

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA

EDUARDO CESAR PACHLA

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES COM
INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ**

PORTO ALEGRE

2022

EDUARDO CESAR PACHLA

**ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES COM
INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Orientador: Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coorientadora: Dra. Ângela Gaio Graeff

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Pachla, Eduardo Cesar

ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS
LEVES COM INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ / Eduardo
Cesar Pachla. -- 2022.

264 f.

Orientador: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho.

Coorientadora: Ângela Gaio Graeff.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Concreto Celular. 2. Casca de Arroz. 3. Fibras
Vegetais. 4. Durabilidade. 5. Desempenho Mecânico. I.
Silva Filho, Luiz Carlos Pinto da, orient. II.
Graeff, Ângela Gaio, coorient. III. Título.

EDUARDO CESAR PACHLA

ANÁLISE DA DURABILIDADE DE COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES COM
INCORPORAÇÃO DE CASCA DE ARROZ

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial à obtenção do grau de
doutor.

Aprovado em: Porto Alegre, 26 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho – UFRGS
Orientador



Prof. Dr^a. Angela Galo Graeff – UFRGS
Coorientadora



Prof^a. Dr^a. Ana Paula Kirchheim – UFRGS
Examinadora



Prof. Dr. Ederli Marangon – UNIPAMPA
Examinador



Prof. Dr. Oswaldo Cascardo Matos – UFG
Examinador

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade, saúde e força para alcançar todos os objetivos.

À minha família, em especial, à minha esposa Débora Bretas, por todo suporte emocional, pelo amor, pelo carinho, pela compreensão por minha ausência em períodos de férias, finais de semanas e feriados, os quais dediquei boa parte nos últimos quatro anos para esta pesquisa. Tenho certeza de que todo esse esforço será recompensado.

Às minhas bebês Carolina e Cecília, que nasceram no último trimestre do doutorado e me deram forças para concluir este trabalho e não desistir de um futuro melhor.

Aos meus verdadeiros amigos, que sempre me apoiaram e me incentivaram a não desistir.

Aos Professores, Dr. Luiz Carlos e Dra. Ângela Graeff, pela orientação e paciência que tiveram ao longo dos últimos quatro anos.

Ao técnico laboratorista Edgar, pelos auxílios prestados no laboratório e nos experimentos realizados. Sem a sua contribuição esta pesquisa, com certeza, não teria sido concluída.

Ao professor Dr. Ederli Marangon, meu orientador de TCC e coorientador de mestrado, que, mesmo após conclusão de ambos os trabalhos, sempre esteve disposto a dar suporte e apoio na minha carreira acadêmica.

Às empresas Rodo Química e HMA Equipamentos, pela doação dos aditivos utilizados na pesquisa.

À FAPERGS pelo financiamento da máquina de produção de espuma e pelos insumos necessários através do projeto Pronex.

“A ciência nunca resolve um problema
sem criar pelo menos outros dez”

George Bernard Shaw

RESUMO

A partir de uma necessidade nacional de desenvolver novos elementos de vedação, que ofereçam alto desempenho e sejam sustentáveis, este trabalho testou a compatibilidade entre o concreto celular e a casca de arroz *in natura*. A pesquisa consistiu em, a partir de uma análise completa da literatura, identificar os problemas constatados no uso de fibras vegetais em matrizes cimentícias e, a partir disso, desenvolver um programa experimental que colaborasse com o avanço no desenvolvimento de compósitos ecologicamente adequados. Para atender aos objetivos propostos, foram feitas diversas análises de dosagem e executadas combinações entre matriz e componente de reforço até atingir um produto adequado para atender aos requisitos normativos brasileiros. Após a definição dos traços, foram executados tratamentos químicos, físicos e térmicos, além de envelhecimento natural, para verificar o desempenho do compósito desenvolvido em curto, médio e longo prazo. Atendendo ao objetivo geral proposto na pesquisa, verificou-se que, de maneira inédita na literatura, essa pesquisa comprova a eficiência da incorporação de uma fibra vegetal (casca de arroz) sem qualquer tipo de tratamento em matriz cimentícia. Os resultados obtidos demonstram que, mesmo após a completa degradação da matéria orgânica, o compósito desenvolvido atende aos requisitos de desempenho mecânico e pode ser utilizado na produção de blocos para alvenaria de vedação. A condição que favorece o uso do concreto celular como matriz cimentícia é o fato de haver compatibilidade entre as densidades da matriz e do componente de reforço. Em relação à fibra vegetal, a partir de análises microestruturais realizadas utilizando microscopia eletrônica de varredura, difração de raios x, fluorescência de raios x e espectroscopia por energia dispersiva, foi verificado que o que viabilizou a garantia de desempenho em longo prazo do compósito foi a composição química da casca de arroz. Por ter em sua composição química, aproximadamente, 90% de polímeros naturais e os outros 10% de sílica, a casca possibilita reações químicas que mitigam a redução de desempenho causada pela perda de resistência gerada, principalmente, pela deterioração da celulose. A sílica, presente em sua maioria nas superfícies da casca, gera a possibilidade de formação de C-S-H e gera uma calcificação da fibra, o que auxilia de maneira significativa na resistência à compressão axial. Já a degradação dos polímeros naturais, que possuem em sua composição hidrogênio, carbono e oxigênio, gera a formação de água e dióxido de carbono que, na sequência, produzem o ácido carbônico. O ácido carbônico, por sua vez, junto do hidróxido de cálcio formado pela matriz, forma o carbonato de cálcio. Essas reações podem auxiliar na mitigação da perda de resistência gerada pela degradação da celulose e são prejudiciais apenas se houver, no compósito, o uso de materiais metálicos que poderão sofrer corrosão.

Palavras-chave: Concreto Celular. Casca de Arroz. Fibras Vegetais. Durabilidade. Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

Based on a national need to develop new sealing elements that offer high performance and are sustainable, this work tested the compatibility between cellular concrete and *in natura* rice husk. The research consisted of, from a complete analysis of the literature, identifying the problems found in the use of vegetable fibers in cementitious matrices and, from that, to develop an experimental program that collaborates with the advance in the development of ecologically adequate composites. To meet the proposed objectives, several dosages analyze were carried out and combinations between matrix and reinforcement component were performed until reaching a suitable product to meet Brazilian regulatory requirements. After defining the traces, chemical, physical, and thermal treatments were performed, in addition to natural aging, to verify the performance of the composite developed in the short, medium, and long term. Given the general objective proposed in the research, it was found that, in an unprecedented way in the literature, this research proves the efficiency of the incorporation of a vegetable fiber (rice husk) without any type of treatment in a cement matrix. The results obtained demonstrate that, even after the complete degradation of the organic matter, the composite developed meets the requirements of mechanical performance and can be used in the production of blocks for masonry sealing. The condition that favors the use of cellular concrete as a cementitious matrix and generated good results is the fact that there is compatibility between the densities of the matrix and the reinforcement component. In relation to plant fiber, from microstructural analyzes carried out using scanning electron microscopy, x-ray diffraction, x-ray fluorescence and energy dispersive spectroscopy, it was verified that what enabled the guarantee of long-term performance of the composite was the composition rice husk chemistry. As it has approximately 90% of natural polymers in its chemical composition and the other 10% of silica, the bark enables chemical reactions that mitigate the losses caused by the loss of strength generated, mainly, by the deterioration of cellulose. Silica, present mostly on the shell surfaces, allows the formation of C-S-H and generates calcification of the fiber, which significantly helps in the resistance to axial compression. The degradation of natural polymers, which have hydrogen, carbon and oxygen in their composition, generates the formation of water and carbon dioxide, which subsequently produce carbonic acid. The carbonic acid, in turn, together with the calcium hydroxide formed by the matrix, forms calcium carbonate. These reactions can help to mitigate the loss of strength generated by the degradation of cellulose and are only harmful if, in the composite, there is the use of metallic materials that may corrode.

Keywords: Cellular Concrete. Rice Husk. Vegetable Fibers. Durability. Mechanical Performance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Propagação das chamas na Grenfell Tower	31
Figura 2 – Anfiteatro Coliseu em Roma	40
Figura 3 - Concreto leve com: a) agregados leves; b) ar incorporado; c) sem finos. 43	
Figura 4 – Classificação do concreto celular.....	44
Figura 5 – Difratoograma da casca de arroz natural	53
Figura 6 – Análise interface fibra-matriz (CA-argamassa).....	62
Figura 7 – Curvas Tensão x Deflexão para compósitos submetidos a diferentes temperaturas.	63
Figura 8 – Imagem das fibras de sisal após aquecimento (a) 23°C, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C e (e) 250°C.....	64
Figura 9 – Curvas “tensão x deflexão” para compósitos submetidos a 0, 5, 10, 15, 20 e 25 ciclos de molhagem e secagem	66
Figura 10 – Fluxograma simplificado da pesquisa	72
Figura 11 – Fluxograma de processos para definição do traço.....	76
Figura 12 – Fluxograma de processos para a mistura dos materiais	77
Figura 13 – Teste do cone de Marsh Modificado	77
Figura 14 – Fluxograma de processos para definir a consistência.....	79
Figura 15 – Determinação das dimensões dos blocos.....	81
Figura 16 – Amostras da casca antes da metalização (a) e após a metalização (b).85	
Figura 17 – Amostras submetidas a intempéries naturais.....	87
Figura 18 – Bancadas para ensaio de durabilidade interno	88
Figura 19 – Controle de temperatura das amostras	88
Figura 20 – Curva granulométrica da areia	89
Figura 21 – Curva granulométrica discreta da areia.....	90
Figura 22 – Casca de arroz	91
Figura 23 – Curva granulométrica da casca de arroz.....	91
Figura 24 – Curva granulométrica discreta da casca de arroz	92
Figura 25 – Característica da casca de arroz retida em cada peneira	93
Figura 26 – Difratoograma da casca de arroz in natura	94
Figura 27 – Análise da superfície externa da casca de arroz com ampliação de 200x (a) e ampliação de 1200x (c) e da superfície interna com ampliação de 200x (b) e ampliação de 1200x (d)	97

Figura 28 – Análise da superfície externa da casca de arroz com ampliação de 2000x (a) e ampliação de 5000x (c), da superfície interna com ampliação de 2000x (b) e ampliação de 5000x (d) e da seção transversal interna com ampliação de 2000x (e) e ampliação de 5000x (f).....	98
Figura 29 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz in natura	99
Figura 30 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz in natura	100
Figura 31 – Microanálise da estrutura interna da casca de arroz in natura.....	101
Figura 32 – Microanálise de partículas identificadas nas superfícies da casca.....	103
Figura 33 – Espuma pré-formada.....	104
Figura 34 – Comparação MEF e MEE 28 dias dos traços com CA.....	106
Figura 35 – MEE 28 dias com análise de desvio padrão dos traços com CA	107
Figura 36 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de CA	109
Figura 37 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de CA	110
Figura 38 – Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com CA	112
Figura 39 – Comparação da resistência à tração aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com CA.....	114
Figura 40 – Gráficos de radar das notas obtidas por cada traço com CA	117
Figura 41 – Gráficos de radar para comparação dos traços (a) Traço Pachla17 e T.10%CA; (b) T.10%CA e T.20%CA; (c) Traço Pachla17 e T.20%CA; (d) T.20%CA e T.30%CA; (e) T.20%CA e T.40%CA; (f) T.20%CA e T.50%CA	118
Figura 42 – Comparação MEF e MEE 28 dias dos traços com areia.....	120
Figura 43 – MEE 28 dias com análise de desvio padrão dos traços com areia	121
Figura 44 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de areia...	123
Figura 45 – Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com areia	125
Figura 46 – Comparação da resistência à tração aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com areia.....	126
Figura 47 – Gráficos de radar das notas obtidas por cada traço com areia.....	128
Figura 48 – Gráficos de radar para comparação dos traços (a) T.20%CA e T.10%Ar; (b) T.10%Ar e T.20%Ar; (c) T.10%Ar e T.30%Ar; (d) T.10%Ar e T.40%Ar; (e) T.10%Ar e T.50%Ar; (f) Todos os traços.....	129
Figura 49 – Amostras após 56 dias em banho-maria.....	135
Figura 50 – Amostras após 365 dias em câmara úmida	135

Figura 51 – Amostras após 365 dias em ambiente interno	135
Figura 52 – Amostras após 365 dias em ambiente externo	136
Figura 53 – Casca de Arroz extraída do Compósito.....	137
Figura 54 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias e 365 dias de cura em câmara úmida	137
Figura 55 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido banho-maria por 56 dias	139
Figura 56 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida	141
Figura 57 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias em ambiente interno	142
Figura 58 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias em ambiente externo	143
Figura 59 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em banho-maria (b) – ampliação de 200 vezes	146
Figura 60 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em banho-maria (b) – ampliação de 2000 vezes	147
Figura 61 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	147
Figura 62 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes	148
Figura 63 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes	148
Figura 64 – Casca retirada do Compósito ampliação de 20000 vezes	149
Figura 65 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 200 vezes.....	149
Figura 66 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 2000 vezes.....	150
Figura 67 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	151
Figura 68 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 5000 vezes.....	151

Figura 69 – Superfície externa da casca in natura (a), superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b), superfície interna da casca in natura (c) e superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (d) – ampliação de 200 vezes.....	153
Figura 70 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b) – ampliação de 2000 vezes.....	154
Figura 71 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	154
Figura 72 – Casca in natura (a) casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b) – ampliação de 5000 vezes.....	155
Figura 73 – Casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno ampliação de 5000 vezes.....	155
Figura 74 – Superfície externa da casca in natura (a), superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b), superfície interna da casca in natura (c) e superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (d), – ampliação de 200 vezes.....	156
Figura 75 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b) – ampliação de 2000 vezes.....	157
Figura 76 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	158
Figura 77 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b) – ampliação de 5000 vezes.....	158
Figura 78 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria.....	159
Figura 79 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria.....	160
Figura 80 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida	161
Figura 81 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida	162
Figura 82 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno	163
Figura 83 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno	164
Figura 84 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo	166

