamento entre as fissuras, menor dimensões das fissuras abertas, e mais uniformidade no padrão das fissuras. Possibilitando melhor desempenho no comportamento mecânico dos painéis sanduíche.

1.3 OBJETIVOS:

1.3.1 Geral:

Desenvolver Painéis Sanduíche com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e da juta, com núcleo em material leve como o XPS que, submetido a ensaios físicos e mecânicos, possa mostrar-se resistente aos esforços de tração e flexão, além de apresentar durabilidade e conforto térmico.

1.3.2 Específicos:

- Verificar a influência do tratamento em autoclave, alcalino e híbrido no comportamento mecânico das fibras, feixes e tecidos através do ensaio de tração direta;
- Verificar a influência destes tratamentos na interface fibra-matriz através de ensaios de arrancamento (*pull-out*);
- Desenvolver um tecido estrutural de fibras da folha do abacaxizeiro adequado aos processos de moldagem para uma matriz autoadensável;

- Moldar placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e da juta, e analisar o comportamento mecânico destas através dos ensaios de flexão em quatro pontos e tração direta;
- Conformar Painéis Sanduíche com faces externas em placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e da juta, com núcleo em material leve como o XPS;
- Avaliar o comportamento térmico e mecânico dos Painéis Sanduíche.

1.4 ESTRUTURA DA TESE:

As etapas necessárias para a realização desta pesquisa, desde a colheita das folhas do abacaxizeiro, passando pelo beneficiamento e produção do tecido, a caracterização do reforço e da matriz, a interação entre reforço e matriz, a produção das faces e painéis sanduíche, bem como seus comportamentos mecânicos, serão apresentadas em seis capítulos, além das referências:

1: Introdução.

Neste capítulo são apresentados a introdução, as justificativas, o problema de pesquisa e a hipótese, os objetivos geral e específicos, além da estrutura da tese.

2: Produção e caracterização de tecidos em fibras de abacaxi para uso em compósitos cimentícios.

Este capítulo apresenta a colheita das folhas do abacaxizeiro, a extração e beneficiamento das fibras de abacaxi, a produção do reforço em tecido de fibra de abacaxi, os tratamentos aplicados nas fibras, feixes e tecidos de abacaxi, a metodologia dos ensaios para a caracterização da fibra como picnometria a gás hélio, difração de raio-X, análise termogravimétrica, absorção de água e variação dimensional, além dos ensaios de tração direta nas fibras, feixes e tecidos de abacaxi e os resultados obtidos.

3: Interação entre reforço e matriz.

Este capítulo apresenta os componentes da matriz (cimento Portland, sílica ativa, cinza volante, agregado, superplastificante e agente modificador de viscosidade), produção da matriz, os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade, resistência à compressão, flexão em três pontos, moldagem dos corpos de prova e os ensaios de arrancamento (*pull-out*) nos feixes e tecidos.

4: Compósitos cimentícios reforçados com tecidos vegetais.

Este capítulo apresenta a produção dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras de abacaxi, que serão utilizados como faces dos painéis sanduíche, a avaliação do comportamento mecânico dos compósitos aos 28 dias através de ensaios de flexão em 4 pontos e tração direta.

5: Desenvolvimento de painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS.

Neste capítulo são apresentadas a produção das faces em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de juta, além da avaliação da influência da orientação do reforço no comportamento mecânico dos compósitos. Será apresentada também a produção dos painéis sanduíche, sendo analisadas quatro configurações para a interface núcleo-face verificando sua influência no desempenho mecânico dos painéis sanduíche. Foi avaliada ainda a influência do número de camadas de reforço na face (de uma a cinco camadas) no comportamento mecânico dos painéis sanduíche.

6: Produção e caracterização de painéis sanduíche reforçados com tecido de abacaxi.

Este capítulo apresenta a produção dos painéis sanduíche com faces em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de abacaxi e núcleo em XPS, além da avaliação do seu comportamento térmico e mecânico.

7: Conclusões.

Neste capítulo são discutidos os efeitos dos tratamentos no comportamento à tração e nas características físicas e químicas das fibras, feixes e tecidos de abacaxi. É analisada a interação entre o reforço e a matriz. É discutido o comportamento e térmico mecânico dos painéis sanduíche com faces em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de abacaxi e de juta, núcleo em XPS.

Neste capítulo também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE TECIDOS EM FIBRAS DE ABACAXI PARA USO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

2.1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem um grande impacto ambiental, utilizando muita energia e consumindo grandes quantidades de recursos naturais. Na produção de compósitos cimentícios é comum o emprego de fibras manufaturadas que possuem alto impacto ecológico. Com o intuito de reduzir o impacto ambiental, uma das alternativas é a utilização de materiais renováveis como os de origem vegetal. Neste aspecto, o uso de fibras vegetais como reforço de compósitos cimentícios traz sustentabilidade, pois as fibras são recursos naturais renováveis, baratos e seu beneficiamento necessita de baixo grau de industrialização.

Dentre as fibras vegetais podemos destacar a fibra da folha do abacaxizeiro, sendo a variedade curauá a mais comum para a produção de fibras. As cultivares de abacaxi mais produzidas são a BRS Pérola, *Smooth Cayenne*, *Gold*, *Queen*, *Singapore Spanish*, *Española Roja* e *Perolera*. Destaca-se dentre estas a espécie BRS Pérola pois corresponde a 88% de todo cultivo brasileiro. No ano de 2019 foram cultivados 67.319 hectares, produzindo cerca de 1.617.684.000 frutos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019). De acordo com Souza *et al.* (2018) a produção média de folhas de abacaxizeiro por hectare é de 45,8 toneladas, que resulta em 1,2 toneladas de fibras secas por hectare. Logo existe um potencial de produção de mais de 80.000 toneladas de fibras extraídas das folhas do abacaxizeiro por ano.

Após a colheita do fruto da espécie BRS Pérola as folhas do abacaxizeiro são descartadas e queimadas para evitar a propagação de pragas, gerando grande impacto ambiental. Uma forma de evitar a queima e propor uma solução ecológica para a destinação deste subproduto das lavouras de abacaxi, seria o aproveitamento das folhas para extração das fibras pois, cerca de 2,7% da massa das folhas é composta por fibras (Souza *et al.*, 2018), que podem ser utilizadas na fabricação de fios, cordas, tecidos, com condições de ser empregados como reforço para a produção de compósitos cimentícios.

O processamento da fibra da folha do abacaxizeiro é realizado da mesma forma como ocorre o processamento das fibras de sisal, que é composto pelas seguintes etapas: corte, desfibramento, secagem e batimento.

Os compósitos cimentícios possuem grande variedade de aplicação na construção civil, podendo ser fabricados com fibras curtas, no entanto, estes compósitos têm o comportamento limitado pela capacidade de ancoragem destas fibras. Uma forma de melhorar o comportamento dos compósitos é a utilização de fibras longas, mas é difícil conseguir o alinhamento das fibras e seu posicionamento em camadas regulares. Desta forma, o uso de tecidos para reforço de compósitos cimentícios vem apresentar uma solução para manter o alinhamento das fibras além de permitir sua aplicação em camadas uniformemente distribuídas na matriz proporcionando melhor desempenho do comportamento dos compósitos.

Em compósitos cimentícios laminados reforçados com têxteis o valor da resistência à flexão e à tração é diretamente influenciado pelo número de camadas de reforço. A título de exemplo, Kong *et al.* (2017) utilizaram fibra de vidro para reforçar matriz cimentícia, produzindo compósitos com 2 e 6 camadas de reforço. Souza *et al.* (2019) analisaram o comportamento à tração direta de compósitos cimentícios reforçados com 1, 3 e 5 camadas de fibras de curauá. Eles verificaram o melhor desempenho nos compósitos com maior número de camadas de reforço, que apresentaram melhor resistência à flexão, tração, rigidez e padrão de fissuração. O tipo de fibra também influencia no desempenho dos compósitos, os tecidos de fibra de vidro apresentam maior rigidez que os tecidos de fibras sisal, isto proporciona aos compósitos reforçados com tecidos de fibras de vidro maiores tensões em deformações mais baixas (CEVALLOS *et al.*, 2015). A utilização de fibras de curauá como reforço de matrizes cimentícias proporcionaram a capacidade de auto recuperação de fissuras pois, as fibras criam uma rede porosa capaz de transmitir umidade por toda matriz ativando reações retardadas de hidratação e carbonatação resultando na cura autógena das fissuras (SOUZA *et al.*, 2017). Vigas de concreto reforçados com fibras de carbono proporcionaram melhor desempenho à flexão que as vigas de concreto reforçados com aço, apresentando maior resistência e maior módulo de elasticidade retardando a abertura de fissuras (ALRSHOUDI, 2021).

Os compósitos formados por argamassas e concretos reforçados com têxteis (TRM – *Textile Reinforced Mortar*; TRC – *Textile Reinforced Concrete*) tem sido um

tipo de material bastante estudado no desenvolvimento de novos produtos/elementos construtivos, bem como na recuperação e reforço de estruturas existentes, pois possuem excelentes propriedades mecânicas, podendo apresentar redução do peso próprio e dos custos dos produtos (Kong *et al.* 2017). A denominação de compósitos reforçados por têxteis engloba tanto os compósitos reforçados com fibras longas quanto os formados por tecidos, sendo que a utilização de tecidos apresenta vantagens pois, devido à sua forma de confecção e ao intertravamento do urdume com a trama, os tecidos se mantêm unidos e alinhados, proporcionando mais uniformidade na conformação dos compósitos cimentícios com consequente aumento de resistência à tração, flexão, maior tenacidade e rigidez.

Tecidos de fibras sintéticas como fibras de vidro (Cevallos *et al.* 2015) (Dalalbashi *et al.* 2021) (Kong *et al.* 2017), fibras de carbono (Alrshoudi, 2021), fibras de aço (Dalalbashi *et al.* 2021), e tecidos de fibras naturais como fibras de linho, juta, cânhamo, algodão, curauá (Souza, 2017) (Souza, 2019) (Souza, 2020), sisal (Cevallos *et al.* 2015) entre outros, têm sido empregados como reforços de concretos e argamassas. As fibras naturais de origem vegetal são recursos renováveis, biodegradáveis, com grande disponibilidade, além do baixo custo, bom desempenho mecânico e baixa densidade, que quando associadas a matriz cimentícia, na forma de tecidos, têm potencial para serem usados em muitas aplicações na construção civil (CEVALLOS *et al.* 2015; SOUZA, 2020).

Os tecidos de fibras vegetais tramados, formados pela intercalação de fios em duas direções, apresentam características necessárias para alcançar maior resistência à tração, flexão e aumento da tenacidade, na direção dos esforços solicitantes. Estes tecidos podem ser confeccionados por fios, que são cordões de fibras enroladas e torcidas umas nas outras, e com feixes são o agrupamento de um determinado número de fibras, geralmente com 10, 15 até 50 fibras por feixe.

O uso de fibras vegetais foi iniciado para promover melhorias no comportamento mecânico dos compósitos, mas devido ao ataque químico que a matriz cimentícia proporciona às fibras o seu uso foi reduzido devido a problemas de durabilidade (GRAM, 1983). Uma das alternativas para impedir o ataque químico foi o tratamento das fibras com agentes químicos e/ou físicos e a modificação da matriz.

A utilização de agentes acoplantes como os silanos, grafitização com peróxidos, tratamentos com álcalis ou permanganatos para aumentar a superfície exposta e a

rugosidade superficial da fibra, reduzem a absorção de água e aumenta a adesão na interface fibra-matriz (LI *et al.*, 2000). Tratamentos químicos podem ser utilizados para remoção parcial da lignina e da hemicelulose, tratamentos térmicos aumentam a cristalinidade da celulose tornando as fibras mais rígidas (RONG *et al.*, 2001). A hornificação promove alteração das propriedades físicas da fibra reduzindo o diâmetro, a absorção de água da fibra e a variação dimensional das fibras (FERREIRA, 2014). O tratamento alcalino promove a modificação da superfície da fibra, quebrando as ligações de hidrogênio, ocorrendo a despolimerização da celulose com aumento na rugosidade superficial, além de remover lignina, cera e substâncias oleosas da superfície da fibra melhorando a adesão na interface fibra-matriz (DILFI *et al.*, 2018; OUSHABI *et al.*, 2018). Outro tipo de tratamento que vem sendo estudado é a autoclavagem das fibras, em que se espera atingir um comportamento semelhante ou superior ao da hornificação, porém com a redução no tempo e no uso de energia para o tratamento. A utilização da autoclavagem tem demonstrado melhora na redução da absorção de água por fibras naturais (ALIX, 2014; MARAIS, 2004)

O uso de fibras de abacaxi para reforçar componentes na construção civil pode criar a demanda pelas fibras e, conseqüentemente, agregará valor às mesmas. Esse aumento do consumo aliado ao valor agregado proporcionará aos produtores melhores condições para manter-se nas regiões produtoras, evitando a migração dos pequenos agricultores para os grandes centros urbanos.

O objetivo deste capítulo é caracterizar e avaliar o efeito dos tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido (autoclavagem + alcalino) em tecidos de fibras de abacaxi, com perspectiva de aplicação como reforço em compósitos cimentícios. Para isto foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e térmica nas fibras, feixes e tecidos de abacaxi in natura e tratados.

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Materiais

Os materiais primários utilizados nesta etapa da pesquisa foram as fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro da espécie BRS Pérola. Diversos ensaios nos

materiais primários foram realizados para melhor caracterizá-los física e mecanicamente. As fibras, feixes e tecidos de fibras de abacaxi foram ensaiados in natura e submetidos aos tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido.

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Mandioca e Floricultura do município de Cruz das Almas – Bahia, que forneceu as fibras das folhas do abacaxizeiro, da Universidade Federal da Bahia – UFBA, da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS, que forneceram a infraestrutura necessária para realização da pesquisa, além da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

2.2.2 Obtenção e beneficiamento da fibra de abacaxi

As folhas do abacaxizeiro foram colhidas em uma plantação no município de Iaçu – Bahia, a 280 km de Salvador. Depois foram transportadas por 290 km para serem desfiadas no município de Valente – Bahia, distante 250 km de Salvador,

A extração das fibras das folhas do abacaxizeiro foi realizada na máquina "Paraibana", a mesma utilizada no desfiamento do sisal, que possui um motor à combustão ligado através de uma correia a um tambor rotativo, dotado de paletas metálicas responsáveis pela raspagem das folhas removendo a mucilagem e deixando as fibras. Esta máquina não possui dimensões propícias para as folhas de abacaxi, que são menores que as de sisal, assim os operadores inseriram de duas a três folhas ao mesmo tempo na máquina, dificultando a raspagem de todas as folhas uniformemente. As folhas que estavam mais próximas às paletas do rotor ficaram mais limpas, já as folhas que estavam por baixo, distantes das paletas do rotor, acabaram não sendo raspadas por completo, ficando com resíduos. Depois do desfiamento as fibras foram estendidas em varais de arame farpado, para secarem ao sol. Na Figura 1 é possível ver a colheita e o desfiamento das folhas de abacaxi.

Figura 1. Colheita e desfibramento das folhas do abacaxizeiro.



As fibras de abacaxi, após o desfibramento e secagem ao ar livre, foram levadas à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Mandioca e Floricultura do município de Cruz das Almas – Bahia, e posteriormente à Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS. Ao chegar à UEFS as fibras ainda estavam úmidas devido às condições climáticas nos dias do desfibramento e posterior secagem ao ar livre, sendo necessário colocá-las em uma estufa a 80 °C por 24 h para retirar a umidade e evitar que as fibras acabassem deteriorando (Figura 2). Depois de secas elas foram armazenadas em sacos plásticos para evitar contato com umidade e preservar suas características até seu uso.

Figura 2. Fibras de abacaxi antes (A) e após (B) secagem em estufa.



As fibras encontravam-se reunidas em mechas que dificultavam sua separação em feixes. Para facilitar a confecção dos feixes, as fibras foram colocadas em um reservatório com água durante 5 dias, substituindo a água a cada 24 h, ao final foram secas em varais como pode ser visto na Figura 3. O processo de confecção dos feixes melhorou um pouco, mas ainda não estava adequado, sendo necessário aprimoramentos.

Figura 3 - Fibras lavadas e dispostas no varal para secagem.



Não foi possível utilizar a bateadeira de sisal para remover as impurezas e realinhar as fibras, pois os impactos e estiramentos danificavam as fibras de abacaxi devido à sua menor espessura, comparada às fibras de sisal. Uma máquina foi desenvolvida para remover as impurezas e realinhar as fibras de abacaxi sem danificá-las. Ela possuía um motor elétrico acoplado a um tambor rotativo, onde foram fixados um par de perfis de alumínio diametralmente opostos e um par de barras roscadas também diametralmente opostas. Após a utilização desta máquina melhorou muito o alinhamento das mechas de fibras possibilitando a confecção dos feixes, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - A e B: "Batedeira"; C: Mecha após passar pela "batedeira"; D: Feixes de fibras.



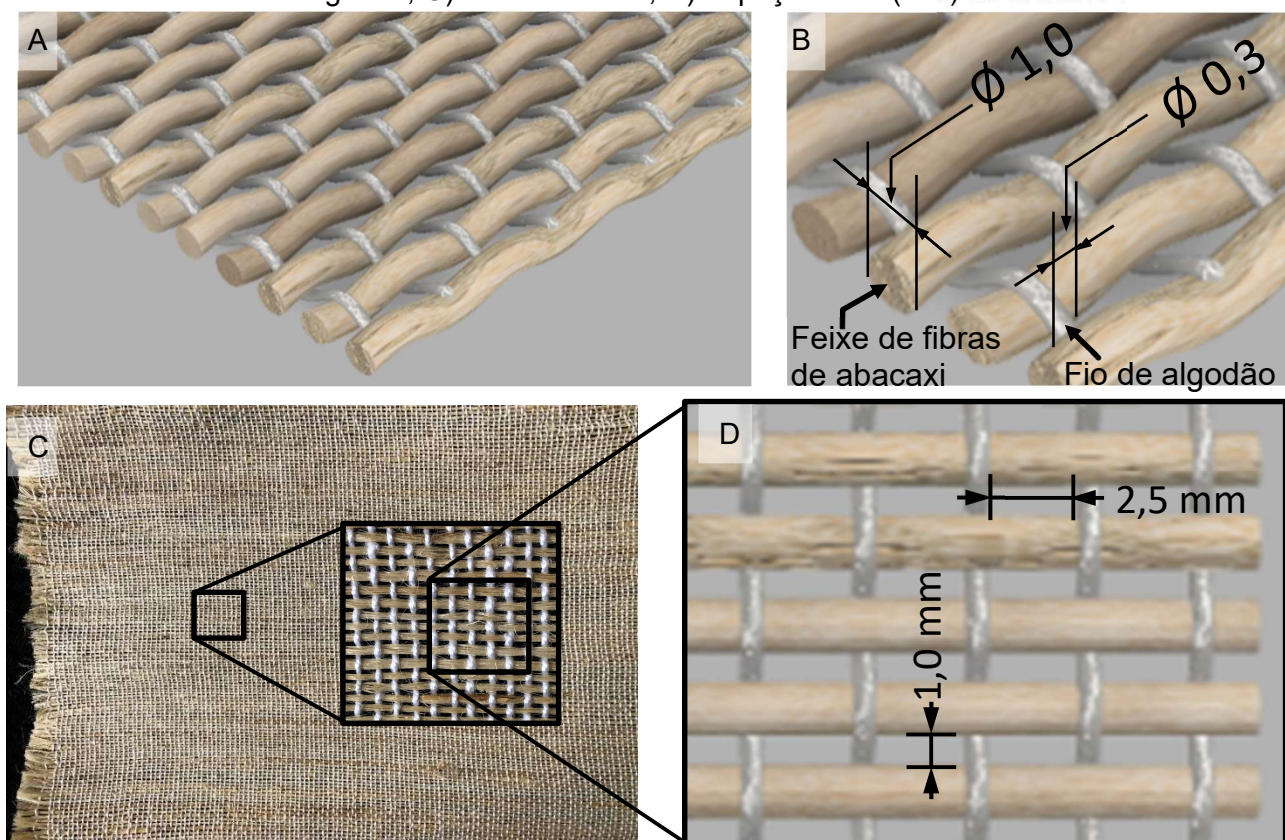
2.2.3 Produção do tecido de fibras de abacaxi

O arranjo das fibras em forma de tecido foi desenvolvido no intuito de obter um espaçamento de malha adequado que não dificultasse ou impedisse a impregnação pela matriz, disponibilizando maior quantidade de fibras para reforço, aumentando a resistência dos compósitos. Os tecidos tiveram sua confecção baseada no trabalho de Cerchiaro *et al.* (2013), Arruda Filho (2015) e Arruda Filho *et al.* (2024).

Cada feixe foi confeccionado por aproximadamente 50 fibras de abacaxi. Os feixes finalizados apresentaram diâmetro entre 0,5 mm e 1,0 mm.

Com os feixes prontos iniciou-se o desenvolvimento dos tecidos, que foram confeccionados em um tear manual, onde o urdume foi feito em fios de algodão com o espaçamento de 2,5 mm, e trama feita com os feixes de fibras de abacaxi, com espaçamento de 1 mm. Este tecido apresentou boas condições para a impregnação pela matriz cimentícia. A Figura 5 mostra uma ilustração e uma foto do tecido com detalhe para o espaçamento da trama e do urdume. Este tecido possui uma gramatura média de 193 g/m².

Figura 5. Tecido de feixes de fibras de abacaxi – A) ilustração; B) Diâmetro (mm) do feixe de fibras de abacaxi e do fio de algodão; C) Foto do tecido; D) Espaçamento (mm) do urdume e da trama.



2.2.1 Tratamento das fibras

Após serem lavados em água a 50 °C por 20 minutos, e depois secarem ao ar por 24 horas, a fim de remover enzimas e impurezas que pudessem reagir com a matriz cimentícia, as fibras, feixes e tecidos de abacaxi foram submetidos a três tratamentos: autoclavagem, alcalino e híbrido (autoclavagem + alcalino).

O tratamento de autoclavagem consistiu em deixar as fibras, feixes e tecidos em autoclave numa pressão de 1,0 bar e temperatura de 127 °C por 60 min (Figura 6), estes parâmetros foram definidos em estudos anteriores, Arruda Filho *et al.* (2022).

Figura 6. Autoclavagem das fibras de abacaxi.



O tratamento alcalino foi realizado para reduzir a absorção de água, bem como a variação dimensional das fibras de abacaxi. Este tratamento consiste em imergir as fibras, feixes e tecidos por 50 min em uma solução aquosa de hidróxido de cálcio a 0,73% depois retirá-las e deixá-las secar em temperatura ambiente (Figura 7). As fibras autoclavadas também foram submetidas ao tratamento alcalino, originando assim o tratamento híbrido.

Figura 7. Tratamento com hidróxido de cálcio.



2.2.1 Caracterização física do reforço

Determinação da massa específica das fibras

As massas específicas das fibras de abacaxi in natura e tratadas foram determinadas através do ensaio de picnometria a gás hélio, por meio do picnômetro Accupyc II 1340 da marca Micrometrics. As amostras in natura foram secas em estufa a 80 °C por 24 h antes da realização do ensaio. O Gás Hélio é empregado, pois ele é inerte e adentra com facilidade nos poros das amostras. O ensaio é realizado ao se colocar uma amostra do material com a massa previamente medida no equipamento, onde é inserido o gás hélio para determinação do volume total ocupado pelas partículas. Cinco determinações da massa específica foram realizadas em cada amostra.

Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado nas fibras de abacaxi in natura e tratadas. Quatro amostras com massa de 1 g, para cada condição das fibras, foram selecionadas para este ensaio. As massas das amostras foram pesadas em balança de precisão igual a 0,0001 g.

As amostras foram secas em estufa a 80 °C por 24 h, então foram pesadas novamente para determinar sua massa seca. Depois foram dispostas em recipientes plásticos que foram preenchidos com 100 ml de água. As amostras foram pesadas

nos tempos de 15, 30 e 45 minutos, e depois de hora em hora até completar 9 h. antes de cada pesagem o excesso de água foi removido com o auxílio de um papel absorvente. Na Figura 8 é possível observar as amostras nos recipientes plásticos.

Figura 8. Fibras imersas em água para determinação da absorção.



O cálculo da absorção foi realizado de acordo com a Equação 1.

Equação 1

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100$$

Em que:

M_i : Massa após imersão (g);

M_s : Massa seca (g).

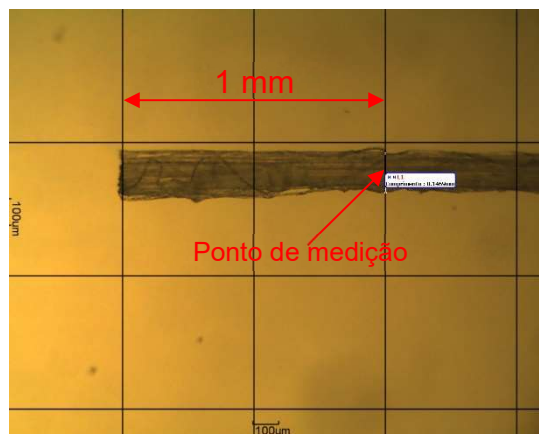
Variação dimensional

Para determinar a variação dimensional das fibras foram selecionadas 16 amostras para cada uma das condições das fibras de abacaxi. As amostras secas foram cortadas com 50 mm de comprimento, em uma das extremidades foi colocada uma etiqueta de identificação, na outra foram realizadas as medições dos diâmetros distante 1 mm do local do corte. Os diâmetros foram medidos em um microscópio ótico modelo Quimis Q7708S-4, com câmera acoplada a um computador com software Motic Image Plus 2.0.

As amostras foram dispostas em recipientes plásticos preenchidos depois com 100 ml de água. Os diâmetros foram medidos nos tempos 1 h a 6 h com medidas a

cada hora. Na Figura 9 é possível observar as amostras no microscópio durante a medição dos diâmetros.

Figura 9. Medição do diâmetro da fibra de abacaxi



Análise termogravimétrica das fibras

As fibras de abacaxi in natura e tratadas foram submetidas ao ensaio de análise termogravimétrica em um equipamento SDT Q600 da TA Instruments. Os ensaios foram realizados em um ambiente de nitrogênio com vazão de gás arraste de 100 ml/min, com taxa de aquecimento de 10 °C/min até 800 °C.

Difração de raio-X nas fibras

As fibras de abacaxi in natura e tratadas, foram submetidas ao ensaio de difração de raios-X em um difratômetro utilizando tubo de cobre e filtro de níquel. As fibras foram cortadas com comprimentos menores que 1 mm e colocadas num porta amostras. As intensidades foram medidas no intervalo para 2θ de 5° a 45°, com passo de 0,5 °/min.

Os índices de cristalinidade das fibras foram determinados de acordo com o método utilizado por Ferreira *et al.* (2015), que usou os valores de intensidade correspondentes à fase cristalina e à fase amorfa de acordo a Equação 2:

Equação 2

$$IC = \frac{I_{cr} - I_{am}}{I_{cr}} \times 100$$

Onde:

IC é o Índice de Cristalinidade (%);

I_{cr} é o valor máximo da intensidade na fase cristalina para 2θ situado entre 22° e 23° ;

I_{am} é o valor mínimo da intensidade na fase amorfa para 2θ situado entre 18° e 19° ;

Determinação da área da seção transversal do reforço.

As fibras, feixes e tecidos foram cortados em três comprimentos diferentes: 60 mm, 80 mm e 100 mm. As amostras de feixes e tecidos foram colocadas para secar em estufa a 80°C por 24 h para remover a umidade, depois tiveram suas massas medidas individualmente em balança com precisão de 0,0001 g. Com a massa seca foi possível determinar a área da seção transversal dos feixes e tecidos de acordo com a Equação 3. Para os tecidos foi descontada a massa dos fios de algodão do urdume, pois não fazem parte da seção transversal do corpo de prova.

Equação 3

$$Am = \frac{m}{\rho r \cdot L}$$

Onde:

Am = área da seção transversal;

m = massa seca;

ρr = densidade;

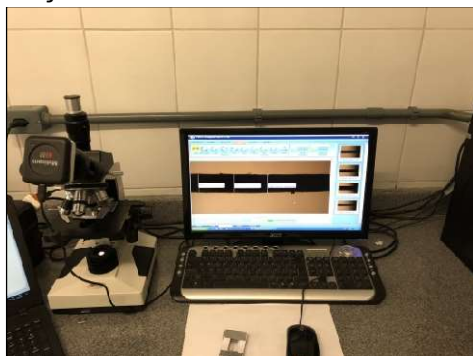
L = comprimento.

A área calculada desta forma utiliza apenas a seção de sólidos descartando os vazios. As densidades das fibras de abacaxi foram obtidas através de ensaios de picnometria a gás hélio.

Como a massa da fibra era muito pequena não foi possível medi-la, mesmo utilizando balança com precisão de 0,00001 g. Então foi utilizado um microscópio ótico modelo Quimis Q7708S-4, com câmera acoplada ao microcomputador com software

Motic Image Plus 2.0, realizando três medições do diâmetro em cada fibra e calculando o diâmetro médio, que foi utilizado para determinar a área da seção transversal da fibra. Na Figura 10 observa-se o microscópio acoplado ao computador.

Figura 10. Medição do diâmetro da fibra através de microscópio.



2.2.2 Comportamento mecânico do reforço.

Quinze fibras, feixes e tecidos de abacaxi, para cada uma das quatro condições, in natura, tratamento em autoclave, alcalilo e híbrido, e três comprimentos analisados, retirados aleatoriamente foram submetidas ao ensaio de tração direta.

O módulo de elasticidade foi calculado com valores obtidos da curva Tensão X Deformação Específica. Os valores utilizados para o cálculo do módulo de elasticidade estavam situados a 20% e 80% da tensão máxima, no trecho linear da curva onde a fibra ainda apresentava um comportamento elástico. A deformação específica foi calculada com o deslocamento da garra.

Os ensaios de tração direta nas fibras, nos feixes e nos tecidos foram realizados em uma máquina de ensaio universal servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, acoplada a um microcomputador com processador Intel – I5, com o software Trapesium X, como pode ser visto na Figura 11. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 2 mm/min.

Figura 11. Máquina de ensaios universal – Shimadzu.



Para realizar a correção do módulo de elasticidade, as fibras, feixes e tecidos foram ensaiados em três comprimentos diferentes: 30 mm, 50 mm e 70 mm. Quinze amostras foram ensaiadas para cada tipo de fibras, feixes e tecidos, para cada comprimento, tratadas e não tratadas.

Para o ensaio de tração nas fibras foi utilizada como referência a Norma ASTM D3822-07, pois ela está relacionada às fibras têxteis.

As fibras e feixes foram fixados num suporte de papel de acordo com a Figura 12, além do adesivo de cura rápida (Super Bonder Original, fabricante Loctite) cada extremidade do molde foi envolvida com fita adesiva de polietileno na cor prata, com trama de tecido e adesivo à base de resina e borracha, (Silver Tape, fabricante 3M) para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na região de fixação.

Os tecidos foram fixados com adesivo de cura rápida em pedaços de papel, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na região de fixação durante a realização do ensaio, como é possível observar na Figura 13.

Figura 12. Esquema do corpo de prova com fibra e feixes.

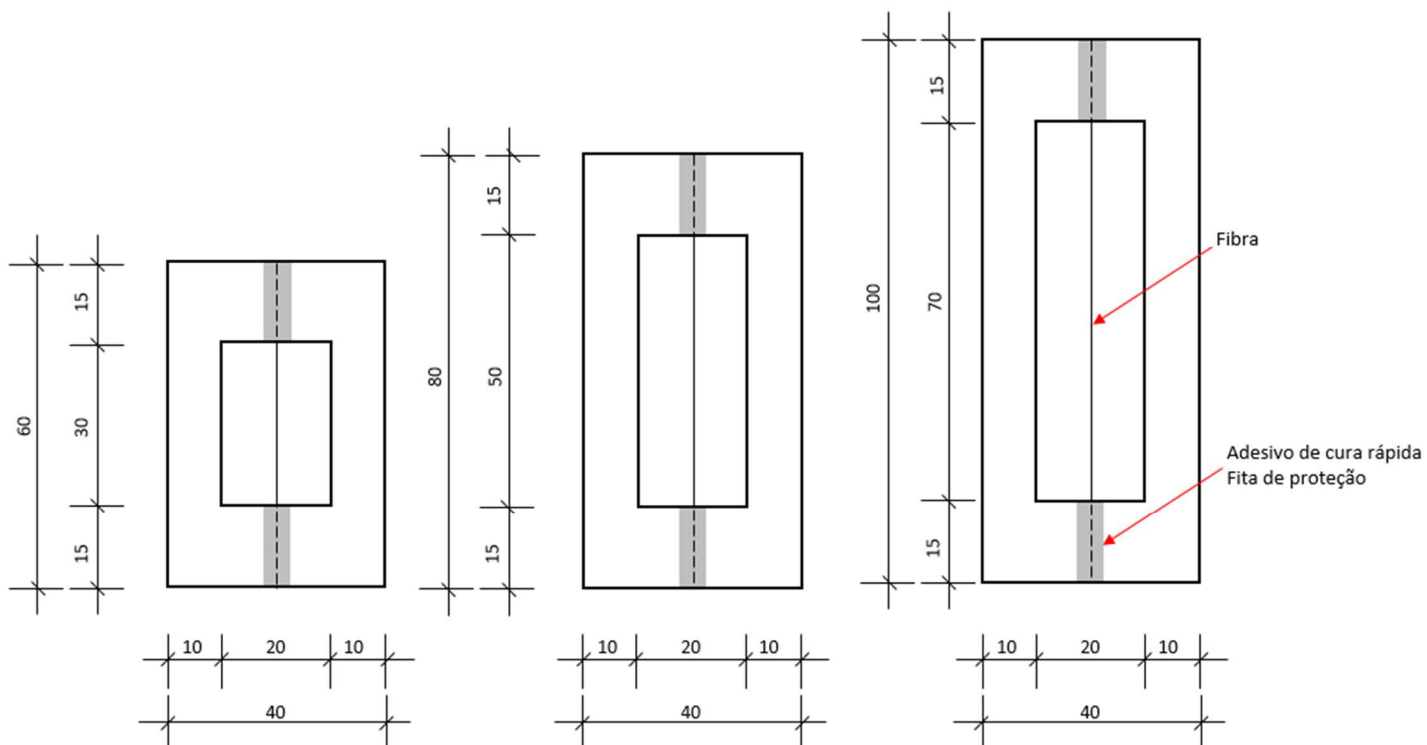


Figura 13. Corpos de prova com tecido de abacaxi, largura 40 mm, comprimentos ensaiados: 30, 50 e 70 mm. Ensaio de tração no tecido fibra vegetal.



2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Propriedades físicas das fibras de abacaxi

Os resultados médios e respectivos desvios-padrão dos ensaios para as massas específicas, absorção de água e variação dimensional das fibras de abacaxi estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Massa específica, absorção de água e variação dimensional das fibras.

Fibra	Massa Específica (g/cm ³)	Absorção de água (%) Após 3h	Varição dimensional (%) Após 3h
Abacaxi – In natura	1,5775 (0,0120)	260 (15,6)	58 (14,2)
Abacaxi – Autoclavado	1,5296 (0,0149)	245 (6,6)	35 (5,5)
Abacaxi – Alcalino	1,6013 (0,0325)	243 (7,2)	33 (2,7)
Abacaxi – Híbrido	1,6270 (0,0294)	232 (8,1)	38 (5,2)

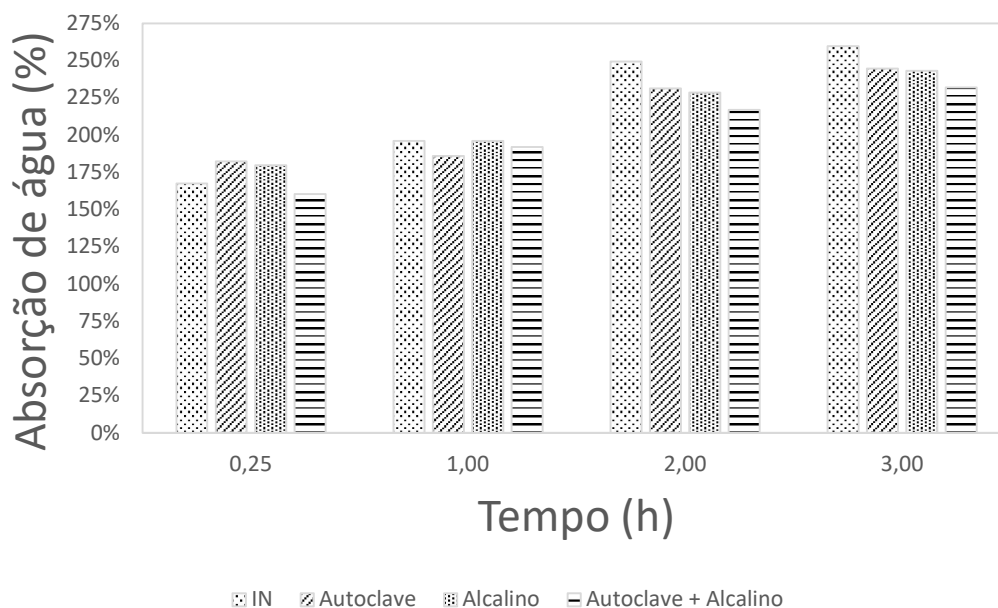
É possível observar que os tratamentos realizados nas fibras de abacaxi promoveram alterações nos valores de suas massas específicas. O tratamento de autoclave reduziu a massa específica em 3,04%.

O tratamento alcalino, por sua vez, promove um aumento da massa específica em 1,51%. Isto pode ter ocorrido pela deposição do hidróxido de cálcio sobre as fibras.

O tratamento híbrido, com o tratamento em autoclavagem sendo aplicado antes do tratamento alcalino, resultou em aumento da massa específica de 3,14% e pode ter promovido uma melhor absorção do hidróxido de cálcio durante o tratamento alcalino.

Quatro amostras, para cada condição da fibra de abacaxi, foram submetidas ao ensaio de absorção de água. A Figura 14 mostra o gráfico de absorção de água x tempo para as fibras de abacaxi in natura e tratadas.

Figura 14. Gráfico de absorção de água em função do tempo.



Na Figura 14 é possível observar que as fibras absorvem água até completar a saturação em três horas. Os tratamentos foram eficazes no objetivo de reduzir a absorção de água por parte da fibra de abacaxi. Após três horas a absorção de água das fibras de abacaxi in natura foi 260%, as fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido foram respectivamente de 245%, 243% e 232%. As fibras de abacaxi apresentaram absorção maior que as fibras de sisal analisadas por Ferreira *et al.* (2015), que tiveram absorção de 200% para fibras in natura e 165% para fibras com tratamento alcalino.

De acordo com Alix *et al.* (2014), o tratamento de autoclavagem promove uma alteração na superfície e na parte interna das fibras, removendo parte da hemicelulose e da pectina, que possuem características higroscópicas.

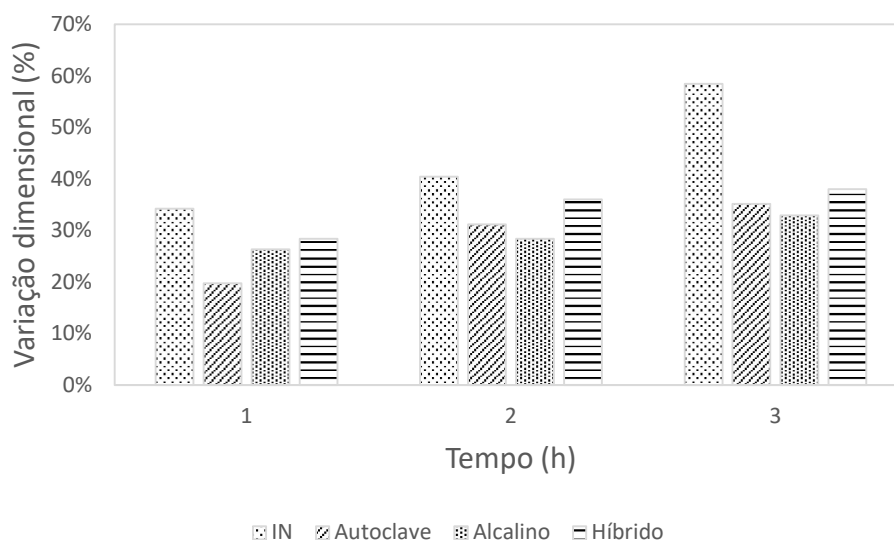
Ferreira *et al.* (2015) realizaram ensaios de absorção de água em fibras de sisal in natura e com tratamentos de hornificação, alcalino, impregnação de polímeros e híbrido (combinação da hornificação com a impregnação de polímeros) e obtiveram, respectivamente, os seguintes resultados: 200%, 170%, 165%, 150% e 100%.