Figura 85 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após 365 dias expostos a ambiente interno.....	168
Figura 86 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após 365 dias expostos a ambiente externo.....	169
Figura 87 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após tratamentos de longo prazo.....	169
Figura 88 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após 365 dias expostos a ambiente interno.....	173
Figura 89 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após 365 dias expostos a ambiente externo.....	173
Figura 90 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após tratamentos de longo prazo.....	174
Figura 91 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após diferentes períodos em câmara úmida.....	177
Figura 92 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após 365 dias expostos a ambiente interno.....	178
Figura 93 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após 365 dias expostos a ambiente externo.....	179
Figura 94 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após tratamentos de longo prazo.....	180
Figura 95 – Amostras após tratamento em NaOH.....	183
Figura 96 – Casca de Arroz do Compósito que ficou 56 dias em NaOH.....	184
Figura 97 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a solução de hidróxido de sódio.....	184
Figura 98 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito (b) – ampliação de 200 vezes.....	186
Figura 99 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes.....	187
Figura 100 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 2000 vezes.....	188
Figura 101 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes.....	189
Figura 102 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes.....	189
Figura 103 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes.....	190

Figura 104 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito submetido a solução de hidróxido de sódio	191
Figura 105 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após ataque em hidróxido de sódio	193
Figura 106 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após ataque em hidróxido de sódio	195
Figura 107 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após ataque em hidróxido de sódio	197
Figura 108 – Amostras após tratamento em H ₂ SO ₄	199
Figura 109 – Casca de Arroz do Compósito que ficou 42 dias em H ₂ SO ₄	199
Figura 110 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a solução de ácido sulfúrico.....	200
Figura 111 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em ácido sulfúrico (b) – ampliação de 200 vezes.....	202
Figura 112 – Superfície interna da casca in natura (a) e da casca retirada do Compósito em solução ácida (b) – ampliação de 200 vezes	203
Figura 113 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em ácido sulfúrico (b) – ampliação de 2000 vezes.....	204
Figura 114 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	205
Figura 115 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes	205
Figura 116 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes	206
Figura 117 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico.....	207
Figura 118 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico.....	208
Figura 119 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico.....	210
Figura 120 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após tratamento com ácido sulfúrico.....	212
Figura 121 – Amostras dispostas em forno mufla para ataque térmico	214
Figura 122 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 100°C	214
Figura 123 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 300°C	215

Figura 124 – Amostras Referência (à esquerda) e Compósitos (à direita) após uma hora na mufla a 650°C.....	215
Figura 125 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 650°C	216
Figura 126 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 100°C.....	217
Figura 127 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 300°C.....	218
Figura 128 – Comparação do difratograma da casca de arroz in natura com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 650°C.....	219
Figura 129 – Comparação do difratograma da casca de arroz extraída dos compósitos submetidos a diferentes temperaturas	Erro! Indicador não definido.
Figura 130 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 200 vezes	222
Figura 131 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes	223
Figura 132 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 2000 vezes	224
Figura 133 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes	224
Figura 134 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 5000 vezes	225
Figura 135 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes	226
Figura 136 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C (b) – ampliação de 200 vezes	227
Figura 137 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes	228
Figura 138 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C (b) – ampliação de 2000 vezes	228
Figura 139 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C (b) – ampliação de 5000 vezes	229
Figura 140 – Casca retirada do Compósito ampliação de 90 vezes	230
Figura 141 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C (b) – ampliação de 200 vezes	230

Figura 142 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C (b) – ampliação de 2000 vezes	231
Figura 143 – Casca in natura (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C (b) – ampliação de 5000 vezes	232
Figura 144 – Casca retirada do Compósito ampliação de 10000 vezes	233
Figura 145 – Microanálise da superfície externa casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 100°C.....	234
Figura 146 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 300°C.....	235
Figura 147 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 650°C.....	236
Figura 148 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após diferentes ataques térmicos	238
Figura 149 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após diferentes ataques térmicos	240
Figura 150 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após diferentes ataques térmicos	242
Figura 151 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à tração na flexão no Compósito utilizando amostras prismáticas	246
Figura 152 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à compressão axial no Compósito utilizando amostras prismáticas.....	247
Figura 153 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à compressão axial no Compósito utilizando amostras cúbicas.....	248

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do concreto celular pelo percentual de dispersão	47
Tabela 2 – Classes do concreto celular autoclavado	49
Tabela 3 – Composição química da casca de arroz sob diferentes pré-tratamentos	52
Tabela 4 – Composição química da casca do arroz.....	53
Tabela 5 – Modos de degradação da celulose.....	54
Tabela 6 – Equações para as configurações de ensaios de flexão.....	60
Tabela 7 – Ácidos que mais afetam a estrutura do concreto	65
Tabela 8 – Propriedades físicas da argamassa com um ano de idade	67
Tabela 9 – Traço utilizado como base para realizar a dosagem	73
Tabela 10 – Traço Pachla17 utilizado na pesquisa	74
Tabela 11 – Adição de casca de arroz ao Traço Pachla17	74
Tabela 12 – Substituição de cimento Portland por areia ao T.20%CA.....	75
Tabela 13 – Velocidade de compressão	83
Tabela 14 – Composição química da casca de arroz in natura.....	95
Tabela 15 – Composição química da superfície externa da casca de arroz in natura obtida a partir de EDS	100
Tabela 16 – Composição química da superfície interna da casca de arroz in natura obtida a partir de EDS	101
Tabela 17 – Composição química da estrutura interna casca de arroz in natura obtida a partir de EDS	102
Tabela 18 – Composição química das partículas identificadas nas superfícies da casca de arroz obtida a partir de EDS.....	103
Tabela 19 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura dos Traços com CA	106
Tabela 20 - Notas atribuídas em função da MEE aos 28 dias de cura.....	107
Tabela 21 – Índice de consistência obtido no mini-slump dos traços com CA	108
Tabela 22 - Notas atribuídas em função da consistência das amostras com CA....	109
Tabela 23 - Notas atribuídas em função da análise visual das amostras com CA..	110
Tabela 24 – Resistência à compressão axial aos 7 dias de cura dos traços com CA	111
Tabela 25 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura dos Traços com CA	111

Tabela 26 - Notas atribuídas em função da resistência à compressão	113
Tabela 27 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 7 dias de cura.....	113
Tabela 28 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura....	113
Tabela 29 - Notas atribuídas em função da resistência à tração na flexão	115
Tabela 30 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura dos traços com areia.....	121
Tabela 31 - Notas atribuídas em função da MEE aos 28 dias de cura.....	122
Tabela 32 – Índice de consistência obtido no mini-slump dos traços com areia	122
Tabela 33 - Notas atribuídas em função da consistência das amostras com areia.	123
Tabela 34 - Notas atribuídas em função da análise visual das amostras.....	123
Tabela 35 – Resistência à compressão axial aos 7 dias de cura dos traços com areia	124
Tabela 36 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura dos traços com areia	124
Tabela 37 - Notas atribuídas em função da resistência à compressão	125
Tabela 38 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 7 dias de cura dos traços com areia.....	126
Tabela 39 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura dos traços com areia.....	126
Tabela 40 - Notas atribuídas em função da resistência à tração na flexão	127
Tabela 41 – Traços utilizados na primeira tentativa de otimização.	130
Tabela 42 – Massa Específica no Estado Fresco	130
Tabela 43 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 7 dias de cura	131
Tabela 44 – Resistência aferidas aos 28 dias para otimização do traço T.10%Ar..	131
Tabela 45 – Traços utilizados na segunda tentativa de otimização.	132
Tabela 46 – Massa Específica no Estado Fresco	132
Tabela 47 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura	132
Tabela 48 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura.....	132
Tabela 49 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura	133
Tabela 50 – Traços utilizados nas análises de durabilidade	134
Tabela 51 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido aos envelhecimentos naturais e acelerado.....	144
Tabela 52 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria.....	160

Tabela 53 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria.....	160
Tabela 54 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS	162
Tabela 55 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS	163
Tabela 56 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS	164
Tabela 57 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS	165
Tabela 58 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS	166
Tabela 59 – Resistências à tração na flexão dos prismas após envelhecimento natural	167
Tabela 60 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	170
Tabela 61 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural	170
Tabela 62 – Resistências à compressão axial dos prismas após envelhecimento natural	172
Tabela 63 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	175
Tabela 64 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural	176
Tabela 65 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em câmara úmida.....	177
Tabela 66 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente interno.....	178
Tabela 67 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente externo.....	179
Tabela 68 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente externo.....	180
Tabela 69 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura	181

Tabela 70 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural	182
Tabela 71 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido à solução de hidróxido de sódio	185
Tabela 72 – Composição química da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de hidróxido de sódio obtida a partir de EDS .	191
Tabela 73 – Resistências à tração na flexão dos prismas após ataque em hidróxido de sódio.....	192
Tabela 74 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	193
Tabela 75 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base).....	194
Tabela 76 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento químico em NaOH (Base).....	194
Tabela 77 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	195
Tabela 78 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base).....	196
Tabela 79 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento térmico	197
Tabela 80 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura	198
Tabela 81 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base).....	198
Tabela 82 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico.....	201
Tabela 83 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico obtida a partir de EDS	207
Tabela 84 – Resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico.....	208
Tabela 85 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	209
Tabela 86 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H ₂ SO ₄	209

Tabela 87 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico	210
Tabela 88 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	211
Tabela 89 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H ₂ SO ₄	211
Tabela 90 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento com ácido sulfúrico.....	211
Tabela 91 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura	213
Tabela 92 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H ₂ SO ₄	213
Tabela 93 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido a 100°C, 300°C e 650°C	220
Tabela 94 – Composição química da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 100°C.....	234
Tabela 95 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 300°C.....	235
Tabela 96 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 650°C.....	237
Tabela 97 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento térmico	237
Tabela 98 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	239
Tabela 99 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos.....	239
Tabela 100 – Resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento térmico	240
Tabela 101 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura	241
Tabela 102 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos.....	241
Tabela 103 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento térmico	242

Tabela 104 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura	243
Tabela 105 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos	243

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	30
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA.....	30
1.2 JUSTIFICATIVA	32
1.3 INEDITISMO	35
1.4 PROBLEMA DA PESQUISA	35
1.5 OBJETIVOS	36
1.5.1 Objetivo geral.....	36
1.5.2 Objetivos específicos.....	36
1.6 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	37
1.7 ESTRUTURA DA TESE	37
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1 CONCRETO LEVE.....	39
2.1.1 Panorama Histórico	40
2.1.2 Classificação.....	42
2.1.3 Concreto Celular.....	43
2.1.3.1 Definição	44
2.1.3.2 Vantagens.....	45
2.1.3.3 Dosagem.....	46
2.1.3.4 Caracterização	47
2.1.3.5 Normatização Técnica	48
2.2 BIOMASSA	50
2.2.1 Casca de Arroz.....	51
2.2.2 Celulose.....	54
2.2.3 Hemicelulose	55
2.2.4 Lignina.....	55
2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA VEGETAL	56
2.3.1 Compatibilidade entre as fibras e o cimento	57
2.3.2 Vantagens da adição das fibras vegetais em materiais cimentícios	57
2.3.3 Desvantagens da adição das fibras vegetais em materiais cimentícios	58
2.4 EXPERIÊNCIAS CONSOLIDADAS	59
2.4.1 Caracterizações físicas e químicas	59
2.4.1.1 Termogravimetria	59
2.4.1.2 Análises de desempenho mecânico.....	59
2.4.1.3 Difração de Raios X	61
2.4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Raio X	61
2.4.2 Amostras submetidas a diferentes temperaturas.....	63

2.4.3	Exposição a ataque ácido.....	65
2.4.4	Exposição a ciclos de molhagem e secagem	66
2.4.5	Compósitos de argamassa leve reforçados com CA	67
2.4.6	Métodos de aprimorar a durabilidade	68
2.4.6.1	Revestimento das fibras vegetais	68
2.4.6.1	Tratamentos físicos.....	69
2.4.6.2	Tratamentos químicos.....	69
3.	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	71
3.1	FLUXOGRAMA DA PESQUISA.....	71
3.2	MÉTODOS	73
3.2.1	Dosagem	73
3.2.2	Método de mistura	76
3.2.3	Consistência e fluidez.....	77
3.2.4	Massa Específica.....	79
3.2.5	Moldagem das amostras	80
3.2.5.1	Amostras para definição do traço.....	80
3.2.5.2	Produção de blocos de vedação	81
3.2.6	Resistência à tração na flexão.....	82
3.2.7	Resistência à compressão.....	82
3.2.7.1	Definição do traço	82
3.2.7.2	Resistência dos blocos de vedação	83
3.2.8	Difração de raios x.....	83
3.2.9	Fluorescência de raios x.....	84
3.2.10	Microscopia eletrônica de varredura	84
3.2.11	Análise de durabilidade	85
3.2.11.1	Deterioração da Hemicelulose e da Lignina	86
3.2.11.2	Deterioração da Celulose	86
3.2.11.3	Envelhecimento Natural	87
3.2.11.4	Envelhecimento Acelerado.....	88
3.3	MATERIAIS.....	89
3.3.1	Cimento Portland.....	89
3.3.2	Areia natural	89
3.3.3	Casca do Arroz.....	91
3.3.3.1	Formato e granulometria da casca de arroz.....	91
3.3.3.1	Difração de raios x	94
3.3.3.2	Fluorescência de raios x	95
3.3.3.3	Microscopia eletrônica de varredura	96