O tratamento alcalino também promove a remoção de parte da hemicelulose, lignina, pectina, reduzindo a hidrofiliabilidade das fibras (KABIR *et al.* 2012). De fato, o estudo de Ferreira *et al.* (2015) identificou uma redução de 17,5% na absorção de água de fibras de sisal com a aplicação do tratamento alcalino.

O tratamento híbrido mostrou que a combinação do tratamento em autoclave somado ao tratamento alcalino proporcionou uma redução de 10,7% na absorção de água da fibra.

Os tratamentos também foram eficazes no objetivo de reduzir a variação dimensional por absorção de água das fibras de abacaxi. A Figura 15 mostra o gráfico de variação dimensional x tempo para as fibras de abacaxi in natura e tratadas.

Figura 15. Gráfico da variação dimensional em função do tempo.



Na figura acima é possível observar que as dimensões das fibras aumentam até completar três horas de saturação, mesmo intervalo medido no ensaio de absorção por imersão. Após três horas de imersão das fibras de abacaxi in natura, a variação dimensional foi 58%, as fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido foram respectivamente de 35%, 33% e 38%.

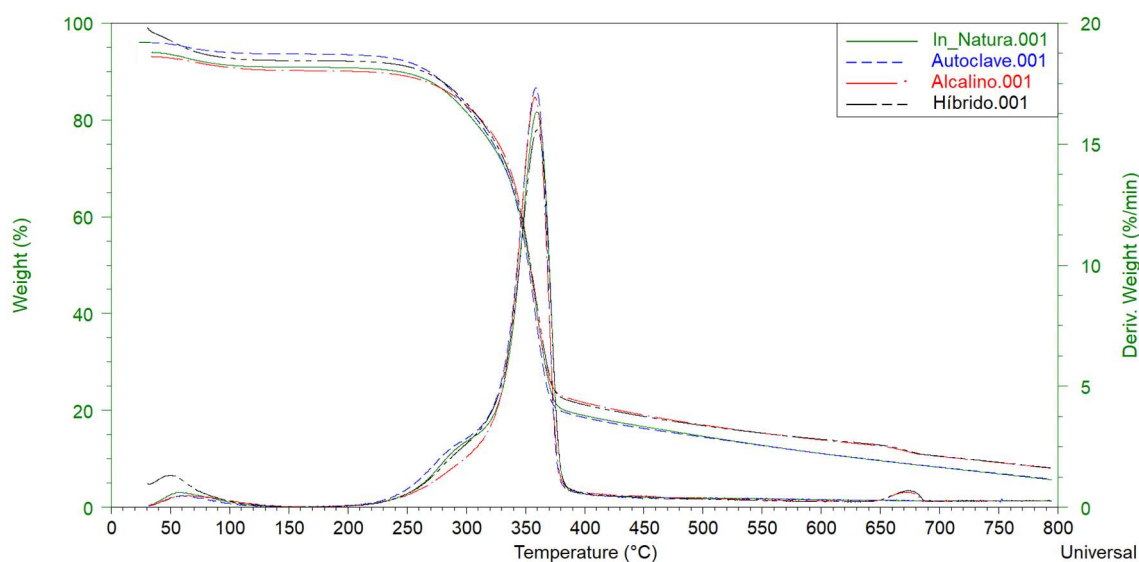
Ao contrário do que aconteceu na absorção em que o tratamento híbrido proporcionou maiores reduções que os tratamentos de autoclavagem e alcalinos separados, na variação dimensional os tratamentos de autoclavagem e alcalinos reduziram a variação dimensional em maior proporção que o híbrido.

As fibras de abacaxi in natura e com os três tratamentos foram submetidas à análise termogravimétrica, as curvas estão apresentadas na Figura 16. É possível visualizar nas curvas três faixas de temperatura onde ocorrem a degradação das fibras. O primeiro intervalo ocorre entre 30 e 100 °C que corresponde à evaporação da água

livre (Ferreira, 2015) (Rebelo, 2019). O segundo está situado entre 230 e 325 °C (Ferreira, 2015), em que acontece a degradação da hemicelulose mostrada a 300 °C, e o início da degradação da celulose, da pectina e da lignina, esta última tem sua degradação entre 250 a 600 °C (Ferreira, 2017). O terceiro situado entre 325 e 380 °C (Ferreira, 2017) corresponde a degradação da celulose, que apresenta seu pico em 360 °C (Rebelo, 2019).

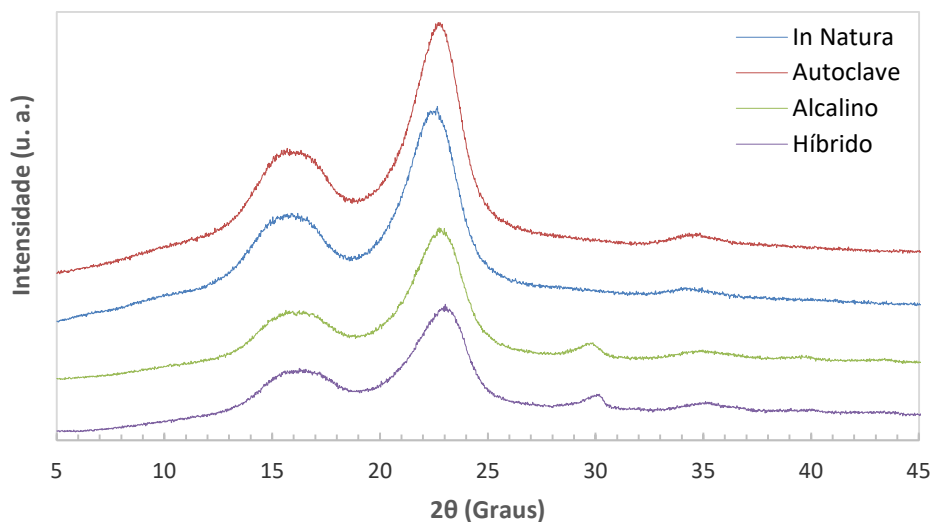
Nas fibras com tratamento alcalino e híbrido verifica-se mais um intervalo entre 655 e 690 °C, que pode estar associado a degradação do carbonato de cálcio que foi formado na reação entre o ar atmosférico e o hidróxido de cálcio utilizado para realização do tratamento alcalino (Santos, 2020). Na Figura 16 estão apresentadas as curvas de TG e DTG das fibras de abacaxi in natura e tratadas.

Figura 16. Análise termogravimétrica das fibras de abacaxi.



As fibras de abacaxi foram submetidas à difração de raios-X. Os difratogramas das fibras de abacaxi in natura e com os três outros tratamentos estão apresentados na Figura 17. É possível observar no gráfico os picos que representam os planos cristalinos dos materiais lignocelulósicos: $2\theta = 16^\circ$, 23° e 34° . Além da fase amorfa composta principalmente pela lignina presente na parede celular. Nas curvas das fibras que sofreram o tratamento alcalino é possível observar mais um pico quando $2\theta = 30^\circ$, pico característico de carbonato de cálcio, proveniente da carbonatação do hidróxido de cálcio (Santos, 2020).

Figura 17. Difratogramas de raios X das fibras de abacaxi.



Os índices de cristalinidade estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Índices de cristalinidade das fibras de abacaxi.

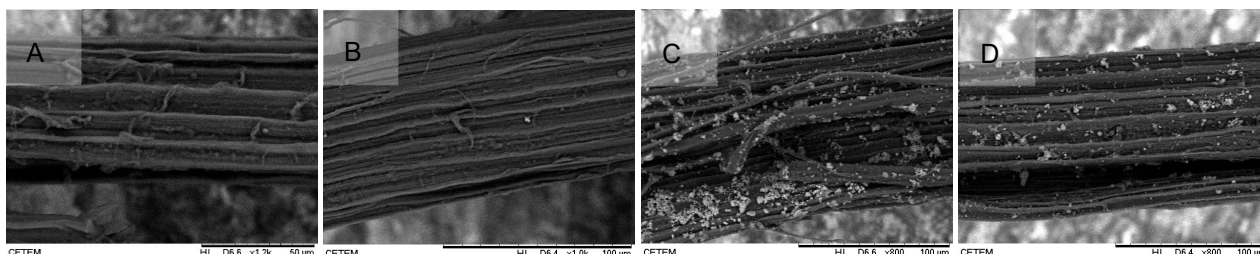
Tratamento	Índice de cristalinidade	$I_{cr} - 2\theta$ (Graus)	$I_{am} - 2\theta$ (Graus)
In Natura	66,91%	22,66	18,58
Autoclave	68,57%	22,70	18,70
Alcalino	68,60%	22,74	18,86
Híbrido	63,91%	22,96	18,54

Os índices de cristalinidade são associados à quantidade de celulose presente nas fibras, estão relacionado a resistência e rigidez, influenciando diretamente o comportamento mecânico das fibras (Cai *et al.*, 2016). Os valores obtidos para os índices de cristalinidade estão muito próximos aos encontrados por Silva (2016) que analisou 11 variedades de fibras de abacaxi encontrando valores entre 60% e 67%.

A Figura 18 apresenta as micrografias obtidas por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para verificar como ficou a superfície das fibras após a realização dos tratamentos. A Figura 18 mostra: A) a fibra de abacaxi In Natura; B) após passar no tratamento em autoclave onde é possível ver que sua superfície ficou

exposta com menos impurezas em sua superfície; C) a fibra de abacaxi após passar pelo tratamento em solução alcalina onde é possível ver depósitos de hidróxido de cálcio em sua superfície; C) a fibra de abacaxi após passar pelo tratamento híbrido.

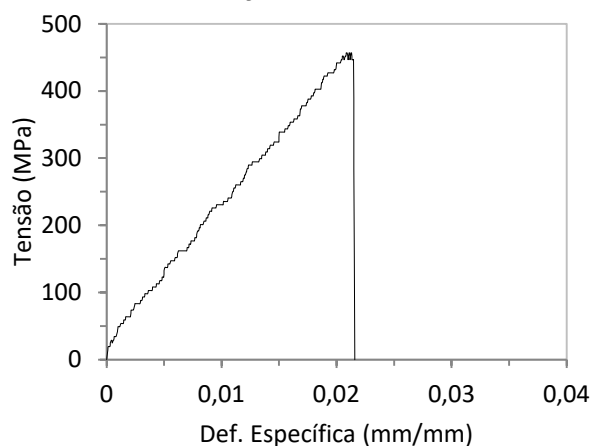
Figura 18. Fibra de abacaxi após passar no tratamento: A) em autoclave; B) Alcalino; C) Híbrido.



2.3.2 Ensaio de tração direta nas fibras

Na Figura 19 observam-se curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração direta das fibras de abacaxi. Verifica-se um comportamento elástico linear até a ruptura, similar ao observado em fibras vegetais de sisal, juta e curauá, comportamento este característico de fibras vegetais (Caldas, 2013).

Figura 19. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração na fibra in natura.



Os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: área, deformação específica, módulo de elasticidade e resistência à tração, para as fibras de abacaxi, são exibidos na Tabela 3.

Tabela 3. Ensaio de tração nas fibras de abacaxi – Média (Desv. Padrão).

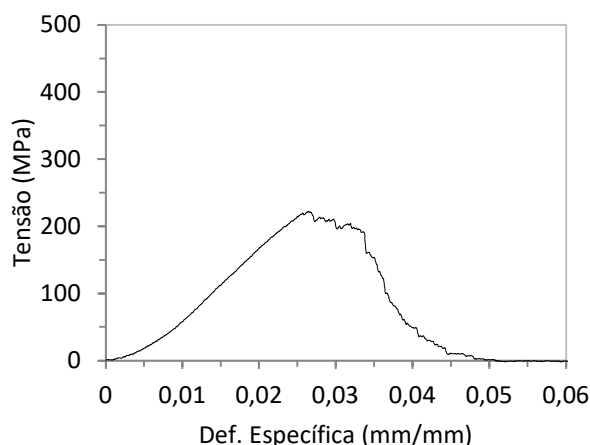
Tratamento	Comp. Ensaiado (mm)	Área (mm ²)		Tensão Máx (MPa)	Módulo de Weibull	Def. Específica (mm/mm)		Módulo de Elasticidade (GPa)		
								Individual	Corrigido	
In Natura	30	0,00637	(0,00108)	431,31	(73,34)	5,70	0,02245	(0,00177)	18,63	(3,26)
	50	0,00727	(0,00143)	295,38	(67,49)	3,89	0,02622	(0,00461)	10,85	(1,89)
	70	0,00579	(0,00157)	468,03	(72,22)	6,00	0,04362	(0,00583)	16,70	(3,04)
Autoclave	30	0,00230	(0,00060)	426,02	(98,03)	3,74	0,01485	(0,00755)	25,95	(6,49)
	50	0,00271	(0,00057)	517,58	(89,30)	5,27	0,02473	(0,00357)	26,37	(5,23)
	70	0,00302	(0,00044)	559,23	(100,47)	5,12	0,02898	(0,00602)	19,90	(3,77)
Alcalino	30	0,00805	(0,00114)	381,19	(68,87)	5,09	0,02282	(0,00316)	14,78	(2,72)
	50	0,00639	(0,00242)	385,47	(107,46)	3,20	0,02765	(0,00437)	11,93	(3,12)
	70	0,00554	(0,00171)	383,81	(64,73)	5,22	0,04060	(0,00637)	9,44	(2,64)
Híbrido	30	0,00851	(0,00247)	347,86	(97,14)	3,32	0,01929	(0,00311)	20,54	(3,91)
	50	0,00786	(0,00141)	317,99	(69,41)	3,95	0,02763	(0,00265)	12,62	(2,82)
	70	0,00830	(0,00173)	224,11	(35,68)	5,92	0,03278	(0,00528)	9,06	(1,69)

As fibras ensaiadas apresentaram um desempenho variado tanto nos parâmetros analisados quanto na geometria das curvas Tensão X Deformação. Desvios semelhantes das propriedades das fibras de sisal quando submetidas à tensão axial podem ser encontrados nos trabalhos, nos quais se supõem a hipótese da heterogeneidade química e física, além das variações de seção ao longo das fibras naturais, sendo que a parte da folha que se encontra mais próxima ao caule apresenta uma seção maior, mais antiga e com paredes celulares mais robustas. Ainda deve-se observar durante o cultivo cada planta pode ser submetida a diferentes variações climáticas, como a quantidade de chuva, variações de temperatura, de umidade, exposição ao sol, além de no desfibramento as fibras sofrerem pré-estiramentos diferentes que modificam seu desempenho, tudo isto resultará nestas variações vistas nas fibras naturais. A resistência à tração média encontrada para a fibra de abacaxi in natura foi de 431,31 MPa, e o coeficiente de variação de 17% considerado adequado por se tratar de fibras naturais.

2.3.3 Ensaio de tração direta nos feixes

Na Figura 20 observam-se as curvas obtidas nos ensaios de tração, em que o comportamento do feixe pode ser dividido em duas fases: na primeira ocorre uma acomodação das fibras que compõem o feixe com um ganho crescente de rigidez até a primeira ruptura, após a primeira ruptura inicia-se a segunda fase em que ocorre a ruptura das demais fibras sequencialmente.

Figura 20. Curva Tensão x Deformação Específica do ensaio de tração no feixe de fibras in natura.



É interessante observar que na maioria dos feixes analisados, ocorreu um aumento da resistência mesmo após a ruptura da primeira fibra, com um decréscimo posterior à medida que mais fibras foram se rompendo (Caldas, 2013).

Os resultados médios e desvios-padrões, das variáveis: área, deformação específica, rigidez e resistência à tração, para os feixes de abacaxi são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Ensaio de tração nos feixes de abacaxi – Média (Desvio. Padrão).

Tratamento	Comp. Ensaiado (mm)	Área (mm ²)		Tensão Máx (MPa)		Módulo de Weibull	Def. Específica (mm/mm)		Rigidez (GPa)	
									Individual	Corrigida
In Natura	30	0,35212	(0,04025)	233,67	(16,69)	12,73	0,02857	(0,00351)	8,80	(1,39)
	50	0,28496	(0,05268)	255,28	(22,84)	10,79	0,04251	(0,00353)	7,23	(0,76)
	70	0,27535	(0,04601)	196,38	(56,62)	3,38	0,05572	(0,00875)	4,82	(3,04)
Autoclave	30	0,32818	(0,03728)	187,30	(33,98)	5,04	0,03462	(0,00338)	6,52	(1,16)
	50	0,25750	(0,03026)	212,79	(31,58)	6,48	0,04631	(0,00478)	4,91	(0,88)
	70	0,27746	(0,03785)	217,14	(36,67)	5,55	0,05664	(0,00463)	4,82	(0,99)
Alcalino	30	0,29228	(0,05636)	158,70	(60,97)	2,40	0,03428	(0,00408)	4,98	(1,54)
	50	0,18476	(0,02760)	295,42	(48,02)	5,59	0,04947	(0,00868)	7,49	(1,10)
	70	0,25252	(0,03370)	255,38	(41,72)	5,81	0,05985	(0,00683)	5,37	(0,70)
Híbrido	30	0,26273	(0,05658)	246,89	(19,77)	11,82	0,03405	(0,00253)	8,47	(1,30)
	50	0,20490	(0,02438)	298,00	(37,83)	7,51	0,04568	(0,00529)	7,83	(1,41)
	70	0,18106	(0,02457)	272,80	(32,42)	8,07	0,05444	(0,00536)	5,94	(0,69)

Para o comprimento de 30 mm a resistência média obtida no ensaio de tração para os feixes de abacaxi in natura foi de 233,67 MPa. O resultado de rigidez para os feixes in natura de abacaxi foi de 8,80 GPa.

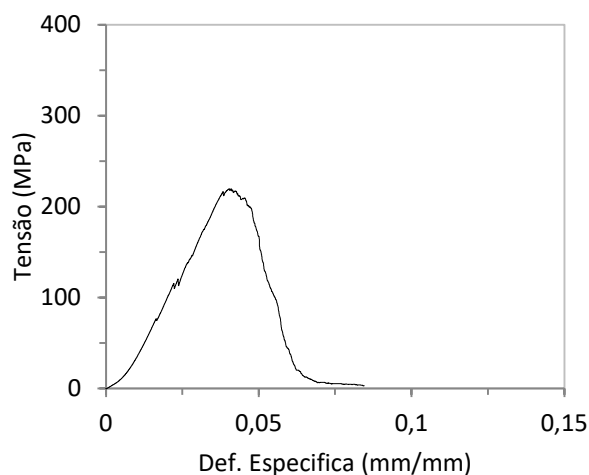
Comparando os feixes com as fibras, observa-se que estes apresentam uma redução dos valores médios do desempenho mecânico, que pode ser explicado pelo fato dos feixes serem formados por múltiplas fibras, assim quando ocorre a ruptura de cada fibra a carga que a mesma estava suportando é distribuída para as demais, além disto a área da secção transversal do feixe diminui e não é considerada esta nova área no cálculo das tensões. Esta redução na resistência dos feixes e fios quando comparados às fibras também foi observado por Fidelis *et al.* (2019) ao realizar ensaios de tração direta em fibras e fios de juta.

Os valores dos desvios-padrão e dos coeficientes de variação também foram reduzidos, pois como cada feixe é formado por diversas fibras, este número maior de fibras acaba proporcionando uma compensação estatística.

2.3.4 Ensaio de tração direta nos tecidos

Na Figura 21 apresentam-se as curvas de Tensão X Deformação Específica obtidas nos ensaios de tração direta nos tecidos de fibras de abacaxi.

Figura 21. Curva tensão x deformação específica do ensaio de tração no tecido de fibras in natura.



Os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: área, deformação específica, rigidez e resistência à tração, para os tecidos de abacaxi, são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5. Ensaio de tração nos tecidos de abacaxi – Média (Desvio. Padrão).

Tratamento	Comp. Ensaiado (mm)	Área (mm ²)	Tensão Máx (MPa)	Módulo de Weibull	Def. Específica (mm/mm)	Rigidez (GPa)	
						Individual	Corrigida
In Natura	30	3,54022 (0,23740)	232,10 (48,81)	15,67	0,04324 (0,00649)	6,83 (1,32)	
	50	2,96938 (0,21209)	198,81 (56,38)	5,70	0,05671 (0,00438)	4,24 (1,50)	8,58
	70	4,55955 (0,32708)	125,23 (24,42)	7,48	0,06949 (0,00738)	2,24 (0,48)	
Autoclave	30	4,78980 (0,20310)	146,21 (18,42)	4,79	0,03570 (0,00199)	6,10 (0,75)	
	50	4,67963 (0,32034)	153,98 (18,98)	3,56	0,04851 (0,00280)	3,76 (0,36)	9,66
	70	5,08101 (0,13860)	141,39 (8,79)	5,07	0,06822 (0,00306)	2,76 (0,23)	
Alcalino	30	4,25885 (0,22196)	170,56 (7,02)	2,40	0,03608 (0,00122)	6,28 (0,32)	
	50	4,66609 (0,25790)	181,50 (9,04)	5,59	0,05481 (0,00348)	4,34 (0,32)	6,02
	70	4,71850 (0,20633)	161,39 (9,41)	5,81	0,06807 (0,00217)	3,06 (0,13)	
Híbrido	30	5,19836 (0,13266)	138,21 (7,58)	11,82	0,03894 (0,00284)	5,08 (0,52)	
	50	5,14469 (0,13539)	143,42 (9,85)	7,51	0,05164 (0,00137)	3,63 (0,15)	6,47
	70	4,90828 (0,15418)	126,21 (6,34)	8,07	0,06858 (0,00252)	2,68 (0,12)	

Pode ser observado na Tabela 5 que foi obtido um desvio padrão baixo para todas as medidas. Isto ocorreu, pois os tecidos utilizados possuíam diversas fibras em cada feixe, logo a variação de diâmetros de cada fibra se torna um fator menos relevante, devido à compensação estatística dos diâmetros em torno de um valor médio.

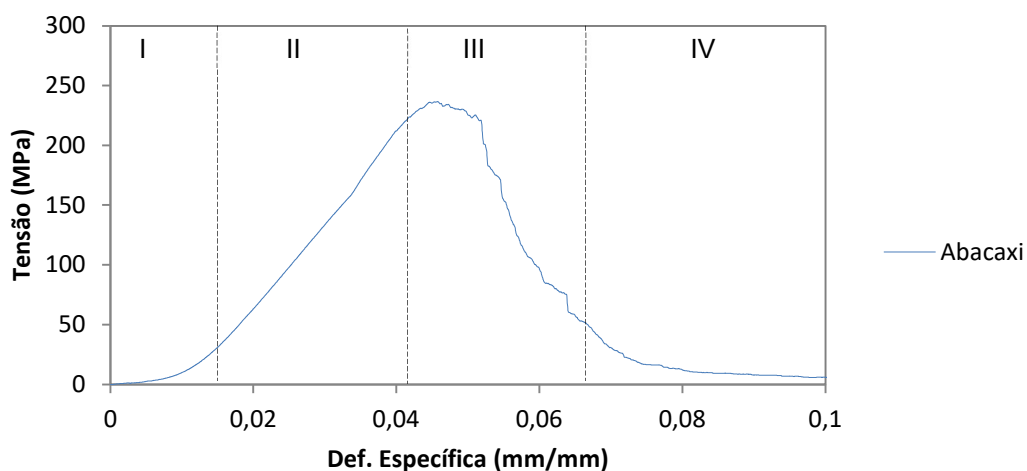
Pode ser notado que em cada feixe do tecido, as rupturas ocorrem em algumas fibras individuais quando alcançam sua resistência máxima. Esse comportamento ocorre devido às pequenas diferenças no diâmetro, constituição e microestrutura de cada fibra, resultando na variação das tensões máximas suportadas pelo tecido.

Analisando as curvas de Tensão X Deformação (Figura 22) observam-se quatro fases distintas durante o ensaio de tração nos tecidos abacaxi:

- Na fase I ocorre a acomodação das fibras dentro dos feixes do tecido, além do realinhamento das fibras da trama, que antes estavam desalinhadas por causa do urdume de algodão, se realinham devido ao carregamento, com um aumento gradual da tensão e da rigidez;
- Na fase II ocorre o aumento da tensão, da deformação e da rigidez, até o início da ruptura das fibras;
- Na fase III inicia-se o processo de ruptura das fibras do tecido;
- Na fase IV ocorre um escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, pois a maior parte das fibras, senão todas, já romperam. Vale lembrar que a deformação específica média na ruptura das fibras individuais foi de 0,06949 mm/mm. Mesmo considerando a acomodação inicial das fibras na fase I, seriam poucas as fibras que iriam romper com uma deformação específica acima de 0,075 mm/mm.

A Figura 22 mostra cada uma das quatro fases.

Figura 22. Fases do comportamento do tecido de feixes de abacaxi in natura submetido à tração.

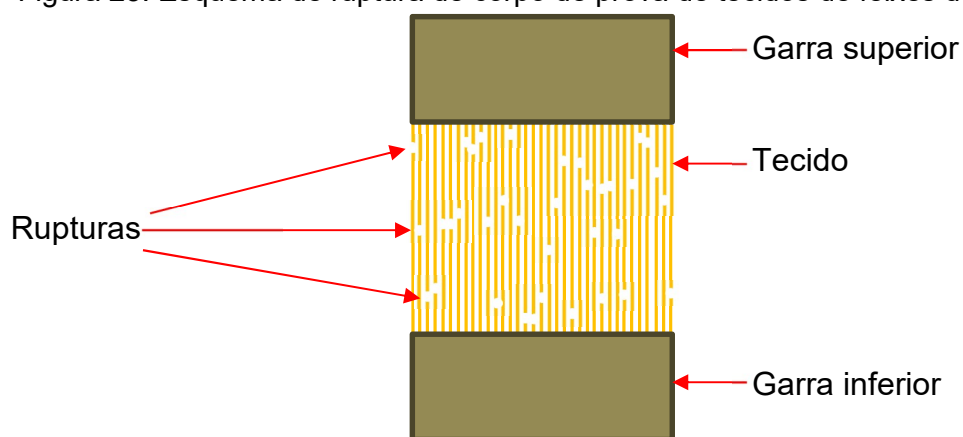


Quando os tecidos são comparados às fibras e feixes, os módulos de elasticidade e a resistência à tração são menores. Isto ocorre devido à própria conformação dos tecidos, que são formados por feixes de fibras entrelaçados por fios de algodão do urdume, onde é necessário um realinhamento maior até que todas as fibras passem a contribuir com a resistência ao carregamento.

Devido ao entrelaçamento da trama com o urdume, mesmo com o rompimento de todas as fibras do tecido, este não se rompe por completo, pois o rompimento de cada fibra não ocorre no mesmo ponto, mas em espaçamentos diferenciados. Como existe um fio de algodão entrelaçando as fibras, a força de atrito mantém o tecido unido, porém com perda de resistência à medida que aumenta o deslocamento.

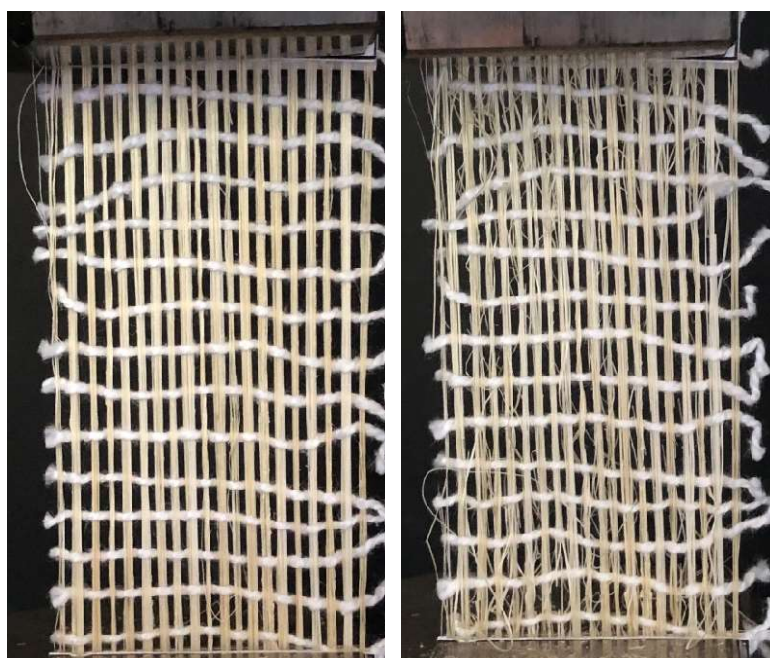
Na Figura 23 está ilustrado um corpo de prova de tecidos de feixes de fibras naturais com as rupturas devido ao ensaio de tração.

Figura 23. Esquema de ruptura de corpo de prova de tecidos de feixes de fibras naturais.



A Figura 24 apresenta um corpo de prova de tecido de feixes de fibras de abacaxi antes e após o ensaio de tração direta. Os feixes de fibras de abacaxi estão unidos transversalmente por fios de algodão do urdume. No início, as fibras estão integras, após aplicação de carga observa-se que as rupturas das fibras não ocorrem no mesmo lugar, algumas mais acima, outras mais abaixo, outras na parte central do corpo de prova. Devido à presença do urdume de fios de algodão, mesmo após todas as fibras estarem rompidas ainda existe uma força de atrito entre as fibras, e entre as fibras e os fios do urdume, que mantem o sistema com certa resistência à tração, que vai reduzindo à medida que o deslocamento aumenta

Figura 24. Tecido antes e após o ensaio de tração direta.



2.4 ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DO REFORÇO - PROBABILIDADE DE RUP-TURA DO REFORÇO

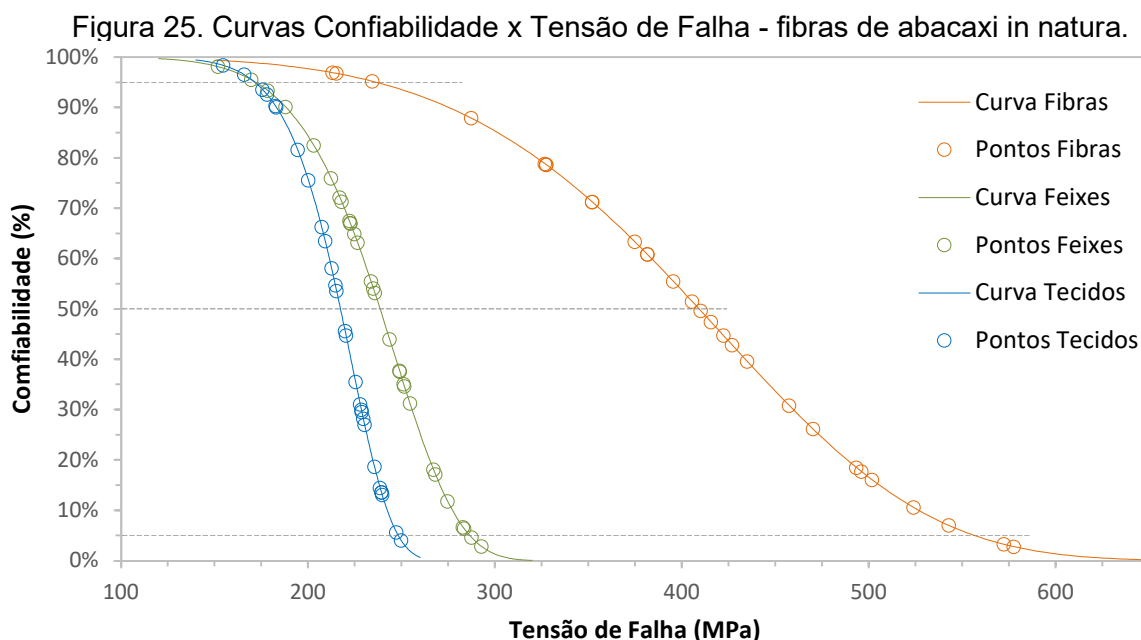
2.4.1 Efeito do tipo de arranjo – fibras únicas, feixes de fibras e tecidos – na variabilidade dos resultados nos ensaios de tração direta.

Para avaliar o efeito do tipo de arranjo – fibras únicas, feixes de fibras e tecidos – na variabilidade dos resultados nos ensaios de tração direta utilizou-se as curvas de distribuição de Weibull, que são métodos estatísticos com curvas de probabilidade

contínua, utilizados na indústria para a determinação da confiabilidade de um determinado material, buscando determinar o desempenho, tempo de vida médio e as taxas de falhas na amostra analisada.

A partir dos resultados do ensaio de tração foi possível traçar a curva Confiabilidade x Tensão de Falha através da distribuição de Weibull. Com as curvas foi possível determinar as tensões referentes à confiabilidade de 95%, 50% e 5% e assim analisar a variabilidade dos tipos de arranjos ensaiados.

A Figura 25 mostra as curvas de Confiabilidade x Tensão de Falha respectivamente das fibras, feixes e tecidos de abacaxi in natura.



Com base nas curvas de Confiabilidade x Tensão de Falha observa-se que a medida que são acrescentadas mais fibras ao corpo de prova (para fibras apenas uma única, para o feixe aproximadamente 50 fibras e para o tecido aproximadamente 800 fibras) a resistência à tração cai significativamente, isto acontece devido às regras de compartilhamento de carga, onde ocorre a perda de resistência das amostras iniciais para serem compartilhadas pelas outras fibras, (FIDELIS *et al.*, 2019).

Porém através da distribuição de Weibull, mostrada por meio das curvas Confiabilidade x Tensão de Falha, é possível observar que o grau de variabilidade dos resultados é consideravelmente reduzido ao se trabalhar com feixes, e principalmente tecidos, o que torna mais adequado o seu uso para a produção industrial de compósitos cimentícios.

Na Figura 26, Figura 27 e Figura 28 estão apresentadas respectivamente as curvas das fibras, feixes e tecidos de abacaxi para cada uma das condições estudadas.

Figura 26. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Fibras de abacaxi.

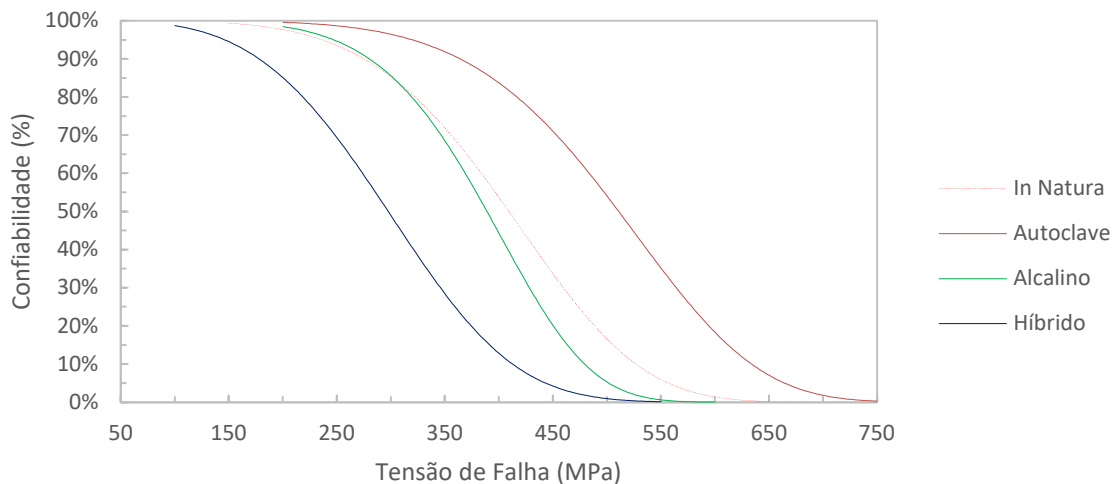


Figura 27. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Feixes de abacaxi.

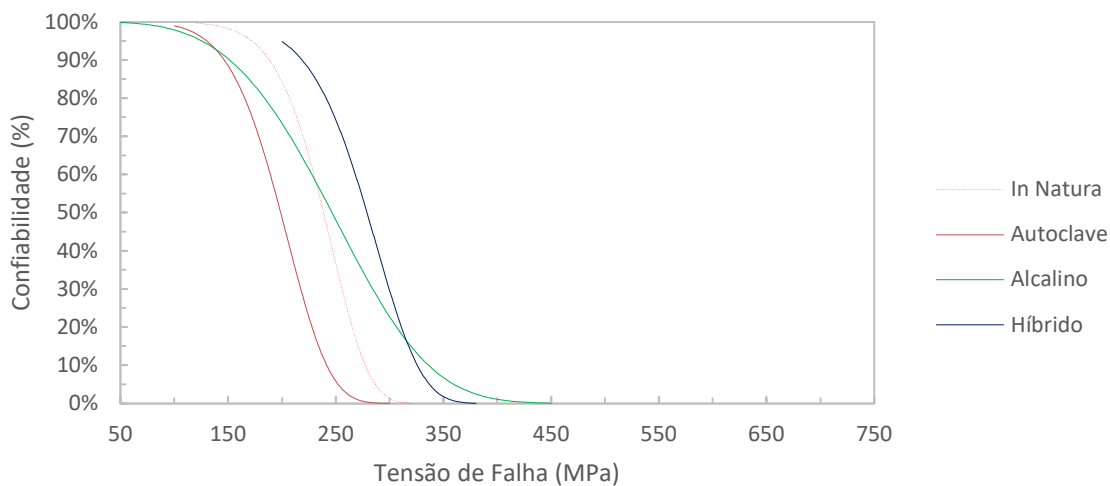
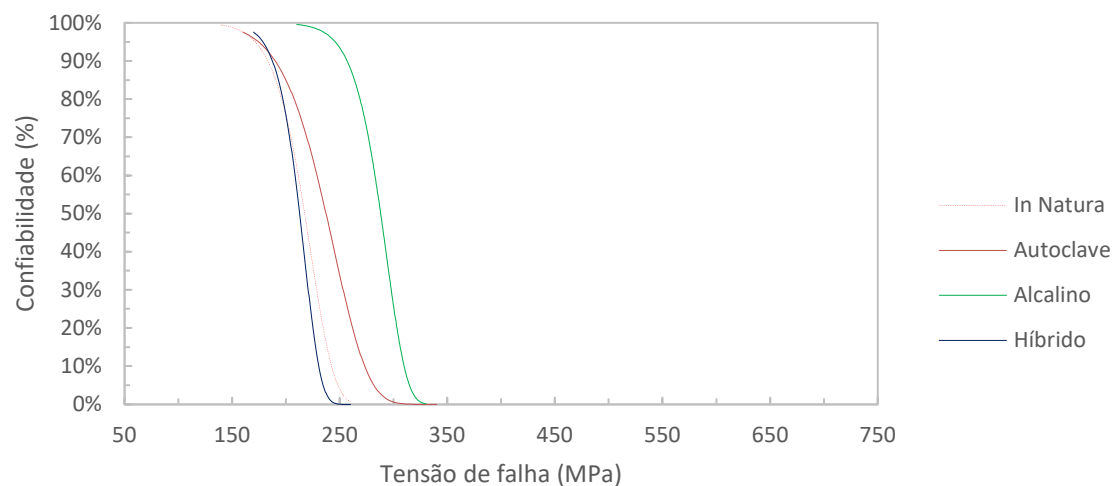


Figura 28. Curvas Confiabilidade x Tensão de Falha. Tecidos de abacaxi.



A Tabela 6 apresenta as tensões de falha referentes a confiabilidade de 95%, 50% e 5% para as fibras, feixes e tecidos de abacaxi nas quatro condições estudadas.

Tabela 6. Tensões de falha das fibras, feixes e tecidos de abacaxi.