3.3.3.4	Espectroscopia por energia dispersiva	99
3.3.4	Aditivo Incorporador de Ar	104
3.3.5	Aditivo Plastificante.....	104
3.3.6	Espuma	104
4.	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS.....	105
4.1	DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CASCA DE ARROZ	105
4.1.1	Análise das massas específicas.....	105
4.1.2	Análise da fluidez e da consistência	108
4.1.3	Análise visual.....	109
4.1.4	Resistência à compressão axial	111
4.1.5	Resistência à tração na flexão em 3 pontos	113
4.1.6	Definição da quantidade de casca de arroz.....	116
4.2	REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO	119
4.2.1	Análise das massas específicas.....	120
4.2.2	Análise da fluidez e da consistência	122
4.2.3	Análise visual.....	123
4.2.4	Resistência à compressão axial	124
4.2.5	Resistência à tração na flexão em 3 pontos	125
4.2.6	Definição do percentual de areia	127
4.3	OTIMIZAÇÃO DO TRAÇO	130
5.	ANÁLISES DE DURABILIDADE DO COMPÓSITO DESENVOLVIDO.....	134
5.1	DURABILIDADE – ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO.....	134
5.1.1	Análise química a partir de difração de raios x	137
5.1.1.1	Compósito submetido a banho-maria	138
5.1.1.2	Compósito com 365 dias em câmara úmida	140
5.1.1.3	Compósito com 365 dias em ambiente interno	141
5.1.1.4	Compósito com 365 dias em ambiente externo	142
5.1.2	Fluorescência de raios x.....	143
5.1.3	Análise em microscopia eletrônica de varredura	145
5.1.3.1	Compósito submetido a banho-maria	146
5.1.3.2	Compósito submetido a câmara úmida por 365 dias	149
5.1.3.3	Compósito submetido a ambiente interno por 365 dias	152
5.1.3.4	Compósito submetido a ambiente externo por 365 dias	156
5.1.4	Espectroscopia por energia dispersiva	159
5.1.4.1	Compósito submetido a banho-maria	159
5.1.4.2	Compósito submetido à câmara úmida por 365 dias	161
5.1.4.3	Compósito submetido a ambiente interno por 365 dias	163

5.1.4.4	Compósito submetido a ambiente externo por 365 dias	166
5.1.5	Análise das resistências à tração na flexão dos prismas.....	167
5.1.6	Análise das resistências à compressão axial dos prismas	172
5.1.7	Análise das resistências à compressão axial dos cubos	176
5.2	DURABILIDADE – ATAQUE QUÍMICO COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO	183
5.2.1	Análise química a partir de difração de raios x	184
5.2.2	Fluorescência de raios x.....	185
5.2.3	Análise em microscopia eletrônica de varredura	186
5.2.4	Espectroscopia por energia dispersiva	190
5.2.5	Análise das resistências à tração na flexão dos prismas.....	192
5.2.6	Análise das resistências à compressão axial dos prismas	194
5.2.7	Análise das resistências à compressão axial dos cubos	197
5.3	DURABILIDADE – ATAQUE QUÍMICO COM ÁCIDO SULFÚRICO	198
5.3.1	Análise química a partir de difração de raios x	200
5.3.2	Fluorescência de raios x.....	201
5.3.3	Análise em microscopia eletrônica de varredura	202
5.3.4	Espectroscopia por energia dispersiva	206
5.3.5	Análise das resistências à tração na flexão dos prismas.....	208
5.3.6	Análise das resistências à compressão axial dos prismas	210
5.3.7	Análise das resistências à compressão axial dos cubos	211
5.4	DURABILIDADE – ATAQUE TÉRMICO.....	214
5.4.1	Análise química a partir de difração de raios x	216
5.4.1.1	Compósito submetido a 100°C.....	217
5.4.1.2	Compósito submetido a 300°C.....	218
5.4.1.3	Compósito submetido a 650°C.....	219
5.4.1.4	Comparação de todas as temperaturas	Erro! Indicador não definido.
5.4.2	Fluorescência de raios x.....	220
5.4.3	Análise em microscopia eletrônica de varredura	222
5.4.3.1	Compósito submetido a 100°C.....	222
5.4.3.2	Compósito submetido a 300°C.....	226
5.4.3.3	Compósito submetido a 650°C.....	229
5.4.4	Espectroscopia por energia dispersiva	233
5.4.4.1	Compósito submetido a 100°C.....	233
5.4.4.2	Compósito submetido a 300°C.....	235
5.4.4.3	Compósito submetido a 650°C.....	236
5.4.5	Análise das resistências à tração na flexão dos prismas.....	237

5.4.6	Análise das resistências à compressão axial dos prismas	240
5.4.7	Análise das resistências à compressão axial dos cubos	242
6.	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS.....	245
6.1	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL.....	245
6.2	COMPROVAÇÃO DE DURABILIDADE DA CASCA DE ARROZ EM MATRIZ CIMENTÍCIA	249
6.3	METODOLOGIA PARA ESCOLHA DE FIBRAS VEGETAIS	250
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	252
7.1	CONCLUSÕES	252
7.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	254
	REFERÊNCIAS.....	255

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, foram embasados os eventos e o tema que evidencia a importância da pesquisa realizada. Inicialmente, apresenta-se a contextualização, em que são abordados problemas que ocorrem com materiais convencionais, bem como, motivos e dificuldades para o uso de fibras naturais incorporadas a materiais cimentícios. Na sequência, desenvolveu-se a justificativa do estudo, os objetivos a serem atingidos, o ineditismo da pesquisa, as delimitações e a estrutura do trabalho.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A necessidade de isolar ambientes para proteção ocorre desde os primórdios da humanidade. Inicialmente, os abrigos eram em cavernas e, com o passar do tempo, o ser humano passou a desenvolver construções específicas para garantir abrigo e segurança. Os elementos desenvolvidos visavam criar proteção e eram executados com diversos materiais como madeira, barro, rocha e palha.

Atualmente, além de fornecer abrigo, as edificações precisam oferecer estanqueidade, bom desempenho térmico, capacidade de isolar ruídos, iluminação adequada, segurança contra o fogo, segurança estrutural, entre outras características que proporcionem o conforto ambiental. A NBR 15575 (ABNT, 2021) é a norma brasileira que define os critérios e os requisitos necessário para garantir desempenho e qualidade aos ambientes. Diversos países já possuem normas de desempenho e alguns países desenvolvidos tratam do tema há mais de 40 anos.

Com a necessidade de melhorar o desempenho das edificações, principalmente por exigência dos usuários e pelo advento de normas de desempenho, novos materiais têm sido desenvolvidos. Os componentes de vedação que garantem bom isolamento e melhor qualidade ambiental são, na grande maioria, compósitos fabricados com fibra de vidro, lã mineral e espuma de poliuretano. Embora o desempenho seja satisfatório, eles podem ser perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente (LAHOUIOUI *et al.*, 2019).

Em 2013, na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul, houve um incêndio que causou a perda de 242 vidas, os laudos do Instituto Geral de Perícias apontam que o protagonista pela amplitude da tragédia foi a espuma de isolamento acústica utilizada, essa espuma era de poliuretano. Sua combustão liberou gases tóxicos como monóxido de carbono, dióxido de carbono e gás cianídrico, o que acabou matando, por asfixia, 234 das 242 vítimas da tragédia (CERETTA, 2013).

Quatro anos depois, em 2017, em Londres, no Reino Unido, houve um grande incêndio na edificação residencial Grenfell Tower (Figura 1). Novamente, a propagação das chamas foi mais rápida devido ao uso de revestimentos de isolamento, nesta tragédia, setenta e duas pessoas morreram (BBC NEWS, 2018).



Figura 1 - Propagação das chamas na Grenfell Tower (BBC NEWS, 2018)

Além das tragédias ocasionadas pelo uso de materiais inadequados para garantir segurança em casos de incêndio, a exposição das pequenas partículas de fibra de vidro e lã de vidro, por exemplo, podem causar problemas respiratórios e irritação na pele e nos olhos. Complementarmente, por serem industrializados, esses materiais apresentam alto valor agregado em países de terceiro mundo e, geralmente, precisam ser importados (LAHOUIOUI *et al.*, 2019; MOHD ZAMZANI; OTHUMAN MYDIN; ABDUL GHANI, 2018; SRIPAIBOONKIJ *et al.*, 2009).

Em vista do déficit de materiais de baixo custo e que ofereçam bom desempenho para elementos de vedação, diversas pesquisas têm estudado a utilização de recursos renováveis como fibras naturais oriundas do agronegócio e da agroindústria para desenvolver novos compósitos. O uso de compósitos cimentícios reforçados com essas fibras é considerado uma tecnologia inovadora também pelos benefícios ecológicos e pelo baixo custo que apresenta (LAHOUIOUI *et al.*, 2019).

Nesse sentido, tem-se dado destaque a fibras de sisal, coco, curauá, juta, casca de arroz e bambu combinadas com materiais cimentícios. Geralmente, as pesquisas fazem uso de materiais abundantes em regiões específicas, sem análises amplas da composição das fibras e do potencial de seu desempenho e durabilidade, por esse motivo, há tanta variedade nas fibras pesquisadas.

Sabendo que o uso de materiais compósitos melhora diversas propriedades finais se comparadas aos seus constituintes de maneira isolada, materiais de matriz cimentícia reforçados por fibras sintéticas ou naturais tendem a proporcionar melhor conforto ambiental se comparados a materiais cimentícios sem fibras (SISMAN; GEZER; KOCAMAN, 2011). Dentre as melhorias verificadas, está a capacidade de resistir à propagação de trincas (MERTA; TSCHEGG, 2013; PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017), redução de peso próprio nas estruturas e isolamento térmico acústico (ALENGARAM; MUHIT; JUMAAT, 2013b).

Tendo em vista o potencial dos compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais para aprimoramento do desempenho dos materiais de vedação, além de suas vantagens quanto ao custo de produção e seu viés sustentável, a incorporação de materiais lenhocelulósicos é vista como boa opção para desenvolvimento de novos produtos (TEIXEIRA *et al.*, 2020).

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de desenvolver novos materiais de vedação que ofereçam segurança e conforto aos ambientes residenciais é primordial para garantir qualidade de vida. Um fato contemporâneo que mostra a necessidade de materiais mais eficientes para isolar ambientes é a pandemia causada pelo novo Coronavírus (COVID-19).

Estima-se que a pandemia tenha gerado, entre os meses de março e junho de 2020, uma taxa média de isolamento social de mais de 40% no Brasil (INLOCO, 2020; JANSEN, 2020). Além disso, alguns países como Itália e China fizeram “*lockdown*” em algumas cidades, o que implica em, praticamente, 100% da população dentro de suas casas. Essas circunstâncias indicam que muitas pessoas precisaram adaptar-se para trabalhar no modelo “*home office*”.

A necessidade de permanecer mais tempo em casa evidenciou os problemas dos materiais de vedação, pois muitos apresentam baixo isolamento acústico, baixa absorção acústica e baixo isolamento térmico. Essas condições geram um conforto ambiental menor, visto que a sociedade convive em meio à grande poluição sonora (JAYAMANI *et al.*, 2014), principalmente nos centros urbanos nos quais existem ruídos que dificultam o conforto ambiental.

O desempenho térmico também é um fator relevante nos materiais de vedação, uma vez que gera redução no uso de equipamentos mecânicos para refrigeração das edificações (KASHANI *et al.*, 2017). Portanto, evidencia-se a necessidade de elementos de vedação que apresentem boa capacidade de isolar ruídos e que garantam conforto térmico.

A disponibilidade de materiais que oferecem elevada qualidade e desempenho adequado para garantir o atendimento completo dos requisitos impostos pela NBR 15575 (ABNT, 2021) é limitada, principalmente pelo alto valor agregado dos produtos disponíveis atualmente. Sendo assim, é pertinente que sejam desenvolvidos e testados materiais de baixo custo, com matérias-primas acessíveis e que sejam comprovadamente adequados para uso em edificações residenciais.

É cientificamente comprovado que materiais porosos como o concreto celular apresentam excelentes resultados frente à absorção acústica e condutividade térmica, além disso, se os poros não forem interligados, esses materiais conseguem obter bom desempenho quanto ao isolamento termoacústico (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

As boas propriedades do concreto celular tendem a melhorar se forem incorporadas fibras de baixa densidade a esse, formando compósitos leves (JAUBERTHIE *et al.*, 2003). Nesse sentido, a casca de arroz já mostrou boas propriedades de isolamento térmico e absorção sonora (GLÉ; GOURDON; ARNAUD, 2011; KINNANE *et al.*, 2016; SIVARAJA *et al.*, 2010)

Por meio de uma revisão na literatura, verificou-se que as fibras vegetais de diversas origens apresentam boas perspectivas em melhorar desempenho térmico, acústico e, até mesmo, mecânico de alguns compósitos cimentícios. No entanto, sua aplicação industrial e comercial ainda não é verificada devido à preocupação com a durabilidade e dificuldade em garantir que o compósito não perca suas propriedades com a degradação da lignina, da celulose e da hemicelulose (VO; NAVARD, 2016).

Segundo Teixeira *et al.* (2020), o clima subtropical e tropical do Brasil aliado aos efeitos da temperatura e umidade do ar dificultam ainda mais o desenvolvimento de compósitos utilizando fibras naturais. Esse fato foi observado por diversos pesquisadores e a grande maioria das pesquisas busca realizar tratamentos nas fibras, para, deste modo, garantir maior durabilidade a essas, o problema é que esses tratamentos acabam inviabilizando o uso desses materiais, pois geram aumento de custo e impossibilitam aplicação prática (VO; NAVARD, 2016).

O tratamento que influenciou na escolha pelo uso da casca de arroz para esta pesquisa foi utilizado por Tolêdo Filho *et al.* (2003). Os autores verificaram que a imersão de fibras de sisal e coco por 10 minutos em sílica ativa, e posterior secagem por 15 minutos, antes da incorporação à matriz cimentícia, reduziu a fragilização do concreto, além de acelerar a hidratação do cimento e melhorar as propriedades mecânicas. Sabendo-se que a casca de arroz possui silício em seu estado natural, foi projetado que existem boas possibilidades de compatibilizar seu uso com concreto leve sem a necessidade de pré-tratamentos.

Outro motivo para a escolha pela fibra vegetal da casca de arroz é o fato de que o Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil e gera milhares de toneladas dessa fibra anualmente. Sendo a casca um resíduo que possui destino inadequado, uma vez que, em grande parte, ela é queimada para gerar energia elétrica e secagem dos grãos, enquanto outra parcela é destinada a aterros sem qualquer tipo de tratamento (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005), é notável a viabilidade do seu uso no desenvolvimento de compósitos cimentícios.

Destaca-se que, na safra de arroz de 2017/18, a área plantada foi de 984.081 hectares, enquanto, nas onze safras anteriores, a área passou de um milhão de hectares. A produção média nas safras compreendidas entre 2010/11 e 2018/19 foi mais de 8 milhões de toneladas (IRGA, 2019). Na safra de 2020/2021, verificou-se uma produtividade de mais de 8,50 milhões de toneladas, a quarta maior da história (IRGA, 2021). Estima-se que, para cada tonelada de arroz, 23% corresponde à casca, o que gera quase dois milhões de tonelada/ano desse resíduo que tem sido queimado e destinado a aterros apenas no Rio Grande do Sul (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005).

O agronegócio representou mais de 20% do PIB brasileiro em 2019 (TOOGE, 2020) e a produção de resíduos por este setor é gigantesca. Desta forma, evidencia-se que o desenvolvimento de materiais que possam ser utilizados em construção de infraestrutura e moradias fazendo uso de subprodutos do agronegócio é uma linha extremamente interessante para o desenvolvimento econômico e sustentável do Brasil. Desta maneira, a pesquisa visa estudar o comportamento de compósitos cimentícios com fibras vegetais a fim de entender melhor as reações químicas e os resultados frente às diferentes intempéries a que possam ser submetidos.

1.3 INEDITISMO

De maneira inédita na literatura, este trabalho reúne uma análise e discussão completa acerca da durabilidade de compósitos de concreto celular com casca de arroz frente a envelhecimento natural e envelhecimento acelerado, e frente a ataques agressivos (buscando definir a resistência residual após degradação total da casca de arroz).

A análise de durabilidade visando atacar os compostos orgânicos da casca de arroz por meio de diversas metodologias se caracteriza como um trabalho inédito e inovador, uma vez que, de acordo com a literatura, existe déficit de pesquisas que analisem de maneira completa a durabilidade de materiais cimentícios com fibras vegetais, sendo este o principal motivo pela não industrialização e comercialização dos produtos desenvolvidos (VO; NAVARD, 2016).

As análises de durabilidade que foram realizadas incrementam diversos pontos químicos e físicos do comportamento de compósitos de matriz cimentícia leve e fibras vegetais. Os ensaios realizados e os resultados obtidos, boa parte de nível microestrutural, apontam uma nova visualização e um novo conceito para definição da escolha de fibras vegetais de maneira assertiva e que possuam um potencial de aplicabilidade maior em relação à durabilidade do material, evitando a escolha somente pela abundância regional.

1.4 PROBLEMA DA PESQUISA

O desenvolvimento desta pesquisa busca prover informações que possibilitem responder à seguinte questão de pesquisa:

- Compósitos cimentícios leves reforçados com casca de arroz apresentam durabilidade adequada se comparados a materiais cimentícios leves tradicionais já normatizados?

1.5 OBJETIVOS

Neste tópico, constam o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.5.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal analisar a durabilidade de compósitos de matriz cimentícia leve reforçados com casca de arroz, definindo quais características da microestruturais geraram os resultados encontrados e determinar se, após a degradação da fibra vegetal, o material apresenta condições mecânicas adequadas e que atendam a regulamentação em vigor no Brasil.

1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão apresentados nos seguintes tópicos:

- Definir um traço com resistência média mínima de 1,20 MPa e com a menor massa específica possível. Essa condição visa atender a NBR 13.438 (ABNT, 2013a) para possibilitar a comparação do compósito com um material já normatizado;
- Estabelecer características que possibilitem executar a reprodução dos materiais estudados. As caracterizações serão realizadas na mistura em seu estado fresco (consistência e massa específica) e nas amostras antes e após a secagem em estufa (resistência e massa específica);
- Determinar a influência da casca de arroz na durabilidade de compósitos de matriz cimentícia. Os ensaios serão realizados por meio de envelhecimento natural (em ambiente interno protegido de intempéries e ambiente externo em que os materiais são submetidos a todas as intempéries climáticas), envelhecimento acelerado e ataques agressivos por meio de agentes físicos, químicos e térmicos;
- Sugerir metodologias para gerar deterioração acelerada das fibras vegetais e indicar qual a melhor opção em função das análises microestruturais e do desempenho mecânico obtido.
- Apresentar a resistência dos compósitos cimentícios após a degradação da casca de arroz verificando se houve a degradação dos polímeros naturais responsáveis por fornecerem resistência para a fibra;

- Verificar se, mesmo após a degradação da casca de arroz, os compósitos desenvolvidos apresentam desempenho mecânico suficiente para serem utilizados na construção civil, ou seja, se atendem à resistência mínima de 1,20 MPa normatizada pela NBR 13.438 (ABNT, 2013b).

1.6 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Esta pesquisa apresenta como delimitação do tema a análise de durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com biomassa vegetal. As análises publicadas nesta tese serão limitadas a um prazo de 365 dias e consistirão em análises de envelhecimento natural, envelhecimento acelerado e ataque agressivo por meio de agentes físicos, químicos e térmicos.

As análises de envelhecimento natural consistirão em submeter as amostras a ambientes internos e externos para simular as ações das intempéries como chuva, vento e sol, e verificar se os compósitos apresentam boa capacidade de funcionar como elementos de vedação externo.

As análises de envelhecimento acelerado serão feitas com imersão das amostras em banho-maria e os ataques agressivos, que visam determinar a resistência residual, serão feitos com imersão em solução de ácido sulfúrico, em solução de hidróxido de sódio e tratamento térmico a temperaturas elevadas.

1.7 ESTRUTURA DA TESE

A tese está dividida em sete capítulos. A seguir, há uma breve síntese do conteúdo abordado em cada um.

No Capítulo 1, está disposta a Introdução. Nela, foi abordada a importância da pesquisa, a justificativa do tema estudado, o objetivo geral, os objetivos específicos e suas delimitações.

No Capítulo 2, está disposta a Revisão Bibliográfica, em que foram conceituados os materiais que envolveram a parte experimental desta pesquisa, normas técnicas relacionadas, resultados obtidos em trabalhos que envolvem o uso de fibras vegetais em materiais cimentícios, problematizações atuais e pontos positivos encontrados por outros autores.

No Capítulo 3, foram apresentados os materiais utilizados na pesquisa, bem como, suas principais características e os métodos experimentais realizados para controle tecnológico. Também constam parâmetros necessários para possibilitar a reprodução da pesquisa em outros locais.

No Capítulo 4, foram apresentados e analisados os traços estudados. Após a definição das propriedades e da qualificação de cada uma das dosagens, foi escolhido o traço definitivo para a sequência da pesquisa, o qual passou a ser denominado de Compósito e teve todas as suas comparações realizadas com o traço Referência, o qual possui normatização técnica e é de amplo uso no país.

No Capítulo 5, foram realizadas todas as análises para verificar a durabilidade do Compósito desenvolvido. Para facilitar o entendimento, buscou-se apresentar todos os resultados numéricos em forma de tabelas e figuras, e a análise foi realizada, sempre que possível, com auxílio de imagens. Buscou-se corroborar todas as análises com o que existe na bibliografia atual.

No Capítulo 6, foi realizada uma discussão global das principais contribuições desta pesquisa para o meio científico nacional e internacional.

No Capítulo 7, foram abordadas as considerações finais do trabalho, relatando, resumidamente, os resultados obtidos, buscando comprovar que os objetivos estipulados na Seção 1.3 foram atingidos em sua integralidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, está apresentado o estado da arte para qualificar os produtos envolvidos na pesquisa. Buscou-se, inicialmente, explicitar as características do concreto celular e como ele tem sido utilizado, quais são seus requisitos atuais e como é realizada sua dosagem; assim, definindo minuciosamente o material que será a matriz do compósito.

A partir das definições realizadas acerca da matriz, sucedeu-se um estudo aprofundado das fibras vegetais, ou seja, foi realizado um estudo sobre os componentes de reforço dos compósitos a serem desenvolvidos. Sobre elas o tópico principal analisado foi sua composição, de tal modo, possibilitando definir seus mecanismos de deterioração, seus pontos fortes e seus pontos fracos.

O terceiro item abordado na revisão bibliográfica foi o estudo sobre compósitos, neste tópico, foi desenvolvido o tema compatibilidade entre matriz-componente de reforço, baseando-se em fibras vegetais. Também foram pontuadas as vantagens e as desvantagens do uso de fibras vegetais em materiais cimentícios.

O quarto e último item abordado neste capítulo foi o estudo das Experiências Consolidadas. Neste tópico, foram referenciadas as principais caracterizações que têm sido feitas para facilitar o planejamento da metodologia utilizada nos ensaios realizados neste trabalho. Essa parte do estudo foi focada em auxiliar no planejamento experimental e facilitar a análise dos resultados, pois, nela, constam ensaios e técnicas utilizados para caracterizações, bem como, resultados obtidos e análise deles por outros autores.

2.1 CONCRETO LEVE

Neste capítulo, é apresentado o panorama histórico do concreto leve, primeiras evidências de seu uso, e grandes obras e marcos históricos em que o concreto leve foi utilizado. Na sequência, são apresentados os três tipos principais de concreto leve, dos quais se dará ênfase ao concreto celular.

Na revisão do concreto celular, é apresentada sua definição segundo a literatura nacional e internacional, suas vantagens em relação aos demais concretos, os métodos de dosagem, os principais ensaios utilizados para sua caracterização, e as normas técnicas e seus requisitos.

2.1.1 Panorama Histórico

O uso de concreto com agregados leves teve início com construtores pré-colombianos, aproximadamente, 1100 a.C. Inicialmente, esse concreto era produzido para uso em construção de elementos estruturais e sua fabricação se dava a partir da mistura de pedra-pomes, ligante à base de cinzas vulcânicas e cal (ROSSIGNOLO, 2007).

As estruturas mais notáveis executadas com concreto leve foram construídas no início do Império Romano e incluem o Porto de Cosa, a Cúpula do Panteão e o Coliseu. O Porto de Cosa foi executado por volta de 273 a.C. e usava concreto feito de materiais vulcânicos naturais, esse porto resistiu por nada menos que dois milênios às forças da natureza apresentando danos apenas de abrasão superficial. O Panteão foi terminado em 27 a.C. e incorpora concreto com densidade variável, essa é outra obra com uso significativo de concreto leve que resistiu há mais de dois milênios e, até hoje, segue em uso para propósitos espirituais. O Coliseu (Figura 2) foi construído entre 75 e 80 d.C. utilizando concreto leve com lava vulcânica triturada nas fundações, tijolo poroso e triturado nas paredes, e pedra porosa nas abóbadas, esse gigantesco anfiteatro tinha uma capacidade para 50.000 espectadores (ACI_R03, 2003).



Figura 2 – Anfiteatro Coliseu em Roma
(VASCONCELOS, 2020)

O uso moderno do concreto leve é marcado pela fabricação de agregados leves expandidos. Os agregados expandidos foram invenção de Stephen J. Hayde. Hayde era um fabricante de tijolos cerâmicos que observou que, quando a etapa de aquecimento nos fornos acontecia mais rápido que o usual, os tijolos ficavam extremamente leves. A partir disso, o fabricante reduziu a dimensão dos tijolos e passou a produzir o material com finalidade de uso em concreto leve. Depois de quase uma década de experimentos, em 1918, Hayde patenteou o processo de obtenção de agregados leves formados pelo aquecimento de forno rotativo (ROSSIGNOLO, 2007).

A produção comercial da escória expandida começou em 1928, uma década após Hayde patentear o produto de base cerâmica. Um dos primeiros usos do concreto armado leve foi na construção de navios e barcas por volta de 1918 (ACI_R03, 2003). Durante a Primeira Guerra Mundial, foram produzidos 14 navios utilizando o concreto leve, na época, o material apresentava 38,5 MPa e massa específica de 1905 kg/m³ aos 28 dias de cura. Na Segunda Guerra Mundial, foram produzidos 488 navios com concreto leve, permitindo grande economia de chapas de aço (CHANDRA; BERNTSSON, 2002; ROSSIGNOLO, 2007).

A aplicação de concreto leve em edifícios de múltiplos pavimentos iniciou em 1929, nos Estados Unidos da América, na cidade de Kansas. O primeiro edifício a utilizar o concreto leve foi executado, inicialmente, com 14 pavimentos em concreto convencional. Para ampliar essa edificação, os projetistas verificaram que, se fosse utilizado concreto leve, poderiam ser executados mais 14 pavimentos, e não apenas os 8 inicialmente planejados. Desta forma, a edificação ficou com 28 pavimentos e os últimos 14 foram executados com concreto leve de 25 MPa de resistência à compressão aos 28 dias de cura (ROSSIGNOLO, 2007).

O concreto leve, além de ser produzido com agregados leves, também pode ser produzido com a incorporação de ar, essa metodologia de produção não é tão recente quanto se imagina. Considera-se que o conceito de concreto celular foi criado pelos romanos, no entanto, o primeiro concreto celular à base de cimento foi patenteado em 1923 por Axel Erikson, apenas 5 anos após a patente feita para produção de agregados leves (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015a; CHICA; ALZATE, 2019).

O concreto celular espumoso foi usado na União Soviética a partir de 1938, em que os processos de fabricação introduzidos por Kudriashoff foram utilizados, esse material já não era utilizado para fins estruturais (PANESAR, 2013). Em 1950, no Reino Unido, foram produzidos elementos de suporte de carga com concreto celular,

na época, ele foi produzido utilizando escória de carvão de usinas termelétricas. O primeiro projeto de larga escala envolvendo o concreto celular foi um túnel ferroviário, no ano de 1980, na Escócia, o concreto apresentava uma densidade de, aproximadamente, 1100 kg/m^3 (CHICA; ALZATE, 2019; NANDI *et al.*, 2016).