Condições Estudadas		Tensão de Falha (MPa)		
		Confiabilidade 95%	Confiabilidade 50%	Confiabilidade 5%
Fibras	In Natura	235,86	407,58	554,04
	Autoclave	316,67	511,11	661,11
	Alcalino	244,44	389,90	498,99
	Híbrido	145,45	295,45	440,91
Feixes	In Natura	170,51	237,17	285,56
	Autoclave	128,28	198,99	251,52
	Alcalino	122,28	245,45	359,09
	Híbrido	218,18	278,18	336,36
Tecido	In Natura	170,30	217,58	247,88
	Autoclave	172,73	236,36	281,82
	Alcalino	245,15	287,58	314,24
	Híbrido	178,18	212,73	234,55

De acordo com os resultados dos ensaios de tração nas fibras de abacaxi, verifica-se que para confiabilidade de 95% o tratamento de autoclavagem apresentou um acréscimo de 34,3% na resistência à tração, o tratamento alcalino um pequeno acréscimo de 3,6%, enquanto o tratamento híbrido, apresentou uma redução de 38,3% na resistência à tração das fibras de abacaxi, quando comparamos com as fibras in natura.

Para os feixes de abacaxi verifica-se que para confiabilidade de 95%, o tratamento híbrido apresentou um acréscimo de 28% na resistência à tração, enquanto os feixes com tratamentos alcalino e em autoclave apresentaram reduções de 28% e 28,8% respectivamente, na resistência a tração dos feixes de abacaxi.

Para os tecidos de fibras de abacaxi verifica-se que para confiabilidade de 95%, o tratamento de autoclavagem apresentou um pequeno acréscimo de 1,4% na resistência à tração, o tratamento alcalino um acréscimo de 44,0%, enquanto o tratamento híbrido, apresentou um acréscimo de 4,6% na resistência a tração das fibras de abacaxi.

2.5 CONCLUSÕES

Os tratamentos realizados promoveram alterações nas fibras reduzindo a absorção de água de 260% da fibra in natura para de 245%, 243% e 232% para fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido respectivamente. A variação dimensional por absorção de água também foi reduzida de 58% para fibras in natura para de 29%, 29% e 38% para fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido respectivamente. Os índices de cristalinidade não sofreram grandes alterações devido aos tratamentos.

Em relação ao comportamento à tração nas fibras, feixes e tecidos de abacaxi, verificou-se através da distribuição de Weibull os arranjos em tecido oferecem menor variabilidade nos resultados quando comparados às fibras e feixes.

3 INTERAÇÃO ENTRE REFORÇO E MATRIZ

No capítulo anterior foram apresentados os tecidos confeccionados a partir das fibras das folhas do abacaxizeiro, desde a colheita das folhas, passando pelo desfiamento, beneficiamento das fibras, produção dos feixes e a confecção dos tecidos. Foram mostrados os tratamentos realizados e sua influência nas propriedades físicas e mecânicas nas fibras, feixes e tecidos de fibras de abacaxi.

Neste terceiro capítulo são apresentados os estudos de aderência entre os feixes e tecidos de fibras de abacaxi e a matriz cimentícia que utilizada para conformação dos compósitos cimentícios.

3.1 INTRODUÇÃO

O uso de fibras naturais para reforçar compósitos cimentícios proporcionam melhorias em suas propriedades mecânicas, pois as matrizes cimentícias são frágeis e as fibras combatem os esforços de tração. As fibras longas no arranjo em tecidos conseguem combater a abertura de fissuras transmitindo os esforços para outros pontos do compósito, funcionando como pontes que previnem e retardam o processo de abertura de fissuras nos compósitos, melhorando assim sua resistência à tração, flexão e tenacidade.

As fibras naturais são materiais sustentáveis e apresentam as vantagens de serem renováveis, biodegradáveis, exigem poucos recursos no cultivo e beneficiamento, podendo ser produzidas em grande escala em países com clima tropical como o Brasil. Porém, devido ao alto grau de hidrofiliidade, elas apresentam grande variação dimensional ocasionada pela absorção e perda de umidade, que leva a uma baixa adesão com as matrizes.

A interface fibra-matriz é a região onde os esforços são transmitidos entre a matriz e o reforço. Ela é afetada diretamente pelo tipo de fibra, suas características geométricas e morfológicas, rugosidade da superfície, comprimento de embebiamento e orientação, além da composição química da matriz (FIDELIS *et al.*, 2019). As propriedades geométricas e mecânicas de fibras naturais como o sisal, o curauá e a juta, que governam o comportamento de adesão dessas fibras embebidas em matriz cimentícias, são comparáveis a de fibras industrializadas já empregadas como reforço de

compósitos cimentícios (FERREIRA *et al.*, 2018). A adesão fibra-matriz também é influenciada de acordo com o arranjo em que a fibra é utilizada, se na forma de fibra única, fios, feixes ou tecidos.

Para melhorar o comportamento da interface, diversos tratamentos têm sido utilizados nas fibras naturais buscando reduzir a absorção de água e conseqüentemente a variação dimensional, dentre eles estão o tratamento alcalino e o tratamento em autoclave.

Ensaio de arrancamento são fundamentais para investigar o comportamento da interface fibra-matriz. O tempo de cura e o comprimento de embebedimento influenciam diretamente no comportamento de arrancamento, para fibras de sisal embebidas em matriz cimentícia, com comprimentos de embebedimento de 10, 20, 30 e 40 mm, nas idades de 3 à 28 dias, foi verificado que o aumento do comprimento de embebedimento resultou no aumento da força de extração para os comprimentos até 30 mm, não observando aumento significativo de força para o comprimento de 40 mm, e capacidade de adesão máxima foi alcançada aos 14 dias de cura (SILVA *et al.*, 2010).

O tratamento de hornificação tem sido utilizado como forma de reduzir a variação dimensional das fibras naturais e conseqüentemente melhorar a aderência na interface fibra-matriz. Ferreira *et al.* (2014) verificaram que após dez ciclos de hornificação a adesão na interface de fibras de sisal embebidas em matrizes cimentícias aumentou entre 40% e 50%.

A utilização de polímeros como tratamento de fibras e fios de juta proporcionou melhor adesão química entre a fibra e a matriz, nos fios, o comportamento foi ainda mais eficiente, pois este tratamento proporcionou a ativação das fibras internas que não faziam contato direto com a matriz (FIDELIS *et al.*, 2019).

O comportamento da interface fibra-matriz nos compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais vegetais devem ser estudados para compreender melhor a interação entre as fibras de abacaxi e a matriz cimentícia.

O objetivo deste capítulo foi estudar os efeitos dos tratamentos empregados de autoclavagem, alcalino e híbrido na interface fibra-matriz. Para isto foram realizados ensaios de arrancamento (*pull-out*) de feixes e tecidos de abacaxi embebidos em matriz cimentícia.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Materiais

Os materiais primários utilizados nesta etapa da pesquisa são as fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro, que foram beneficiadas para a produção dos feixes e tecidos além dos componentes da matriz cimentícia.

3.2.1.1 Reforço

O reforço utilizado foram os feixes e tecidos de fibras de abacaxi. Sua caracterização, propriedades mecânicas, e os tratamentos já foram apresentados e discutidos no capítulo 2 desta tese.

3.2.1.2 Matriz

A matriz cimentícia utilizada nesta pesquisa foi baseada no trabalho de Lima (2018). É uma matriz adequada para trabalho com fibras naturais pois, em sua composição estão presentes materiais pozolânicos responsáveis por consumir o hidróxido de cálcio livre além de baixar a alcalinidade da matriz, ajudando a proteger as fibras aumentando a durabilidade dos compósitos.

O traço utilizado nesta matriz foi: 1 : 0,2 : 0,8 : 2 : 0,7 (cimento : sílica ativa: cinza volante : areia : água). Foi utilizado também o superplastificante Vedacit Adiment Premium (teor de 0,8% em relação à massa de cimento) e o agente modificador de viscosidade (teor 0,07% em relação à massa de cimento). Os componentes individuais da matriz foram caracterizados pelo pesquisador Igor Machado da Silva Parente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPEC, da Universidade Federal da Bahia – UFBA.

As características dos componentes da matriz estão descritas a seguir:

3.2.1.3 Cimento Portland, Sílica Ativa e Cinza Volante.

Nesta pesquisa foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), fabricante Mizu. A sílica ativa foi adquirida no comércio de Salvador, seu fabricante foi a Companhia de Ferro-ligas da Bahia (FERBASA), localizada no município de Pojuca (BA). A cinza volante foi adquirida no município de Capivari de Baixo – Santa Catarina, fabricante Pozo Fly.

O cimento, a cinza volante e a sílica ativa tiveram suas massas específicas medidas por meio de picnometria a gás hélio, no mesmo equipamento onde foram realizados os ensaios das fibras. Suas áreas superficiais foram obtidas através do método BET (BRUNAUER; EMMETT; TELLER), utilizando um analisador de área superficial e porosidade modelo Gemini VII da Micromeritics, sob pressão de 17 psi. O gás utilizado foi o nitrogênio.

As características físicas do cimento, sílica ativa e da cinza volante estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7. Características físicas do cimento, sílica ativa e da cinza volante.

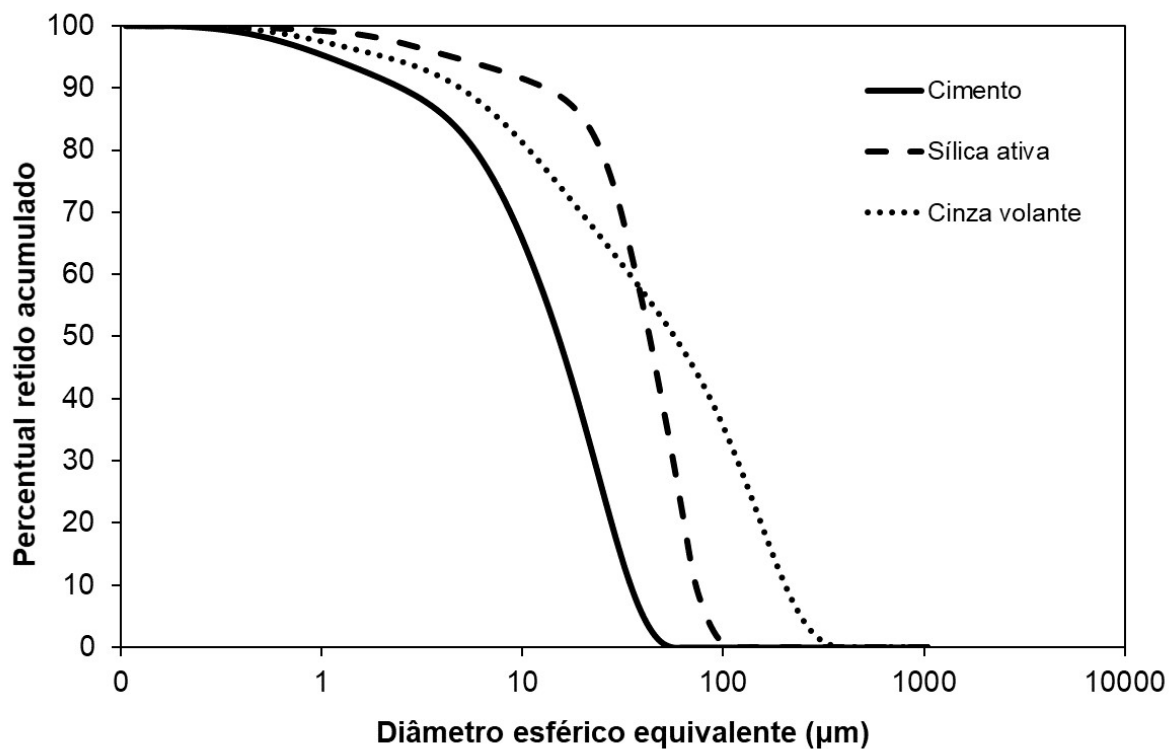
Característica	Cimento	Sílica ativa	Cinza volante
Superfície específica BET (m ² /g)	1,36	15,15	0,76
Massa específica (g/cm ³)	3,14	2,32	2,15
Diâmetro esférico equivalente (D ₁₀) (µm)	33,15	71,31	198,00
Diâmetro esférico equivalente (D ₅₀) (µm)	15,41	42,79	55,24
Diâmetro esférico equivalente (D ₉₀) (µm)	2,27	11,94	4,89

Fonte (Parente, 2020).

A granulometria do cimento, da sílica ativa e da cinza volante foram caracterizadas em um granulômetro a laser Mastersizer 3000E da marca Malvern, com faixa de detecção entre 0,1 a 1000 µm, com dispersão em água, que possui o índice de refração igual a 1,33. Na Figura 29 é possível observar a distribuição dos tamanhos de partícula do cimento, da sílica ativa e da cinza volante.

A composição química do cimento, da sílica ativa e da cinza volante foi determinada por espectroscopia por fluorescência de raios-X (FRX). Os ensaios de FRX foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) do Instituto Federal da Bahia (IFBA). O modelo do equipamento foi o FRX S2 Ranger, fabricante BRUKER. A Tabela 8 mostra a composição química do cimento, da sílica ativa e da cinza volante, determinada pela técnica de fluorescência de raios-X (FRX).

Figura 29. Distribuição dos tamanhos de partículas do cimento, da sílica ativa e da cinza volante.



Fonte (Parente, 2020).

Tabela 8. Composição química principal do cimento, sílica ativa, cinza volante.

Material	Cimento	Sílica ativa	Cinza volante
SiO ₂	16,18	85,51	56,61
Al ₂ O ₃	3,76	1,47	27,15
Fe ₂ O ₃	3,77	5,13	6,27
CaO	64,28	0,30	1,58
MgO	4,90	1,40	1,70
K ₂ O	1,05	1,90	3,11
SO ₃	4,83	0,53	0,64
Na ₂ O	0,60	2,10	1,10
Outros	0,63	1,66	1,84

Fonte (Parente, 2020).

3.2.1.4 Agregados

O agregado utilizado nesta pesquisa foi a areia quartzosa com dimensão máxima característica de 1,2 mm, proveniente do município de Alagoinhas, comumente empregada em construções na cidade de Feira de Santana. Sua massa específica foi determinada de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009a). A granulometria foi determinada por peneiramento manual, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com a determinação do módulo de finura.

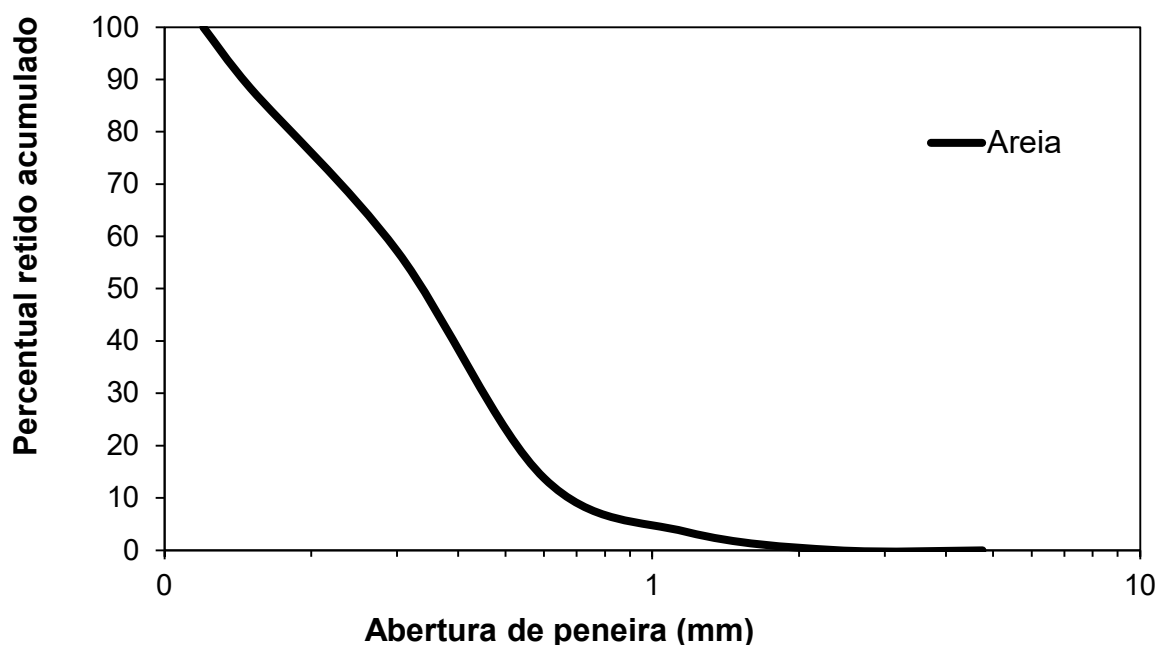
A Tabela 9 apresenta as características físicas da areia utilizada para preparação da matriz. A Figura 30 mostra as distribuições granulométricas da areia.

Tabela 9. Características físicas da areia.

Característica	Areia
Massa específica (g/cm ³)	2,61
Dimensão máxima característica (mm)	1,20
Módulo de finura	1,64

Fonte (Parente, 2020).

Figura 30. Distribuição dos tamanhos de partícula da areia.



Fonte (Parente, 2020).

3.2.1.5 Superplastificante e Agente Modificador de Viscosidade.

A matriz autoadensável foi obtida empregando-se um dispersante à base de poliacarboxilatos (superplastificante Adiment Premium - Vedacit®). Este superplastificante apresenta massa específica igual $1,09 \text{ g/cm}^3$ e proporção de 70% água e 30% sólidos, de acordo com os dados do fabricante. Com o objetivo de reduzir a exsudação, evitar a segregação e manter a coesividade da argamassa, foi utilizado um agente modificador de viscosidade (Rheomac UW 410), fabricado pela empresa BASF. É um produto com base química de polímeros de celulose, com alto peso molecular e apresenta-se em forma de pó com cor branca.

3.2.1.6 Água.

A água utilizada no preparo das matrizes cimentícias foi proveniente da rede de abastecimento de água potável da Universidade Estadual de Feira de Santana.

3.2.2 Produção da Matriz

O processo de produção da matriz foi realizado em uma argamassadeira de 5 litros, durou 10 min do início ao fim do preparo, de acordo com as seguintes etapas:

1. Mistura dos aglomerantes;
2. Homogeneização em argamassadeira na velocidade 1 (125 rpm)
3. Adição da água mais superplastificante durante 1 min.
4. Adição da areia durante 1 min.
5. Homogeneização por 2 min e desligar a argamassadeira.
6. Desaglomeração manual e adição de VMA durante 1 min.
7. Homogeneização na velocidade 2 (220 rpm) durante 5 min.

3.2.3 Métodos de ensaios

3.2.3.1 Absorção por imersão

Os valores correspondentes aos resultados do ensaio de absorção por imersão foram obtidos de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005) estão descritos na Tabela 10.

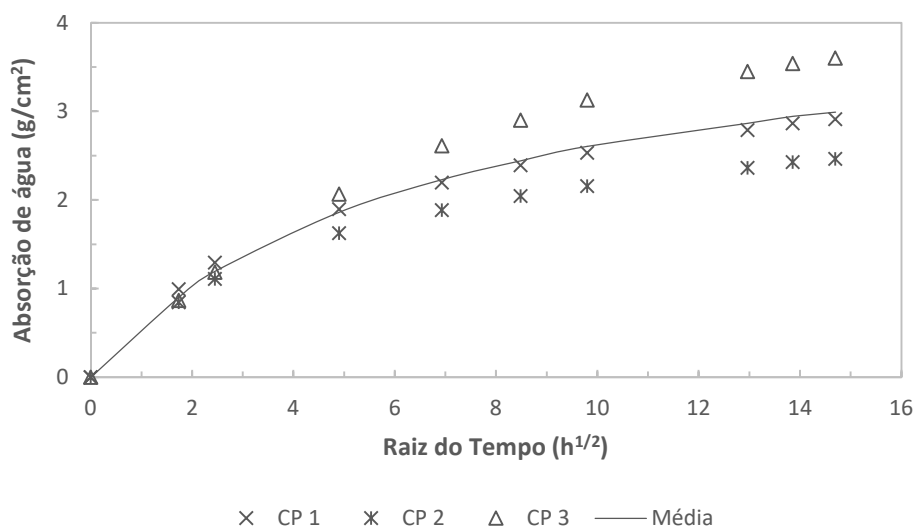
Tabela 10. Absorção por imersão.

Absorção (%)	Massa Espec. Amostra Seca (g/cm ³)	Massa Espec. Amostra Sat. (g/cm ³)	Massa Espec. Real (g/cm ³)
13,83(0,30)	1,84(0,02)	2,09(0,01)	2,47(0,01)

3.2.3.2 Absorção por capilaridade.

Os valores correspondentes aos resultados do ensaio de absorção por capilaridade foram obtidos de acordo com a NBR 9779 (ABNT, 1995), e estão apresentados na Figura 31.

Figura 31. Absorção de água matriz x raiz do tempo.



3.2.3.3 Resistência à compressão e flexão em três pontos.

Os valores correspondentes aos resultados do ensaio de flexão de corpos de prova prismáticos foram obtidos de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 1994b), e em relação a resistência à compressão de corpos de prova prismáticos foram obtidos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 1996). Os valores médios estão apresentados na Tabela 11, os desvios-padrão estão apresentados entre parênteses.

Tabela 11. Resistência à compressão e flexão em três pontos.

Parâmetros	Tempo de cura	
	7 dias	28 dias
Resistência à flexão corpos de prova prismáticos (MPa)	6,96(0,34)	10,66(0,47)
Resistência à compressão de corpos de prova prismáticos (MPa)	20,43(0,98)	34,39(1,00)

3.2.4 Ensaio de Arrancamento – (Pull-out) nos feixes

Os ensaios de arrancamento possibilitaram analisar o comportamento de aderência na interface fibra-matriz, os ensaios foram realizados nos feixes e tecidos de fibras de abacaxi. Os feixes e tecidos tiveram o comprimento embebido na matriz de 10 mm, 20 mm e 30 mm. Doze corpos de prova de feixes e de tecidos foram ensaiados para cada um dos três comprimentos, em cada uma das quatro condições apresentadas (in natura, tratamento em autoclave, alcalino e híbrido).

3.2.4.1 Preparação dos corpos de prova.

Os feixes foram cortados com comprimento de 100 mm e as áreas de suas seções transversais foram determinadas da mesma maneira que no ensaio de tração.

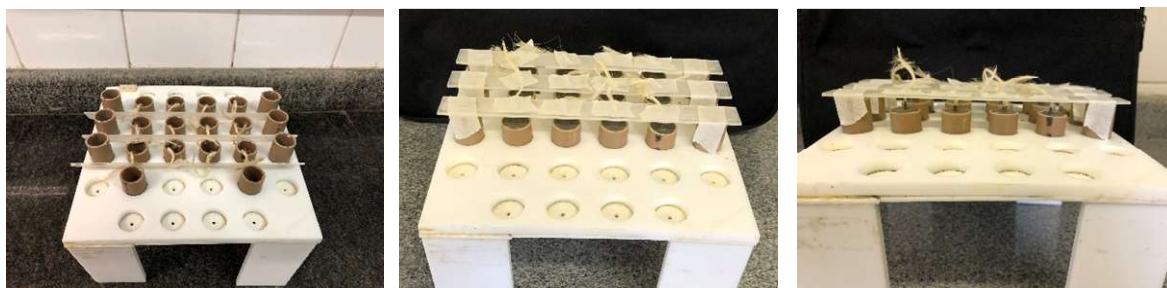
Com a área da seção transversal dos feixes calculada foi possível determinar o diâmetro equivalente de cada feixe, e conhecendo o comprimento de embebimento de 10 mm, 20 mm e 30 mm, foi possível determinar a área lateral de potencial contato da interface feixe-matriz.

Os tecidos foram cortados com comprimento de 100 mm, sendo que cada corpo de prova de tecido possuía seis feixes. As massas secas foram determinadas da mesma maneira que no ensaio de tração. A massa dos fios de algodão que compõem

o urdume foi descontada. A massa seca restante foi dividida por seis, que é a quantidade de feixes que compunham cada pedaço do tecido. Com esta massa foi calculada a área transversal de cada feixe, da mesma maneira que no ensaio de tração, determinando então o diâmetro equivalente dos feixes que compõem cada tecido. Conhecendo o comprimento de embeбimento de 10 mm, 20 mm e 30 mm, calculou-se a área lateral de contato da interface feixe-matriz. Multiplicando por seis, que é o número de feixes que compunham cada tecido, temos a área lateral de contato da interface tecido-matriz.

Os feixes foram fixados no centro de tubos de policloreto de vinila (PCV) com diâmetro de 20 mm. Para manter o alinhamento durante a moldagem dos feixes foi

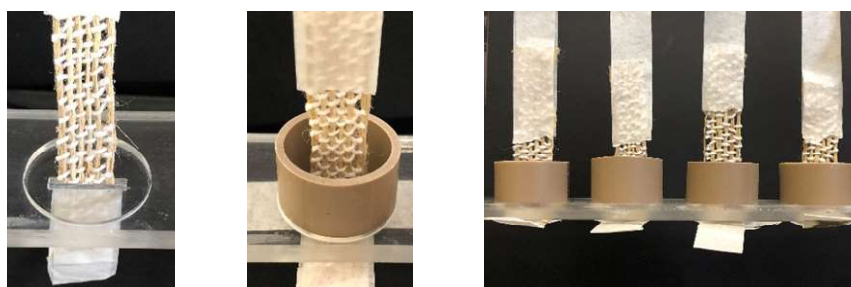
Figura 32. Moldagem de corpos de prova para ensaio de arrancamento dos feixes.



utilizada uma plataforma de acrílico com molde vasado para a fixação dos tubos. Cada molde possuía em sua base um furo central por onde os feixes passavam e eram fixados. Na parte superior os feixes foram centralizados com auxílio de uma régua de acrílico furada com o mesmo espaçamento da plataforma, como pode ser observado na Figura 32.

Os tecidos foram fixados no centro de tubos de PCV com diâmetro de 32 mm. Para manter o alinhamento durante a moldagem dos tecidos foi utilizado uma plataforma (mesa) de acrílico com molde vazado para a fixação dos tubos, com fendas 2 mm de largura por onde os tecidos passavam e eram fixados, como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33. Moldagem de corpos de prova para ensaio de arrancamento dos tecidos.



Com os feixes e tecidos fixados na plataforma, foi preparada a matriz e lançada nos moldes de PVC.

Os corpos de prova foram retirados da plataforma após dois dias e ficaram em uma caixa acrílica. A cura não foi feita em água, havia apenas um recipiente com água dentro da caixa ao lado dos corpos de prova. Depois de 7 dias os corpos de prova foram removidos para realização dos ensaios. Moldes de papel foram fixados com adesivo de cura rápida (Super Bonder Original, fabricante Loctite) nos feixes e tecidos para permitir o alinhamento e evitar a concentração de tensões na garra durante o ensaio. As dimensões do molde eram de 40 mm por 20 mm, foram fixados nos tecidos com distância de 0,5 mm para o tubo de PVC.

3.2.4.2 *Configuração dos ensaios de arrancamento.*

Os ensaios de arrancamento nos feixes foram realizados em um texturômetro modelo TA XT PLUS *Texture Analyzer*, marca *Stable Micro Systems*, com capacidade de carga de 500 N, acoplado a um microcomputador com o software específico Exponent Connect. A velocidade do deslocamento do travessão do texturômetro foi de 1,2 mm/min. Já os ensaios de arrancamento dos tecidos foram realizados na mesma máquina de ensaios utilizadas nos ensaios de tração direta. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 1,2 mm/min e a célula de carga de 1 kN.

Foi elaborado um aparato para fixação dos corpos de prova no texturômetro e na máquina de ensaios universal, que consistia em um tudo de aço galvanizado com um parafuso para fixação dos corpos de prova na parte inferior e na parte superior foi instalada uma junta universal para permitir o correto alinhamento dos corpos de prova durante a execução dos ensaios. Na Figura 34 é possível ver o aparato desenvolvido para a fixação dos corpos de prova.

Figura 34. Aparato para fixação do corpo de prova.

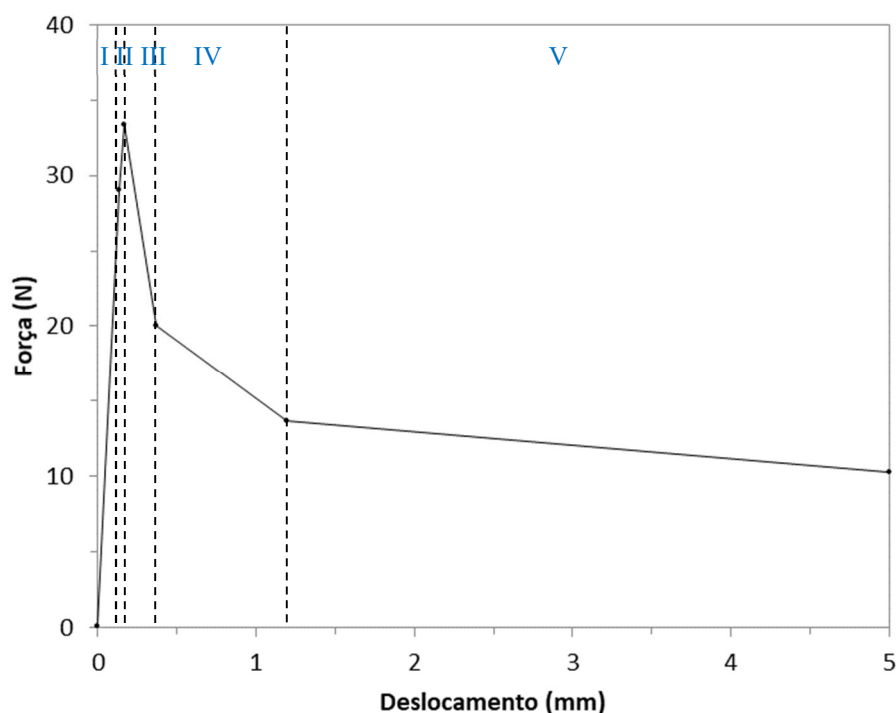


3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Ensaio de Arrancamento – (Pull-out) nos feixes

A Figura 35 exibe a curva Força X Deslocamento do ensaio de arrancamento no feixe de fibras in natura com comprimento de embhecimento de 10 mm.

Figura 35. Curva Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento no feixe.



O comportamento dos feixes durante o ensaio de arrancamento apresenta quatro fases distintas:

A fase I apresenta o comportamento elástico, com aumento gradual da carga suportada, sendo a adesão considerada perfeita, sem apresentar deslizamento entre o feixe e a matriz.

A fase II tem início quando a resistência de cisalhamento adesional é superada iniciando-se o processo de decoesão, apresentando mudança de inclinação em relação a fase I. Mesmo assim a carga continua aumentando até atingir a carga máxima.

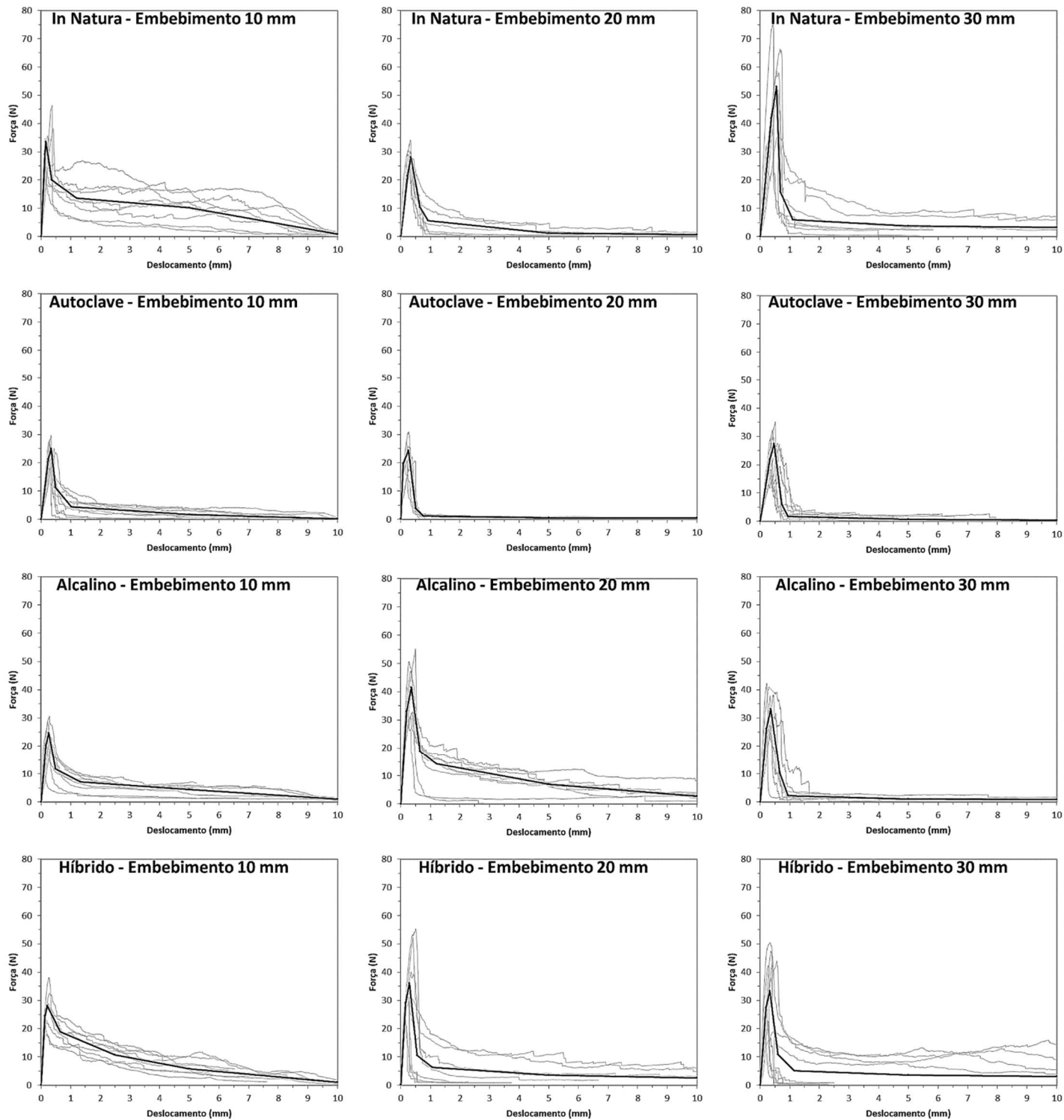
A fase III tem início logo após o ensaio alcançar a carga máxima, apresentando grande queda na carga até alcançar o ponto onde a decoesão estará completa. Nesta fase a decoesão ocorre simultaneamente com a ruptura das fibras que se encontraram em uma posição mais externa do feixe que estavam mais aderidas a matriz.

A fase IV começa após o ponto de decoesão completa, neste momento ainda está acontecendo rupturas de fibras, e o comportamento do ensaio começa a ser conduzido pela força friccional.

A fase V começa após não haver mais rupturas de fibras, nesta fase o comportamento do ensaio é governado pela força friccional até o final do ensaio.

A Figura 36 exibe as curvas Força X Deslocamento dos ensaios de arrancamento.

Figura 36. Curvas Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento nos feixes.



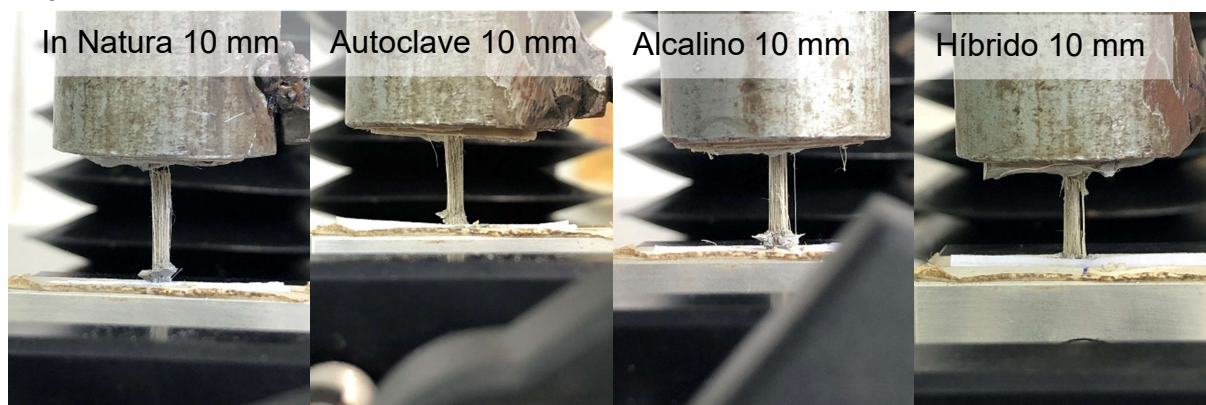
Os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: área, tensão adesional, deslocamento na tensão adesional máxima, para os corpos de prova ensaiados são exibidos na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados do ensaio arrancamento nos feixes de abacaxi.

Tratamento	Comp. Embebido (mm)	Área (mm ²)	Desl. Tensão Adesional (mm)	Tensão Adesional (MPa)
In Natura	10	16,33 (0,92)	0,16 (0,05)	1,84 (0,21)
	20	30,68 (0,97)	0,29 (0,05)	0,81 (0,10)
	30	54,20 (1,28)	0,55 (0,11)	0,92 (0,15)
Autoclave	10	16,43 (0,64)	0,46 (0,11)	1,40 (0,18)
	20	33,13 (1,12)	0,27 (0,09)	0,70 (0,12)
	30	42,27 (2,12)	0,65 (0,09)	0,53 (0,06)
Alcalino	10	13,36 (0,70)	0,23 (0,05)	1,85 (0,28)
	20	31,77 (0,97)	0,35 (0,05)	1,05 (0,17)
	30	47,18 (1,56)	0,40 (0,07)	0,66 (0,16)
Híbrido	10	16,98 (0,70)	0,25 (0,08)	1,62 (0,32)
	20	30,91 (3,93)	0,28 (0,06)	0,96 (0,23)
	30	50,36 (2,81)	0,33 (0,07)	0,57 (0,15)

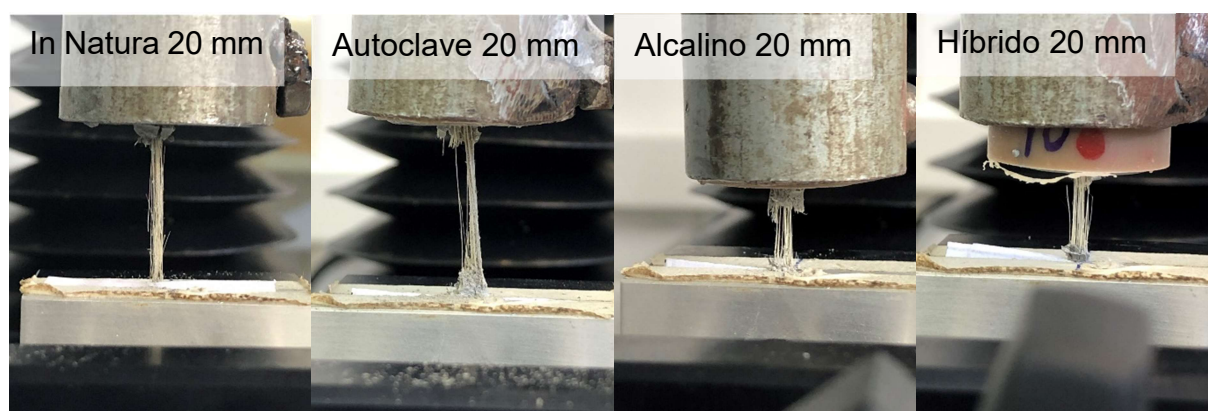
Analisando as curvas Força x Deslocamento para os corpos de prova com 10 mm de embebiamento pode-se observar que a tensão de adesão quase não apresentou variação entre os feixes *in natura* e os com tratamento alcalino, já os corpos de prova com o tratamento em autoclave e o tratamento híbrido apresentaram um desempenho inferior aos *in natura* de 24,32% MPa e 12,43% MPa respectivamente. Observa-se que a maioria dos feixes com tratamento alcalino e principalmente os híbridos apresentaram decoesão completa pouco após alcançarem o ponto de carga máxima. Neste comprimento as fibras que compunham os feixes, nas quatro condições, apresentaram deslizamento com poucas fibras rompidas. Como é possível observar na Figura 37.

Figura 37. Ensaio de arrancamento nos feixes com 10 mm de embebedimento.