Os agentes espumantes à base de proteínas hidrolisadas chegaram ao mercado no final dos anos 50. Esses agentes permitiram melhorar a estabilidade das células, assim, melhorando o controle da densidade. Nos anos 1990, foram criados os agentes espumantes sintéticos, esses produziam células de ar ainda mais estáveis com uma vida útil prolongada, melhorando as propriedades do concreto no estado plástico. Atualmente, os agentes espumantes utilizados para produzir concreto celular espumoso são híbridos, ou seja, são produzidos a partir de uma mistura de proteínas e agentes sintéticos, desta forma, possibilitando o uso do concreto espumoso em larga escala (CHICA; ALZATE, 2019).

Além do vasto desenvolvimento tecnológico dos agentes espumantes, também foram desenvolvidos equipamentos para produção de espuma, o que melhora a capacidade de concreto celular espumoso em escala industrial e com controle de densidade da espuma, pressão, entre outras. A primeira pesquisa científica acerca de concreto celular espumoso foi realizada por Valore Jr. (1954a, 1954b) e, atualmente, o interesse mundial no tema é crescente, focando em algumas linhas de pesquisa como: avaliação dos tipos de aditivos, adição de elementos pozolânicos, como cinzas volantes, resíduos de cana-de-açúcar, microssílica, avaliação de propriedades físicas como calor de hidratação, resistência a variações de temperatura, microestrutura, distribuição de poros, comportamento reológico, durabilidade, entre outras (CHICA; ALZATE, 2019).

2.1.2 Classificação

Os concretos com reduzida densidade são conhecidos como concretos leves, eles diferem dos concretos convencionais, não apenas no peso, mas também nas propriedades mecânicas, no desempenho térmico e acústico, na trabalhabilidade, no módulo de deformação, na retração e na fluência (MELO, 2009).

Os concretos leves podem ser obtidos com a adição de agregados leves, a adição de ar incorporado, o excesso de água ou pela ausência de finos (Figura 3). Para ser classificado como concreto leve, a NBR 8953 (ABNT, 2011) determina que a massa específica do material seja inferior à 2000 kg/m^3 .

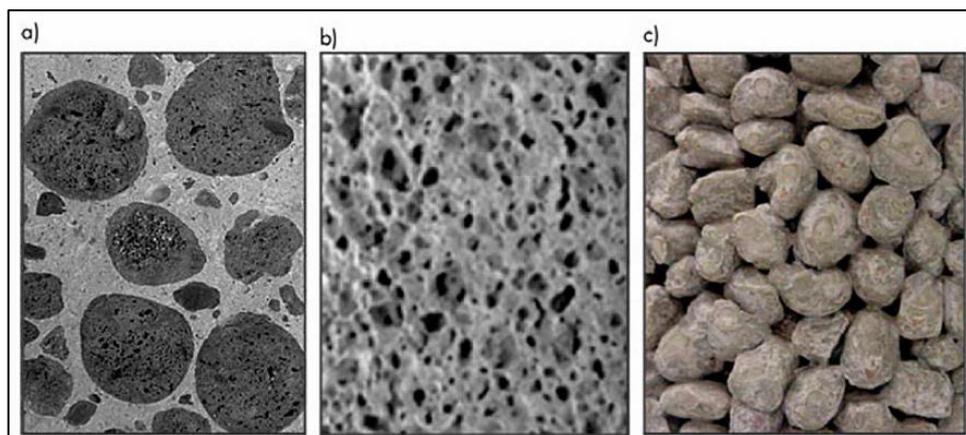


Figura 3 - Concreto leve com: a) agregados leves; b) ar incorporado; c) sem finos. (ROSSIGNOLO, 2007)

Neste trabalho, será aprofundado o estudo referente ao concreto celular, sendo este um concreto leve produzido com adição de ar incorporado, também conhecido como concreto aerado e concreto espumoso. Desta forma, a revisão bibliográfica abordará apenas as características do concreto celular, não evidenciando concreto com agregados leves e concreto sem finos.

2.1.3 Concreto Celular

A composição do concreto celular é semelhante à do concreto convencional, a principal diferença são os agentes espumígenos e a eventual retirada dos agregados graúdos. O concreto celular, atualmente, é dividido em dois grandes grupos, o primeiro é o concreto aerado, também denominado concreto espumado ou espumoso, e o segundo é o microporos. A principal diferença entre eles é o sistema pelo qual se criam os poros e o tamanho médio deles (CHICA; ALZATE, 2019).

No concreto aerado/espumoso, os poros são formados pela inclusão de agentes espumígenos. Esse concreto apresenta bolhas de ar em grande quantidade e de dimensão macroscópica. Nos microporos, a porosidade é obtida com o uso de argamassa de cal altamente diluída que permite a entrada de ar quando o processo de assentamento é iniciado (CHICA; ALZATE, 2019; TEIXEIRA FILHO; TEZUCA, 1992).

O concreto celular aerado também apresenta uma divisão, sendo possível obter esse tipo de concreto por meio de aeração química, a qual se dá com o uso de substâncias como pó de alumínio, pó de zinco, peróxido de hidrogênio ou cal clorada, essas substâncias formam reações que geram os poros (MELO, 2009). O concreto celular aerado ainda pode ser formado por agente espumígeno, que pode ser utilizado

em um equipamento específico para formar a espuma (espuma pré-formada) ou pode ser incorporado no misturador, e, por meio da agitação mecânica, gera os poros (TEIXEIRA FILHO; TEZUCA, 1992).

De acordo com Narayanan e Ramamurthy (2000a), o controle da porosidade é mais fácil com a incorporação do ar ao concreto com a espuma pré-formada. O concreto celular produzido dessa forma, geralmente, apresenta as maiores resistências à compressão e é mais econômico (CHICA; ALZATE, 2019). A espuma pré-formada pode estar seca ou úmida, a espuma seca é estável e apresenta bolhas com tamanho abaixo de 1 mm, já a espuma úmida produz bolhas entre dois e cinco milímetros e é menos estável que a espuma seca (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009).

A cura do concreto celular pode ser feita com a temperatura ambiente constante ou por meio de pulverização de ar e água ou vapor. A cura por temperatura ambiente é, geralmente, utilizada para produzir elementos sem função estrutural, já a cura pela pulverização de ar e água ou vapor é utilizada para produzir elementos estruturais (CHICA; ALZATE, 2019). A *Figura 4* apresenta as classes de concreto celular.

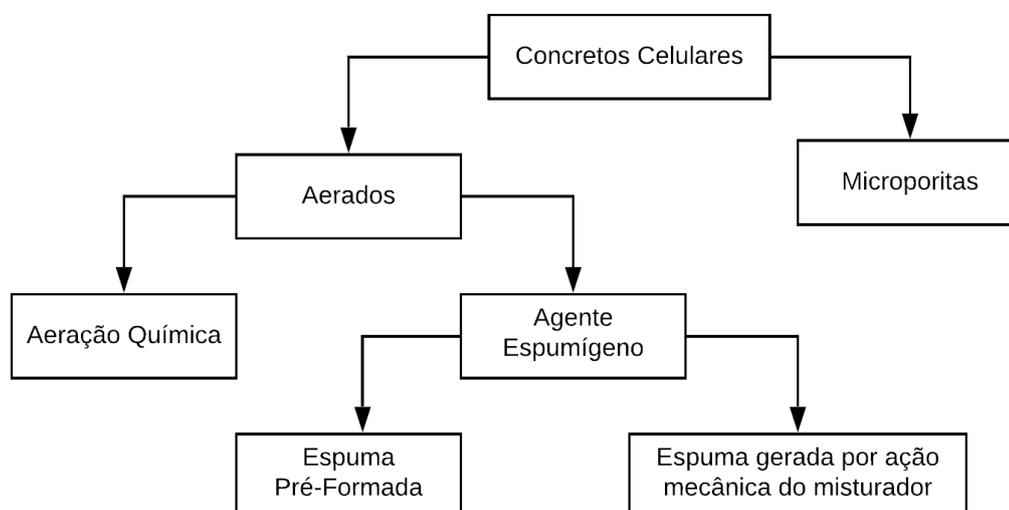


Figura 4 – Classificação do concreto celular.
(TEIXEIRA FILHO; TEZUCA, 1992)

2.1.3.1 Definição

No Brasil, o material de base cimentícia, estrutura porosa e reduzida massa específica é popularmente conhecido como concreto celular, no entanto, também é comum encontrar na bibliografia a denominação de concreto aerado. O termo concreto celular é proveniente da Europa, onde o material é conhecido como “*Cellular*

Concrete” ou “*Beton Cellulaire*”. Nos Estados Unidos da América, o material com as características descritas é denominado, principalmente, de “*Aerated Concrete*” (SILVA, 2015).

Em diversas bibliografias, o termo “*Foamed Concrete*” – Concreto Espumoso, em tradução literal – é utilizado para denotar o concreto celular. Essa designação é utilizada, pois está relacionada com a forma como o material é produzido, isto é, a partir da incorporação de agentes espumantes que geram uma espuma responsável por conceder sua porosidade característica (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015b; NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000b; SILVA, 2015).

O concreto celular consiste em componentes básicos e complementares, e a bibliografia possui nomenclaturas divergentes em função de materiais com composição semelhante. Kashani et al. (2017) e Raj, Sathyan e Mini (2019) utilizam o termo “*cellular concrete*” (concreto celular em tradução direta) para nomear o material formado por uma mistura de baixa densidade composta por cimento, água e espuma.

Amran, Farzadnia e Ali (2015) dividem o material em função da presença de agregado graúdo. Eles dividem em argamassa, onde os componentes básicos são o cimento, areia e água, e em concreto, em que se adicionam à argamassa agregados maiores. Os materiais complementares tanto do concreto quando da argamassa são, geralmente, adições, aditivos plastificantes e fibras de diversas origens.

De acordo com a ASTM C796 - 1997, o concreto celular é um produto leve que consiste em pastas de cimento Portland, cimento e sílica, cimento e pozolanas ou outros aglomerantes que possuem estrutura celular homogênea. Essa espuma celular pode ser obtida com produtos químicos que formam gás ou espuma. Geralmente, agregados graúdos de elevada densidade não são utilizados, mas agregados leves (podem ser finos ou graúdos) são, comumente, utilizados para produzir concreto celular.

2.1.3.2 Vantagens

A principal característica do concreto celular é a alta relação resistência/peso e a baixa densidade. Seu uso é vantajoso por reduzir o peso próprio dos elementos construtivos na estrutura e na fundação, contribuir para conservação de energia, reduzir custo de mão de obra e custo de transporte (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015b; CORTELIASSI, 2005; NARAYANAN; RAMAMURTHY, 2000b).

O concreto celular, a partir da incorporação de células de ar e, por consequência, sua reduzida densidade, apresenta baixa condutividade térmica, bom isolamento acústico, alta resistência ao fogo, baixa resistência à compressão e boa estabilidade ao congelamento e descongelamento (RAMAMURTHY; KUNHANANDAN NAMBIAR; INDU SIVA RANJANI, 2009; ZAMORA, 2007).

Se comparado com o concreto convencional, uma das maiores vantagens é a redução de peso, o que gera estruturas mais econômicas. Também pode-se citar melhor isolamento térmico e acústico, e a não necessidade de compactar, vibrar e nivelar (CHICA; ALZATE, 2019).

2.1.3.3 Dosagem

Existem poucos métodos específicos de dosagem para concreto celular espumoso. Na maioria das produções, a dosagem é realizada por tentativa e erro a fim de projetar a mistura apropriada quantificando o teor de água, teor de espuma, teor de aglomerante, teor de aditivo plastificante e demais componentes. De maneira geral, a proporção dos componentes é projetada para obter uma densidade-alvo (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015b; PANESAR, 2013).

A necessidade de água no concreto celular depende dos constituintes e do uso de aditivos. O fator água/cimento (a/c), assim como no concreto convencional, é definido principalmente pela uniformidade, consistência e estabilidade da mistura desejada (NAMBIAR; RAMAMURTHY; ASCE, 2008). Nambiar e Ramamurthy (2006a, 2006b) relataram que um baixo teor de água gera uma mistura muito rígida, o que pode ocasionar na ruptura das bolhas durante a agitação mecânica, o que resulta em um aumento da densidade. Da mesma forma, com alto fator a/c , a pasta fica muito fina para reter as bolhas, o que causa segregação da espuma da mistura e, conseqüentemente, a densidade final também aumenta.

De acordo com Valore (1954) apud Amran, e Farzadnia e Ali (2015), a quantidade ideal de água a ser utilizada na mistura do concreto celular deve ser determinada pela consistência e não por uma relação predeterminada de água/cimento. Caso a água não esteja em quantidade adequada, o cimento tende a absorver a água que compõe a espuma para o processo de hidratação, o que, por sua vez, gera degeneração da espuma e aumento da densidade aparente.

Para que a mistura mantenha boa consistência, é recomendado, por Kearsley, (2006) e Kearsley e Visagie (1999), que a relação água/cimento esteja compreendida entre 0,4 e 1,25. A British Cement Association (1994) recomenda uma relação a/c de 0,5 a 0,6 e Raj, Sathyan e Mini (2019) recomendam um fator água/cimento de, pelo menos, 0,30. A ASTM C796 - 1997 recomenda um fator a/c entre 0,58 e 0,64 a depender do tipo de cimento utilizado e, caso a mistura não seja satisfatória, a norma sugere misturas experimentais a fim de determinar a relação adequada. É importante salientar que a solução da espuma é incluída como parte da água total da mistura, portanto, deve ser considerada para determinar o fator a/c (ASTM C796 - 1997).

O uso de plastificantes melhora significativamente a trabalhabilidade, a estabilidade e a consistência do concreto celular espumoso (TIKALSKY; POSPISIL; MACDONALD, 2004). Esses aditivos servem como redutores de água e facilitam a mobilidade e plasticidade do concreto (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015b).

De acordo com Nambiar, Ramamurthy e Asce (2008), a consistência e a reologia são consideradas de bom desempenho quando a capacidade de espalhamento das misturas de concreto fresco fica limitada entre 40% e 60% para um tempo de vazão abaixo de 20 segundos utilizando o cone de Marsh. Desta forma, a mistura pode ser inserida nos moldes e se autocompactar sem nenhum auxílio externo. A Tabela 1 apresenta a classificação do percentual de dispersão do concreto celular espumoso.

Tabela 1 – Classificação do concreto celular pelo percentual de dispersão

Valores de fluxo (%)	Descrição
0 – 20	Muito baixo
20 – 40	Baixo
40 – 60	Médio
60 – 80	Alto
80 – 120	Muito alto

Fonte: Adaptado de (NAMBIAR; RAMAMURTHY; ASCE, 2008)

2.1.3.4 Caracterização

A determinação da densidade e da consistência do concreto celular são as primeiras aferições realizadas quando o material está no estado fresco. Geralmente, elas são aferidas por um cone de Marsh para investigar o desempenho da mistura (AMRAN; FARZADNIA; ALI, 2015b; NAMBIAR; RAMAMURTHY; ASCE, 2008).

A elevada retração do concreto celular apresenta-se como um grande inconveniente. Amran, Farzadnia e Ali (2015) apontam que o valor da retração por secagem do concreto celular é dez vezes maior que a retração do concreto convencional. Esse problema tem sido resolvido com a adição de fibras, pois elas têm a capacidade de reter água e atrasar a evaporação, portanto, reduz a retração durante a secagem. Quanto maior a quantidade de fibras adicionadas à mistura, menor será a retração do concreto (FALLIANO *et al.*, 2019).

Koh, Lee e Yeoh (2006) verificaram que a retração por secagem aumenta com a adição de cinzas volantes pulverizadas. Jones e McCarthy (2005) adicionaram areia para comparar a retração por secagem do concreto celular com cinza volante, nesse caso, foi verificado que, ao contrário da cinza volante, a adição de areia reduz a retração do concreto celular. Ramamurthy e Narayanan (2000) verificaram que materiais com alta área superficial aumentam a quantidade de água adsorvida, dificultam a evaporação da água adicionada na mistura, reduzindo, assim, a retração. Ramamurthy e Narayanan (2000) também afirmam que o uso de superplastificante tem um efeito insignificante na retração por secagem.

A durabilidade do concreto celular depende da conexão dos poros. Se houver alta proporção de poros conectados, a durabilidade do concreto será reduzida, no entanto, se os poros não forem ligados, o material apresentará menor entrada de impurezas. Os poros, quando não conectados e uniformemente distribuídos, geram boas propriedades térmicas e mecânicas (RAJ; SATHYAN; MINI, 2019).

De acordo com a pesquisa de revisão da literatura realizada por Raj, Sathyan e Mini (2019), trabalho este embasado em 137 produções com ênfase em concretos leves e celulares, os pontos que apresentam falta de estudo para aperfeiçoar o material são o estudo da durabilidade, coeficiente de Poisson, fluência, módulo de Young e retração.

2.1.3.5 Normatização Técnica

O concreto celular é um material normatizado no Brasil e possui seu uso regulamentado. As normas relativas ao concreto celular são as seguintes:

- NBR 12.644/2014: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014);

- NBR 12.645/1992: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992a);
- NBR 12.646/1992: Paredes de Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992b);
- NBR 13.438/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Requisitos (ABNT, 2013b);
- NBR 13.440/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Métodos de Ensaio (ABNT, 2013b);
- NBR 14.956/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural (ABNT, 2013c, 2013d).

Das normativas brasileiras, apenas a NBR 12645 (ABNT, 1992a) e a NBR 12646 (ABNT, 1992b) são relativas ao concreto celular simples, isto é, sem passar por cura em autoclave. De acordo com Ferreira (1987), o concreto celular espumoso que passa por cura em autoclave (CAA) apresenta resistência à compressão estimada em duas vezes ao mesmo concreto curado em baixa temperatura (CCBT) e sua retração é estimada na metade do seu equivalente sem processo de cura em autoclave.

A norma que regulamenta a produção de concreto celular para fabricação de blocos é referente ao concreto celular autoclavado. Como exposto, produzir concretos curados em baixa temperatura (CCBT) que atinjam a mesma relação resistência-densidade que o CCA é difícil. Conforme a NBR 13438 (ABNT, 2013a), as classes do CCA devem corresponder aos requisitos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes do concreto celular autoclavado

Classe	Resistência à compressão (seca)		Densidade aparente seca
	Valor médio mínimo (MPa)	Menor valor isolado (MPa)	Média (kg/m ³)
C 12	1,2	1,0	< 450
C 15	1,5	1,2	< 500
C 25	2,5	2,0	<550
C 45	4,5	3,6	<650

Fonte: Adaptado de NBR 13438 (ABNT, 2013a)

2.2 BIOMASSA

Atualmente, há muitos estudos realizados para o uso de biomassa a partir de culturas dedicadas ou de resíduos agrícolas como substitutos de agregados e reforços em compósitos de cimento. Esses resíduos podem ter o potencial de formar novos materiais de construção, economicamente viáveis e ecologicamente corretos (ALENGARAM; MUHIT; JUMAAT, 2013b; PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

A biomassa é composta, basicamente, de carbono, hidrogênio e oxigênio. Ela é produzida pela natureza e suas composições químicas e estrutura são variáveis em função da origem, condições climáticas, idade, localização na planta, entre outras. Os componentes da biomassa formam um complexo químico de celulose, lignina, hemicelulose, substâncias inorgânicas e extrativos, como pectinas, gorduras, ceras e outras substâncias solúveis em água (VO; NAVARD, 2016).

As plantas são compostas por milhões de células separadas entre si por uma parede celular. As células são coladas com lignina e cada uma é cercada por paredes compostas por celulose, hemicelulose e outros compostos. Os principais componentes das plantas são a celulose, a hemicelulose e a lignina. Esses três elementos são polímeros naturais não distribuídos uniformemente dentro de plantas, sendo que suas concentrações mudam em função da espécie da planta, do tipo de tecido, do clima, do solo ou da data da colheita (VO; NAVARD, 2016).

As fibras vegetais, geralmente, possuem alto grau de porosidade. Com a presença dos numerosos grupos hidroxila de celulose e hemiceluloses, elas também são altamente higroscópicas. A atração de moléculas de água leva a um aumento na dimensão após a imersão (BATRA, 2007). A presença de lignina hidrofóbica auxilia na diminuição da absorção de umidade e dificulta a penetração de água na parede celular, aumentando a durabilidade das fibras.

Materiais lignocelulósicos possuem boa resistência térmica e elétrica. Essas características e suas propriedades mecânicas são afetadas pelo teor de umidade e, portanto, a umidade relativa da atmosfera circundante, o que causa a maior dificuldade de produzir materiais cimentícios com adição de fibras vegetais que possuam boa durabilidade. As principais vantagens do uso de biomassa em materiais de construção são a baixa densidade, o bom isolamento térmico e o baixo custo. A utilização da biomassa pode levar à economia de energia e conservação de recursos não renováveis (VO; NAVARD, 2016).

A composição de plantas lignocelulósicas pode ter grande variabilidade, no entanto, não é o único parâmetro importante. A estrutura da peça semelhante à fibra também é muito variável e influencia as propriedades mecânicas das peças. As propriedades da superfície também são importantes, pois a maioria das plantas é coberta com uma fina camada de compostos químicos, a fim de controlar a interação da planta com a atmosfera (VO; NAVARD, 2016).

A colheita e o processamento de grãos geram enormes quantidades de subprodutos agrícolas, como casca de arroz, colmo de algodão, casca de coco, óleo de palma etc. (ALENGARAM; MUHIT; JUMAAT, 2013a). Por ser relativamente barata, renovável e abundante, seu uso como reforço em materiais cimentícios vem ganhando destaque nas pesquisas.

Diversos trabalhos têm focado no desenvolvimento de materiais mais ecológicos reforçados por fibras vegetais, o potencial desses materiais é baseado na sustentabilidade, no baixo custo, em alta disponibilidade, baixa densidade e baixo impacto ambiental. A interação dessas fibras naturais geram bom desempenho nas propriedades mecânicas, no entanto, devido às propriedades hidrofílicas dos materiais lignocelulósicos, ocorre redução da força de ligação entre as fibras e as matrizes, reduzindo resistência ao longo do tempo (LAHOUIOUI *et al.*, 2019).

2.2.1 Casca de Arroz

A produção de arroz no Rio Grande do Sul é crescente, na safra de 1921/22, a área plantada foi de 79.120 hectares e a produtividade foi de 2.190 kg/ha. Na safra de 2020/21 a área plantada chegou a 945.791 hectares e a produtividade chegou a 9.705 kg/ha (IRGA, 2021). Todo o arroz tem como proteção uma capa protetora, a qual é denominada casca de arroz. Removida durante o refino do arroz, ela apresenta um baixo valor comercial, pois não possui valor nutritivo (AMICK, 1982).

A composição química da casca de arroz varia em função de diversos fatores, como localização da planta, condições climáticas locais e método de ensaio utilizado. Mesmo assim a variação, não é tão grande que impossibilite uma real ideia dos principais componentes químicos. De acordo com Amick (1982), 15% da casca é de sílica, 80% são compostos orgânicos e o restante são outros componentes em forma de cinza.

O estudo desenvolvido por Reyes et al. (1998) aponta que a composição química da casca de arroz varia conforme o tipo de pré-tratamento realizado nessa. As composições estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química da casca de arroz sob diferentes pré-tratamentos

Tratamento	Celulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Outros* (%)
Nenhum	38,4 ± 2,8	29,4 ± 5,9	8,5 ± 1,8	23,7
Irradiação	33,9 ± 3,4	31,8 ± 5,1	10,1 ± 1,7	24,2
H ₂ O ₂	53,2 ± 3,2	28,0 ± 4,5	10,6 ± 1,70	8,2
Ozônio	41,6 ± 3,9	28,9 ± 4,7	10,7 ± 2,2	18,8
ClO ₂ ⁻	39,6 ± 4,2	16,1 ± 4,8	11,2 ± 2,6	33,1

*Valor obtido por diferença: massa total – (celulose + lignina + cinzas)

Fonte: Adaptado de Reyes; Peralta-Zamora; Durán (1998)

Se observados os valores referentes à composição química da casca de arroz sem nenhum pré-tratamento, verifica-se que o maior componente da casca é a celulose seguida pela lignina. As cinzas estão por volta de 8,5% e a hemicelulose está enquadrada dentro dos 23,7% (REYES; PERALTA-ZAMORA; DURÁN, 1998). Conforme apresentado na Tabela 2, a casca de arroz sem nenhum pré-tratamento tem, aproximadamente, 90% de matéria orgânica (celulose + lignina + hemicelulose).

Kuhad e Singh (1993) determinaram que 70% da composição química da casca de arroz é de matéria orgânica. Desse percentual, verificou-se 36% de hexoses, 15% de pentoses, 19% de lignina e 20% de cinzas. Salienta-se que a hemicelulose é composta, principalmente, por grupos de hexoses e pentoses, e a celulose é um hornopolímero linear regular de unidades repetidas de glicose, a qual se enquadra no grupo das pentoses.

Todas as pesquisas citadas encontraram um percentual de cinzas, que varia de 8,5% a 20%, sendo que o principal componente desta cinza é a sílica, aproximadamente, 90%. Carvalho (2015) realizou ensaio de difração de raio x para verificar as fases dos elementos, conforme a Figura 5, observa-se que a sílica se encontra amorfa mesmo na casca *in natura*.

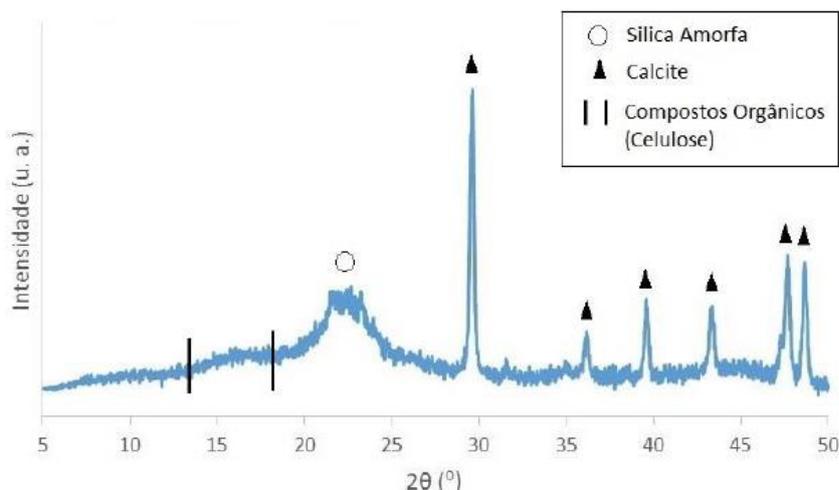


Figura 5 – Difratograma da casca de arroz natural (CARVALHO, 2015)

Jauberthie *et al.* (2000) realizaram o estudo da composição química da casca de arroz a fim de determinar a origem da sílica e dos demais componentes obtidos após a queima. A Tabela 4 apresenta os valores encontrados.

Tabela 4 – Composição química da casca do arroz

Elemento	% (em peso)		
	Superfície Externa	Superfície Interna	Interior
C	6,91	30,20	62,54
O	47,93	42,53	35,19
Si	45,16	27,27	2,27
Total	100,00	100,00	100,00

Fonte: Adaptado de Jauberthie *et al.* (2000)

As análises foram feitas por Jauberthie *et al.* (2000) utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia por energia dispersiva (EDS) após tratar a casca com peróxido de hidrogênio. A partir dos valores obtidos, Jauberthie *et al.* (2000) chegaram a recomendar a utilização da casca para produção de concreto leve, já que, por possuir natureza fibrosa e sílica, poderia melhorar a resistência mecânica, reduzir a massa específica e apresentar boa durabilidade.