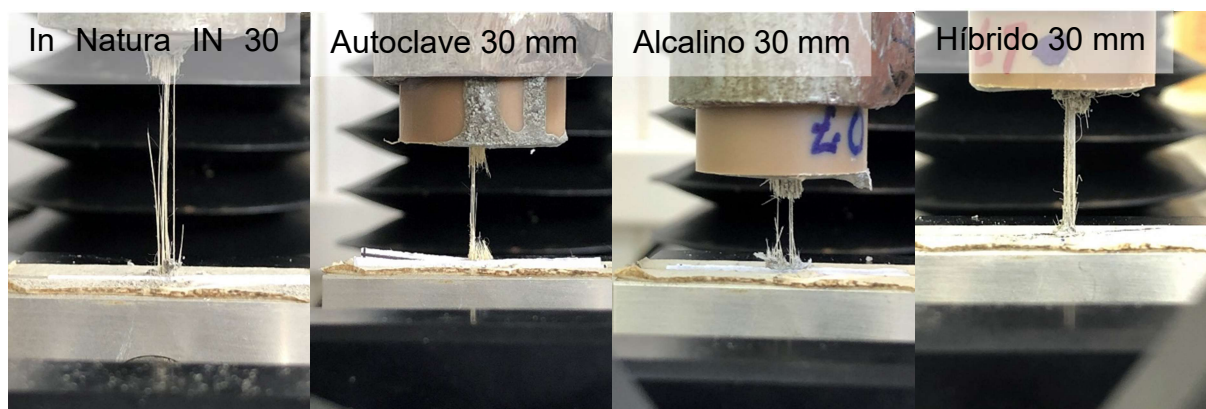
Ao aumentar o comprimento de embebedimento para 20 mm as tensões de adesão foram reduzidas significativamente, observa-se ainda que os corpos de prova com tratamento alcalino e com tratamento híbrido apresentaram tensões de adesão de 1,05 MPa, 0,96 MPa, respectivamente, valores superiores aos corpos de prova com feixes in natura e autoclavados, com valores 0,81 MPa, 0,70 MPa, respectivamente. Neste comprimento parte das fibras mais externas dos feixes, nas quatro condições, apresentaram adesão à matriz e romperam, enquanto as fibras mais internas com pouco contato com a matriz sofreram deslizamento, como é possível observar na Figura 38, fenômeno próximo ao observado por Fidelis *et al.* (2019) que realizou ensaios de arrancamento em fios de juta e verificou que as fibras mais internas não tinham contato com a matriz com pouca contribuição para adesão na interface.

Figura 38. Ensaio de arrancamento nos feixes com 20 mm de embebedimento.



Nos corpos de prova com 30 mm de embebimento, as tensões de adesão tiveram novas reduções em seus valores para os corpos de prova com feixes autoclavados, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido, com valores de 0,53 MPa, 0,66 MPa e 0,57 MPa, a exceção foram os corpos de prova com feixes *in natura* que aumentaram suas tensões de adesão para 0,92 MPa. Devido ao maior comprimento de embebimento, grande parte das fibras externas dos feixes, nas quatro condições, apresentaram adesão à matriz e romperam, enquanto as fibras mais internas com pouco contato com a matriz sofreram deslizamento. Como é possível observar na Figura 39.

Figura 39. Ensaio de arrancamento nos feixes com 30 mm de embebimento.

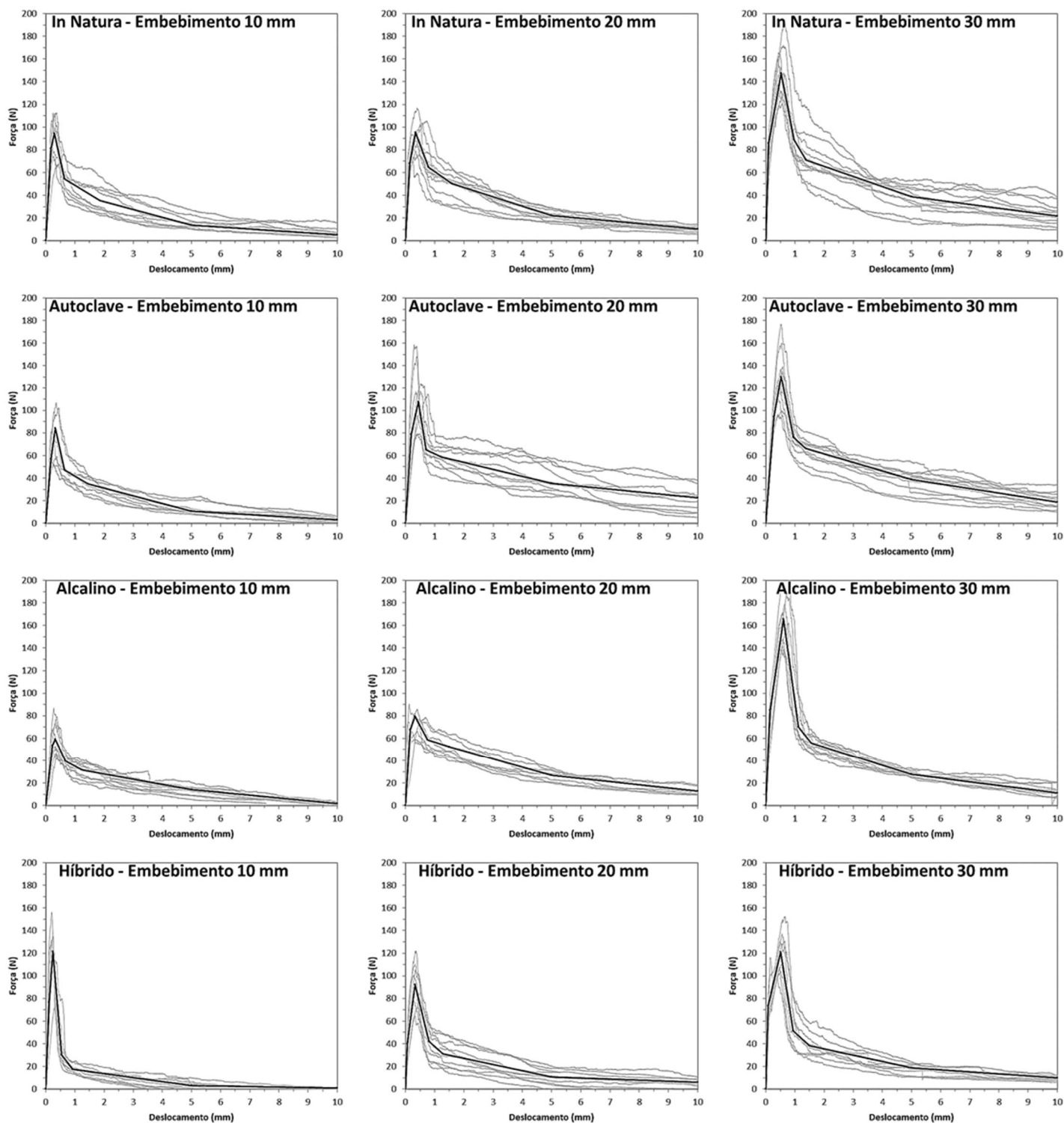


Em relação ao deslocamento na tensão de adesão pode-se observar um aumento à medida que se amplia o comprimento de embebimento. Entre os comprimentos de embebimento de 10 mm e 30 mm houve aumento de 246% passando de 0,16 mm para 0,55 mm respectivamente nos corpos *in natura*. Para os corpos de prova com tratamento em autoclave, tratamento alcalino, e tratamento híbrido os aumentos foram de 42% ,73% e 33%, respectivamente.

3.3.2 Ensaio de arrancamento nos Tecidos

Doze corpos de prova foram submetidos ao ensaio de arrancamento, com três comprimentos de embebimento de 10 mm, 20 mm, e 30 mm, para cada uma das quatro condições dos tecidos, *in natura*, com tratamento em autoclave, com tratamento alcalino e com o tratamento híbrido. A Figura 40 exibe as curvas Força X Deslocamento dos ensaios de arrancamento.

Figura 40. Curvas Força x Deslocamento do ensaio de arrancamento nos tecidos.



Os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: área, tensão adesional, deslocamento na tensão adesional máxima, para os corpos de prova ensaiados são exibidos na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados do ensaio arrancamento nos tecidos de abacaxi.

Tratamento	Comp. Embebido (mm)	Área (mm²)	Desl. Tensão Adesional (mm)	Tensão Adesional (MPa)
In Natura	10	101,91 (1,84)	0,37 (0,08)	0,79 (0,11)
	20	197,96 (2,99)	0,34 (0,08)	0,47 (0,05)
	30	308,08 (7,92)	0,55 (0,04)	0,46 (0,03)
Autoclave	10	102,39 (2,29)	0,32 (0,05)	0,84 (0,16)
	20	206,18 (4,80)	0,43 (0,06)	0,53 (0,06)
	30	316,48 (12,12)	0,53 (0,02)	0,41 (0,04)
Alcalino	10	105,01 (2,88)	0,34 (0,04)	0,55 (0,11)
	20	212,82 (3,11)	0,34 (0,04)	0,36 (0,03)
	30	314,76 (7,04)	0,60 (0,05)	0,54 (0,04)
Híbrido	10	101,85 (1,81)	0,23 (0,03)	1,21 (0,11)
	20	208,28 (5,12)	0,34 (0,04)	0,43 (0,05)
	30	307,70 (5,75)	0,50 (0,07)	0,38 (0,03)

Para os corpos de prova com 10 mm de embebiamento pode-se observar que a tensão de adesão foi de 0,79 MPa para os tecidos in natura, com aumento de 53,16% e 6,33% nos corpos de prova com tecidos com tratamento híbrido e autoclavados respectivamente, já o desempenho dos tecidos com tratamento alcalino que foram de 30,38% inferior.

Ao aumentar o comprimento de embebiamento para 20 mm as tensões de adesão foram reduzidas, observa-se ainda que os corpos de prova com tecidos autoclavados apresentaram a tensão de adesão de 0,53 MPa, desempenho superior aos in natura, com tratamento alcalino e híbrido, com tensões de adesão de 0,47 MPa, 0,36 MPa e 0,43 MPa respectivamente.

Nos corpos de prova com 30 mm de embebimento as tensões de adesão tiveram novas reduções em seus valores para os corpos de prova com feixes in natura, autoclavados, e com tratamento híbrido, com valores de 0,46 MPa, 0,41 MPa e 0,38 MPa, a exceção foram os corpos de prova com tecidos com tratamento alcalino que aumentaram suas tensões de adesão para 0,54 MPa.

Nos ensaios de arrancamento dos tecidos é possível que as fibras que compunham os feixes, nas quatro condições, apresentaram deslizamento com poucas fibras rompidas.

Em relação ao deslocamento na tensão de adesão máxima pode-se observar um aumento à medida que se amplia o comprimento de embebimento. Entre os comprimentos de embebimento de 10 mm e 30 mm houve aumento de 50% passando de 0,37 mm para 0,55 mm respectivamente nos corpos in natura. Para os corpos de prova com tratamento em autoclave, tratamento alcalino, e tratamento híbrido os aumentos foram de 67% ,75% e 120% respectivamente.

3.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que os feixes e tecidos tratados apresentaram menor tensão adesional que os feixes e tecidos in natura. Analisando as fibras que compunham os tecidos observou-se que estas apresentaram poucas rupturas, já nas fibras que compunham os feixes, com 20 mm e principalmente com 30 mm de embebimento, é possível perceber que as fibras mais externas apresentaram adesão à matriz e romperam durante o ensaio, enquanto as fibras internas seguiram deslizando, isto sugere que os diâmetros dos feixes devem ser reduzidos para melhorar a impregnação pela matriz e melhorar o desempenho da ligação na interface.

4 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM TECIDOS VEGETAIS

No capítulo anterior foram exibidos os estudos de aderência entre os feixes e tecidos de fibras de abacaxi e a matriz cimentícia utilizada para conformação dos compósitos cimentícios.

Este quarto capítulo apresenta o desenvolvimento e a produção dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de abacaxi in natura e tratados, e a análise do seu comportamento mecânico através dos ensaios de tração direta e flexão em quatro pontos.

4.1 INTRODUÇÃO

Já existem estudos com a utilização de fibras curtas, de mechas alinhadas de fibras longas, na produção de compósitos cimentícios com bons resultados mecânicos. Neste intuito busca-se introduzir a utilização de tecidos estruturais de fibra da folha do abacaxizeiro, na conformação dos compósitos com matrizes cimentícias, pois com a inserção dos tecidos consegue-se melhor alinhamento e direcionamento das fibras, desta forma eleva-se o desempenho mecânico dos compósitos na direção e sentido dos esforços solicitantes.

Com a utilização dos tecidos consegue-se aumento da tenacidade e ganho de resistência pós-fissuração maior do que se tem atingido com o uso de fibras curtas e mechas de fibras longas. Melhora-se a múltipla fissuração, com um menor espaçamento entre as fissuras, menor dimensões das fissuras abertas, e mais uniformidade no padrão das fissuras. Mas ainda são necessários mais estudos, para que possam ser desenvolvidos elementos com o desempenho mecânico adequado para serem utilizados como elementos de vedação, elementos estruturais ou semiestruturais.

Este trabalho estuda novas formas de uso para as fibras da folha do abacaxizeiro, procurando incorporá-las às matrizes cimentícias no arranjo em tecido, buscando solucionar problemas no processo de moldagem, compatibilização entre tecido e a argamassa, espaçamento da malha do tecido para o reforço da placa.

Materiais compósitos são resultantes da combinação de dois ou mais materiais, com diferentes propriedades físicas e químicas com a finalidade de criar um material adequado às diversas situações de uso. As propriedades dos compósitos reforçados

com fibras são uma combinação entre as propriedades da matriz e das fibras de reforço. A interface fibra-matriz deve ser suficientemente resistente para que haja uma grande transferência de tensões e deformações entre os dois materiais (CARVALHO, 2005).

Os compósitos com matrizes cimentícias são os mais utilizados na engenharia civil, na forma de concreto com fibras, argamassa armada e fibrocimento. Uma pequena porcentagem do concreto produzido no mundo é reforçada com fibras. Adição de fibras reduz a fissuração da matriz, pois as fissuras são interligadas pelas fibras aumentando a tenacidade, resistência à tração e ao impacto. A influência da fibra sobre o comportamento à tração vai depender de vários parâmetros, como tipo, comprimento, diâmetro, teor incorporado e forma de distribuição. A introdução das fibras garante a manutenção de resistência após a fissuração da matriz, permitindo maior deformação do compósito antes da ruptura, propiciando maiores resistência ao impacto e tenacidade (LIMA, 2004).

As fibras da folha do abacaxizeiro possuem alta resistência à tração, e quando utilizada como reforço em compósitos cimentícios, devem proporcionar aumento de resistência à flexão, à tração e tenacidade, além de serem leves e possuírem baixo custo de produção.

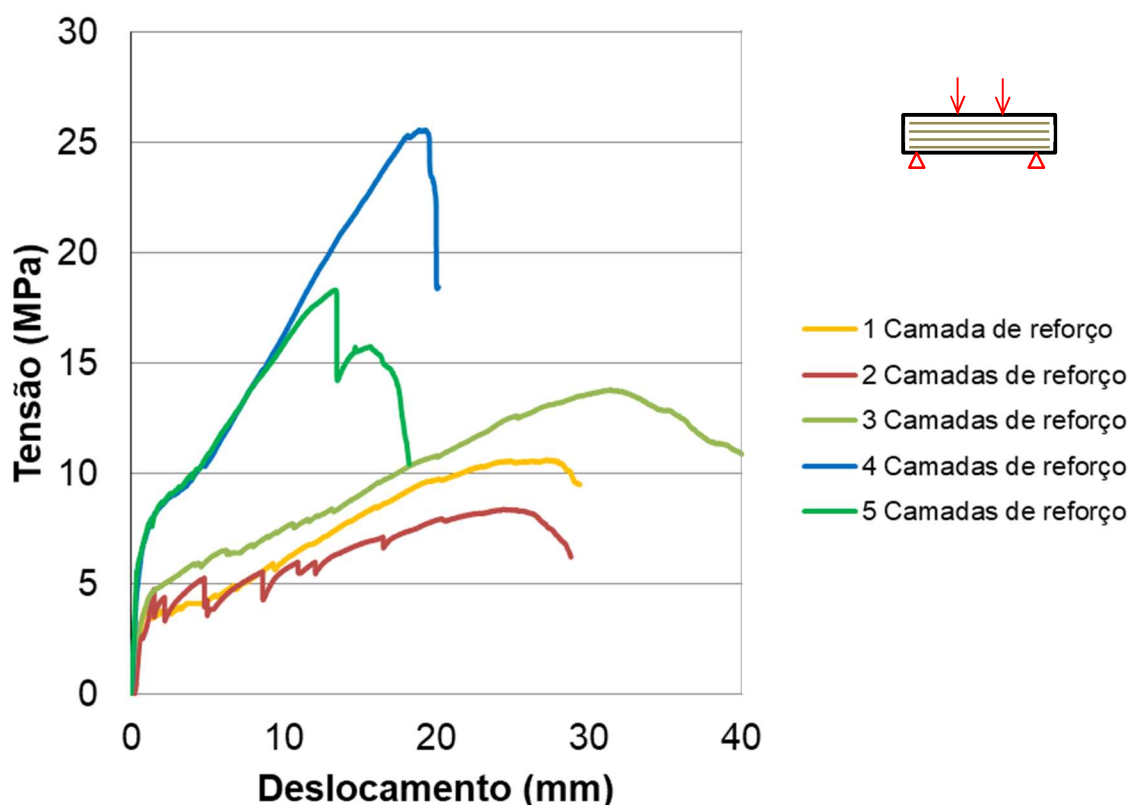
As propriedades mecânicas dos compósitos dependem das propriedades das fibras, da matriz e da interface fibra-matriz. O desempenho dos compósitos é influenciado pela proporção entre os materiais, e pela geometria, comportamento, comprimento e arranjo das fibras, que podem ter direção preferencial ou distribuição aleatória dependendo se são usados tecidos ou mantas, respectivamente (CERCHIARO, 2013).

Butler *et al.* (2010) afirmam que o concreto reforçado com fibras têxteis pode ser utilizado em estruturas novas, no reforço ou reparo de estruturas pré-existentes, construídas em concreto armado. Eles apresentam a utilização do compósito numa cobertura com geometria de concha hiperbólica-parabólica, onde o reforço é aplicado em três níveis de camadas de tecido na parte superior da concha, com espessura total de 15 mm. Verificou-se que a aplicação do concreto reforçado com fibras têxteis é simples e pode ser adaptada para formas geométricas complexas.

Mumenya *et al.* (2010) analisaram os padrões de fissuração formados em compósitos cimentícios reforçados com fibras têxteis submetidos a ensaios de tração direta. As amostras possuíam seis camadas de tecido de polipropileno, curadas por 28 dias e expostas ao intemperismo por diferentes períodos. Foram submetidas ao ensaio de tração direta. Observou-se que as fissuras variaram principalmente com a idade, níveis de esforços e tipo de intemperismo. Houve aumento da espessura e do espaçamento entre fissuras devido ao envelhecimento.

Arruda Filho (2015) moldou compósitos cimentícios com 1, 2, 3, 4 e 5 camadas de reforço em tecidos de feixes sisal e avaliou o comportamento à flexão e a tração direta destes compósitos. Verificou-se que o número de camadas de reforço influencia diretamente n comportamento mecânico de compósitos, no qual o melhor desempenho foi alcançado pelos compósitos conformados com 4 camadas de reforço, alcançando resistência máxima à tração de 8,50 MPa e resistência máxima à flexão de 25,91 MPa. Na Figura 41 é possível observar as curvas Tensão X Deslocamento no ensaio de flexão em 4 pontos nos compósitos reforçados com tecidos de feixes de sisal.

Figura 41. Curvas Tensão x Deslocamento. Ensaio de flexão em 4 pontos nos compósitos reforçados com tecidos de feixes de sisal.



Fonte: (Adaptado de ARRUDA FILHO, 2015).

4.2 METODOLOGIA

O desenvolvimento dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais da fibra da folha do abacaxizeiro, foi realizado de forma experimental, nos laboratórios existentes na Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como o CETA, o SP Timoshenko e o LEDMA, e nos Laboratórios de Estrutura e de Compósitos do Departamento de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Os materiais utilizados na conformação destes compósitos, para preparo da matriz bem como os tecidos estruturais de fibras vegetais, já foram apresentados, caracterizados e discutidos nos capítulos anteriores.

4.2.1 Materiais

4.2.1.1 Reforço

O reforço utilizado foi o tecido de feixes de fibras de abacaxi. Sua caracterização, propriedades mecânicas, e os tratamentos já foram discutidos no Capítulo 2 desta tese.

4.2.1.2 Matriz

A matriz cimentícia utilizada nesta pesquisa foi baseada no trabalho de Lima (2018). A caracterização de seus constituintes, propriedades mecânicas, e a forma de preparo já foram discutidos no capítulo 3 desta tese.

4.2.2 Produção dos compósitos

Foram moldadas 4 placas cimentícias reforçadas com 2 camadas de tecidos de abacaxi. Sendo a primeira com o tecido in natura, a segunda com o tecido tratado em autoclave, a terceira com o tecido com tratamento alcalino, e a última com o tecido com tratamento híbrido.

As placas foram moldadas em formas de acrílico quadradas com 42 cm de lado. As etapas principais para a conformação dos compósitos foram: preparação da argamassa, impregnação do tecido, moldagem e cura.

Os tecidos utilizados como reforço foram lavados em um recipiente metálico com água à temperatura ambiente sendo aquecida a uma taxa de 2 °C/min até atingirem 50 °C. Após atingir esta temperatura, foi mantido em temperatura constante por vinte minutos para remover enzimas e impurezas presentes nas fibras que poderiam reagir com a matriz cimentícia retardando a pega e a cura.

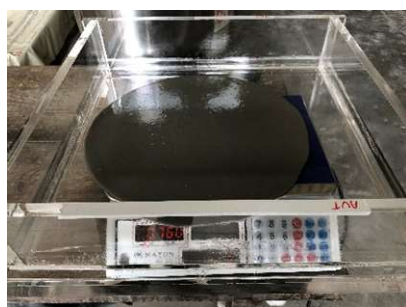
A preparação da argamassa deve garantir a homogeneidade e deve ser realizada em argamassadeira adequada, para que não haja segregação (SANTOS, 2013). A impregnação deve possibilitar o envolvimento das fibras pela argamassa. A moldagem foi realizada de forma a potencializar o desempenho dos compósitos.

As massas dos componentes da matriz cimentícia: Cimento CP-V ARI, Microsílica, Cinza Volante, Areia, VMA, Superplastificante e a água; foram pesadas individualmente em balança de precisão igual a 0,01 g. Bem como as massas dos reforços para cada placa.

Antes de iniciar a preparação da argamassa foi aplicado desmoldante nas formas para facilitar a remoção das placas após a secagem inicial. A preparação da matriz ocorreu em uma argamassadeira de 20 litros seguindo os mesmos passos do capítulo anterior.

As placas possuíam 3 camadas de matriz e 2 camadas de reforço. Iniciou-se a moldagem aplicando 1/3 da massa da matriz na forma, para isso a forma foi disposta sobre uma balança digital como pode ser observado na Figura 42.

Figura 42. Primeira camada de argamassa.



Após a primeira camada de argamassa assentou-se a primeira camada do tecido. Para melhorar a impregnação das fibras utilizou-se um rolo de náilon para comprimir as fibras sobre a matriz. Após a primeira camada do tecido depositou-se a segunda camada de argamassa, com uma espátula distribuiu-se uniformemente a matriz sobre o tecido, comprimindo a matriz na direção do tecido para obter uma melhor

impregnação das fibras. Outras camadas de tecido e de argamassa foram adicionadas sucessivamente perfazendo um total de 2 camadas de reforço e 3 de matriz, como mostra a Figura 43.

Figura 43. Moldagem das placas cimentícias reforçadas com tecidos de abacaxi.



Os compósitos recém moldados foram levados à mesa vibratória por quinze segundos, a fim de melhorar o adensamento da matriz, reduzindo o volume de vazios e melhorando a impregnação das camadas de tecido.

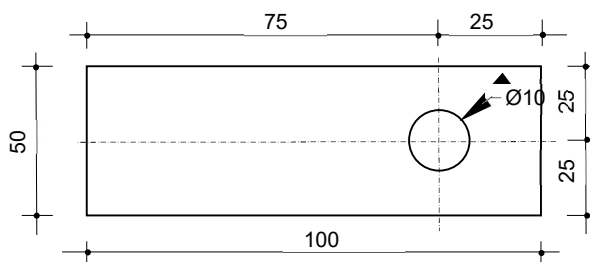
Mantas de algodão úmidas foram colocadas sobre as placas para evitar a perda excessiva de umidade durante a secagem inicial. Após 7 dias as placas foram removidas das formas e levadas para cura em reservatório com água à temperatura ambiente, onde permaneceram até completar 28 dias.

As placas foram cortadas removendo 1 cm de borda de cada lado, ficando com dimensões finais de 40 x 40 cm. Cada placa forneceu 16 amostras com lados de 20 cm por 5 cm, sendo que destas 3 foram utilizadas para ensaio de tração direta aos 28 dias, 3 foram utilizadas para ensaio de flexão em 4 pontos aos 28 dias.

4.2.3 Ensaio de tração direta

Os compósitos foram submetidos aos ensaios de tração direta, com corpos de prova com 20 cm de comprimento por 5 cm de largura. Foi desenvolvido um aparato metálico composto por barras chatas de aço com 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e 2 mm de espessura, com um furo circular com 10 mm de diâmetro em uma das extremidades de acordo com a Figura 44.

Figura 44. Representação do aparato metálico.



Duas placas metálicas foram fixadas em cada lado dos corpos de prova com adesivo epóxi, os furos das placas metálicas estavam alinhados e foram unidas por um parafuso à um suporte fixado à garra da máquina de ensaio universal.

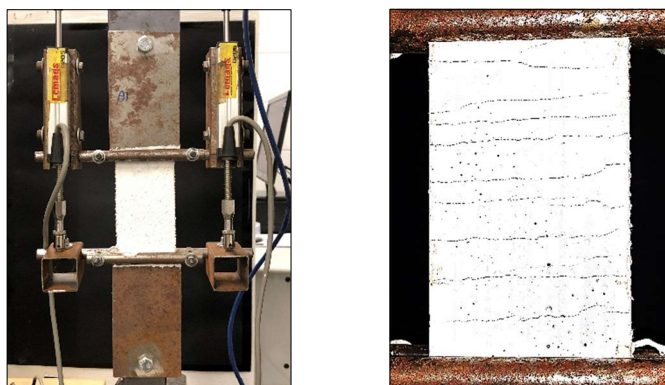
Este aparato foi utilizado para não causar avarias à matriz cimentícia, e manter o alinhamento do corpo de prova durante o ensaio, evitando a ocorrência de esforços causados pelo desalinhamento. A preparação dos corpos de prova pode ser observada na Figura 45.

Figura 45. Preparação dos corpos de prova.



Os ensaios foram realizados no mesmo equipamento em que foram realizados os ensaios de tração direta nas fibras, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi 0,5 mm/min. Foram instalados dois LVDT's (Transformador Diferencial Variável Linear) nas laterais dos corpos de prova para medir o deslocamento durante a realização do ensaio. As faces foram pintadas com tinta branca para facilitar a visualização do surgimento das fissuras. O esquema para a realização do ensaio pode ser visto na Figura 46.

Figura 46. Ensaio de tração direta.



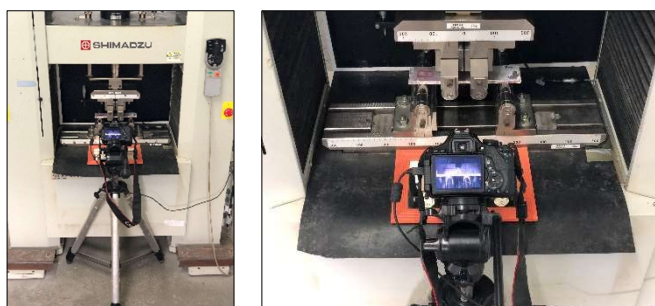
4.2.4 Ensaio de flexão em quatro pontos

Ensaio de flexão em 4 pontos foram realizados, de acordo com as normas americanas ASTM C 947 (ASTM, 1999) e ASTM C 459 (ASTM, 1997) em corpos de prova prismático-retangulares (placas com 20 cm de comprimento, 5 cm de largura e 0,8 cm de espessura) a fim de se analisar o comportamento do compósito reforçado com tecidos de fibras de abacaxi, quando submetido à flexão, bem como analisar o processo de abertura das fissuras.

Os ensaios foram realizados no mesmo equipamento utilizado no ensaio de tração direta, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaios universal foi 0,5 mm/min. Para melhor precisão foi utilizado um LVDT, acoplado ao aparato de flexão, que permitiu medir a flecha na posição central do vão. A distância entre os pontos de aplicação de carga foi de 50 mm, e entre os apoios foi de 150 mm.

As placas foram pintadas com tinta branca, para facilitar a visualização do surgimento das fissuras. Um espelho foi instalado inclinado abaixo dos painéis para permitir o acompanhamento das fissuras (ver Figura 47).

Figura 47 - Ensaio de Flexão em 4 Pontos.



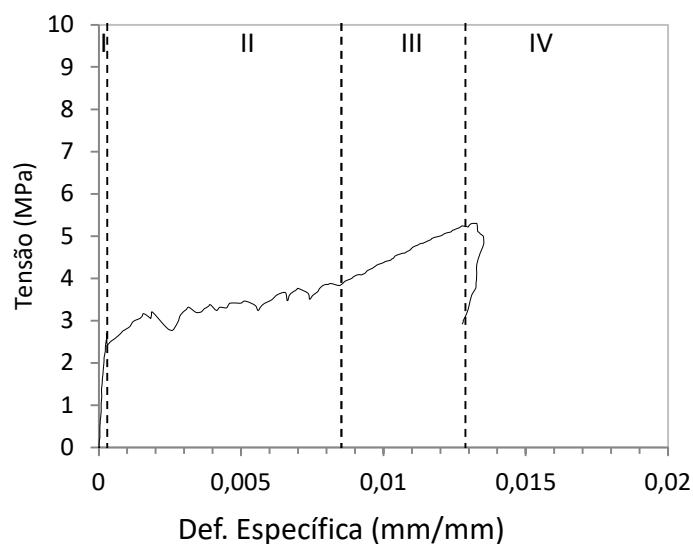
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.3.1 Ensaio de tração direta

Os ensaios de tração direta foram realizados nos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de abacaxi in natura e tratados. Utilizaram-se três corpos de prova para cada um dos quatro tipos de compósitos.

A Figura 48 mostra o comportamento típico das placas durante o ensaio de tração direta com quatro fases distintas:

Figura 48. Curva Tensão x Deformação específica no ensaio de Tração Direta.



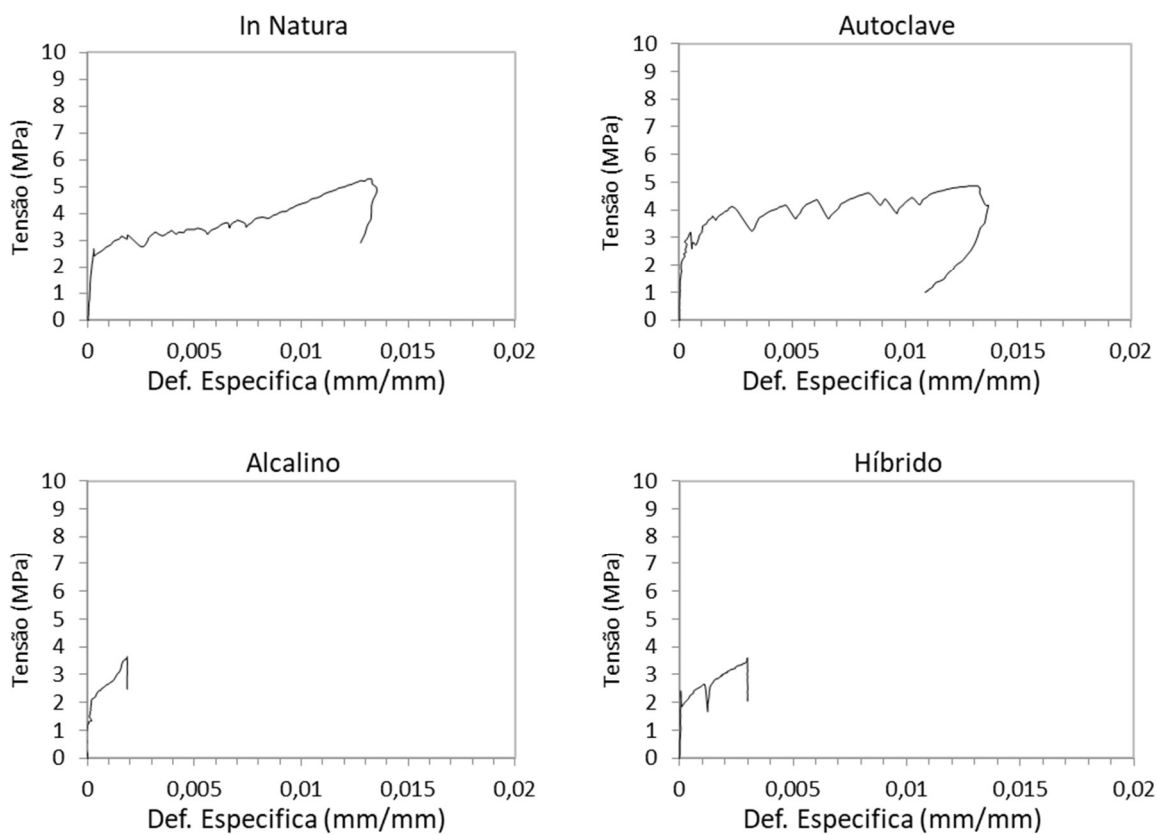
- Na fase I o compósito apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis mesmo com o auxílio da câmera fotográfica, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura, finalizando esta fase com uma queda brusca na tensão;
- Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de abacaxi começa a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto ocorre o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada. Este ciclo de surgimento de fissuras e do combate às mesmas pelo reforço se repete

diversas vezes e em intervalos regulares, assim esta fase é conhecida como multifissuração, nesta fase também há uma redução na rigidez;

- Na fase III praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas o aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim a tensão continua tendo um aumento significativo na pós-fissuração.
- Na fase IV onde a maior parte das fibras do tecido de abacaxi utilizado como reforço, senão todas, já sofreram ruptura, iniciando um escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, reduzindo a resistência do compósito de forma semelhante com o que ocorre no tecido quando submetido ao ensaio de tração. O comportamento das placas quando submetidas à tração foi semelhante ao encontrado por Olivito *et al.* (2014).

Na Figura 49 são apresentadas as curvas Tensão X Deslocamento para cada um dos quatro tipos de compósitos. Observa-se que os compósitos reforçados com tecidos in natura e alcalinos apresentaram melhor desempenho que os compósitos reforçados com tecidos autoclavados e com tratamento híbrido.

Figura 49. Curva Tensão x Deformação específica no ensaio de Tração Direta



Na Tabela 14 são exibidos os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: tensão de primeira fissura (MPa), deslocamento na tensão de primeira fissura (mm), módulo de ruptura (MPa), deslocamento na tensão de ruptura (mm) obtidos no ensaio de tração direta nos compósitos, bem como a rigidez.

Tabela 14. Resultados médios e desvios-padrões. Ensaio de Tração Direta.

Reforço	Volume de Reforço	Tensão de 1ª Fissura (MPa)	Deslocamento na tensão de 1ª Fissura (mm)	Resistência à tração (MPa)	Deslocamento na Ruptura (mm)	Rigidez (GPa)
In Natura	6,71%	2,03 (0,72)	0,00056 (0,00020)	5,78 (0,41)	1,55 (0,31)	8,96 (3,58)
Autoclave	5,75%	1,70 (0,60)	0,00028 (0,00014)	4,92 (0,30)	1,66 (0,17)	17,27 (5,49)
Alcalino	6,19%	2,23 (0,76)	0,00014 (0,00003)	3,93 (0,26)	0,55 (0,45)	17,78 (8,57)
Híbrido	6,25%	2,70 (0,26)	0,00006 (0,00001)	3,79 (0,31)	0,21 (0,19)	17,67 (15,58)

Com as informações contidas na Tabela 14, observa-se que os tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido alteraram o comportamento dos compósitos submetidos aos ensaios de tração direta, em relação aos tecidos in natura. Nos compósitos com reforço com tratamento alcalino e híbrido a tensão de primeira fissura apresentou acréscimo de 10% e 33% respectivamente, já nos compósitos com reforço com tratamento em autoclave mostrou redução de 16%. Os compósitos com os tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido apresentaram menor deslocamento na tensão de primeira fissura, com redução no deslocamento de 50%, 75% e 89% respectivamente. Mesmo apresentando melhorias no comportamento em relação a primeira fissura os compósitos com os tratamentos em autoclave, alcalino e híbrido, apresentaram perda de desempenho na tensão máxima de 15%, 32% e 34% respectivamente. Já em relação a rigidez observa-se um aumento de 93%, 98% e 97% para os tratamentos em autoclave, alcalino e híbrido respectivamente.

Ao comparar os resultados obtidos com os de Olivito *et al.* (2014), que moldou compósitos reforçados com tecidos de sisal com 8 mm de espessura e volume de reforço de 2,9%, percebe-se que os compósitos reforçados com tecidos de abacaxi in natura, que possuem 6,71% de volume de reforço, apresentaram módulo de ruptura de 5,78 MPa, valor 144% superior ao de Olivito *et al.* (2014) que obteve módulo de ruptura de 2,37 MPa. Vale ressaltar que os compósitos tratados também apresentaram módulo de ruptura superior ao de Olivito *et al.* (2014). Uma possibilidade para isto foi a diferença na configuração dos tecidos de reforço, que no trabalho de Olivito *et al.* (2014) era feito de fios, enquanto neste trabalho os tecidos foram confeccionados de feixes de fibras alinhadas, que proporcionam melhor desempenho para os compósitos, pois devido as fibras se encontrarem alinhadas estas apresentam menor deformação e começam a contribuir para o combate dos esforços com menor deslocamento, diferentemente dos fios onde as fibras são torcidas sendo necessário maior deslocamento até que elas passem a contribuir para o suportar o carregamento.

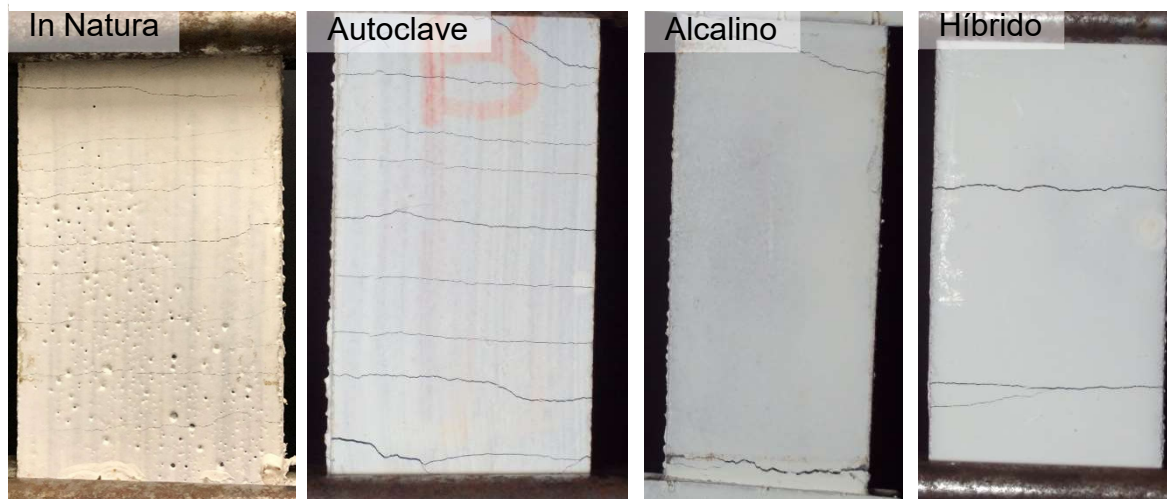
Outro parâmetro importante é o número de fissuras e seus espaçamentos. O número de fissuras no ensaio de tração foi determinado contando a quantidade de fissuras existentes na parte central do compósito, onde não havia as placas metálicas fixadas com o adesivo epóxi. As médias dos três corpos-de-prova foram calculadas para cada tipo de compósito. Na Tabela 15 são apresentados o número de fissuras e o espaçamento entre elas para os quatro compósitos estudados.

Tabela 15. Número de fissuras nos compósitos – Ensaio de tração direta.

Tratamento do reforço	In Natura	Autoclave	Alcalino	Híbrido
Média nº fissuras	10,34	12,00	-	1,11
Espaçamento médio entre fissuras (mm)	9,67	8,33	-	90,00

Os corpos de prova com reforço in natura e autoclavado apresentaram mais fissuras que os corpos de prova com reforço com tratamento alcalino e híbrido. As fissuras nos corpos de prova com reforço in natura e autoclavado ocorreram de forma distribuída uniformemente ao longo do corpo de prova mostrando boa interação entre o reforço e a matriz. Os corpos de prova com reforço híbrido apresentaram em média 1,11 fissuras. Já os corpos de prova com reforço alcalino não apresentaram fissuras no intervalo medido, as fissuras ocorreram abaixo do aparato de fixação dos LVDT's. A Figura 50 apresenta os corpos de prova dos quatro tipos de compósitos após o ensaio de tração direta.

Figura 50. Corpos de prova após ensaio de tração direta.

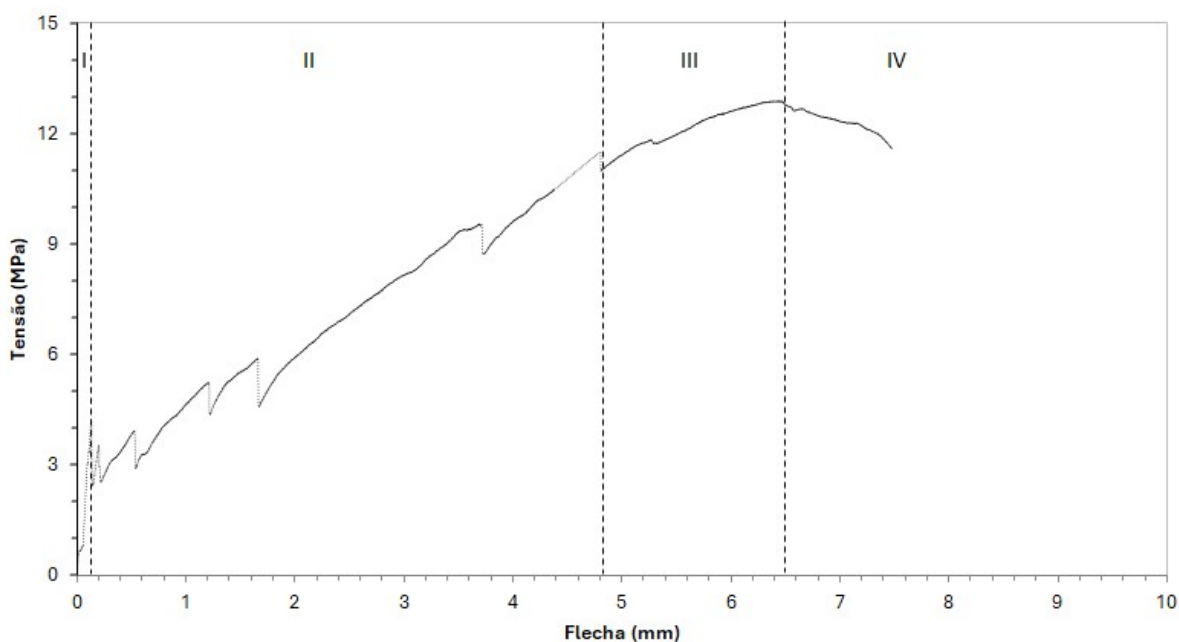


4.3.2 Ensaio de flexão em quatro pontos nos compósitos

Ensaio de flexão em quatro pontos foram realizados em três corpos para cada uma das placas cimentícias reforçadas com tecidos de abacaxi tratados e in natura.

Pode-se observar na Figura 51 o comportamento dos compósitos reforçados com tecidos de abacaxi submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos com quatro fases distintas:

Figura 51. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos

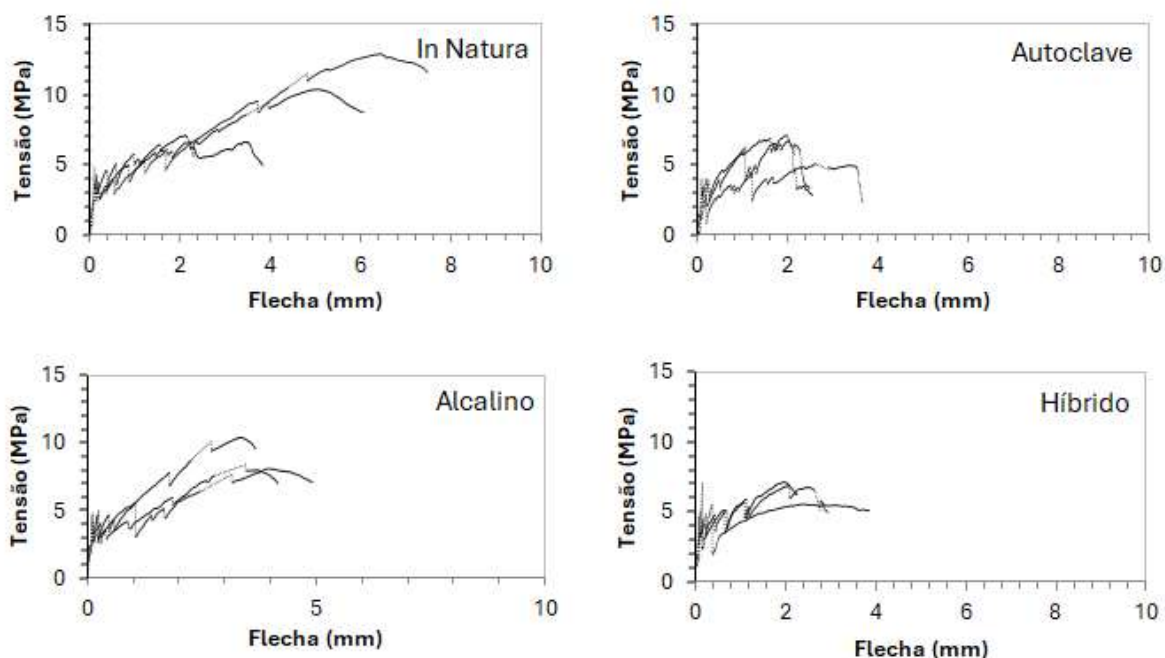


- Na fase I o compósito apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis mesmo com o auxílio da câmera fotográfica, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura, evidenciada pela queda de tenção detectada pela máquina de ensaio universal, finalizando esta fase;
- Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de sisal comece a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto ocorra o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada. Este ciclo de surgimento de fissuras e do combate às mesmas pelo reforço se repete algumas vezes, nesta fase também há redução na rigidez;
- Na fase III praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas a propagação e aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim a resistência continua a tendo um aumento significativo na pós-fissuração, até alcançar resistência máxima do compósito.

- Na fase IV, após a ruptura do compósito, houve um comportamento de amolecimento devido ao aumento da espessura das fissuras, reduzindo a resistência do compósito. O comportamento das placas quando submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos foi semelhante ao encontrado por Melo Filho *et al.* (2013).

Na Figura 52 são apresentadas as curvas típicas de “Tensão X Deslocamento” para cada um dos quatro tipos de compósitos. Observa-se que os compósitos reforçados com tecidos in natura e alcalinos apresentaram melhor desempenho que os compósitos reforçados com tecidos autoclavados e com tratamento híbrido.

Figura 52. Curvas Tensão versus Deslocamento do ensaio de flexão e 4 pontos.



Na Tabela 16 são exibidos os resultados médios e desvios-padrões das variáveis: tensão de primeira fissura (MPa), deslocamento na tensão de primeira fissura (mm), módulo de ruptura (MPa), deslocamento na tensão de ruptura (mm) obtidos no ensaio de flexão nos compósitos, bem como a rigidez.

Tabela 16. Resultados médios e desvios-padrões. Ensaio de flexão em quatro pontos.

Reforço	Volume de Reforço	Tensão de 1ª Fissura (MPa)	Deslocamento na tensão de 1ª Fissura (mm)	Módulo de Ruptura (MPa)	Deslocamento na Ruptura (mm)	Rigidez (GPa)
In Natura	6,71%	4,30 (0,17)	0,12 (0,03)	10,14 (2,89)	5,71 (1,04)	35,28 (10,52)
Autoclave	5,75%	2,93 (1,36)	0,09 (0,02)	6,63 (1,08)	2,20 (0,36)	33,74 (5,58)
Alcalino	6,19%	4,43 (0,31)	0,11 (0,02)	8,97 (1,25)	3,59 (0,33)	32,44 (4,88)
Híbrido	6,25%	5,50 (1,23)	0,12 (0,04)	7,03 (0,13)	2,02 (0,10)	42,52 (5,81)

Com as informações contidas na Tabela 16, observa-se que os tratamentos de autoclavagem, alcalino e híbrido alteraram o comportamento dos compósitos submetidos aos ensaios de flexão em quatro pontos, quando comparados aos tecidos in natura. Da mesma forma como ocorreu nos ensaios de tração direta os compósitos, com reforço com tratamento alcalino e híbrido, apresentaram acréscimo na tensão de primeira fissura de 3% e 28% respectivamente, já os compósitos com reforço com tratamento em autoclave mostrou redução de 32%. Os compósitos com os tratamentos de autoclavagem e alcalino apresentaram menor deslocamento na tensão de primeira fissura, com redução no deslocamento de 25%, 8% e respectivamente, enquanto o com tratamento híbrido manteve o mesmo valor que o com o reforço in natura. Assim como aconteceu no ensaio de tração direta, mesmo apresentando melhorias no comportamento em relação à primeira fissura, os compósitos com os tratamentos em autoclave, alcalino e híbrido, apresentaram perda de desempenho no módulo de ruptura de 34%, 11% e 30% respectivamente. Já em relação a rigidez observa-se um aumento de 21% nos compósitos com reforço com tratamento híbrido e redução de 4% e 8% para os tratamentos em autoclave, alcalino respectivamente.

O espaçamento médio entre as fissuras também é um parâmetro importante para a avaliação do desempenho dos compósitos. Com as fotografias das placas no momento de ruptura, traçou-se três linhas longitudinais paralelas sobre a mesma, uma no centro e as outras duas nas extremidades, estas linhas estavam delimitadas pelos pontos de carregamento distantes 5 cm um do outro. Desta forma foi possível contar o número de fissuras que interceptavam cada linha para depois calcular a média para cada placa, mesma metodologia adotada em estudos anteriores (Arruda Filho, 2015).

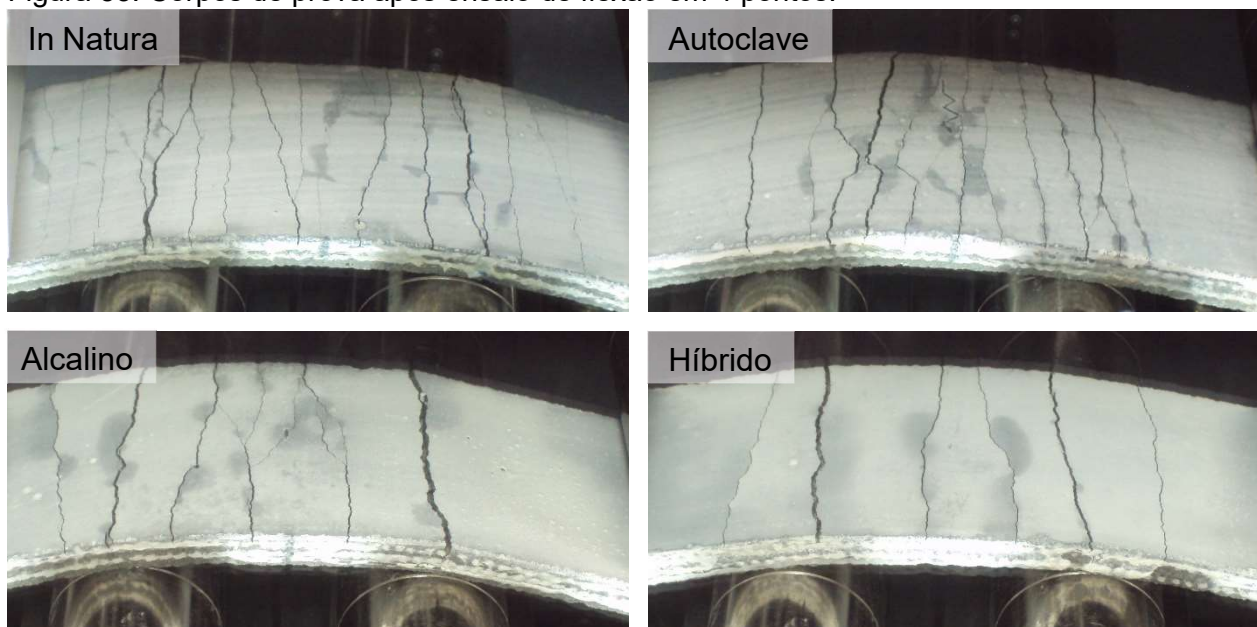
Na Tabela 17 são apresentados o número de fissuras e o espaçamento entre elas para os quatro compósitos estudados.

Tabela 17. Número de fissuras nos compósitos – Ensaio de flexão em 4 pontos.

Tratamento do reforço	In Natura	Autoclave	Alcalino	Híbrido
Média nº fissuras	5,78	7,00	4,44	3,67
Espaçamento médio entre fissuras (mm)	8,65	7,14	11,25	13,64

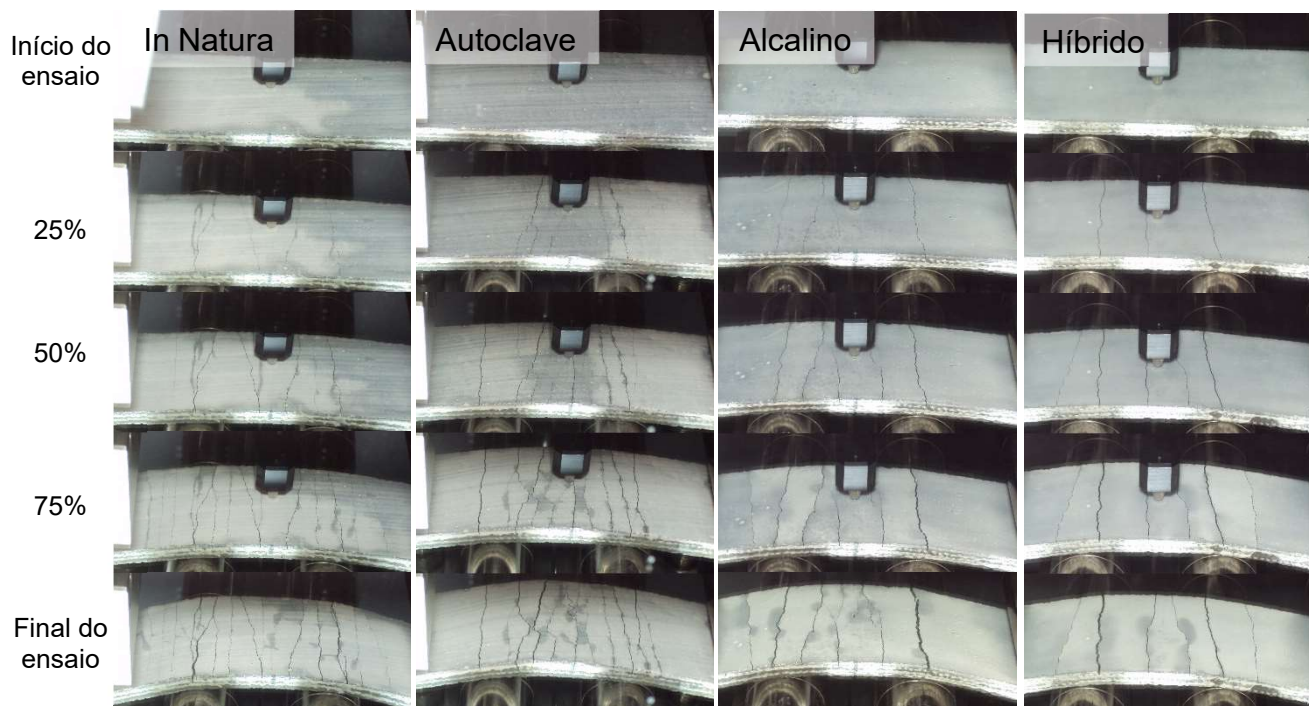
As informações contidas na Tabela 17 mostram que, assim como como ensaio de tração direta, os compósitos com reforço in natura e autoclavado apresentaram mais fissuras que os corpos de prova com reforço com tratamento alcalino e híbrido. As fissuras nos corpos de prova com reforço in natura e autoclavado ocorreram de forma distribuída uniformemente ao longo do corpo de prova mostrando boa interação entre o reforço e a matriz. Os corpos de prova com reforço alcalino e híbrido apresentaram menos fissuras. A Figura 53 apresenta os corpos de prova dos quatro tipos de compósitos após o ensaio de tração direta.

Figura 53. Corpos de prova após ensaio de flexão em 4 pontos.



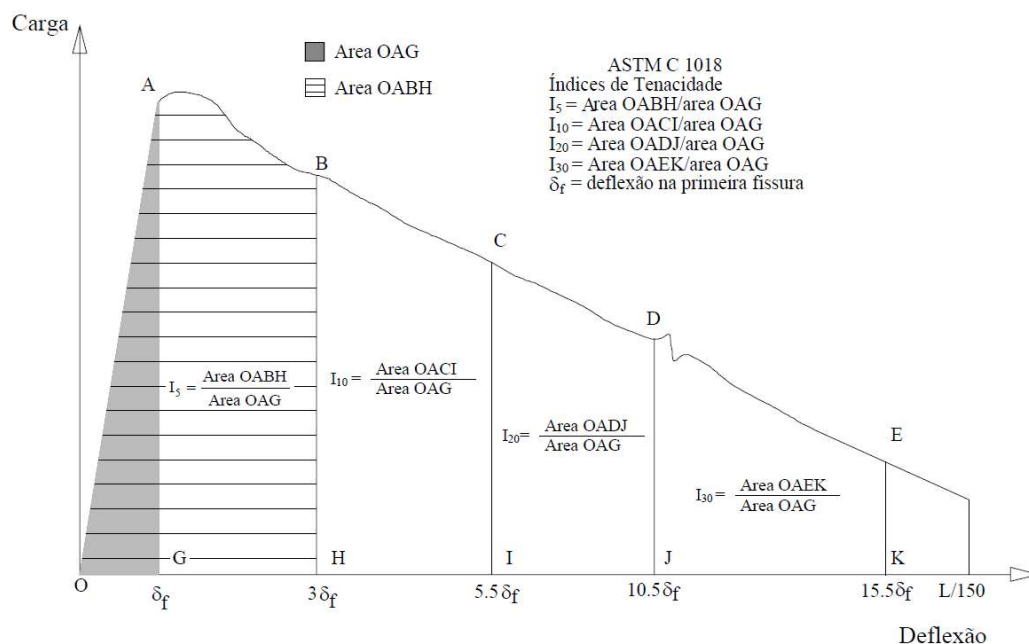
A Figura 54 apresenta a evolução das fissuras nos corpos-de-prova durante os ensaios de flexão em quatro pontos, no início e final do ensaio, e em 25%, 50% e 75% do deslocamento na ruptura.

Figura 54. Evolução das fissuras nos compósitos, no ensaio de flexão em 4 pontos.



A tenacidade foi determinada de acordo com a Norma ASTM C1018, em que a área sob a curva “carga x deslocamento” é utilizada para a determinação dos índices de tenacidade I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} . Existe um deslocamento associado para cada índice. Este deslocamento é um múltiplo da primeira fissura: para I_5 o deslocamento é 3,5 vezes o valor do deslocamento da primeira fissura, 5,5 vezes para I_{10} , 10,5 vezes para I_{20} e 15,5 vezes para I_{30} . Cada índice é calculado dividindo a área sob a curva “carga x deslocamento” até seu deslocamento respectivo, pela área sob a curva “carga x deslocamento” até o deslocamento da primeira fissura. A Figura 55 mostra a definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992).

Figura 55. Definição dos pontos para o cálculo dos índices de tenacidade proposto pela ASTM C1018 (1992), Lima (2004).



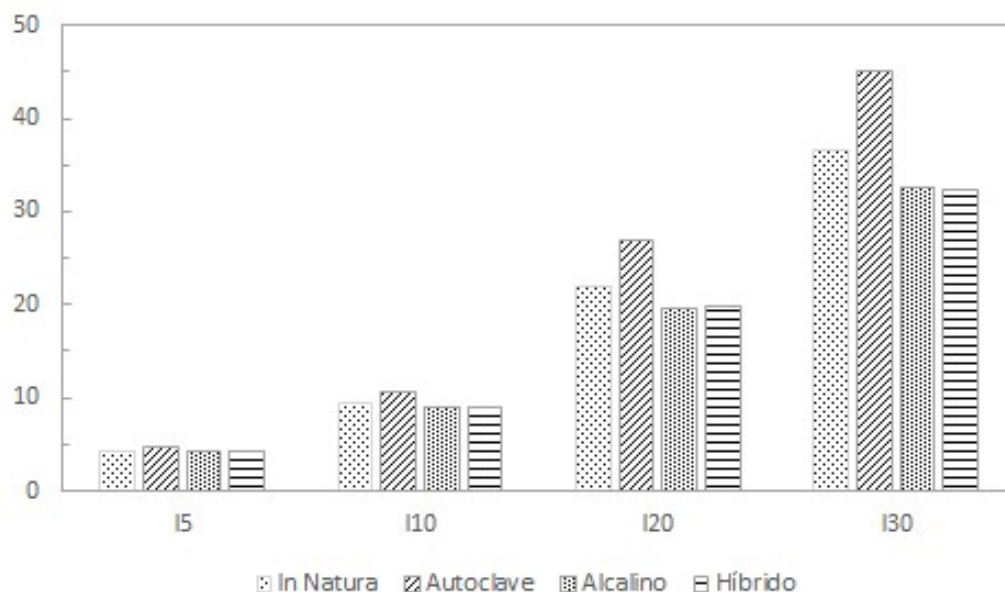
Na Tabela 18 são exibidos os resultados médios e desvios-padrões, dos índices de tenacidade I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} , bem como o volume de reforço em cada compósito.

Tabela 18. Índices de Tenacidade.

Tratamento	Volume de Reforço	Índices de Tenacidade			
		I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
In Natura	6,71%	4,31 (0,29)	9,43 (0,37)	21,88 (0,87)	36,49 (1,61)
Autoclave	5,75%	4,77 (0,17)	10,54 (0,74)	26,93 (4,07)	45,02 (5,32)
Alcalino	6,19%	4,37 (0,30)	8,89 (0,45)	19,64 (1,02)	32,60 (3,61)
Híbrido	6,25%	4,28 (0,43)	8,99 (1,26)	19,73 (2,02)	32,26 (3,43)

A Figura 56 mostra o comparativo dos índices de tenacidade I_5 , I_{10} , I_{20} e I_{30} , onde é possível observar que os compósitos reforçados com tecidos autoclavados apresentaram desempenho superior ao compósito com reforço sem tratamento. Já os compósitos com reforço com tratamento alcalino e híbrido apresentaram leve queda no desempenho. Isso também pode ser visto pela quantidade de fissuras e pelo espaçamento das mesmas.

Figura 56. Comparativo dos Índices de Tenacidade.



4.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados nos ensaios de tração direta e flexão em 4 pontos é possível concluir que, mesmo apresentando melhorias no comportamento em relação a primeira fissura, os compósitos com os tratamentos em autoclave, alcalino e híbrido, apresentaram perda de desempenho na tensão máxima.

Em relação à tração direta, dentre os compósitos com reforços tratados, o compósito com reforço com tratamento em autoclave apresentou melhor padrão de fissuração e maior desempenho em relação à tensão máxima.

Em relação à flexão, dentre os compósitos com reforços tratados, o compósito com reforço com tratamento em autoclave, mesmo apresentando mais fissuras e mais tenacidade que os demais, apresentou o pior desempenho em relação à tensão de primeira fissura e ao módulo de ruptura, dentre os compósitos com reforços tratados o com tratamento alcalino apresentou melhor desempenho.

5 DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS SANDUÍCHE COM FACES CIMENTÍCIAS REFORÇADAS COM TECIDOS DE JUTA E NÚCLEO EM XPS

No capítulo anterior foi exibido o desenvolvimento e a produção dos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de abacaxi in natura e tratados, e a análise do seu comportamento mecânico através dos ensaios de tração direta e flexão em quatro pontos.

Neste quinto capítulo é apresentado o desenvolvimento e a produção dos painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS. Numa primeira etapa o comportamento a flexão dos painéis sanduíche foi estudado com quatro diferentes configurações na interface núcleo-face: núcleo liso, núcleo com ranhuras paralelas, núcleo com ranhuras transversais e núcleo com conectores de cisalhamento. Após a determinação da melhor interface núcleo-face, foi estudado o comportamento a flexão dos painéis sanduíche, variando o número de camadas de reforço nas faces de 1 a 5.

5.1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil tem um grande impacto ambiental, utilizando muita energia e consumindo grandes quantidades de recursos naturais. Na produção de compósitos cimentícios é comum o emprego de fibras manufaturadas que possuem alto impacto ecológico. Uma alternativa para reduzir o impacto ambiental é a utilização de materiais renováveis como as fibras vegetais. O uso de fibras vegetais como reforço de compósitos cimentícios traz sustentabilidade pois, as fibras são recursos naturais renováveis, baratos e seu beneficiamento necessita de baixo grau de industrialização.

Em compósitos cimentícios laminados reforçados com têxteis os valores de resistência à flexão e à tração são diretamente influenciados pelo número de camadas de reforço. Kong *et al.* (2017) utilizaram fibra de vidro para reforçar matriz cimentícia, produzindo compósitos com 2 e 6 camadas de reforço. Souza *et al.* (2019) analisaram o comportamento à tração direta de compósitos cimentícios reforçados com 1, 3 e 5 camadas de fibras de curauá. Eles verificaram o melhor desempenho nos compósitos com maior número de camadas de reforço, que apresentaram melhor resistência à flexão, tração, rigidez e padrão de fissuração.

Os compósitos formados por argamassas e concretos reforçados com têxteis (TRM – Textile Reinforced Mortar; TRC – Textile Reinforced Concrete) têm sido utilizados no desenvolvimento de novos produtos/elementos construtivos, bem como na recuperação e reforço de estruturas existentes, pois possuem excelentes propriedades mecânicas, podendo apresentar redução do peso próprio e dos custos dos produtos (Kong *et al.* 2017).

O uso de tecidos de fibras vegetais como reforço de compósitos cimentícios apresenta vantagens pois, devido a sua forma de confecção e ao intertravamento do urdume com a trama, os tecidos se mantem unidos e alinhados, proporcionando mais uniformidade na conformação dos compósitos cimentícios com consequente aumento de resistência à tração, flexão, maior tenacidade e rigidez.

Tecidos de fibras sintéticas como fibras de vidro (Cevallos *et al.* 2015) (Dalalbashi *et al.* 2021) (Kong *et al.* 2017), fibras de carbono (Alrshoudi, 2021), fibras de aço (Dalalbashi *et al.* 2021), e tecidos de fibras naturais como fibras de linho, juta, cânhamo, algodão, curauá (Souza, 2017) (Souza, 2019) (Souza, 2020) (Salgado, 2021), sisal (Cevallos *et al.* 2015) entre outros, tem sido empregados como reforços de concretos e argamassas. As fibras naturais de origem vegetal são recursos renováveis, biodegradáveis, com grande disponibilidade, além do baixo custo, bom desempenho mecânico e baixa densidade, que quando associadas a matriz cimentícia, na forma de tecidos, tem potencial para serem usados em muitas aplicações na construção civil (CEVALLOS *et al.* 2015; SOUZA, 2020).

Uma fibra bastante utilizada como reforço na produção de compósitos cimentícios é a juta, que pertencentes ao gênero *Corchorus*, da família *Tiliáceae*, ela se desenvolve em climas úmidos e tropicais, sendo obtida da parte lenhosa do caule que possui 2 cm de diâmetro, com altura de 3 a 4 metros. Os tecidos de juta são produzidos para diversas aplicações tais como decoração, artesanato, fabricação de sacolas, etc. (FIDELIS, 2019) (MIRANDA, 2016). No Brasil, a produção de juta se concentra ao longo do Rio Amazonas, entre Manaus e Santarém, em regiões de várzea. O cultivo da juta se tornou uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica (PIRES, 2009) (FIDELIS, 2019).

Uma forma de melhorar o desempenho de compósitos cimentícios reforçados por tecidos vegetais é a configuração em painéis sanduíche, que são materiais constituídos por uma estrutura em camadas: duas lâminas finas, denominadas de faces,

separadas por uma camada de um material de baixa densidade, geralmente é menos rígido e resistente, chamado de núcleo (CALDAS, 2014). A união das faces com o núcleo otimiza as funções de cada um: As faces fornecem o aspecto do painel, a resistência, a rigidez, o núcleo por sua vez confere a resistência ao cisalhamento e impacto, baixa densidade, isolamento térmico e acústico (GLÓRIA, 2021).

As estruturas sanduíche podem ser utilizadas como elementos estruturais pré-moldados, painéis de parede, telhado e piso (TEKALUR *et al*, 2008). Apresentando principal vantagem a alta resistência e rigidez com quantidade reduzida de massa (ZHOU *et al.*, 2005). Graças à alta resistência ao impacto, baixa condutividade térmica e acústica, as estruturas sanduíche estão sendo preferidas em relação a outras soluções convencionais de construção em diversas aplicações industriais (DEY *et al.*, 2015) (ARBAOUI *et al.*, 2015).

Quando um painel sanduíche é submetido ao ensaio de flexão em 4 pontos, a face superior sofre compressão, enquanto a face inferior suporta tração e o núcleo garante a transferência de tensão entre as faces, sendo submetido principalmente ao cisalhamento (CUYPERS *et al*, 2011). O desempenho estrutural dos painéis sanduíche dependem das propriedades das faces, do núcleo, da eficácia da ligação entre núcleo e faces e das dimensões dos componentes, em particular da espessura das faces e do núcleo (TEKALUR *et al*, 2008) (ZHOU *et al*, 2005).

A disposição do painel sanduíche em camadas, as diferentes propriedades dos elementos e o processo de fabricação tornam o painel sanduíche suscetível a defeitos na ligação entre faces e núcleo, provocando alta concentração de tensões na interface entre as faces e o núcleo, (SCHWARTS-GIVLI *et al*, 2007) (ICARDI *et al*, 2009). Um dos principais problemas encontrados em painéis sanduíche submetidos a ensaios de flexão é a delaminação das camadas, provocada por esta ausência de aderência entre as faces e o núcleo. Além disso, a ruptura por cisalhamento também é comumente notada (GLÓRIA, 2021).

As pesquisas com painéis sanduíche apresentam resultados promissores para a melhoria da resistência e rigidez deste tipo de material, porém ainda carecem de propostas eficazes para solucionar o problema da delaminação das camadas que os compõem.

O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento a flexão painéis sanduíche com as faces reforçadas em tecidos de juta, variando o número de camadas de reforço de 1 a 5. Para isto foram estudadas quatro diferentes configurações na interface núcleo-face: núcleo liso, núcleo com ranhuras paralelas, núcleo com ranhuras transversais e núcleo com conectores de cisalhamento. Sendo a configuração que apresentou melhor desempenho foi empregada para conformação dos painéis sanduíche com diferentes números de camadas de reforço na face.

Foi investigado também o comportamento mecânico de fibras e fios de juta, a influência da orientação (trama e urdume) no desempenho mecânico dos tecidos e das faces em compósitos cimentício reforçados com tecido de juta. Além de analisar o desempenho dos painéis sanduíche em relação a sua massa.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais primários utilizados nesta etapa da pesquisa foram as fibras naturais de juta na forma de tecidos, os constituintes da matriz cimentícia e o núcleo em poliestireno extrudado (XPS).

5.2.1 Materiais

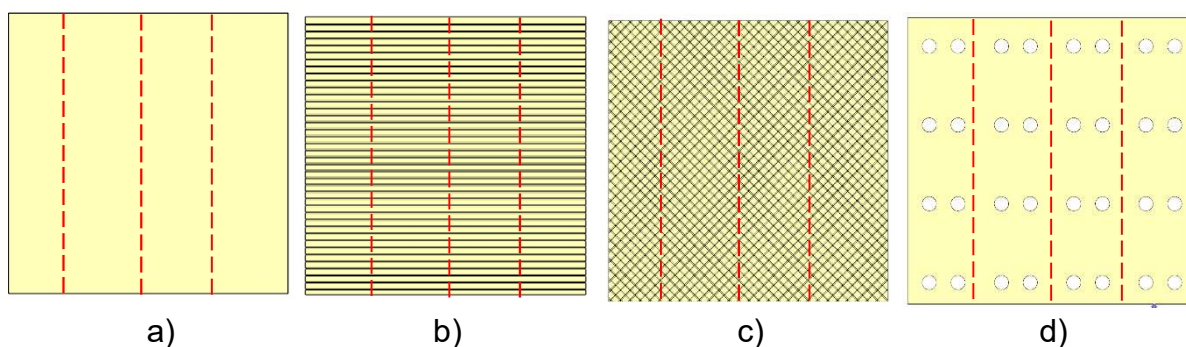
5.2.1.1 Núcleo

O núcleo utilizado foi poliestireno extrudado (XPS), com 20 mm de espessura e densidade de 0,04 g/cm³. Quatro configurações diferentes configurações de interface núcleo-face foram utilizadas para conformação dos painéis

O primeiro painel continha um núcleo liso, sem nenhum tipo de ranhura ou seção foi utilizado como referência na pesquisa, chamado de Painel Sanduíche em Compósito Cimentício reforçado com Juta – Referência (PSCCJ-R). No núcleo do segundo painel, foram feitas ranhuras transversais paralelas, com 2 mm de espessura, 2 mm de profundidade e espaçamento de 20 mm, chamado Painel Sanduíche em Compósito Cimentício reforçado com Juta – Ranhuras Paralelas (PSCCJ-//). No núcleo do terceiro painel, foi feita uma malha de ranhuras ortogonais, sendo que estas tinham inclinação de 45° em relação ao tecido, chamado Painel Sanduíche em Compósito Cimentício reforçado com Juta – Ranhuras em Malha (PSCCJ-#). No núcleo do último painel, foram feitos furos cilíndricos com 20 mm de diâmetro, regularmente espaçados

de acordo com a Figura 57 que foram preenchidos com matriz, criando assim os conectores de cisalhamento, chamado Painel Sanduíche em Compósito Cimentício reforçado com Juta – Conectores de Cisalhamento (PSCCJ-Ø).

Figura 57. Diferentes tipos de painel – a) PSCCJ-R; b) PSCCJ-//; c) PSCCJ-#; d) PSCCJ- Ø



5.2.1.2 Matriz

A matriz cimentícia utilizada nesta pesquisa foi baseada no trabalho de Lima (2018). A caracterização de seus constituintes, propriedades mecânicas, e a forma de preparo já foram discutidos no capítulo 3 desta tese.

5.2.1.3 Reforço

O tecido de juta usado como reforço possui espaçamento de 1,5 mm no sentido da trama e do urdume, com gramatura de 284 g/m². O tecido foi lavado em água a 50 °C por 20 minutos, a fim de remover enzimas e impurezas que pudessem reagir com a matriz cimentícia. Depois secou ao ar por 24 horas. A massa específica das fibras foi de 1,4749 g/cm³, determinado através do ensaio de picnometria a gás hélio, utilizando o picnômetro Accupyc II1310, fabricado pela Micrometrics.

5.2.2 Métodos

5.2.2.1 Determinação da área da seção transversal do reforço.

A área da seção transversal dos feixes e tecidos foram determinadas usando os procedimentos adotados por Caldas (2013). Os feixes e tecidos foram cortados 300 mm e 120 mm de comprimentos respectivamente. Cada amostra teve sua massa medida em balança com precisão de 0,0001 g, colocadas para secar em estufa a 80 °C

por 24 h. Com a massa seca foi possível determinar a área da secção transversal dos feixes e tecidos de acordo com a Equação 4. Para o tecido foi descontada a massa dos fios que estavam na direção perpendicular ao sentido do ensaio, pois não fazem parte da seção transversal do corpo de prova.

Equação 4

$$Am = \frac{m}{\rho r \cdot L}$$

Em que:

Am = área da seção transversal;

m = massa seca;

ρr = densidade;

L = comprimento.

A área calculada desta forma utiliza apenas a seção de sólidos descartando os vazios. A densidade das fibras de juta foi obtida através da picnometria a gás hélio.

Como a massa da fibra era muito pequena não foi possível medi-la. Então foi utilizado um microscópio ótico modelo Quimis Q7708S-4, com câmera acoplada ao microcomputador com software Motic Image Plus 2.0, realizando três medições do diâmetro em cada fibra e calculando o diâmetro médio, que foi utilizado para determinar a área da seção transversal.

5.2.2.2 Avaliação do comportamento mecânico do reforço

Quinze amostras de fibras e fios foram ensaiadas. 30 amostras de tecidos foram ensaiadas, sendo 15 na direção do urdume e 15 na direção da trama. Isto foi necessário pois no processo de confecção dos tecidos podem ser aplicados diferentes tensões na trama e no urdume, logo se fez necessário identificar em qual direção o tecido apresentava melhor desempenho. O módulo de elasticidade foi calculado com valores obtidos na curva Tensão X Deformação Específica, situados a 20% e 80% da tensão máxima, no trecho linear da curva. A deformação específica foi calculada com o deslocamento da garra.

Os ensaios de tração direta nos corpos de prova de fibra foram realizados em um texturômetro, modelo TA. XT PLUS Texture Analyzer, com célula de carga de 500 N e velocidade de deslocamento do travessão de 1,8 mm/min. A Norma ASTM D3822-07 foi utilizada como referência pois está relacionada às fibras têxteis.

Os ensaios de tração direta nos feixes e nos tecidos foram realizados em uma máquina de ensaio universal estática servo-elétrica modelo Autograph AGS-X Séries, fabricante Shimadzu, com capacidade de carga de 100 kN, acoplada a um microcomputador com processador Intel – I5, com o software específico Trapesium X. A velocidade do deslocamento da ponte da máquina universal de ensaios foi de 1,8 mm/min.

As fibras foram fixadas num suporte de papel de acordo com a Figura 58, além do adesivo cada extremidade do molde foi envolvida com fita adesiva para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra. Os feixes foram fixados com adesivo de cura rápida em uma lixa nº 100. Na Figura 58 é possível observar o esquema do corpo de prova com fibra e o ensaio de tração direta. Na Figura 59 é possível observar o esquema do corpo de prova do feixe. Os tecidos foram fixados com adesivo de cura rápida em pedaços de papel, para evitar o escorregamento e a concentração de tensões na garra durante a realização do ensaio, como é possível observar na Figura 60.

Figura 58. A) Esquema do corpo de prova com fibra; B) Ensaio de tração direta na fibra.

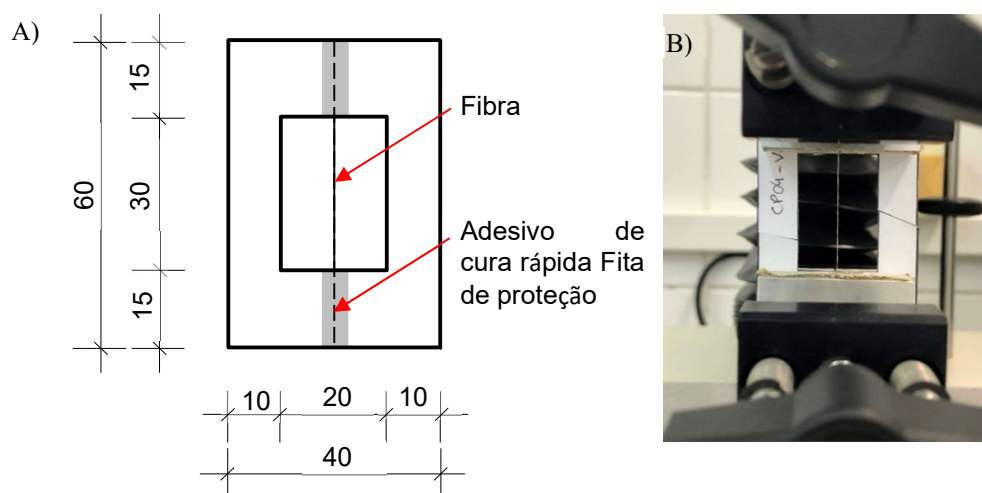


Figura 59. A) Esquema do corpo de prova do feixe; B) Corpo de prova do feixe.