Ao verificar a presença de sílica na casca de arroz *in natura* (AMICK, 1982; CARVALHO, 2015; JAUBERTHIE *et al.*, 2000; KUHAD; SINGH, 1993) e, por meio de difração de raios X, constatar que ela está amorfa (CARVALHO, 2015), há uma boa possibilidade de incorporá-la em matriz cimentícia e manter uma boa durabilidade (JAUBERTHIE *et al.*, 2000). Com a sílica amorfa na superfície externa da casca de arroz, é possível que ocorra a formação de C-S-H na interface fibra matriz, assim, criando uma camada protetora para a casca.

2.2.2 Celulose

A celulose é o polímero renovável mais abundante no mundo. Estima-se que é sintetizado entre 10^{11} e 10^{12} toneladas de celulose por ano, no entanto, ela, geralmente, é produzida em combinação com a lignina e outros polissacarídeos, como a hemicelulose. A produção comercial de celulose concentra-se em fontes colhidas, como madeira, ou naturais, como o algodão (HOLIK, 2006).

A celulose é considerada polímero forte, pois é ela quem fornece a força estrutural da planta. Ela é biossintetizada na membrana plasmática de cada célula sob a forma de um filamento pequeno e comprido compreendendo um pequeno número de cadeias de celulose – 18 a 36 cadeias (HAIGLER *et al.*, 2014; KLEMM *et al.*, 1998; VO; NAVARD, 2016). Esse filamento é comumente chamado de fibra e, quando aglomerado em filamentos maiores, forma a parede celular, geralmente denominado de nanofibra. Essas nanofibras podem ser extraídas e possuem elevado potencial na área de pesquisa, pois possuem alto desempenho mecânico (ABDUL KHALIL; BHAT; IREANA YUSRA, 2012).

As fibras de celulose da parede celular podem inchar quando em contato com água ou meio alcalino aquoso, o que pode ser um problema quando utilizado no concreto. A celulose é degradada ou oxidada em meio ácido aquoso ou não aquoso na presença de fungos ou bactérias por clivagem das ligações glicosídicas. Quando exposta a temperaturas acima de 200°C , a celulose sofre uma degradação térmica que leva a produtos gasosos e carvão (VO; NAVARD, 2016).

A degradação da celulose pode ser obtida com vários tipos de energia, como, por exemplo, energia química, térmica, mecânica ou de radiação. A Tabela 5 apresenta possíveis modos de degradação da celulose.

Tabela 5 – Modos de degradação da celulose

Entrada de energia	Modo de Ação
Química	Hidrólise ácida
	Hidrólise enzimática
	Degradação alcalina
	Degradação oxidativa
Térmica	Tratamento térmico em diferentes temperaturas
Radiação	Exposição à radiação UV/visível
	Exposição à radiação de alta energia

Fonte: Adaptado de Klemm et al. (1998)

2.2.3 Hemicelulose

As hemiceluloses são heteropolissacarídeos estruturais ramificados por polimerização presentes entre as microfibrilas de celulose nas paredes celulares, elas servem como uma interface entre a celulose e a lignina. As microfibrilas de celulose ficam embebidas em hemicelulose e lignina, a função é agir como barreira contra a degradação enzimática ou microbiana (RAMOS; MAXIMINO; CARVALHO, 2008).

Os tipos e as composições de hemiceluloses presentes na parede celular variam significativamente, dependendo das plantas, dos estágios e das condições de crescimento e do tipo de tecidos, uma parte importante das hemiceluloses são os grupos acetil. As hemiceluloses possuem baixa estabilidade térmica, podem ser facilmente hidrolisadas por ácido diluído, são altamente solúveis em alcalinos e suscetíveis a ataques fúngicos. A hemicelulose é o ponto mais fraco das fibras vegetais quando se trata de preparação de compósitos cimentícios (VO; NAVARD, 2016). Soluções aquosas de hidróxido de sódio são usadas para remover a lignina e a hemicelulose das fibras vegetais (SIXTA, H.; POTTHAST, A.; KROTSCHKEK, 2006).

2.2.4 Lignina

Depois da celulose, a lignina é o polímero orgânico mais abundante e importante nas plantas. Ela é um componente químico e morfológico característico do tecido de plantas angiospermas e gimnospermas, e, geralmente, é encontrada no tecido vascular que possui como função o transporte de líquidos. A quantidade de lignina nas plantas é bastante variável (HOLIK, 2006).

A lignina é uma substância hidrofóbica de alto peso molecular e sua composição e estrutura variam em função do tipo de planta (ROWELL; STOUT, 2007). Ela é uma das estruturas mais complexas entre os polímeros naturais (HENRIKSSON, 2009). Sua presença pode ajudar a proteger os materiais lignocelulósicos da degradação microbiana. Devido à sua estrutura ter uma mistura de porções aromáticas e fenólicas, a lignina pode estar envolvida em muitas reações, como hidrogenólise, hidrólise, condensação e oxidação (SAKAKIBARA e SANO, 2001).

A lignina pode ser removida de materiais lignocelulósicos por cloração, para formar uma clorolignina solúvel (ROWEL, 2007), ou por reação com álcali quente em processos de polpação (SIXTA, H.; POTTHAST, A.; KROTSCHKEK, 2006).

2.3 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRA VEGETAL

O emprego de fibras naturais na confecção de compósitos é feito há muito tempo. Há menções do uso de palha para armação de tijolos de barro em Êxodo 5:6-7 (BÍBLIA SAGRADA, 2008). Atualmente, a utilização de fibras vegetais é resultante de um pensamento mais sustentável no que diz respeito ao destino dos materiais e à redução de custos para fabricação de materiais de boa qualidade.

No Brasil, os primeiros estudos sobre fibras naturais em compósitos com matriz cimentícia surgiram na década de 1980 no Centro Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia (MELO FILHO, 2005). Diversas pesquisas na Engenharia dos Materiais têm sido realizadas visando à substituição das fibras sintéticas pelas naturais (ABDUL KHALIL; BHAT; IREANA YUSRA, 2012; ARDANUY *et al.*, 2011; JAUBERTHIE *et al.*, 2000, 2003; MELO FILHO, 2005; VO; NAVARD, 2016).

O uso de fibras naturais apresenta melhorias pontuais em relação ao desempenho de compósitos cimentícios, além de facilidade de manuseio e transporte. Portanto, existe menor preocupação em problemas de saúde e segurança quando comparadas a fibras vegetais e materiais com mesma finalidade de origem sintética (PANYAKAEW; FOTIOS, 2011; SRIPAIBOONKIJ *et al.*, 2009).

Como referenciada por diversas pesquisas, a incorporação de materiais vegetais brutos, ou seja, sem qualquer tipo de tratamento, melhora substancialmente a condutividade térmica, no entanto, reduz as propriedades mecânicas (CHABRIAC *et al.*, 2016; LABOREL-PRÉNERON; MAGNIONT; AUBERT, 2018).

Por essas características, os estudos com pré-tratamento químico das fibras têm sido aprofundados, o objetivo geral dessas pesquisas tem sido melhorar as características mecânicas dos compósitos (RASHID *et al.*, 2016).

Constatado que a adição de fibras naturais reduz a condutividade térmica de compósitos cimentícios e que há necessidade de otimizar o comportamento energético dos edifícios, os estudos e a busca por desenvolver materiais com biomassa e fibras vegetais foram intensificados. A efetivação de construções com o uso de compósitos com fibras oriundas de resíduos agroindustriais em larga escala tende a reduzir as quantidades consumidas de combustíveis fósseis, e, por conseguinte, reduzir as emissões de dióxido de carbono e dióxido de enxofre (LAHOUIOUI *et al.*, 2019).

2.3.1 Compatibilidade entre as fibras e o cimento

A compatibilidade entre as fibras vegetais e o cimento Portland refere-se ao grau de pega do cimento após a mistura com água e com dado material orgânico. De maneira geral, o processo químico de endurecimento do cimento não é afetado ou é alterado em níveis muito baixos, quando confirmada essa característica, os materiais são compatíveis. No entanto, se o endurecimento do cimento for prejudicado, os materiais são considerados incompatíveis, nesse caso, o compósito apresentará falta de integridade física (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

Segundo Jorge, Pereira e Ferreira (2004), um método analítico para avaliar a extensão da compatibilidade é a medição da liberação de calor durante o processo químico exotérmico de hidratação do cimento. Se, na comparação de uma pasta sem interferência de fibras vegetais com uma pasta com fibras, a razão entre a quantidade de calor for maior que 68%, os materiais são considerados compatíveis, se o valor for entre 28% e 68%, os materiais são considerados moderadamente compatíveis e, se for inferior a 28%, é constatada a incompatibilidade entre a matriz e o reforço.

Em análises realizadas por Miller e Moslemi (1991), foi observado que madeiras e fibras com predominância de celulose, lignina, ácido graxo, ácido resinoso, esterol e terpeno não diminuam significativamente a resistência de compósitos cimentícios, enquanto isso, a glicose foi a substância que causou a maior diminuição de resistência à tração. A hemicelulose, o tanino e o ácido acético causaram uma diminuição de resistência em níveis reduzidos.

Ao analisar as características químicas que favorecem a compatibilidade observadas por Miller e Moslemi (1991) e as características químicas da casca de arroz analisadas por Reyes; Peralta-Zamora; Durán (1998) – descritas no item 2.2.1 deste trabalho; identifica-se o potencial uso da casca como componente de reforço em materiais cimentícios.

2.3.2 Vantagens da adição das fibras vegetais em materiais cimentícios

Segundo Loan e Navard (2016), as propriedades mais estudadas em pesquisas científicas são: comportamento mecânico, encolhimento, absorção de água, propriedades térmicas, desagregação, resistência ao congelamento e descongelamento, ultrassom, corrosão, permeabilidade, superfície inicial de absorção e desempenho acústico.

De maneira geral, as pesquisas provaram que os compósitos cimentícios com agregados de diversos tipos de biomassa apresentaram redução na densidade (ALENGARAM; MAHMUD; JUMAAT, 2010; LAHOUIOUI *et al.*, 2019), melhoria na resistência à compressão (SISMAN; GEZER; KOCAMAN, 2011), maior resistência à flexão e maior ductilidade (AWWAD *et al.*, 2012; CHEN; LIU, 2005; PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017), boa capacidade de resistir à propagação de trincas (MERTA; TSCHEGG, 2013; PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017), bom isolamento térmico (SIVARAJA *et al.*, 2010) e boa absorção acústica (GLÉ; GOURDON; ARNAUD, 2011), etc.

Outra vantagem do uso de compósitos de matriz cimentícia reforçados por fibras vegetais é o fortalecimento da microestrutura do material, o que aumenta a resistência ao impacto da matriz quebradiça e minimiza os efeitos de retração, principalmente para reduzir a trinca da matriz (TEIXEIRA *et al.*, 2020)

2.3.3 Desvantagens da adição das fibras vegetais em materiais cimentícios

O uso de fibras naturais como componente de reforço em materiais cimentícios tem como principal ponto negativo a perda de resistência mecânica em médio ou longo prazo. Essa perda de resistência se dá pela alta alcalinidade do cimento, que acaba danificando as fibras. O hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH}_2)$) é apontado como o principal causador da degradação das fibras (ARDANUY *et al.*, 2011).

Segundo Lahouioui *et al.* (2019), compósitos com fibras de palma não tratadas apresentam maior absorção de água, o que pode causar microfissuras nas estruturas dos compósitos, reduzindo a durabilidade. Por esse motivo, os autores sugerem que compósitos com fibras tratadas sejam mais duráveis do que os compósitos que apresentam adição de fibras naturais sem qualquer tratamento.

Muitos trabalhos vêm sendo realizados para possibilitar o uso de biomassa em materiais cimentícios, considerando que há uma necessidade vital de traduzir o conhecimento atual em atividades comerciais posteriores. No entanto, o desenvolvimento e as aplicações práticas desses materiais ainda estão sob avaliação crítica devido a problemas que precisam ser resolvidos, principalmente no que tange a durabilidade dos compósitos. Portanto, embora vários benefícios tenham sido comprovados, esses compósitos possuem uso limitado devido ao pouco conhecimento existente quanto à durabilidade (VO; NAVARD, 2016).

2.4 EXPERIÊNCIAS CONSOLIDADAS

Neste item da pesquisa, a revisão da literatura foi focada em artigos científicos de revisão, pois, desta forma, é possível obter um apanhado maior de pesquisas e possibilita-se utilizar análises comparativas entre diferentes trabalhos já avaliadas por revisores especialistas nos temas estudados.

2.4.1 Caracterizações físicas e químicas

Neste tópico, serão abordadas as características dos principais ensaios realizados na área de compósitos com materiais lenhocelulósicos, isto é, fibras vegetais. A intenção aqui é descrever a metodologia utilizada para realização das caracterizações mais importantes, assim, facilitando o planejamento adequado do programa experimental, bem como, otimizando o tempo dos ensaios em laboratório.

2.4.1.1 Termogravimetria

No estudo realizado por Melo Filho (2012) sobre a durabilidade de compósitos reforçados por fibra de sisal sob ataques químicos e térmicos, foram realizadas análises termogravimétricas (TGA) nas fibras em seu estado natural e após sua adição aos compósitos. As análises ocorreram com taxa de aquecimento de 10°C/min, com temperatura de, aproximadamente, 800°C para as fibras e 1000°C para a pasta.