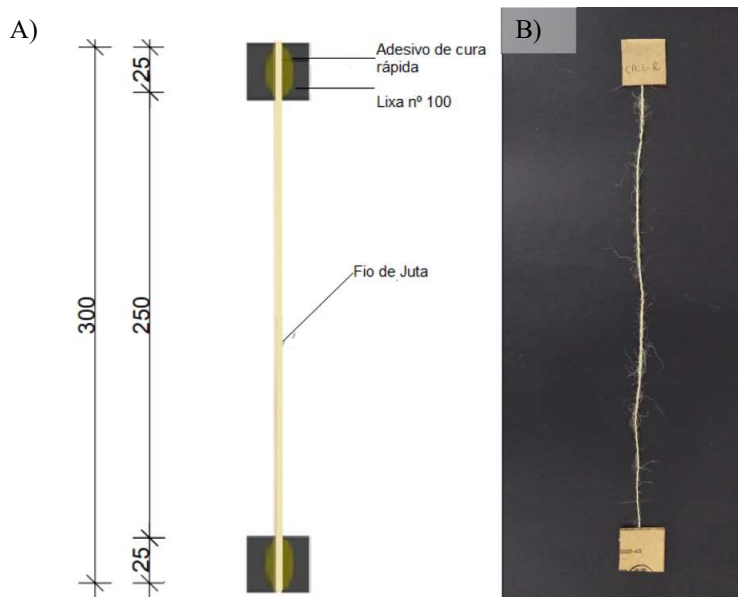
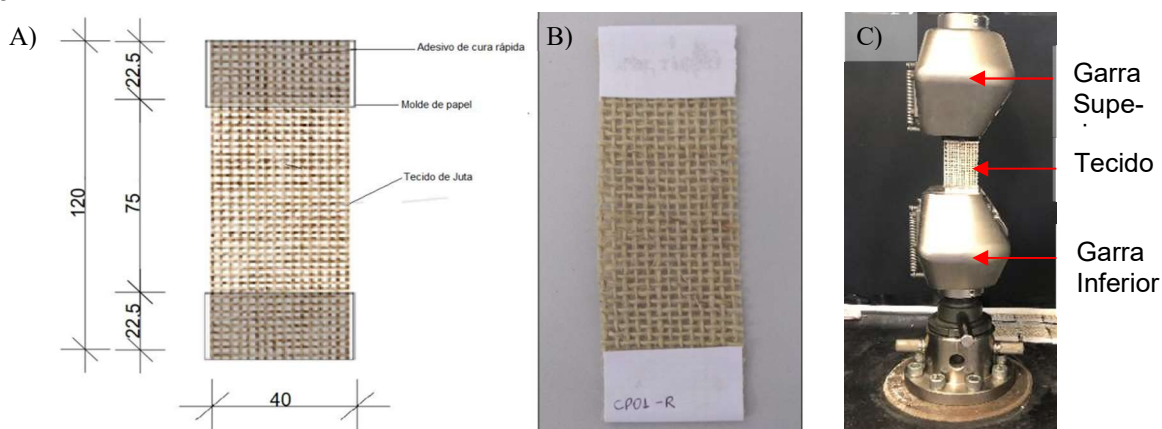


Figura 60. A) Esquema do corpo de prova de tecido; B) Corpo de prova de tecido; C) Ensaio de Tração.



5.2.2.3 Moldagem das faces e dos painéis

Duas placas cimentícias reforçadas com tecido de juta foram moldadas, sendo uma com o reforço disposto na direção do urdume e a outra na direção da trama, para avaliar o efeito da direção do reforço no desempenho do compósito.

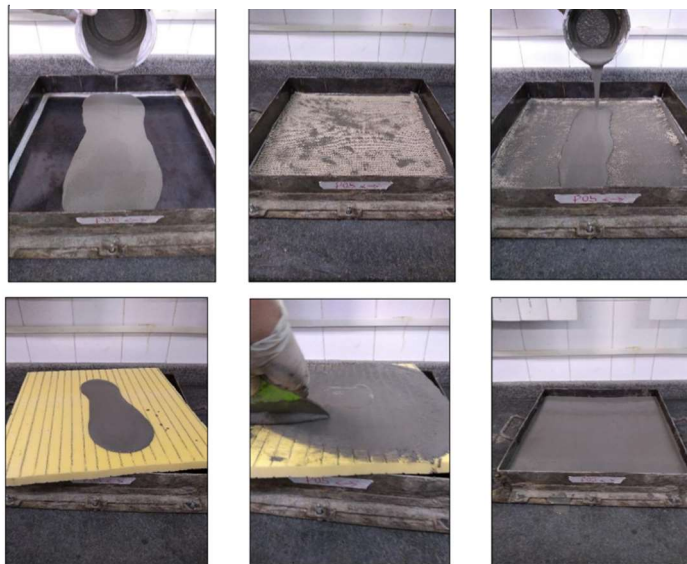
A moldagem das placas foi iniciada preparando a matriz e lançado uma camada de 2 mm em uma fôrma quadrada com 40 cm de lado. Então a primeira camada de

reforço em tecido de juta foi inserida comprimindo-a sobre a matriz. A segunda camada de argamassa foi aplicada uniformemente sobre o tecido, comprimindo a matriz na direção do tecido. O processo de inserção de matriz e camada de reforço repetiu-se até obter 4 camadas de reforço envoltas por argamassa. A espessura da placa foi de 1 cm.

Quatro painéis sanduíche foram moldados, um para cada configuração de interface núcleo-face. Após a determinação da melhor configuração núcleo-face cinco painéis sanduíche foram moldados, sendo que as faces de cada um deles foram moldadas com quantidades diferentes de camadas de reforço variando de 1 a 5 camadas.

A conformação dos painéis foi iniciada moldando a face inferior, como citado anteriormente. Em seguida, foi inserido o núcleo em poliestireno extrudado (XPS) aplicando uma camada de matriz na face do núcleo para preencher as ranhuras do mesmo, melhorando a conformação da interface núcleo-face. A face superior foi moldada sobre o núcleo seguindo os mesmos procedimentos utilizados para a confecção da inferior. Observa-se na Figura 61 o processo de moldagem dos painéis sanduíche.

Figura 61. Processo de moldagem dos compósitos



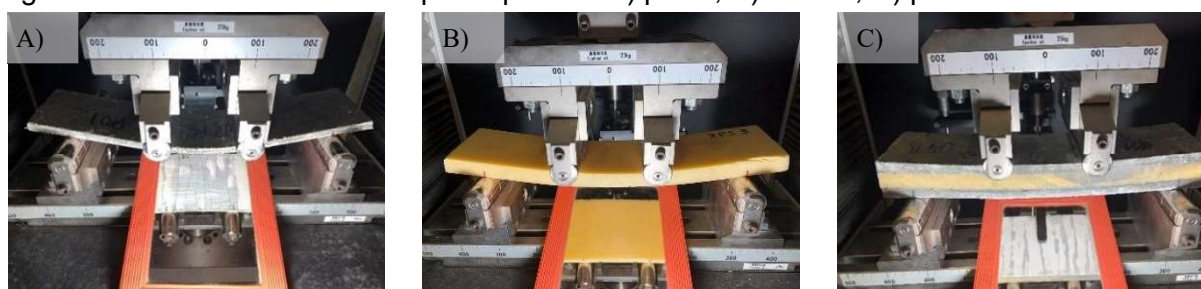
Após 72 h os painéis foram retirados das fôrmas e imersos em reservatório com água até completar 28 dias de cura. Após a cura os painéis foram cortados obtendo-se os quatro corpos de prova por painel, com dimensões de 40 cm de comprimento, 10 cm de largura e a espessura variou de 3 a 4,5 cm de acordo com o número de camadas de reforço nas faces.

5.2.2.4 Avaliação do comportamento mecânico das faces, núcleo e painel

Cada um dos cinco painéis sanduíche, das duas placas cimentícias reforçadas com tecidos de juta e do núcleo de XPS forneceram quatro corpos de prova cada para ensaio de flexão em quatro pontos.

Os ensaios de flexão em quatro pontos foram realizados de acordo com as normas americanas ASTM C 947 (ASTM, 1999) e ASTM C 459 (ASTM, 1997) em corpos de prova prismático-retangulares, a fim de se analisar o comportamento à flexão, bem como o processo de abertura das fissuras. Os ensaios foram realizados na máquina na mesma máquina de ensaios onde foram realizados os ensaios de tração nos tecidos, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi 0,5 mm/min. Um Transdutor Diferencial Variável Linear (LVDT) foi acoplado ao aparato de flexão, que permitiu medir a flecha no centro do vão. A distância entre os pontos de aplicação de carga foi de 100 mm, e entre os apoios foi de 300 mm. A Figura 62 apresenta a configuração e a realização do ensaio.

Figura 62. Ensaio de flexão em quatro pontos: A) placa; B) núcleo; C) painel sanduíche

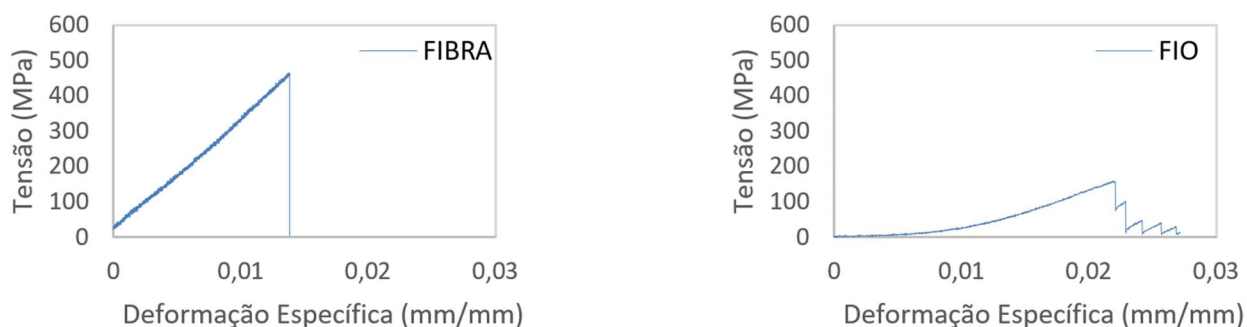


5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Ensaio de Tração nas fibras, fios e tecidos

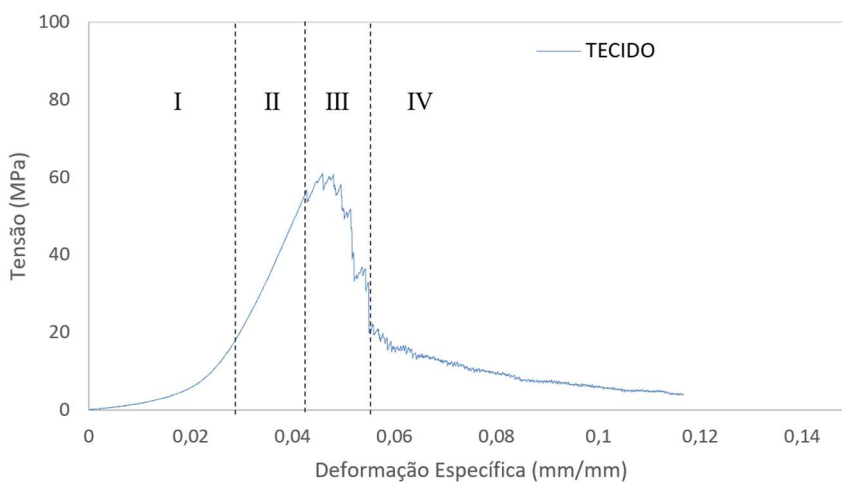
Durante o ensaio de tração direta as fibras mostraram pouca acomodação inicial seguida de um comportamento linear elástico até a ruptura. Os fios sofreram uma acomodação das fibras que o compõem, apresentando baixo ganho de tensão no início do ensaio. Após a acomodação, as fibras se rearrumam contribuindo de maneira eficiente para suportar o carregamento, apresentando comportamento linear, aumentando as tensões até a ruptura da primeira fibra, a partir deste momento ocorre a ruptura sequencial das demais fibras, acompanhada de queda na tensão a cada fibra rompida. Na Figura 63 é possível observar as curvas típicas Tensão versus Deformação Específica para a fibra e para o fio.

Figura 63. Curvas Tensão x Deformação Específica – na fibra e no fio.



A Figura 64 mostra a curva de Tensão X Deformação Específica durante o ensaio de tração nos tecidos de juta, é possível observar quatro fases distintas:

Figura 64. Curva Tensão x Deformação Específica – no tecido.



Na fase I ocorre uma acomodação natural das fibras nos fios do tecido, com um aumento gradual da tensão e da rigidez; na fase II ocorre o aumento da tensão, da deformação e da rigidez, até o início da ruptura das fibras; na fase III inicia-se o processo de ruptura das fibras do tecido; na fase IV ocorre um escorregamento entre as fibras dentro dos feixes, pois a maior parte das fibras, senão todas, já romperam, pois a deformação específica média na ruptura das fibras individuais foi de 0,014 mm/mm, mesmo considerando a acomodação inicial das fibras na fase I, seriam poucas as que romperiam com uma deformação específica acima de 0,060 mm/mm.

Observa-se no Tabela 19, os valores correspondentes para área, deformação específica na ruptura, tensão e módulo de elasticidade, com as respectivas médias e desvios-padrão.

Tabela 19. Valores médios da área, deformação específica na ruptura, tensão e módulo de elasticidade.

	ÁREA (mm ²)	DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA NA RUPTURA (mm/mm)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	RIGIDEZ (GPa)
Fibras	0,0029 (0,001)	0,014 (0,002)	460,17(180,26)	28,07 (10,27)
Fios	0,2200 (0,020)	0,020 (0,010)	166,80 (19,99)	9,69 (0,79)
Tecidos TRAMA	6,770 (0,256)	0,061 (0,003)	59,86 (4,290)	2,01 (0,11)
Tecidos URDUME	7,310 (0,493)	0,052 (0,003)	61,01 (2,790)	2,27 (0,24)

Os fios quando comparados com as fibras apresentam redução nos valores médios de desempenho mecânico, devido aos fios serem formados por múltiplas fibras torcidas. Quando ocorre a ruptura de cada fibra a área da seção transversal do fio diminui e não é considerada a nova área para o cálculo das tensões.

Ao comparar os tecidos com as fibras e fios, a rigidez e a resistência à tração são menores. Isto ocorre pois os tecidos são formados por fios torcidos de fibras, entrelaçados nas duas direções, sendo necessário um realinhamento até que todas as fibras passem a contribuir com a resistência ao carregamento. Observa-se o desempenho um pouco superior dos tecidos ensaiados na direção do urdume em relação aos tecidos ensaiados na direção da trama, verifica-se um acréscimo de 1,92 % na tensão máxima na direção do urdume, inferior aos 5,73 % encontrado por Fidelis (2019). Isto pode ter ocorrido, pois as tensões aplicadas na confecção dos tecidos utilizadas nesta pesquisa, nas direções do urdume e da trama, foram mais uniformes que os aplicados na confecção do tecido de Fidelis (2019).

Devido ao entrelaçamento da trama com o urdume, mesmo com o rompimento de todas as fibras do tecido, este não se rompe por completo, pois o rompimento de cada fibra não ocorre no mesmo ponto, mas em espaçamentos diferenciados. O entrelaçamento o tecido unido, porém com perda de resistência à medida que aumenta o deslocamento.

Fidelis (2019) analisou o comportamento à tração de fibras, fios e tecidos de juta e encontrou os seguintes resultados para a fibra: tensão máxima igual a 249 MPa, inferior ao encontrado nesta pesquisa e módulo de elasticidade igual a 43,9 GPa, superior ao encontrado nesta pesquisa; para os fios: tensão máxima igual a 104 MPa e módulo de elasticidade igual a 5,68 GPa, valores inferiores aos encontrados nesta

pesquisa; para os tecidos encontrou os seguintes resultados: tensão máxima igual a 66 MPa e módulo de elasticidade igual a 4,83 GPa, valores superiores aos encontrados nesta pesquisa. Vale ressaltar que a seção transversal dos fios e tecidos foram determinadas de forma diferente.

A variação entre os valores encontrados pelos diferentes autores, justifica-se pelo fato das fibras vegetais possuírem composição heterogênea química e física ao longo de toda sua seção, além dos fatores externos aos quais são submetidas durante o cultivo como: variações climáticas, variações de temperatura e umidade e exposição ao sol.

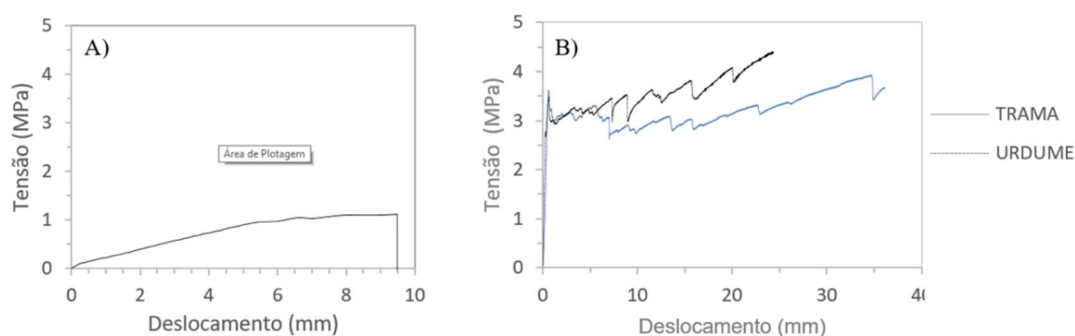
5.3.2 Ensaio de flexão em quatro pontos no núcleo e nas faces.

Três corpos de prova provenientes das faces e do núcleo foram submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos.

No ensaio do núcleo a curva Tensão versus Deslocamento mostra uma acomodação inicial, seguida de um comportamento linear até 5 mm de deslocamento com o aumento de tensão, em seguida é observado no gráfico que o material entra no regime plástico até a sua ruptura brusca.

No ensaio das placas reforçadas com tecidos de juta é possível observar que o desempenho da placa com reforço na direção do urdume apresentou após a primeira fissura um comportamento superior ao da placa com reforço na direção da trama. Este comportamento reflete o comportamento dos tecidos que apresentaram desempenho melhor na direção do urdume. Figura 65 mostra a curva Tensão versus Deslocamento do ensaio de flexão em quatro pontos no núcleo em XPS e nos compósitos reforçados com tecidos de juta na direção do urdume e da trama.

Figura 65. Curvas Tensão x Deslocamento: A) núcleo; B) placas com reforço na direção da trama e do urdume.



O Tabela 20 mostra o resultado do ensaio de flexão do compósito cimentício reforçados com tecidos de juta, para cada direção de reforço, o volume de reforço, tensão de primeira fissura, deslocamento de primeira fissura, tensão máxima, deslocamento na tensão máxima e rigidez, com as respectivas médias e desvios-padrões, além do núcleo de XPS.

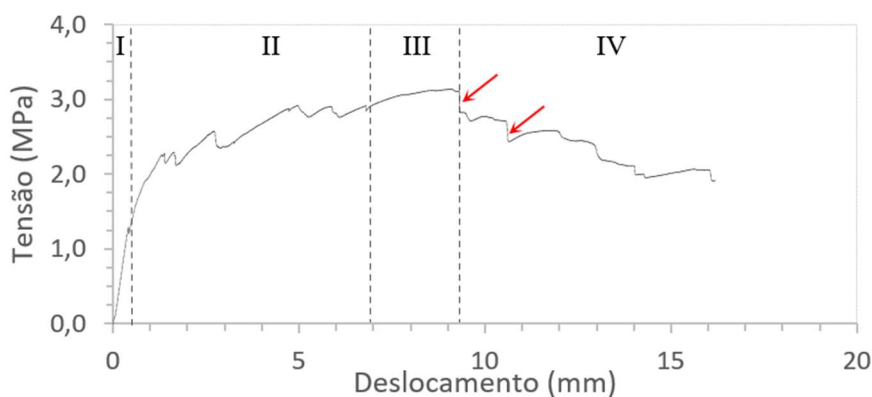
Tabela 20. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos nas placas na direção do urdume e da trama.

Direção do Reforço	VOLUME DE REFORÇO	TENSÃO DE 1ª FISSURA (MPa)	DESLOC.DE 1ª FISSURA (mm)	Módulo de Ruptura (MPa)	Desloc. no Módulo de Ruptura (mm)	RIGIDEZ (GPa)
Trama	12,02	3,43 (0,22)	0,13 (0,18)	3,64 (0,25)	27,86 (6,64)	8,64 (1,70)
Urdume	11,10	2,90 (0,07)	0,28 (0,03)	4,70 (0,11)	25,39 (0,86)	12,29 (2,01)
Núcleo (XPS)	-	-	-	1,19 (0,09)	10,62 (1,62)	0,35 (0,05)

5.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos - painéis sanduíche com as quatro configurações na interface núcleo-face.

Devido ao melhor desempenho das placas reforçadas na direção do urdume, os painéis sanduíche foram moldados com o reforço nesta direção. Três corpos de prova provenientes de cada tipo de painel sanduíche, foram submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. Na Figura 66 observa-se a curva Tensão x Deslocamento dos corpos de prova dos painéis sanduíche submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. Pode-se observar que o comportamento dos painéis possui quatro fases distintas.

Figura 66. Curva Tensão x Deslocamento no ensaio de flexão em quatro pontos nos painéis.



Na fase I o painel apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis mesmo com o auxílio da câmera fotográfica, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura, evidenciada pela queda de tensão detectada pela máquina de ensaio universal, finalizando esta fase;

Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de juta comece a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto ocorra o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada.

Na fase III praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas a propagação e aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim ainda pode-se observar um acréscimo em sua resistência, até alcançar resistência máxima do painel.

Na fase IV ocorre a ruptura do núcleo (indicadas pelas setas vermelhas), seguida do comportamento de amolecimento devido ao aumento da espessura das fissuras, reduzindo a resistência painel.

O PSCCJ – R utilizado como referência apresentou delaminação, mas não houve ruptura do núcleo. Diferentemente, o PSCCJ – // e PSCCJ – #, que apresentaram melhor transmissão de esforços entre o núcleo e a face, reduzindo a delaminação e apresentando inclusive ruptura do núcleo. No PSCCJ – Ø as quedas de tensão provocadas pela ruptura do núcleo são mais discretas, o que mostra que a inserção de conectores melhorou a resistência do painel ao cisalhamento, com melhora no desempenho na fase pós fissuração. Dentre os painéis estudados o painel com ranhuras paralelas obteve o melhor desempenho, apresentando melhores resultados de tensão e rigidez.

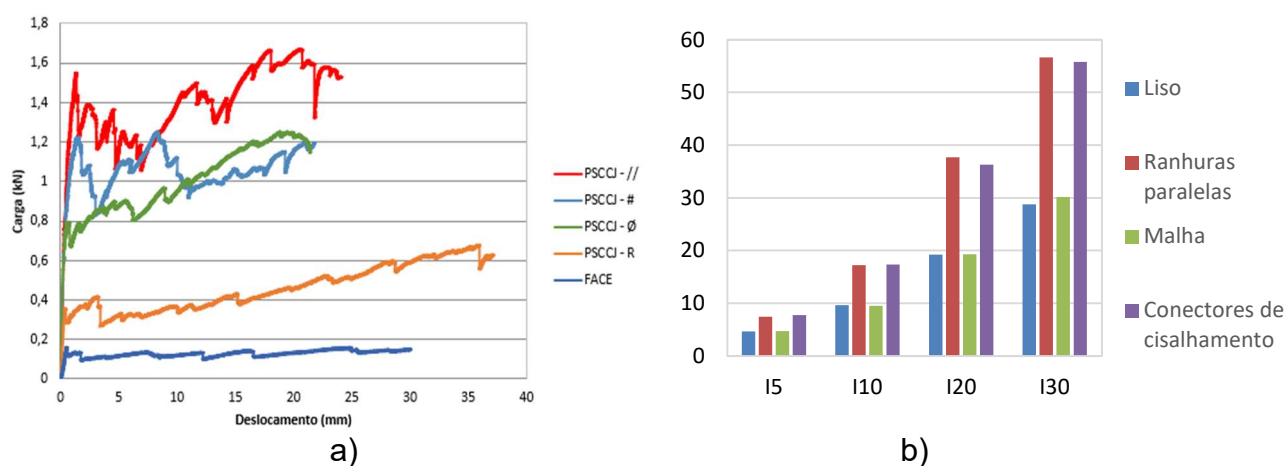
Na Tabela 21 são mostrados os resultados médios e desvios-padrões das tensões de 1ª fissura (MPa), do módulo de ruptura, deslocamentos na tensão 1ª fissura e na ruptura (mm) e a rigidez (GPa), obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos nos painéis sanduíche.

Tabela 21. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos dos painéis

	Volume de reforço	Tensão de 1ª fissura (MPa)	Desloc. de 1ª fissura (mm)	Módulo de Ruptura (MPa)	Desloc. no Módulo de Ruptura (mm)	Rigidez (GPa)
PSCCJ – R	10,61%	0,81 (0,03)	0,50 (0,16)	1,63 (0,14)	36,39 (1,28)	2,04 (0,31)
PSCCJ – //	10,64%	1,38 (0,09)	0,31 (0,01)	2,97 (0,32)	14,23 (5,57)	5,68 (0,26)
PSCCJ – #	10,66%	1,26 (0,06)	0,26 (0,01)	2,47 (0,13)	6,18 (2,99)	5,37 (0,43)
PSCCJ – Ø	9,52%	1,44 (0,33)	0,37 (0,18)	2,23 (0,34)	22,18 (3,61)	4,93 (1,53)

A Figura 67a apresenta um comparativo das curvas de carga x deslocamento dos corpos de prova analisados. A Figura 67b apresenta o comparativo dos índices de tenacidade.

Figura 67. a) Comparação entre curvas carga x deslocamento b) Comparativo dos índices de tenacidade



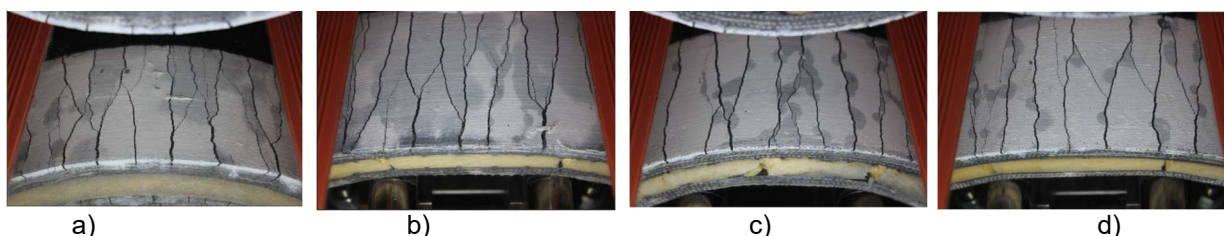
Na Figura 67 a) é possível observar que os painéis PSCCJ – //, PSCCJ – # e PSCCJ – Ø apresentaram desempenho superior ao painel PSCCJ – R, apresentando acréscimo na carga suportada de 146,89% para o PSCCJ – //; de 84,76% para o PSCCJ – # de 84,76% para o PSCCJ – Ø, mostrando que as configurações da interface núcleo-face propostas nesta pesquisa contribuíram para a melhoria do comportamento à flexão dos painéis sanduíche. Vale ressaltar que o PSCCJ – // apresentou

o melhor desempenho. Analisando os modos de ruptura observa-se os painéis apresentaram ruptura por tração nas faces seguidas de ruptura por cisalhamento do núcleo, com exceção do PSCCJ – R onde não houve ruptura do núcleo.

A tenacidade dos painéis foi verificada de acordo com a Norma ASTM C1018. É possível afirmar que o melhor desempenho foi obtido pelo PSCCJ – //, enquanto o pior foi o PSCCJ – R. Na Figura 67 b) é possível perceber que o PSCCJ – // e o PSCCJ – Ø apresentaram comportamento bastante semelhantes, com resultados ligeiramente maiores para o PSCCJ – //.

O espaçamento médio entre as fissuras também é um parâmetro importante para a avaliação do desempenho dos painéis sanduíche. Na Tabela 22 observa-se que o painel PSCCJ – // apresentou o menor espaçamento médio entre fissuras, demonstrando que as ranhuras em paralelo foram as mais eficientes na transmissão de esforços entre núcleo e as faces. A Figura 68 apresenta um comparativo entre o número de fissuras abertas em cada tipo de painel.

Figura 68. Comparativo do número de fissuras abertas para os painéis – a) PSCCJ – R; b) PSCCJ – //; c) PSCCJ – #; d) PSCCJ – Ø



A Tabela 22 apresenta o número de fissuras em cada painel e o espaçamento médio das mesmas.

Tabela 22. Número de fissuras e espaçamento médio das fissuras para cada tipo de painel.

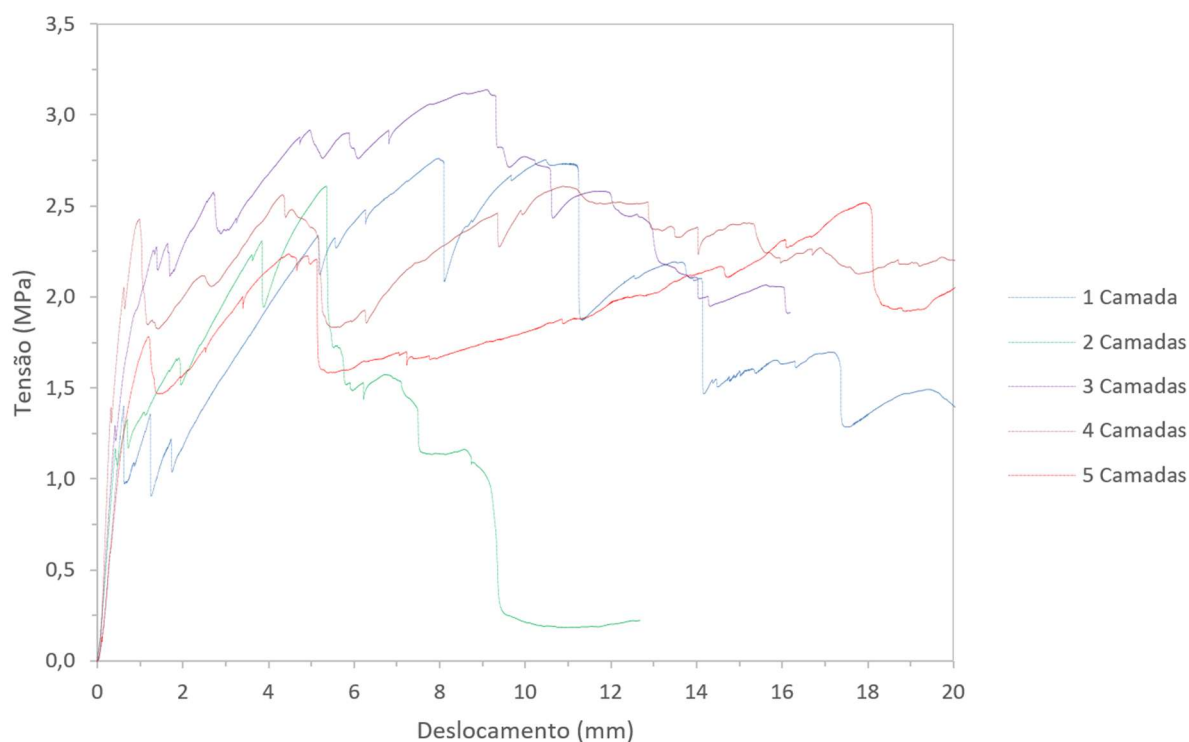
Painel	PSCCJ – R	PSCCJ – //	PSCCJ – #	PSCCJ – Ø
Nº de fissuras	8,56	6,44	5,89	5,78
Espaçamento médio (mm)	11,69	15,52	16,98	17,31

5.3.4 Ensaio de flexão em quatro pontos - painéis sanduíche com diferentes números de camadas de reforço na face.

O painel PSCCJ-//, com configuração de interface núcleo-face em ranhuras transversais paralelas, apresentou melhor desempenho, por isso esta configuração foi escolhida para analisar o efeito da variação de camadas de reforço nas faces do painel.

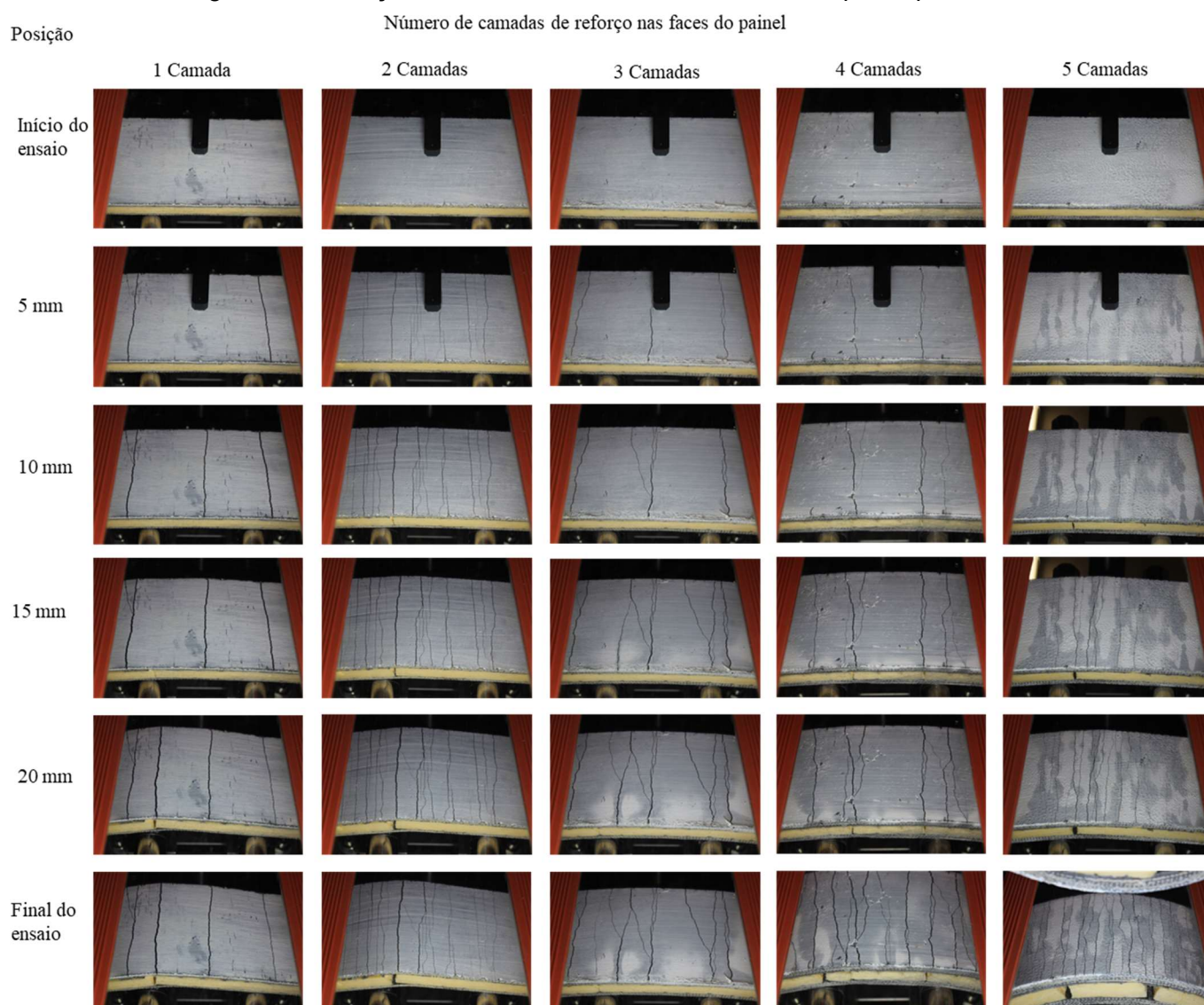
A Figura 69 mostra as curvas de Tensão versus Deslocamento dos painéis analisados, variando as camadas de reforço na face de 1 a 5 camadas.

Figura 69. Curvas de Tensão x Deslocamento no ensaio de flexão em quatro pontos nos painéis sanduíche.



A Figura 70 mostra a evolução da propagação de fissuras durante o ensaio de flexão para as diferentes quantidades de camadas de reforço na face.

Figura 70. Evolução de fissuras no ensaio de flexão em quatro pontos.



O número e o espaçamento entre as fissuras são parâmetros importantes para avaliação do desempenho dos painéis sanduíche. Na Tabela 23 observa-se o número e o espaçamento das fissuras. Fica nítido que quanto maior o número de camadas na face, há um aumento no número de fissuras e menor o espaçamento entre elas.

Tabela 23. Número e espaçamento das fissuras no ensaio de flexão em quatro pontos.

Número de camadas de reforço nas faces do painel	1	2	3	4	5
Média nº de fissuras	2,77	5,22	4,00	6,55	11,22
Espaçamento médio entre fissuras (mm)	36	19,14	25,00	15,25	8,91

Na Tabela 24 são apresentados os valores correspondentes para cada tipo de painel o volume de reforço, a massa específica, tensão de primeira fissura, deslocamento de primeira fissura, módulo de ruptura, deslocamento da tensão máxima e rigidez, com as respectivas médias e desvios-padrões.

Tabela 24. Resultados do ensaio de flexão em quatro pontos dos painéis sanduíche.

Tipo De Painel	Volume De Reforço	Massa Unitária (G/Cm ³)	Tensão De 1ª Fissura (MPa)	Desloc. na Tensão 1ª Fissura (mm)	Módulo de Ruptura (MPa)	Desloc. no. Módulo de Ruptura (mm)	Rigidez (GPa)
1 CAMADA	6,73	0,609	1,34 (0,22)	0,63 (0,18)	2,6 (0,14)	7,16 (1,66)	2,55 (0,58)
2 CAMADAS	9,14	0,692	1,23 (0,07)	0,43 (0,02)	2,56 (0,11)	4,81 (0,86)	3,09 (0,11)
3 CAMADAS	10,98	0,855	1,25 (0,03)	0,41 (0,01)	3,04 (0,12)	7,71 (1,21)	3,34 (0,11)
4 CAMADAS	10,69	1,021	1,37 (0,09)	0,30 (0,01)	2,96 (0,32)	14,23 (5,50)	5,68 (0,25)
5 CAMADAS	12,20	0,982	1,86 (0,56)	1,58 (1,22)	2,50 (0,24)	18,04 (6,61)	1,60 (0,96)

Observou-se que apesar de conter o melhor comportamento de fissuração com número maior de fissuras e menor espaçamento médio entre elas, os painéis com maior número de camadas na face mostraram desempenho inferior aos painéis com três e duas camadas com relação a módulo de ruptura.

As rupturas nos núcleos dos painéis ocorreram entre 8 e 15 mm, um deslocamento maior que o encontrado quando o núcleo foi ensaiado sozinho. Nos painéis com 1, 2 e 3 camadas de reforço na face os núcleos apresentaram apenas uma ruptura, enquanto no com 4 e 5 camadas apresentaram 2 rupturas, segundo Arbaoui *et. al* (2009), este tipo de ruptura acontece quando a tensão de cisalhamento ultrapassa a resistência do material que compõe o núcleo ao cisalhamento. Após os painéis alcançarem a carga máxima o reforço já não era capaz de suportar o carregamento, logo as fissuras aumentavam de espessura e os painéis começavam apresentar delaminação entre as faces e o núcleo.

O painel com três camadas na face obteve um melhor desempenho para a tensão máxima com 3,04 MPa e o correspondente com melhor desempenho para tensão crítica com 1,86 MPa foi o painel com 5 camadas na face. O painel com 4 camadas

na face obteve melhor desempenho com relação a rigidez correspondente a 5,68 GPa e o menor desempenho com relação a rigidez foi o de 5 camadas na face com o valor correspondente a 1,60 GPa.

A tenacidade foi definida de acordo com a Norma ASTM C1018 (1992). e o exposto por LIMA (2004), onde a área sob a curva “carga x deslocamento” é utilizada para determinação dos índices de tenacidade I5, I10, I20 E I30. A Tabela 25 apresenta os índices de tenacidade.

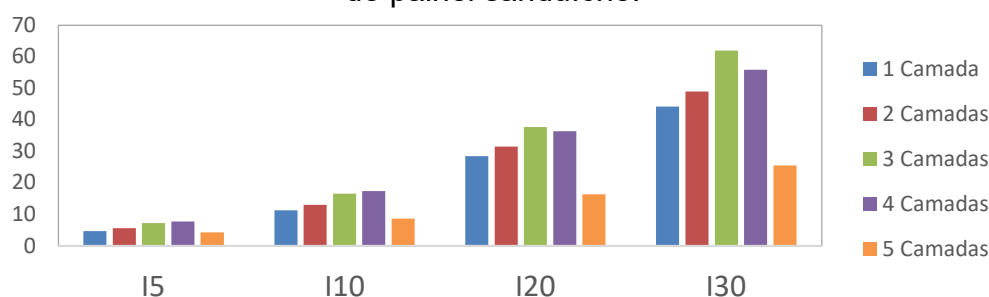
Tabela 25. Índices de Tenacidade.

Nº de Camadas na face	I5	I10	I20	I30
1	4,61 (0,26)	11,20 (1,24)	28,36 (2,08)	44,13 (6,50)
2	5,58 (0,07)	12,91 (0,27)	31,47 (0,960)	48,92 (1,08)
3	7,16 (0,14)	16,54 (0,27)	37,61 (0,87)	61,97 (1,44)
4	7,71 (0,21)	17,33 (1,40)	36,29 (3,06)	55,79 (3,45)
5	4,18 (0,41)	8,58 (1,99)	16,27 (3,31)	25,49 (4,50)

Em relação a tenacidade, também houve melhoria no desempenho dos compósitos com o aumento do número de camadas de reforço, todavia observa-se uma queda de desempenho nos compósitos com 5 camadas para todos os índices de tenacidade.

A Figura 71 mostra os índices de tenacidade onde fica visível uma queda de desempenho nos compósitos com 5 camadas de reforço.

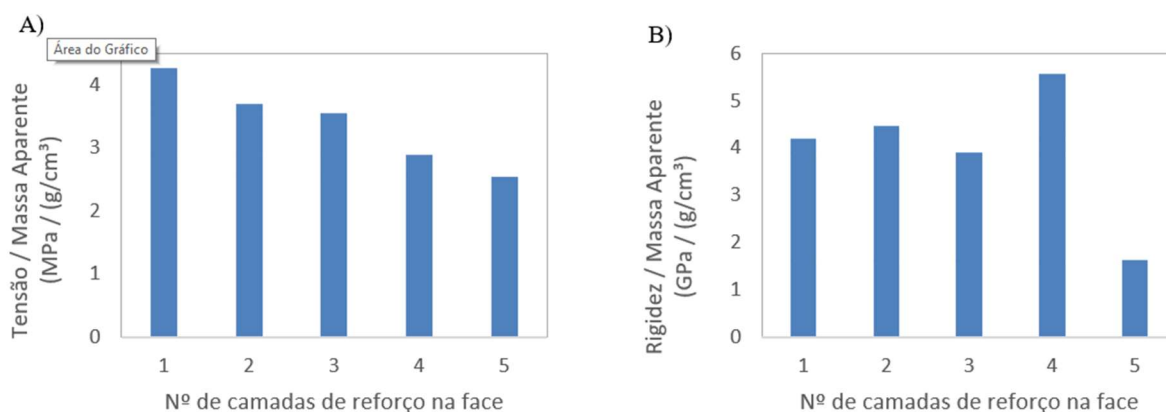
Figura 71. Índices de Tenacidade de acordo com cada configuração de painel sanduíche.



Com a intenção de investigar o desempenho dos compósitos com relação a sua massa e volume de recursos empregados, foi calculada a eficiência dos compósitos

na razão entre tensão máxima média e sua massa unitária (Tensão/ Massa Aparente) ($\text{MPa} / (\text{g}/\text{cm}^3)$), e na razão entre rigidez média e sua massa unitária (Rigidez/ Massa Aparente) ($\text{GPa}/(\text{g}/\text{cm}^3)$). Na Figura 72 é possível observar a eficiência dos painéis sanduíche.

Figura 72. Eficiência do compósito: A) na razão entre tensão máxima média e sua massa unitária; B) na razão entre rigidez média e sua massa unitária.



Os painéis com 2 e 4 quatro camadas de reforço na face possuem eficiência com relação a rigidez superior aos demais. Os outros painéis possuíam número ímpar de camadas de reforço, logo a camada na posição central não contribuía de maneira eficiente para a melhoria do desempenho dos painéis. Os painéis que possuem até duas camadas de tecido na face apresentaram eficiência superior aos demais em relação a tensão e sua massa unitária, assim consegue-se materiais mais leves, com menor custo e quantidade de recursos utilizados em sua conformação.

5.4 CONCLUSÕES

A direção do reforço afeta o desempenho das placas cimentícias reforçadas com tecidos de juta, sendo que as placas com reforço no sentido do urdume apresentaram desempenho superior as placas com reforço no sentido da trama, quando submetidas ao ensaio de flexão em 4 pontos. Da mesma forma os resultados dos ensaios de tração direta nos tecidos mostraram que quando ensaiados na direção do urdume apresentaram desempenho ligeiramente superior aos ensaiados na direção da trama.

Observou-se que o poliestireno extrudado apresentou bons resultados como núcleo de painéis sanduíche. O PSCCJ – // apresentou uma tensão máxima 84 % maior

do que o PSCCJ – R. Quanto à tensão de primeira fissura, o PSCCJ – Ø apresentou resultado 77 % maior do que o PSCCJ – R.

As diferentes configurações de núcleo influenciam diretamente o comportamento mecânico dos mesmos, fornecendo melhor aderência entre faces e núcleo e solucionando os problemas de delaminação das camadas e de ruptura por cisalhamento, com destaque para o PSCCJ – // e o PSCCJ – Ø, por apresentar melhores resultados de tensão máxima e rigidez.

O desempenho do painel sanduíche foi diretamente afetado pelo número de camadas de reforço em suas faces, tendo suas tensões máximas, rigidez e tenacidade evoluindo gradativamente até o painel com quatro camadas de reforço. O que não se repetiu no painel com cinco camadas de reforço.

Em relação à eficiência entre a tensão máxima e massa unitária, pode-se observar que os painéis que possuem até duas camadas de reforço na face apresentaram eficiência superior aos demais conseguindo-se assim materiais mais leves, com menor custo e quantidade de recursos utilizados em sua conformação. É possível perceber que foram confeccionados painéis sanduíche leves, o que demonstra que os mesmos se configuram como estruturas rápidas e viáveis, com fácil aplicação na construção civil.

6 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHE REFORÇADOS COM TECIDO DE ABACAXI

No capítulo anterior foi apresentado o desenvolvimento e a produção dos painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS, com quatro diferentes configurações na interface núcleo-face: núcleo liso, núcleo com ranhuras paralelas, núcleo com ranhuras transversais e núcleo com conectores de cisalhamento. Após a determinação da melhor interface núcleo-face, foi estudado comportamento a flexão painéis sanduíche, variando o número de camadas de reforço nas faces de 1 a 5.

Este sexto capítulo mostra o desenvolvimento e a produção dos painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de abacaxi e núcleo em XPS, além da análise do comportamento mecânico e térmico das faces, do núcleo e do painel sanduíche.

6.1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos principais setores econômicos do Brasil e do mundo, mas causa um grande impacto ambiental, devido ao alto consumo de energia e matérias-primas não renováveis (BRIBIAN *et al.*, 2011). De acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, no que diz respeito ao desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis, é necessária uma mudança significativa na forma como os espaços urbanos são construídos e gerenciados para alcançar o desenvolvimento sustentável. Isso indica que mudanças tecnológicas na indústria da construção precisam ser implementadas para que as edificações possam ser desenvolvidas de forma segura e sustentável, com menor consumo de água, energia e materiais no processo de fabricação e uso (ANWAR; STHAPIT, 2016).

Uma forma de minimizar o problema é a utilização de materiais de fontes renováveis como os biocompósitos. Com baixo custo de produção e sistemas construtivos otimizados que minimizem o consumo de material não renovável. Necessitando menos energia para montagem e fabricação, permitindo a construção de edifícios otimizados, com conforto térmico e acústico (SELLAMI *et al.*, 2022).

Com o objetivo de alcançar a eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir o consumo de energia com ambientação, a Norma Brasileira de Desempenho Predial

NBR15575:2013 descreve métodos de avaliação para verificar se a edificação apresentará condições térmicas em seu interior melhores ou iguais às do ambiente externo, à sombra, para o projeto do típico dia de verão. No entanto, ao utilizar alvenaria tradicional, produzida com blocos cerâmicos ou blocos de concreto, verifica-se que as paredes precisariam ser mais espessas para garantir o conforto térmico necessário. Isso gera custos mais altos, demanda por mais material não renovável e aumenta o peso da edificação nas fundações.

Nesse contexto, o uso de painéis sanduíche leves como parede de construção trará maior conforto térmico e acústico às edificações. Feitos com faces em materiais rígidos e um núcleo em material leve, os painéis são fáceis de montar e mais leves do que a parede de alvenaria tradicional. Por outro lado, as soluções comerciais existentes para painéis sanduíche com face de material cimentício não possuem reforço e limitam sua aplicação em elementos flexurais devido à baixa resistência à fissuração do material. Uma solução é o uso de reforço em materiais sustentáveis de fonte renovável, como fibras vegetais (FRAZÃO *et al.*, 2020; GLORIA; TOLEDO FILHO, 2021).

O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento mecânico de painéis sanduíche com as faces reforçadas com tecidos de fibras da folha do abacaxizeiro, além de avaliar o seu conforto térmico. Para isso, foram moldados painéis sanduíche com faces em compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras de abacaxi, e realizados ensaios de flexão em 4 pontos e compressão axial, além disto foi desenvolvida uma câmara térmica para verificar o comportamento térmico dos painéis sanduíche.

6.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais primários utilizados nesta etapa da pesquisa foram os tecidos confeccionados a partir das fibras extraídas da folha do abacaxizeiro, os constituintes da matriz cimentícia e o núcleo em poliestireno extrudado (XPS).

6.2.1 Materiais

6.2.1.1 Núcleo

O núcleo utilizado foi o XPS, com 20 mm de espessura e densidade de 0,04 g/cm³, já apresentado no capítulo 5 desta tese. A configuração adotada na interface núcleo-face foi a união de duas configurações apresentadas no capítulo 5. Foram feitas ranhuras transversais paralelas com 2 mm de espessura, 2 mm de profundidade e espaçamento de 20 mm (da mesma forma como no PSCCJ-//), unidos aos furos cilíndricos de 20 mm de diâmetro, regularmente espaçados (da mesma forma como no PSCCJ-Ø).

6.2.1.2 Matriz

A matriz cimentícia utilizada nesta pesquisa foi baseada no trabalho de Lima (2018). A caracterização de seus constituintes, propriedades mecânicas, e a forma de preparo já foram discutidos no capítulo 3 desta tese.

6.2.1.3 Reforço

O reforço utilizado foi o tecido de feixes de fibras de abacaxi com o tratamento alcalino, pois na conformação dos compósitos cimentícios este tratamento foi o que apresentou melhor comportamento no ensaio de flexão. Sua caracterização, propriedades mecânicas, e os tratamentos já foram discutidos no capítulo 2 desta tese.

6.2.2 Métodos

6.2.2.1 Moldagem das placas e dos painéis

Duas placas cimentícias foram moldadas apenas com a matriz, para avaliarmos seu comportamento térmico e mecânico. Dois painéis sanduíche foram moldados com duas camadas de reforço em cada face. A moldagem foi executada da mesma maneira que os painéis do capítulo 5.

Após 72 h as placas e os painéis foram retirados das fôrmas e imersos em reservatório com água até completar 28 dias de cura. Após a cura as placas e os painéis

foram removidos do reservatório e secos à temperatura ambiente por 48 h, para realização dos ensaios térmicos. Na Figura 73 é possível ver a painel sanduiche moldado, a Figura 74 mostra a seção transversal do painel com destaque para as camadas de reforço na face e na Figura 75 observam-se as ranhuras feitas no núcleo.

Figura 73. Painel sanduiche.



Figura 74. Seção Longitudinal do Painel Sanduiche

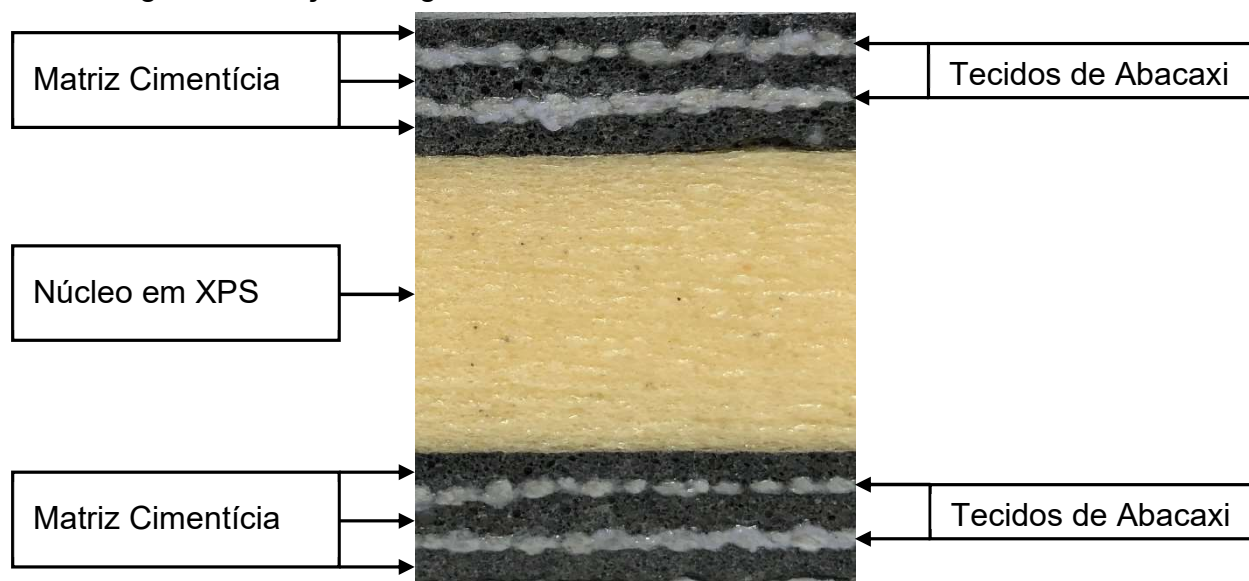
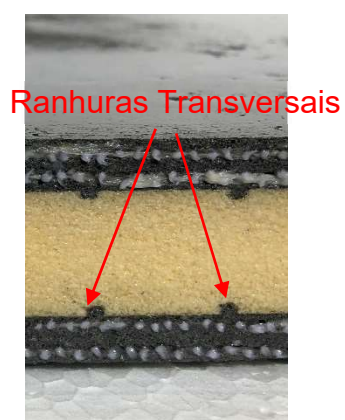


Figura 75. Seção transversal do painel Detalhe das ranhuras no núcleo



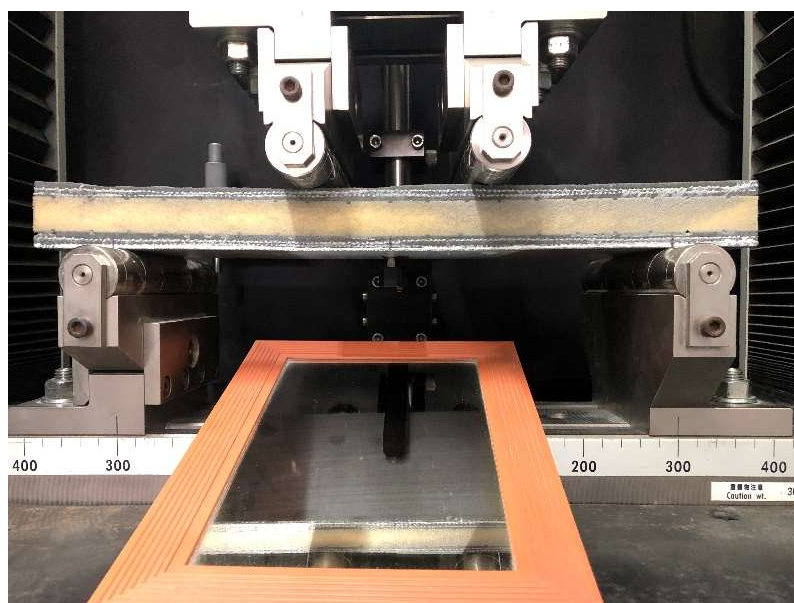
Posteriormente os painéis foram cortados obtendo-se três corpos de prova por painel, com dimensões de 40 cm de comprimento, 10 cm de largura e 3,5 cm de espessura, E quatro corpos de prova com dimensões de 20 cm de comprimento, 10 cm de largura 3,5 cm de espessura para o ensaio de compressão.

As placas também foram cortadas nas dimensões de 20 x 10 cm, e o núcleo em XPS foi cortado dimensões de 40 x 10 cm e de 20 x 10 cm para a realização do ensaio de compressão axial.

6.2.2.2 Avaliação do comportamento mecânico das faces, núcleo e painel

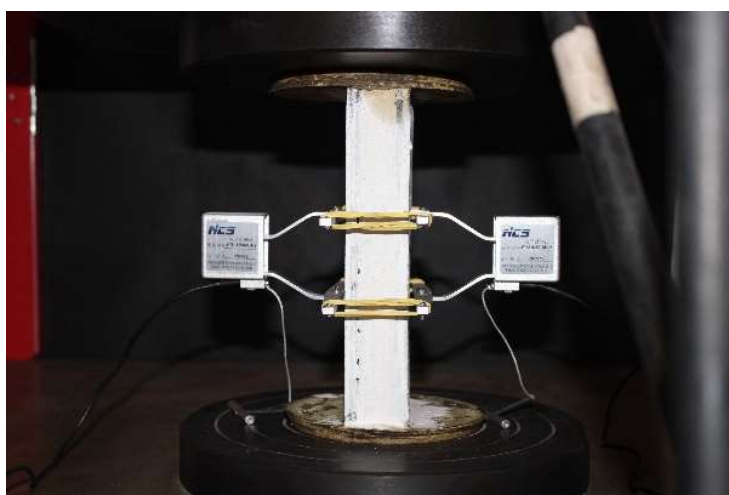
Os ensaios de flexão em quatro pontos nos painéis sanduiche foram realizados de acordo com as normas americanas ASTM C 947 (ASTM, 1999) e ASTM C 459 (ASTM, 1997) em corpos de prova prismático-retangulares, a fim de se analisar o comportamento à flexão, bem como o processo de abertura das fissuras. Os ensaios foram realizados na máquina na mesma máquina de ensaios onde foram realizados os ensaios dos painéis sanduiche do capítulo 5, a velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi 0,5 mm/min. Um Transdutor Diferencial Variável Linear (LVDT) foi acoplado ao aparato de flexão, que permitiu medir a flecha no centro do vão. A distância entre os pontos de aplicação de carga foi de 100 mm, e entre os apoios foi de 300 mm. A Figura 76 apresenta a realização do ensaio.

Figura 76. Ensaio de Flexão em 4 pontos.



Os ensaios de compressão axial longitudinal foram realizados de acordo com a norma ASTM C364/C364M 07 (*Reapproved 2012*) *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*, com o carregamento sendo feito na mesma direção das fibras de abacaxi. Através deste ensaio foi possível avaliar o comportamento do painel sanduíche, das faces e da interface núcleo-face, além de determinar a resistência à compressão axial. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios universal, com capacidade de carga de 200 kN. A velocidade de deslocamento da ponte da máquina de ensaio universal foi de 0,5 mm/min. Nos corpos de prova com dimensões de 20 x 10 cm foram instalados dois extensômetros tipo *clip-gage*, um de cada lado, para acompanhar a deformação do corpo de prova durante a realização do ensaio de acordo com a Figura 77.

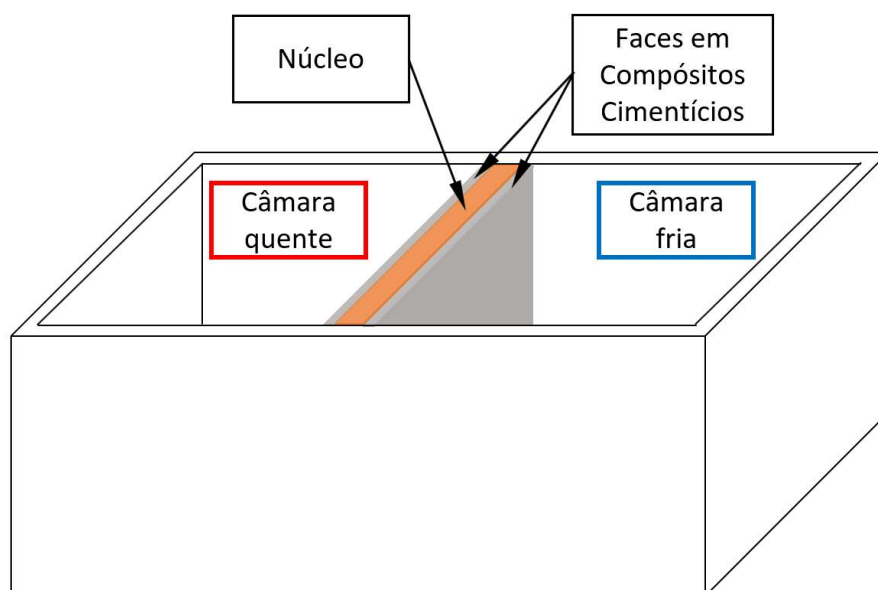
Figura 77. Ensaio de compressão no painel sanduíche



6.2.2.3 Avaliação do comportamento térmico das faces, núcleo e painel

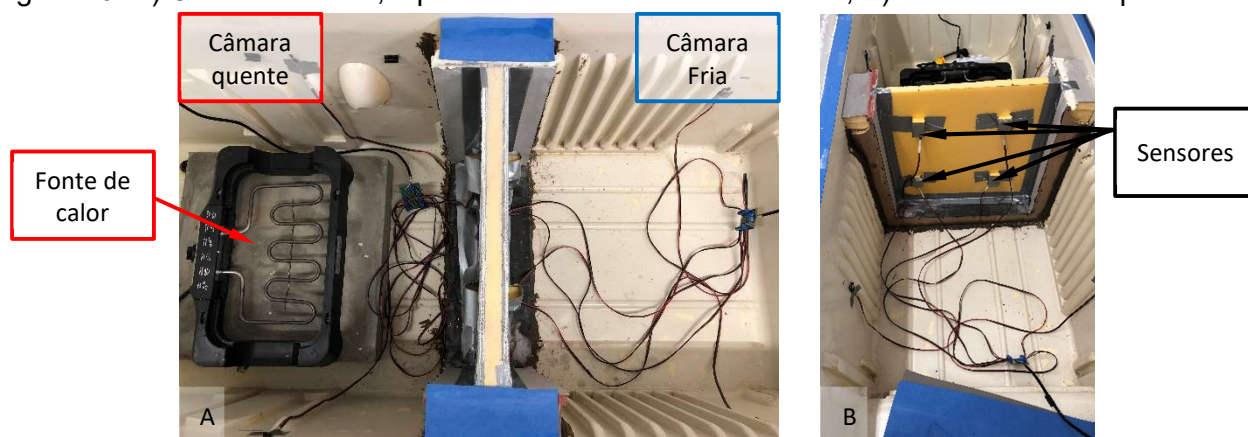
Os ensaios de comportamento térmico na placa cimentícia, no núcleo e no painel sanduíche, foram realizados em uma câmara térmica desenvolvida durante a pesquisa, composta por uma câmara quente e uma câmara fria, separadas por um suporte de madeira compensada com 10 cm de largura, preenchido com material isolante, com abertura de 40 x 40 cm, onde os corpos de prova foram fixados para realização do ensaio. A Figura 78 mostra o esquema da câmara térmica.

Figura 78. Esquema da câmara térmica.



Além dos sensores de temperatura nas câmaras, quatro sensores foram fixados em cada face da amostra para monitorar a variação de temperatura ao longo do ensaio. Na Figura 79 é possível observar a câmara térmica, o painel sanduíche, a fonte de calor e os sensores de temperatura. Um pouco de pasta térmica foi aplicada no local de contato dos sensores com as amostras para melhorar a transferência térmica da amostra para os sensores. Para proteger os sensores da temperatura da câmara o outro lado foi protegido por um bloco de material isolante com 2 x 2 x 2 cm. O ensaio durou 24 horas sendo as primeiras 8 horas de aquecimento da câmara quente até a temperatura de 50° C, utilizando fonte de calor elétrica resistiva, e 16 horas de resfriamento, com câmara térmica fechada. Os sensores estavam ligados em um computador com um que fazia a leitura da temperatura a cada 10 segundos.

Figura 79. A) Câmara térmica, o painel sanduíche e fonte de calor; B) Sensores de temperatura.



6.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.3.1 Avaliação do comportamento mecânico da placa cimentícia, do núcleo e do painel sanduíche.

6.3.1.1 Ensaio de flexão em quatro pontos nos painéis sanduíche.

Três corpos de prova do painel sanduíche foram submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. Na Figura 80 observa-se a curva Tensão x Flecha dos corpos de prova dos painéis sanduíche submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. A tensão foi calculada de acordo com teoria das vigas compostas por materiais diferentes ilustrada na Figura 81.

Figura 80. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos.

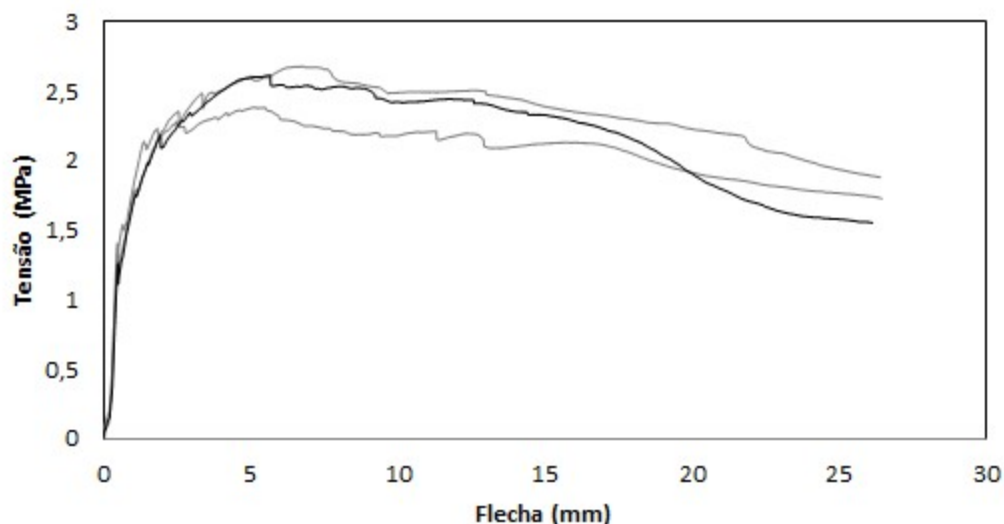
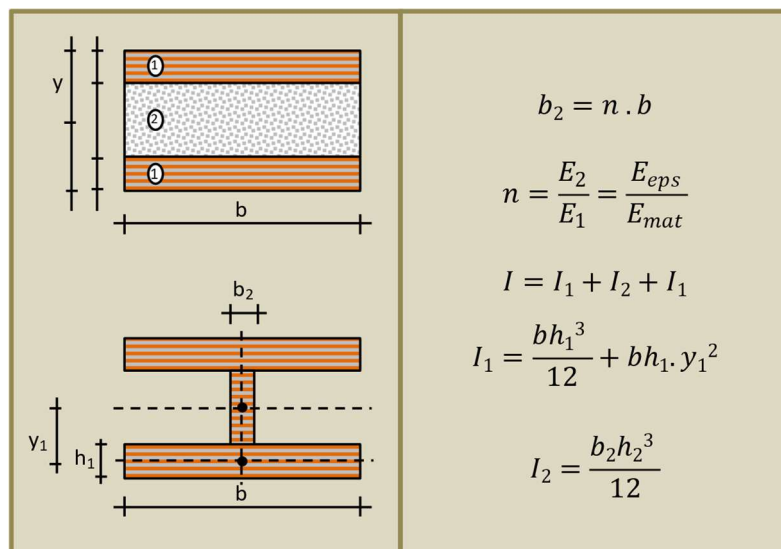


Figura 81. Ilustração da viga composta por materiais diferentes



Onde:

I – Momento de inércia equivalente;

I_1 – Momento de inércia das faces;

I_2 – Momento de inércia do núcleo;

E_1 – Módulo de elasticidade das faces;

E_2 – Módulo de elasticidade do núcleo;

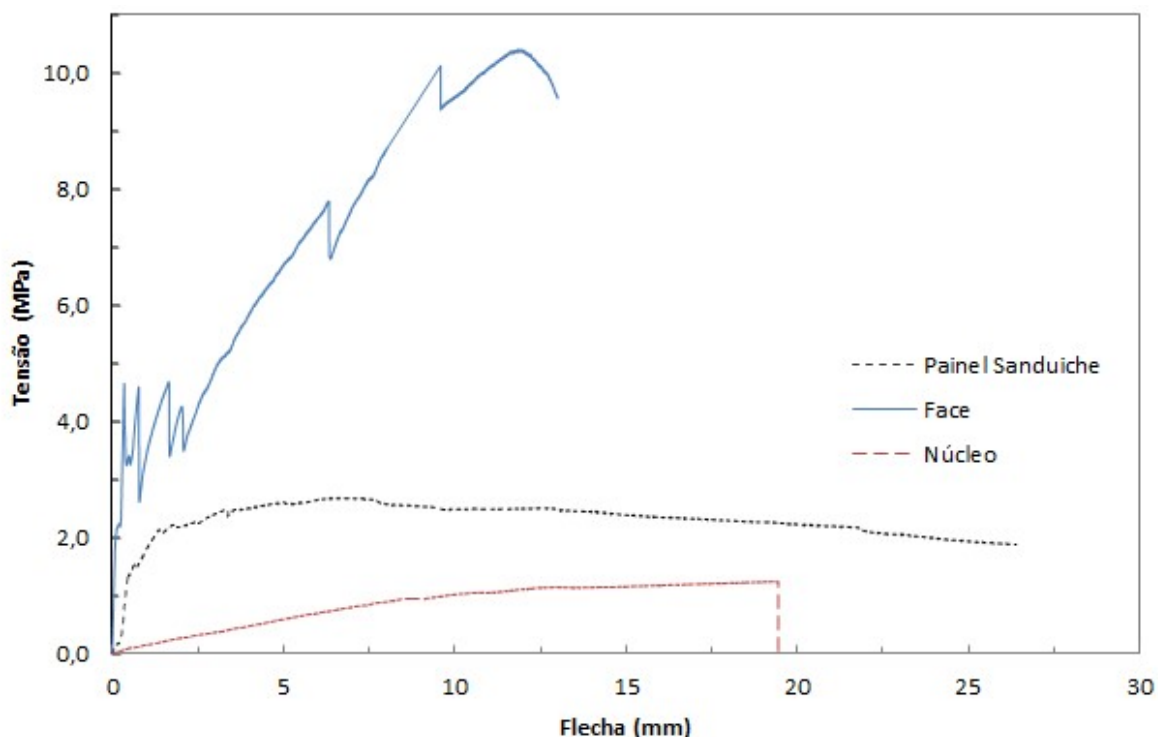
h_1 – Espessura das faces;

h_2 – Espessura do núcleo;

O comportamento do painel sanduíche mostrou que após a fase de fissuração conseguiu manter a capacidade de carga, sem apresentar o comportamento de amolecimento logo após atingir a tensão máxima, como nos estudos de Gloria *et al.* (2021) que trabalharam com painéis sanduíche com faces reforçadas com fibras longas de sisal e Frazão *et al.* (2018) que trabalharam painéis sanduíche com faces reforçadas com fibras longas e fibras curtas de sisal.

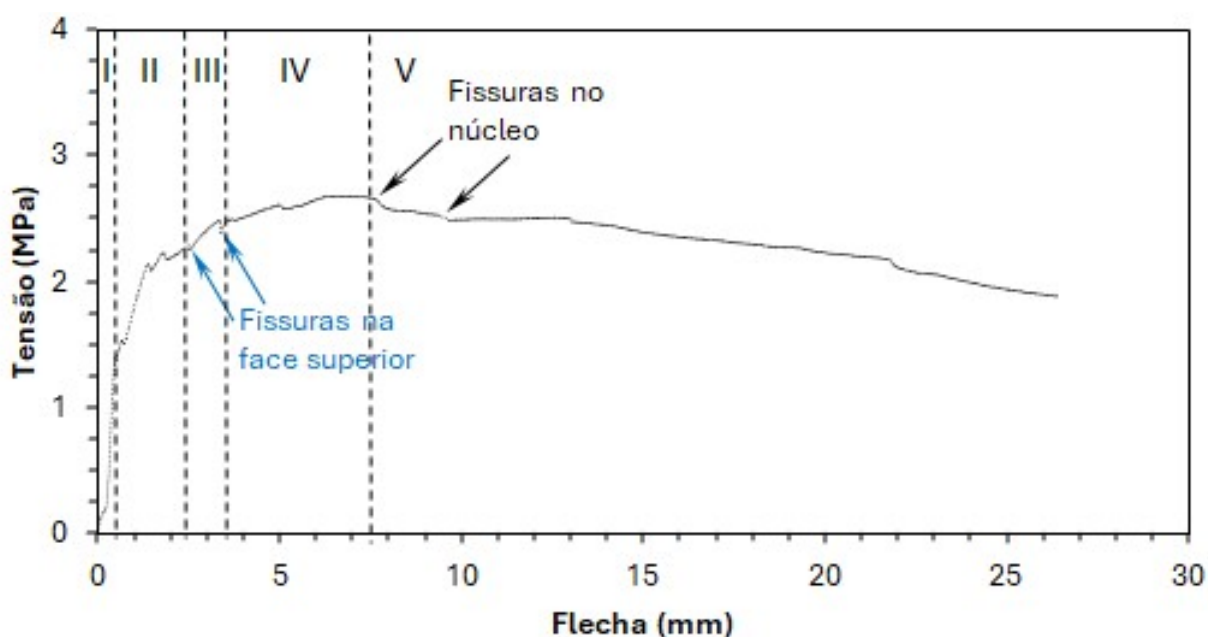
Na Figura 82 observa-se a curva Tensão X Flecha no ensaio de flexão do painel sanduíche, do núcleo em XPS e da face em compósito cimentício reforçado com tecido de abacaxi.

Figura 82. Curva Tensão X Flecha no ensaio de flexão do painel sanduíche, do núcleo e da face



Na Figura 83 observa-se a curva Tensão x Deslocamento dos corpos de prova dos painéis sanduíche submetidos ao ensaio de flexão em quatro pontos. Pode-se observar que o comportamento dos painéis possui V fases distintas.

Figura 83. Curva Tensão x Flecha no ensaio de flexão em quatro pontos no painel sanduiche.



Na fase I o painel apresenta um comportamento elastoplástico, sem aparecimento de fissuras visíveis, até que a matriz atinge sua capacidade de carga e surge a primeira fissura na face inferior do painel, evidenciada pela queda de tensão detectada pela máquina de ensaio universal, finalizando esta fase;

Na fase II após o aparecimento da primeira fissura, ocorre um pequeno aumento de sua dimensão até que o reforço de tecido de abacaxi começa a mostrar sua eficiência suportando cargas adicionais sem que a fissura se propague, logo a tensão que o compósito suporta começa a aumentar, até que em outro ponto ocorra o aparecimento de uma nova fissura na matriz, com nova redução na carga suportada. Apresentando novas fissuras nas faces inferior e superior do painel.

Na fase III ocorreu a abertura de fissuras na face superior do painel acima dos pontos de apoio, estas fissuras estão sinalizadas pelas setas azuis.

Na fase IV praticamente não ocorre abertura de novas fissuras, mas a propagação e aumento da abertura das fissuras existentes, pois o reforço já não consegue transmitir eficientemente as tensões para outros pontos da matriz, mesmo assim é possível observar um acréscimo de resistência até o aparecimento de fissuras no núcleo, sinalizadas pelas setas pretas.

Na fase V após a ruptura do núcleo, verifica-se uma redução na resistência, com posterior descolamento entre a face inferior e o núcleo. As extremidades do painel também apresentam um descolamento entre a face superior e o núcleo.

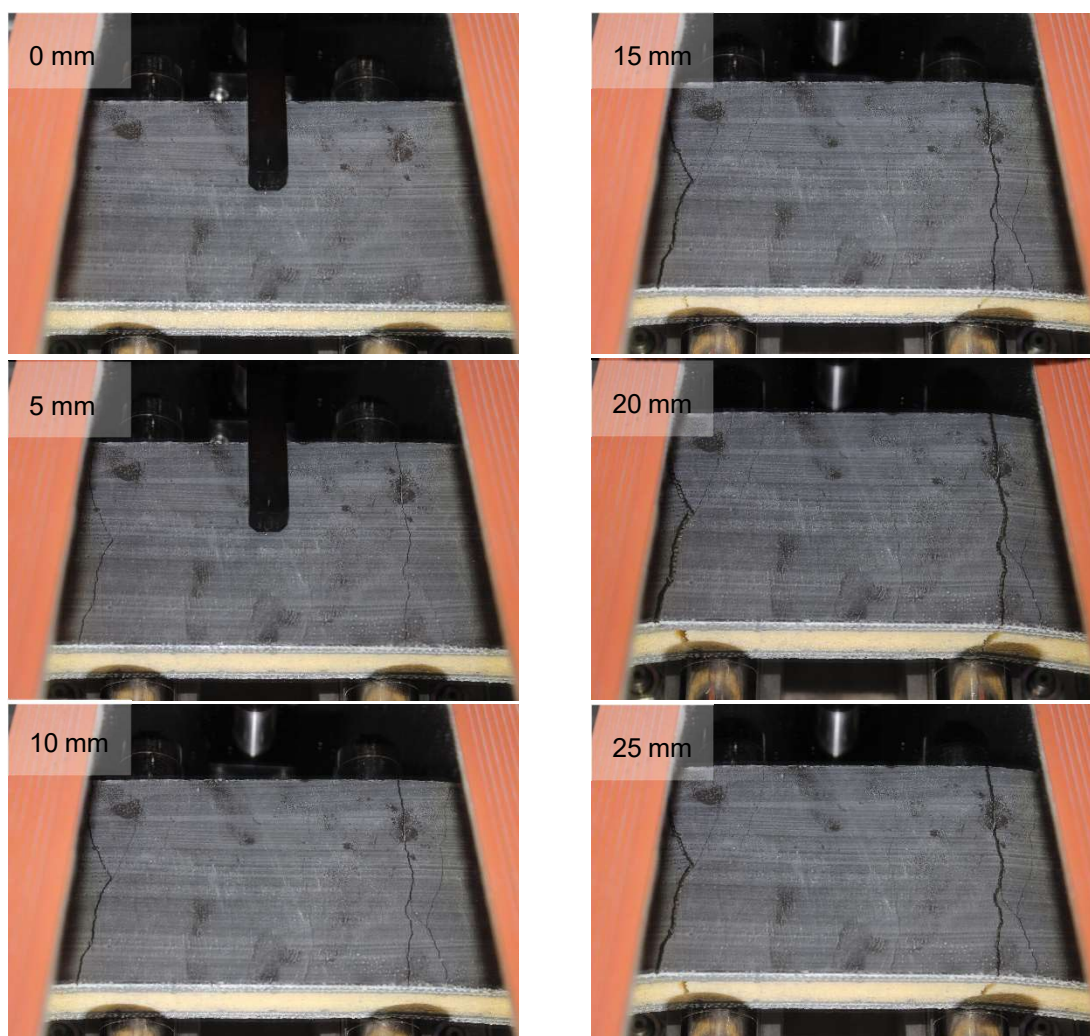
O volume de reforço nas faces dos painéis sanduíche foi de 6,56%. Na Tabela 26 são apresentados os resultados médios e desvios-padrões das tensões de 1ª fissura (MPa), do módulo de ruptura, deslocamentos na tensão 1ª fissura e na ruptura (mm) e a rigidez (GPa), obtidos no ensaio de flexão em 4 pontos nos painéis sanduíche.

Tabela 26. Resultados do ensaio de flexão em 4 pontos dos painéis

Tensão de 1ª fissura (MPa)	Desloc. de 1ª fissura (mm)	Módulo de Ruptura (MPa)	Desloc. no Módulo de Ruptura (mm)	Rigidez (GPa)
1,31 (0,08)	0,16 (0,03)	2,56 (0,15)	1,95 (0,13)	8,14 (0,66)

A Figura 84 apresenta a evolução das fissuras nos corpos-de-prova durante os ensaios de flexão em quatro pontos, no início do ensaio, e nos deslocamentos de 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm e 25 mm.

Figura 84. Evolução das fissuras na face inferior dos Painéis Sanduiche.

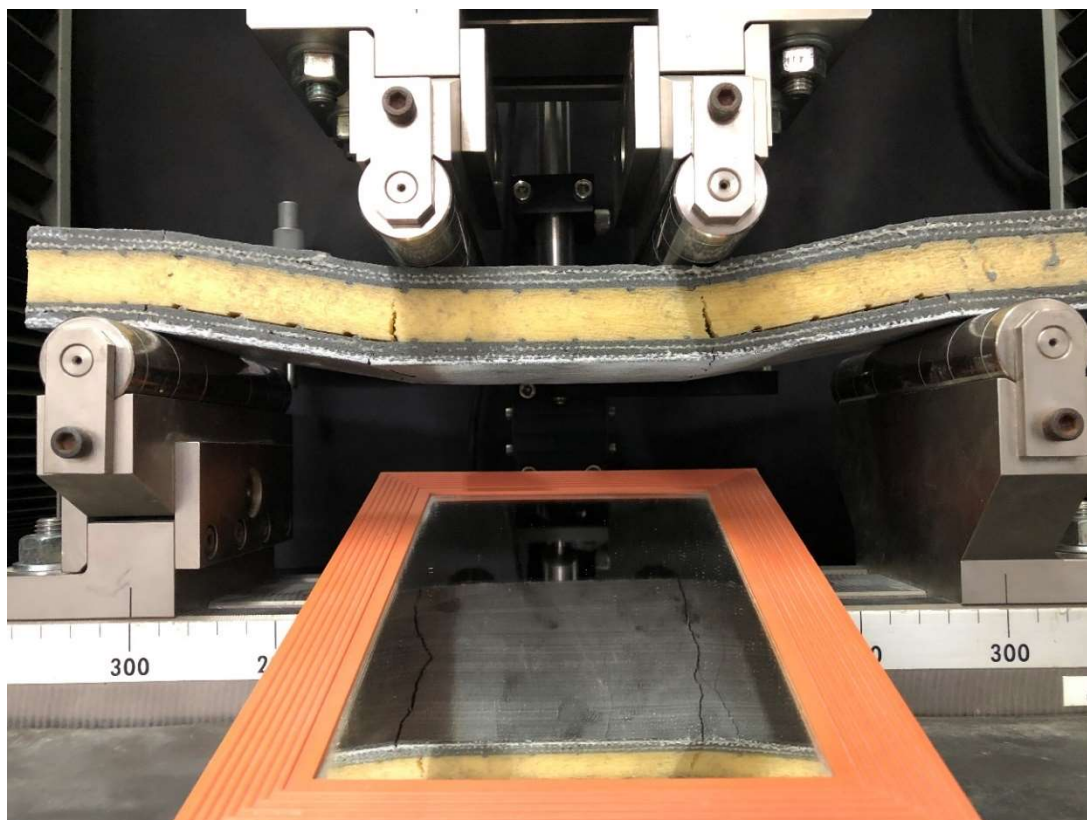


As fissuras na parte inferior dos painéis ocorreram na direção dos pontos de aplicação de carga. Após a fissuração por flexão na parte inferior dos painéis surgiram as fissuras por cisalhamento na parte superior na direção dos pontos de apoio como pode ser visto na Figura 85. Por fim surgiram as fissuras no núcleo dos painéis como pode ser observado na Figura 86

Figura 85. Fissuras na parte superior do Painel Sanduiche.

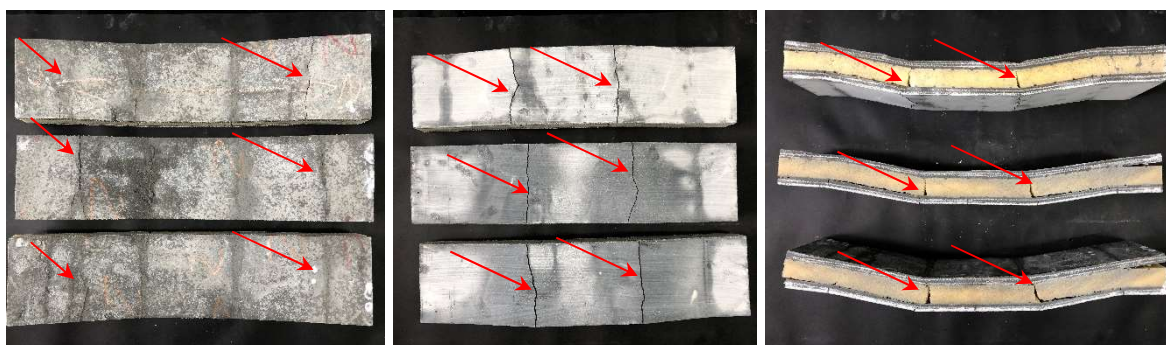


Figura 86. Fissuras no núcleo do Painel Sanduiche.



A Figura 87 mostra as fissuras nas faces superiores, inferiores e laterais dos painéis após o ensaio de flexão.

Figura 87. Fissuras nos Painéis Sanduíche após ensaio de flexão em 4 pontos



6.3.1.2 Ensaio de Compressão no painel sanduíche.

Três corpos de prova do painel sanduíche foram submetidos ao ensaio de compressão axial. Na Figura 89 observa-se a curva Tensão x Deformação Específica dos corpos de prova dos painéis sanduíche submetidos ao ensaio de compressão axial. Pode-se observar que o comportamento linear até o aparecimento da primeira fissura,

que ocorre por flambagem na face, mesmo assim o a carga continua a aumentar até que ocorre a delaminação entre a face e o núcleo, seguida da delaminação entre o reforço de tecido de abacaxi e a matriz, como pode ser visto na Figura 88.

Figura 89. Curva Tensão x Deformação Específica no ensaio de compressão axial.

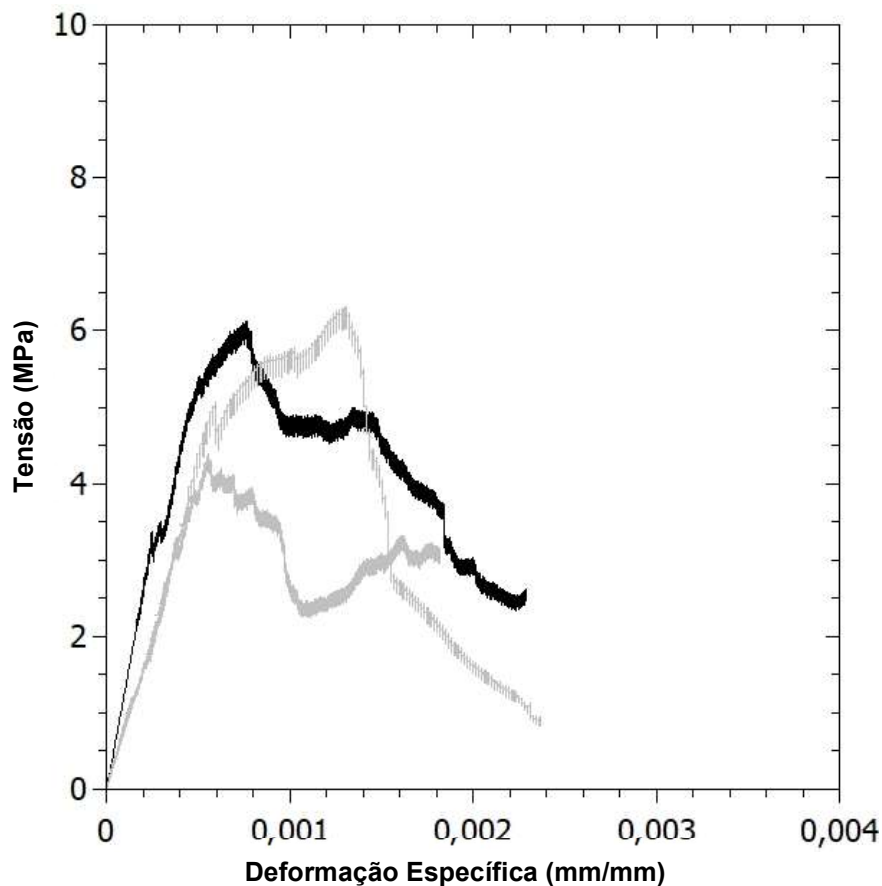
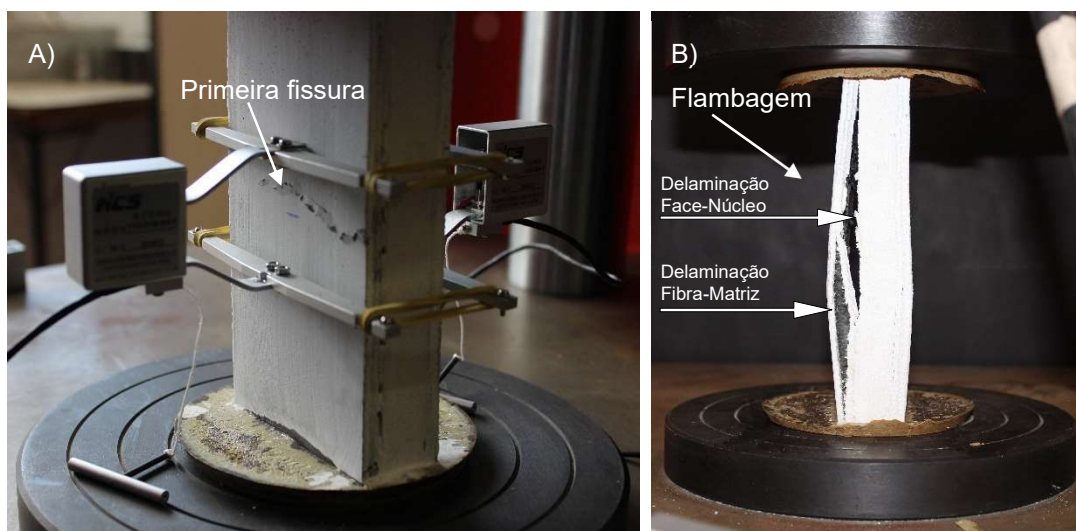


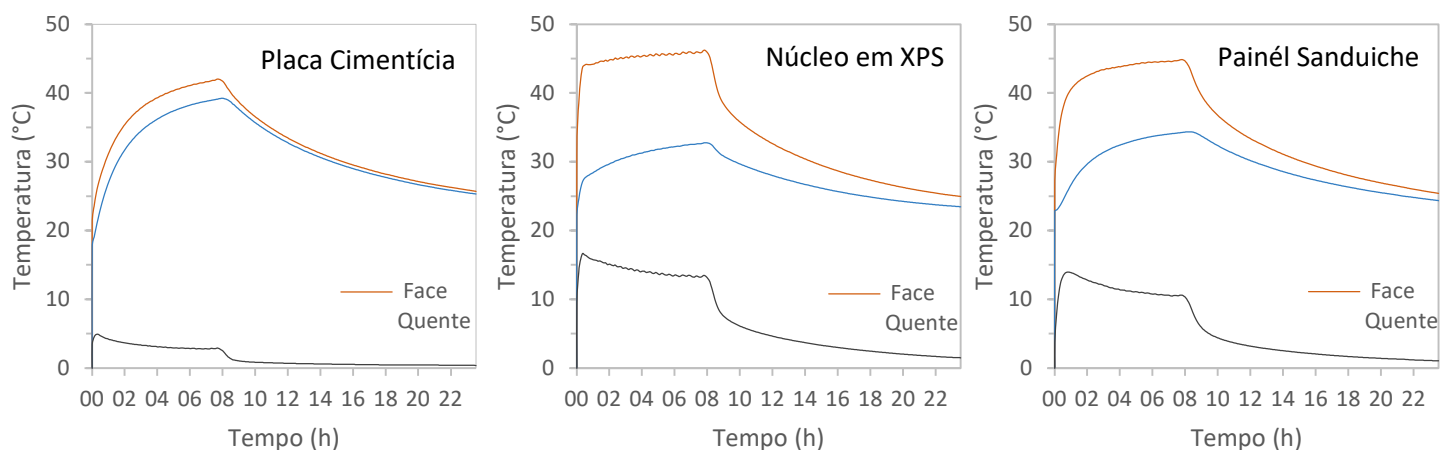
Figura 88. Ensaio de Compressão nos Painéis Sanduiche: A) Primeira fissura na face; B) Delaminação Núcleo-Face e Delaminação Fibra-Matriz.



6.3.2 Avaliação do comportamento térmico da face, do núcleo e do painel sanduíche.

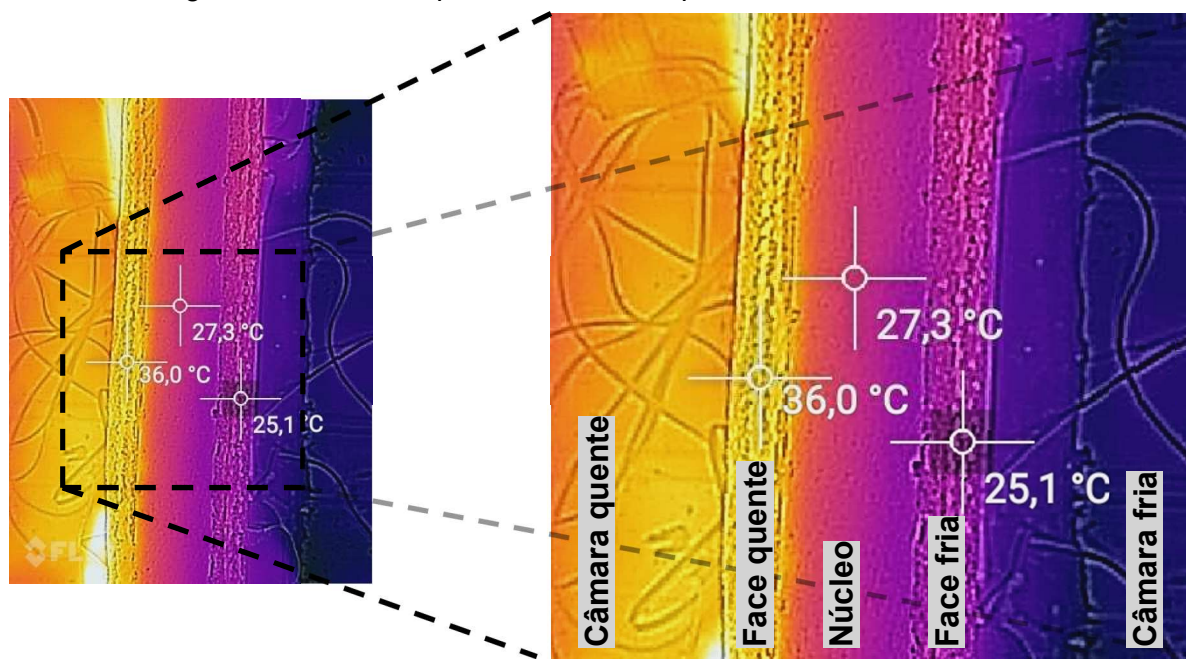
A Figura 90 mostra o resultado suavizado do teste de conforto térmico para a placa de cimento, o núcleo XPS e o painel sanduíche.

Figura 90. Resultado do teste de conforto térmico.



Na Figura 91 é possível observar uma termografia do perfil do painel sanduiche após 1 h de aquecimento na câmara térmica durante o ensaio, é possível perceber a temperatura na face quente de 36°C , no núcleo de $27,3^{\circ}\text{C}$ e na face fria de $25,1^{\circ}\text{C}$.

Figura 91. Termografia da lateral do painel sanduiche após 1 h do início do ensaio.



Verifica-se que, após o início do ensaio com acionamento da fonte de calor, as faces externas das amostras aumentaram gradativamente a temperatura, e a taxa de aquecimento da placa de cimento aconteceu de forma mais lenta que as demais. A temperatura máxima na câmara quente ficou em torno de 48° C, conforme Tabela 27, sendo que a face quente da placa XPS apresentou a temperatura mais elevada, seguida do painel sanduíche e da placa cimentícia.

Tabela 27. Resultados experimentais do ensaio térmico.

Amostras	Temperatura máxima (°C)				Variação de temperatura máxima (°C)	
	Câmara quente	Câmara fria	Face quente	Face fria	Câmaras	Faces
Placa Cimentícia	48,30	42,00	39,20	37,70	6,30	1,50
Núcleo em XPS	48,50	27,60	46,20	32,80	20,90	13,40
Painel Sanduíche	48,20	29,10	44,90	34,40	19,10	10,50

Por outro lado, devido à maior condutividade térmica da argamassa de cimento, este material não se mostrou adequado para isolamento térmico, apresentando redução de 13% de temperatura entre as câmaras quente e fria e redução de 4% entre as faces da amostra. Para o painel sanduíche as reduções de temperatura foram de 40% e 23%, respectivamente, enquanto o XPS apresentou reduções de temperatura de 43% e 29%, respectivamente.

Utilizando o software diferenças finitas foi possível determinar a partir dos resultados experimentais os valores de condutividade térmica e calor específico mostrado na Tabela 28.

Tabela 28. Valores de condutividade térmica e calor específico.

Amostras	Condutividade Térmica (λ)	Calor específico (c)
	W/(m.K)	J/(kg.K)
Placa Cimentícia	1,050	1000
Núcleo em XPS	0,030	1450
Painel Sanduíche	0,053	1013

As propriedades térmicas para os materiais construtivos na construção de paredes, de acordo com a ABNT 15220- 2, são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29. Condutividade térmica e calor específico de materiais utilizados na construção de paredes.

Material	Condutividade Térmica (λ)	Calor específico (c)
	W/(m.K)	J/(kg.K)
Argamassa de assentamento	1,15	1000
Concreto (bloco e parede)	1,75	1000
Reboco	1,15	1000
Tijolo cerâmico	0,90	920

Fonte: NBR 15220-5 (ABNT, 2005)

Painéis a base de cortiça para uso como isolamento em construções forma produzidos por Lackreb *et. al.* (2023) que apresentaram condutividade térmica variando de 0,041 W/(m.K) a 0,067 W/(m.K), o que indica que os painéis produzidos tem uma performance a painéis produzidos para melhorar o conforto térmico das edificações.

Ng e Low 2010, produziram painéis sanduiche em concreto leve com núcleo em papel de jornal, com condutividade térmica variando entre 0,303 e 0,621 a depender da densidade do núcleo. Alvares – Ramires *et al* 2012 produziram painéis com face em argamassa armada e núcleo em fibras de coco que obtiveram uma condutividade térmica de 0,21 W/m.K, que é menor do que tijolos de concreto vasados mas ainda maior que os painéis sanduiche produzidos neste trabalho.

6.4 CONCLUSÕES

Neste estudo foi desenvolvido um painel sanduíche utilizando faces em compósitos cimentícios reforçados em tecidos de abacaxi e núcleo em XPS. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o uso de reforço com tecido de abacaxi nas faces do painel sanduíche aumenta a resistência à flexão e a capacidade de absorção de energia do material.

Comparado ao painel de argamassa, o painel sanduíche reduz significativamente a transferência de temperatura entre dois ambientes, mostrando-se uma solução adequada para aumentar o conforto térmico das edificações. Utilizando o método

de diferenças finitas implícitas baseado em modelo numérico, é possível determinar, por problema inverso, as propriedades térmicas das camadas (face e núcleo). Com isso, é possível determinar o comportamento térmico do painel sanduíche submetido ao fluxo de calor, e assim definir a geometria adequada para as paredes do edifício, considerando a eficiência energética construtiva.

7 CONCLUSÕES

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi desenvolver painéis sanduíche com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e de juta, com núcleo em material leve como o XPS, resistentes aos esforços de tração, compressão e flexão, além de proporcionar conforto térmico.

Primeiramente foram produzidos, tratados e caracterizados os tecidos em fibras de abacaxi para uso em compósitos cimentícios, depois foi estudado a aderência entre o reforço e matriz. Foram desenvolvidos compósitos cimentícios reforçados com tecidos de fibras de abacaxi. Posteriormente foi realizado desenvolvimento de painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS. Por fim foram produzidos e caracterizados os painéis sanduíche reforçados com tecido de fibras de abacaxi.

A partir dos estudos realizados conclui-se que os painéis sanduíche com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais de fibras naturais extraídas da folha do abacaxizeiro e de juta são tecnicamente viáveis, e se configuram como estruturas leves, de rápida execução e com fácil aplicação na construção civil.

7.1.1 Produção e caracterização de tecidos em fibras de abacaxi para uso em compósitos cimentícios

Em relação ao comportamento à tração das fibras, feixes e tecidos de abacaxi, verificou-se através da distribuição de Weibull os arranjos em tecido oferecem menor variabilidade nos resultados quando comparados às fibras e feixes.

Os tratamentos realizados promoveram alterações nas fibras reduzindo a absorção de água de 260% da fibra in natura para de 245%, 243% e 232% para fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido respectivamente. A variação dimensional por absorção de água também foi reduzida de 58% para fibras in natura para de 29%, 29% e 38% para fibras tratadas em autoclave, com tratamento alcalino e com tratamento híbrido respectivamente.

7.1.2 Interação entre reforço e matriz

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que os feixes e tecidos tratados apresentaram menor tensão adesional que os feixes e tecidos in natura. Analisando as fibras que compunham os tecidos observou-se que estas apresentaram poucas rupturas, já nas fibras que compunham os feixes, com 20 mm e principalmente com 30 mm de embebição, é possível perceber que as fibras mais externas apresentaram adesão à matriz e romperam durante o ensaio, enquanto as fibras internas seguiram deslizando, isto sugere que os diâmetros dos feixes devem ser reduzidos para melhorar a impregnação pela matriz e melhorar o desempenho da ligação na interface.

7.1.3 Compósitos cimentícios reforçados com tecidos vegetais

Os resultados apresentados nos ensaios de tração direta e flexão em 4 pontos mostraram que, mesmo apresentando melhorias no comportamento em relação a primeira fissura, os compósitos com os tratamentos em autoclave, alcalino e híbrido, apresentaram perda de desempenho na tensão máxima. Dentre os compósitos com reforços tratados o com tratamento alcalino apresentou melhor desempenho.

Em relação à tração direta, dentre os compósitos com reforços tratados, o compósito com reforço com tratamento em autoclave apresentou melhor padrão de fissuração e maior desempenho em relação à tensão máxima.

7.1.4 Desenvolvimento de painéis sanduíche com faces cimentícias reforçadas com tecidos de juta e núcleo em XPS

A direção do reforço afeta o desempenho das placas cimentícias reforçadas com tecidos de juta, sendo que as placas com reforço no sentido do urdume apresentaram desempenho superior as placas com reforço no sentido da trama, quando submetidas ao ensaio de flexão em 4 pontos. Da mesma forma os resultados dos ensaios de tração direta nos tecidos mostraram que quando ensaiados na direção do urdume apresentaram desempenho ligeiramente superior aos ensaiados na direção da trama.

Observou-se que o poliestireno extrudado apresentou bons resultados como núcleo de painéis sanduíche. O PSCCJ – // apresentou uma tensão máxima 84 % maior

do que o PSCCJ – R. Quanto à tensão de primeira fissura, o PSCCJ – Ø apresentou resultado 77 % maior do que o PSCCJ – R.

As diferentes configurações de núcleo influenciam diretamente o comportamento mecânico dos painéis, fornecendo melhor aderência entre faces e núcleo e solucionando os problemas de delaminação das camadas e de ruptura por cisalhamento, com destaque para o PSCCJ – // e o PSCCJ – Ø, por apresentar melhores resultados de tensão máxima e rigidez.

O desempenho do painel sanduíche foi diretamente afetado pelo número de camadas de reforço em suas faces, tendo suas tensões máximas, rigidez e tenacidade evoluindo gradativamente até o painel com quatro camadas de reforço. O que não se repetiu no painel com cinco camadas de reforço.

Em relação à eficiência entre a tensão máxima e massa unitária, pode-se observar que os painéis que possuem até duas camadas de reforço na face apresentaram eficiência superior aos demais conseguindo-se assim materiais mais leves, com menor custo e quantidade de recursos utilizados em sua conformação.

7.1.5 Produção e caracterização de painéis sanduíche reforçados com tecido de abacaxi.

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que o uso de reforço com tecido de abacaxi nas faces do painel sanduíche aumenta a resistência à flexão e a capacidade de absorção de energia do material.

Comparado ao painel de argamassa, o painel sanduíche reduz significativamente a transferência de temperatura entre dois ambientes, mostrando-se uma solução adequada para aumentar o conforto térmico das edificações.

Utilizando o método de diferenças finitas implícitas baseado em modelo numérico, é possível determinar, por problema inverso, as propriedades térmicas das camadas (face e núcleo). Com isso, é possível determinar o comportamento térmico do painel sanduíche submetido ao fluxo de calor, e assim definir a geometria adequada para as paredes do edifício, considerando a eficiência energética construtiva.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Outros estudos podem ser realizados para otimizar o desempenho painéis sanduíche com faces externas em compósitos cimentícios reforçados com tecidos estruturais de fibras da folha do abacaxizeiro e de juta, com núcleo em XPS.

A primeira recomendação é de modificar as configurações dos painéis: alterando a espessura do núcleo; modificando a quantidade de camadas reforço em tecidos de fibras de abacaxi nas faces.

A segunda recomendação seria uma nova configuração do tecido de fibras de abacaxi com menos fibras na confecção de cada feixe, cerca de 50 do utilizado nesta pesquisa. Desta forma pode-se conseguir melhor aderência entre a matriz e os feixes e tecidos, otimizando o desempenho dos painéis sanduiche.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. Tese (Livre docência). EPUSP, São Paulo, 1991.

ALAVEZ-RAMIREZ, R.; CHIÑAS-CASTILLO, F.; MORALES-DOMINGUEZ, V.J.; & ORTIZ-GUZMAN, M.; **Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels**. Construction and Building Materials, 37, 425-431. (2012).

ALIX, S.; COLASSE, L.; MORVAN, C.; LEBRUN, L.; MARAIS, S. **Pressure impact of autoclave treatment on water sorption and pectin composition of flax cellulosic-fibres**. Carbohydr Polym. 2014

ALRSHOUDI, F. **Behaviour of Textile-Reinforced Concrete Beams versus Steel-Reinforced Concrete Beams**. Advances in Civil Engineering, vol. 2021, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D3822 - **Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers**, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 1018 – 92, **Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fibre Reinforced Concrete (Using beam with Third Point-Loading)**, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 459, **Standard test method for asbestos-cement flat products**, Annual Book of ASTM Standards, V. 04.05, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM C 947 **Standard test method for flexural properties of thin-section glass-fiber-reinforced concrete (using simple beam with third-point loading)**, Annual Book of ASTM Standards, 1999,

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C364/C364M07 **Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions**. (Reapproved 2012)

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C365/C365M11a **Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores**.

AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C393/C393M - 11 **Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure.**

ANWAR; STHAPIT. **Asian Institute of Technology: Solution and Systems for Social and Affordable.** <http://consulting.ait.ac.th/>. Acesso em fevereiro de 2019

ARBAOUI J.; SCHMITT, Y.; PIERROT, J.; ROYER, F. **Comparison study and mechanical characterisation of a several composite sandwich structures.** Int. J. Compos. Mater., vol. 5, no. 1, pp. 1–8, 2015.

ARRUDA FILHO, A.B. **Placas cimentícias reforçadas com tecidos estruturais de sisal.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2015.

ARRUDA FILHO, A.B.; DANTAS, C.L.D.R.; LIMA, P.R.L.; FONTES, C.M.A. (2022): **Autoclave Treatment of Sisal Fiber and Its Effect on Fiber Properties and on the Pull-out Behavior from Cementitious Matrix.** Journal of Natural Fibers, DOI: 10.1080/15440478.2021.2021463.

ARRUDA FILHO, A.B.; LIMA, P.R.L.; CARVALHO, R.F.; GOMES, O.F.M.; TOLEDO FILHO, R.D. **Effect of Number of Layers on Tensile and Flexural Behavior of Cementitious Composites Reinforced with a New Sisal Fabric.** Textiles 2024, 4, 40–56. <https://doi.org/10.3390/textiles4010004>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-2. **Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Argamassa – Determinação da Resistência à Compressão.** Rio de Janeiro: 1996

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222. **Argamassa e Concreto-Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e Concreto Endurecido – Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica.** Rio de Janeiro: 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; CAPILLA, Antônio Valero; USÓN, Alfonso Aranda. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.** Building and environment, v. 46, n. 5, p. 1133-1140, 2011

BUTLER, M.; LIEBOLDT, M.; MECHTCHERINE, V. (2010) - **Application of Textile-Reinforced Concrete (TRC) for structural strengthening and in prefabrication.** Advances in Cement-Based Materials - van Zijl & Boshoff (eds), London, p. 127-136.

CAI, M., TAKAGI, H., NAKAGAITO, A. N., LI, Y., WATERHOUSE, G. I.N. **Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber-reinforced composites.** Composites: Part A. V. 90, 589–597. 2016.

CALDAS, B. G. S.; ROCHA FILHO, S.; CARVALHO, R. F. **Methodology for Tensile Tests on Vegetable Fibers.** International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies - Construction Materials & Technologies for Sustainability. Rio de Janeiro, 2013.

CALDAS, B.G.S.; PENA, R. V. A.; KERCHE, E. F.; AMICO, S. C.; CARVALHO, R.F. **Vacuum infused sandwich structures based on sisal.** 2nd Brazilian Conference On Composite Materials – BCCM2. São José dos Campos – São Paulo, 2014.

CARVALHO, R. F. **Compósito de fibra de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** 119 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CERCHIARO, J.R., THOMAS N.I.R., CARVALHO, R.F. **Substituição fibras de vidro por tecidos de sisal em compósitos com matriz poliéster.** 12° Congresso Brasileiro de Polímeros (12°CBPol). 2013.

CEVALLOS, O. A.; OLIVITO, R.S. **Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites.** Composites: Part B. 2015.

CUYPERS, H.; WASTIELS. J. **Analysis and verification of the performance of sandwich panels with textile reinforced concrete faces.** J. Sandw. Struct. Mater., vol. 13, no. 5, pp. 589–603, 2011.

DALALBASHI, A.; GHIASSI, B.; OLIVEIRA, D. O. **Aging of lime-based TRM composites under natural environmental conditions**. *Construction and Building Materials*. 2021.

DEY, V.; ZANI, G.; COLOMBO, M.; DI PRISCO, M.; MOBASHER, B. **Flexural impact response of textile-reinforced aerated concrete sandwich panels**. *Mater. Des.*, vol. 86, pp. 187–197, 2015.

DILFI, A.; BALAN, A.; BIN, H.; XIAN, G.; & THOMAS, S. **Effect of surface modification of jute fiber on the mechanical properties and durability of jute fiber-reinforced epoxy composites**. *Polymer Composites*. 39. 10.1002/pc.24817. 2018.

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

FERREIRA, S.R., SILVA, F.A., LIMA, P. R. L., TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems**. *Construction and Building Materials*. V. 139, 551–561. 2017.

FERREIRA, S.R.; LIMA, P.R.L.; SILVA, F.A.; TOLEDO FILHO, R.D. **Effect of sisal fiber hornification on the fiber-matrix bonding characteristics and bending behavior of cement based composites**. *Key Engineering Materials*, Vol. 600, pp 421-432, 2014.

FERREIRA, S.R.; LIMA, PEPE, M.; MARTINELLIC, E.; SILVA, F.A.; TOLEDO FILHO, R.D. **Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices**. *Composites Part B*, V. 140, 183–196, 2018.

FIDELIS, M. E. A.; TOLEDO FILHO, R. D, SILVA, F.A.; MOBASHERC, B.; MÜLLERD, S.; MECHTCHERINED, V. **Interface characteristics of jute fiber systems in a cementitious matrix**. *Cement and Concrete Research*, V. 116, 252–265, 2019.

FRAZÃO, C.; BARROS, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; FERREIRA, S. R.; Gonçalves, D. **Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete**. *Cement and Concrete Composites*. 2018.

GHAVAMI, K. **Application of bamboo as a low-cost energy material in civil engineering**. Mexico: CIB/RILEM, 1989. p.526-536

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

GRAM, H. E. **Durability of natural fibers in concrete**. Swedish Cement and Concrete Research Institute. 1983

ICARDI, U.; FERRERO, L. **Optimisation of sandwich panels with functionally graded core and faces**. Compos. Sci. Technol., vol. 69, no. 5, pp. 575–585, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Disponível em:** <<https://ww2.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=ba&tema=lavouratemporaria2019>> Acesso em: 25 de outubro de 2019.

JSCE. 1990. **Method of test for shear strength of steel fiber reinforced concrete (SFRC)**. Standard JSCE-SF6, Japan Society of Civil engineers (JSCE), Tokyo.

KONG, K.; MESTICOU, Z.; MICHEL, M.; B, LARBI, A. S.; JUNES, A. **Comparative characterization of the durability behaviour of textilereinforced concrete (TRC) under tension and bending**. Composite Structures. Vol 179. 2017.

LAKREB, N.; SEN, U.; TOUSSAINT, E.; AMZIANE, S.; DJAKAB, E.; **Physical properties and thermal conductivity of cork-based sandwich panels for building**. Construction and Building Materials, 368. 2023.

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. **Sisal fibre and its composites: a review of recente developments**. Composites Science and Technology, v.60, p.2037-2055. 2000.

LIMA, P. R. L., **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal**. Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de janeiro, 263 p., 2004.

LIMA, P. R. L.; BARROS, J. A. O.; ROQUE, A. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, J. M. F. **Short sisal fiber reinforced recycled concrete block for one-way precast concrete slabs**. Construction and Building Materials, V. 187, 620–634. 2018.

MARAIS, S.; GOUANVÉ, F.; BONNESOEUR, A.; GRENET, J.; PONCIN, F.; MORVAN, C.; MÉTAYER, M. **Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: Effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and**

permeation properties. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36. 975-986. 10.1016/j.compositesa. 2004.

MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R.D. (2013) - **Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems.** Cement & Concrete Composites, v. 40, p.30–39. 2013.

MIRANDA, R. M. **Desenvolvimento de uma estrutura sanduíche de base polimérica, produzida com resíduos das indústrias de mineração e metalurgia, para aplicação como painel divisório de ambientes internos na construção civil.** 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Pará, 2016.

MUMENYA, S.W.; ALEXANDER, M.G.; TAIT, R.B. (2010) - **Evaluation of mechanical behaviour of weathered textile concrete.** Advances in Cement-Based Materials - van Zijl & Boshoff (eds), London, p. 137-142.

OLIVITO, R.S.; CEVALLOS, O.A.; CARROZZINI, A. **Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures.** Materials & Design, v.57, p.258–268, 2014.

OUSHABI, A.; FAHD, O. H.; ABBOUD, Y.; SAIR, S.; TANANE, O.; BOUARI, A. E.; **Improvement of the interface bonding between date palm fibers and polymeric matrices using alkali-silane treatments.** International Journal of Industrial Chemistry. 9. 10.1007/s40090-018-0162-3. 2018.

PARENTE, I. M. S. **Parâmetros de durabilidade de compósito sisal-cimento para uso como fôrmas permanentes de vigas de concreto armado.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, Salvador, 2020.

REBELO, V., SILVA, Y., FERREIRA, S. R., TOLEDO FILHO, R. D., GIACON, V. **Effects of mercerization in the chemical and morphological properties of amazon piassava.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, 29(1), e2019013. 2019.

RONG, M.Z.; ZHANG, M.Q.; LIU, Y.; YANG, G.C.; ZENG, H.M.; (2001). **The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites.** Composites Science and Technology, v.61, p.1437–1447.

SANTOS, D. O. J. **Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bio-concreto de casca de arroz.** Tese (doutorado) COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 144 p., 2020.

SANTOS, R. J.; LIMA, P. R. L. **Aderência fibra-matriz em compósitos a base de cimento reforçados com dois tipos de resíduos de sisal.** III Encontro Nacional sobre o Aproveitamento de Resíduos na Construção Civil, ANTAC, São Leopoldo, RS, 2013.

SAVASTANO JR, H., NOLASCO, A. M., LUZ, P. H. C., **Análise dos resíduos e subprodutos da agroindústria de fibras vegetais do Brasil para uso em materiais de construção.** In: Simpósio de Ciências da Engenharia Ambiental, 2., e Simpósio do Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, 4., 1997, São Carlos – SP. Anais... São Carlos – SP: CRHEA-EESC-USP, p. 87-87,1997.

SCHWARTS-GIVLI, H.; RABINOVICH, O.; FROSTIG, Y. **High-order nonlinear contact effects in cyclic loading of delaminated sandwich panels.** Compos. Part B Eng., 2007.

SELLAMI, A.; BOUAYAD, D.; BENAZZOUK, A.; AMZIANE, S.; MERZOUD, M. **Study of toughness and thermal properties of bio-composite reinforced with diss fibers for use as an insulating material.** Energy and Buildings, p. 112527, 2022.

SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R.D.; MOBASHER, B.; CHAWLA, N. **A multi-scale investigation of the mechanical behavior of durable sisal fiber cement composites.** Revista Matéria, v. 15, n. 2, pp. 338-344, 2010

SILVA, J. M. **Caracterização de fibras em germoplasma de abacaxi para a formulação de compósitos cimentícios.** Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) Universidade Federal do Recôncavo da Bahia e Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas, 2016.

Soon-Ching, N.; Low, K.; **Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel.** Construction and Building Materials, 42, 2452-2456. 2010.

SOUZA, E.H.; ARRUDA FILHO, A.B.; REINHARDT, D.H.; MARCONCINI, J.M.; LIMA, PRL.; SALEME, L.Y.; AONA1; DUARTE SOUZA, F.V.D.; **ESTIMATIVA DO RENDIMENTO DE FIBRAS EM PLANTIO DE ABACAXI CV. PÉROLA**. Revista RG News V4 (3) 2018 - Sociedade Brasileira de Recursos Genéticos.

SOUZA, L. O.; SOUZA, L. M. S.; SILVA, F. A. **Mechanical autogenous recovery and crack sealing of natural curauá textile reinforced concrete**. Construction and Building Materials. 2020.

SOUZA, L. O.; SOUZA, L. M. S.; SILVA, F. A. **Mechanics of natural curauá textile-reinforced concrete**. Magazine of Concrete Research. 2019.

SOUZA, L.; SOUZA, L.; SILVA, F. **Autogenous healing capability of natural curauá textile reinforced concrete**. 3rd International Conference on Natural Fibers: Advanced Materials for a Greener World, ICNF. Braga. Portugal. 2017.

SUKONTASUKKUL, P.; SANGPET, T.; NEWLANDS, M.; TANGCHIRAPAT, W.; LIMKATANYU, S.; CHINDAPRASIRT, P.; **Thermal behaviour of concrete sandwich panels incorporating phase change material**. Advances in Building Energy Research, 16(1), 64-88. 2022.

TEKALUR, S. A.; BOGDANOVICH, A. E.; SHUKLA, A. **Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core**. Compos. Sci. Technol., vol. 69, no. 6, pp. 736–753, 2008.

TOLEDO FILHO, R.D.; BARBOSA, N.P.; GHAVAMI, K. - **Applications of sisal and coconut fibres in adobe blocks**. II International RILEM Symposium on vegetable Plants and their fibres as building materials. Salvador, Brasil, 17-21 set, p. 139-149. 1990.

ZHOU, D.; STRONGE, W. **Mechanical properties of fibrous core sandwich panels**. J. Mech. Eng. Sci., 2005.