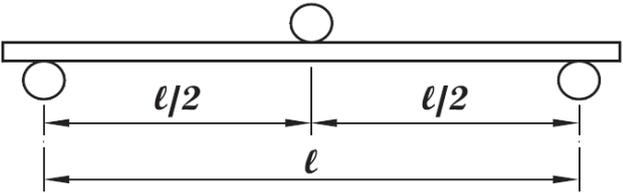
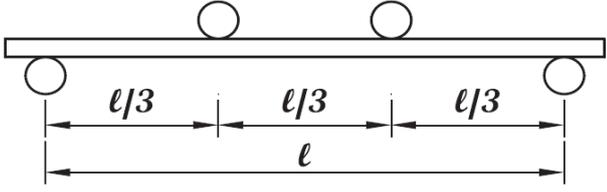
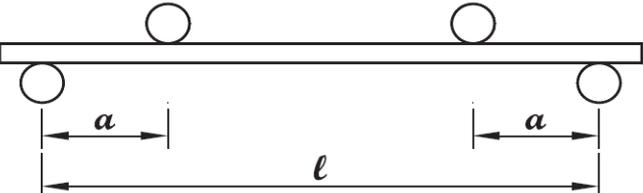
As fibras foram utilizadas *in natura* lavadas em laboratório e extraídas dos compósitos após terem sido submetidas a diferentes condições de exposição químicas e térmicas. As fibras foram extraídas da matriz com um alicate de pressão, e, após o esmagamento, eram separadas com auxílio de peneira (MELO FILHO, 2012).

2.4.1.2 Análises de desempenho mecânico

Segundo Ardanuy, Claramunt e Toledo Filho (2015), a grande maioria dos trabalhos dedicados ao estudo do comportamento mecânico de compósitos cimentícios com fibras celulósicas curtas e dispersas aleatoriamente na matriz analisa as propriedades de flexão utilizando as configurações de três e quatro pontos. Os principais parâmetros determinados a partir das curvas “força/tensão x deslocamento/deformação” são: módulo de elasticidade (E), limite de tensão de proporcionalidade, tensão máxima atingida (σ_u) e a deformação (ϵ).

O limite de tensão de proporcionalidade é definido como o valor da tensão no ponto superior da parte linear da curva e o módulo de elasticidade é a tangente do ângulo de inclinação da curva de tensão *versus* deflexão durante a deformação elástica. As equações para o cálculo desses parâmetros dependem da configuração de flexão (três ou quatro pontos), das distâncias entre os apoios e sua relação com a posição das forças e da espessura do corpo de prova. Outro parâmetro importante para esses materiais de alta ductilidade é a energia absorvida durante o ensaio de flexão, definida como a área sob a curva força *versus* deslocamento do início ao limite do ensaio. A Tabela 6 ilustra as configurações de ensaio e o equacionamento utilizado para cada uma (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

Tabela 6 – Equações para as configurações de ensaios de flexão

	<ul style="list-style-type: none"> • $E = \frac{F.l^2}{4.f.b.h^3}$ • $\varepsilon = \frac{6.f.h}{l^2}$ • $\sigma_u = \frac{3.F.l}{2.b.h^2}$
	<ul style="list-style-type: none"> • $E = \frac{23.F.l^3}{108.f.b.h^3}$ • $\varepsilon = \frac{108.f.h}{23.l^2}$ • $\sigma_u = \frac{F.l}{b.h^2}$
	<ul style="list-style-type: none"> • $E = \frac{3.F.a}{b.h^2}$ • $\varepsilon = \frac{12.f.h}{3.l^2-4.a^2}$ • $\sigma_u = \frac{F.a.(3l^2-4.a^2)}{4.f.b.h^2}$

Sendo:

- E = Módulo de elasticidade (MPa);
- ε = Deformação (mm/mm);
- σ_u = Tensão máxima atingida (MPa);
- F = Carga (N);
- l = Comprimento do vão de apoio (mm);
- f = Deflexão máxima (mm);
- b = Largura da amostra (mm);
- h = Espessura da amostra (mm);
- a = Distância entre o suporte e a posição da carga (mm).

Fonte: Adaptado de ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO (2015)

O principal problema da utilização das configurações apresentadas na Tabela 6 é que os resultados são influenciados pelas dimensões das amostras e não apenas pelas características do material, tal fato torna a comparação entre diferentes amostras inviável, no entanto, para comparar materiais com amostras semelhantes, as configurações obtêm bons resultados (ARDANUY; CLARAMUNT; TOLEDO FILHO, 2015).

2.4.1.3 Difração de Raios X

Para realizar ensaios de difração de raios x nas amostras de argamassa com casca de arroz, Jauberthie et al. (2003) moeram duas amostras até conseguirem um pó e uma fração fibrosa (a casca de arroz), essa fração foi eliminada usando peneira de 50 μm . O pó foi analisado na difração com comprimento de onda $K\alpha$ Cu, o registro feito foi do tipo passo a passo, assim, possibilitando a integração da superfície dos picos com alto grau de precisão.

A partir deste ensaio, Jauberthie et al. (2003) compararam dois tipos de amostras, uma conservada em ambiente com 50% de umidade relativa (UR) e outra armazenada em ambiente com umidade relativa de 95%. Entre as diferenças observadas, verificou-se que as amostras com 50% de umidade possuíam 14% mais cal do que as amostras com 95% de UR. Essa redução da cal nas amostras com 95% de UR ocorreu porque ela foi parcialmente consumida na reação pozolânica para formar C-S-H. Os autores também verificaram que as amostras com 50% de UR apresentavam mais carbonato de cálcio.

Em relação ao C-S-H II ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), a análise dos difratogramas apontou que as argamassas conservadas em 95% de UR apresentavam maior quantidade, o que, para os autores, sugere que o grau de reação pozolânica é alto, isto é, aumenta o consumo de cal e, por consequência, a quantidade de C-S-H (JAUBERTHIE *et al.*, 2003).

2.4.1.4 Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Raio X

Jauberthie et al. (2003) utilizaram microscópio eletrônico de varredura (MEV) para analisar a distribuição de sílica em uma seção de casca de arroz. As fibras analisadas foram as mesmas das amostras que permaneceram em umidade relativa de 50% e 95% durante um ano (já citado nos itens 2.3.3 e 2.3.5.1 deste trabalho). Para realizar esse estudo, pequenas amostras da argamassa com fibras de CA foram

acopladas ao MEV com espectroscopia por energia dispersiva (EDS), o uso de MEV com EDS permitiu aos autores definir a posição e identificação dos elementos. A Figura 6 ilustra as imagens obtidas na análise, bem como, algumas configurações de ensaio.

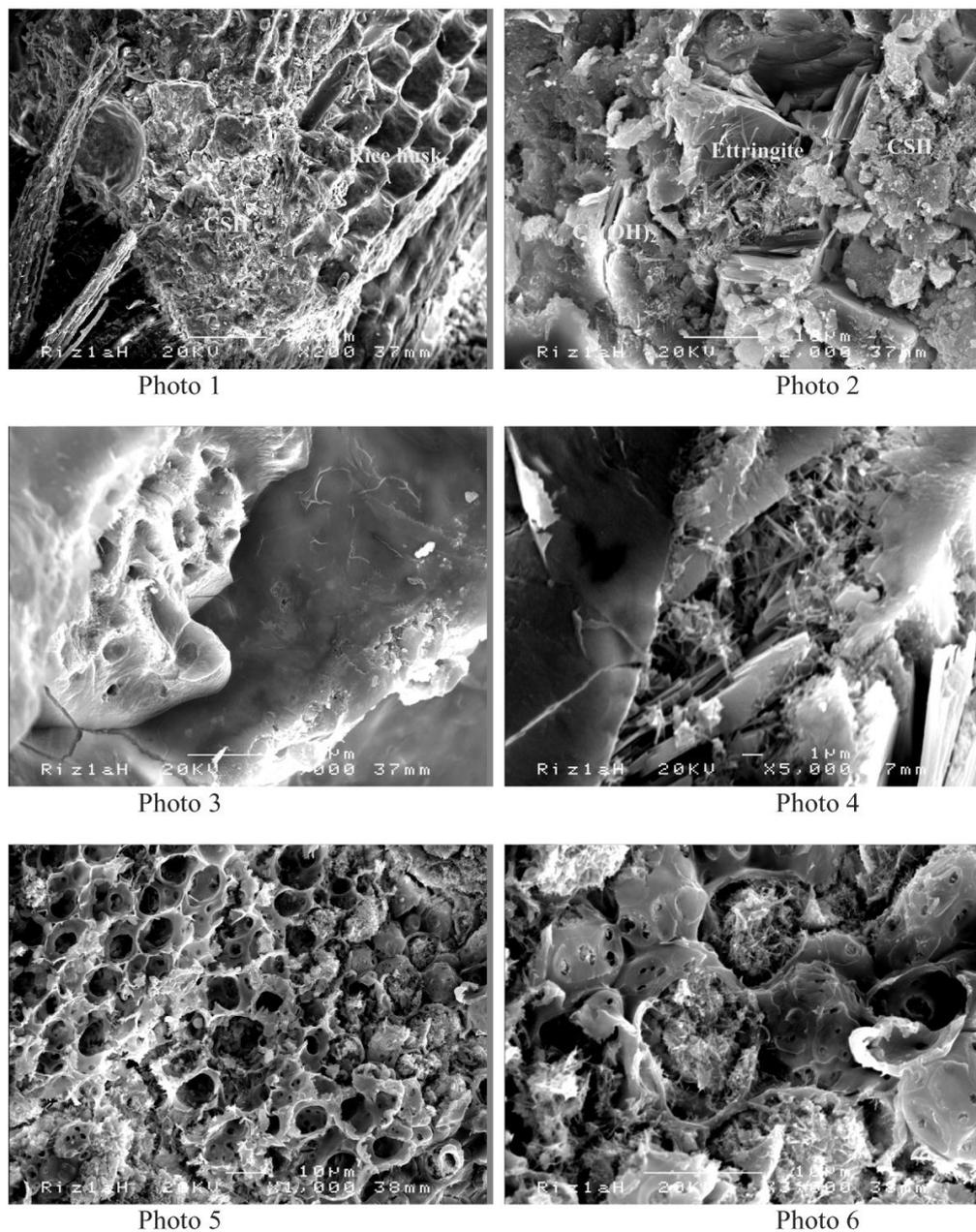


Figura 6 – Análise interface fibra-matriz (CA-argamassa)
(JAUBERTHIE *et al.*, 2003)

Conforme pode se observar na Figura 6, a tensão de aceleração utilizada para desenvolvimento das imagens foi de 20 kV em todas as análises. A ampliação das imagens foi de duzentos a cinco mil vezes e a distância da emissão para amostra foi

entre 35 mm e 40 mm. Melo Filho (2012), na análise de fibras de sisal empregando MEV, também utilizou parâmetros semelhantes.

2.4.2 Amostras submetidas a diferentes temperaturas

Atualmente, outros testes têm sido desenvolvidos buscando entender o comportamento mecânico dos compósitos sob diferentes situações. Melo Filho (2012) testou a influência química e térmica em compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal. Na Figura 7, são apresentadas as curvas “tensão x deflexão” obtidas dos ensaios de flexão para amostras submetidas a temperaturas de 23, 70, 100, 150, 200 e 250°C (MELO FILHO, 2012).

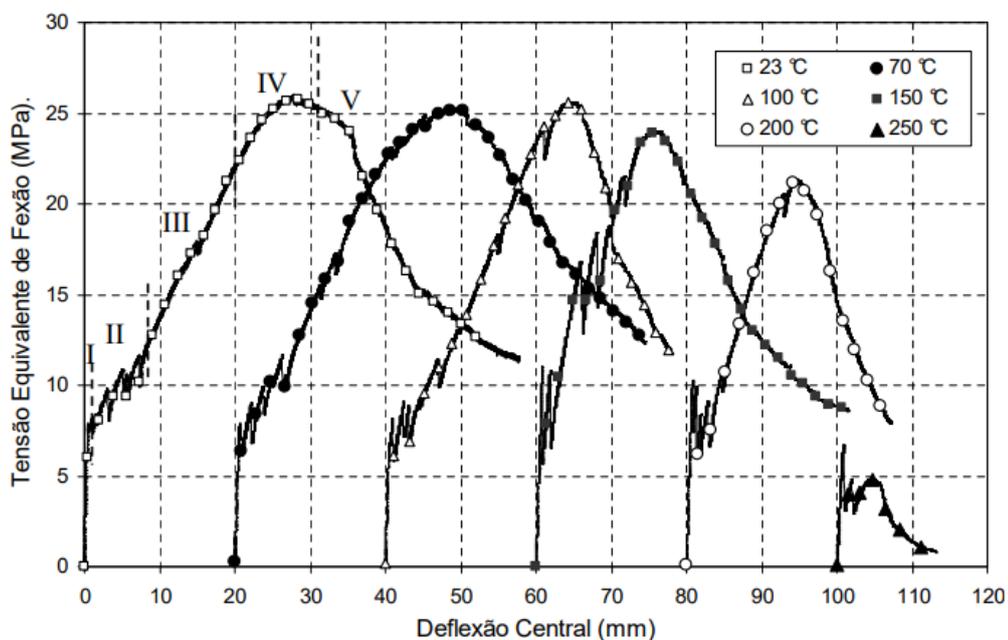


Figura 7 – Curvas Tensão x Deflexão para compósitos submetidos a diferentes temperaturas.
(MELO FILHO, 2012)

Segundo Melo Filho (2012), a tensão última observada nas curvas “tensão x deformação” (região IV - Figura 7) não teve diferença estatisticamente significativa (as diferenças foram menores que 8%) entre os níveis de temperatura de 23°C e 150°C. Quando a temperatura é acrescida para 250°C, a tensão máxima reduz drasticamente.

É interessante que os resultados verificados por Melo Filho (2012) na análise da curva tensão x deformação estão de acordo com os resultados obtidos na análise termogravimétrica, na qual o autor verificou que a fibra de sisal apresenta estabilidade térmica até a temperatura de cerca de 220°C a 230°C.

Por meio de microscopia óptica, Melo Filho (2012) analisou a condição das fibras extraídas dos compósitos após aquecimento. A Figura 8 ilustra a situação das fibras sob cada temperatura.

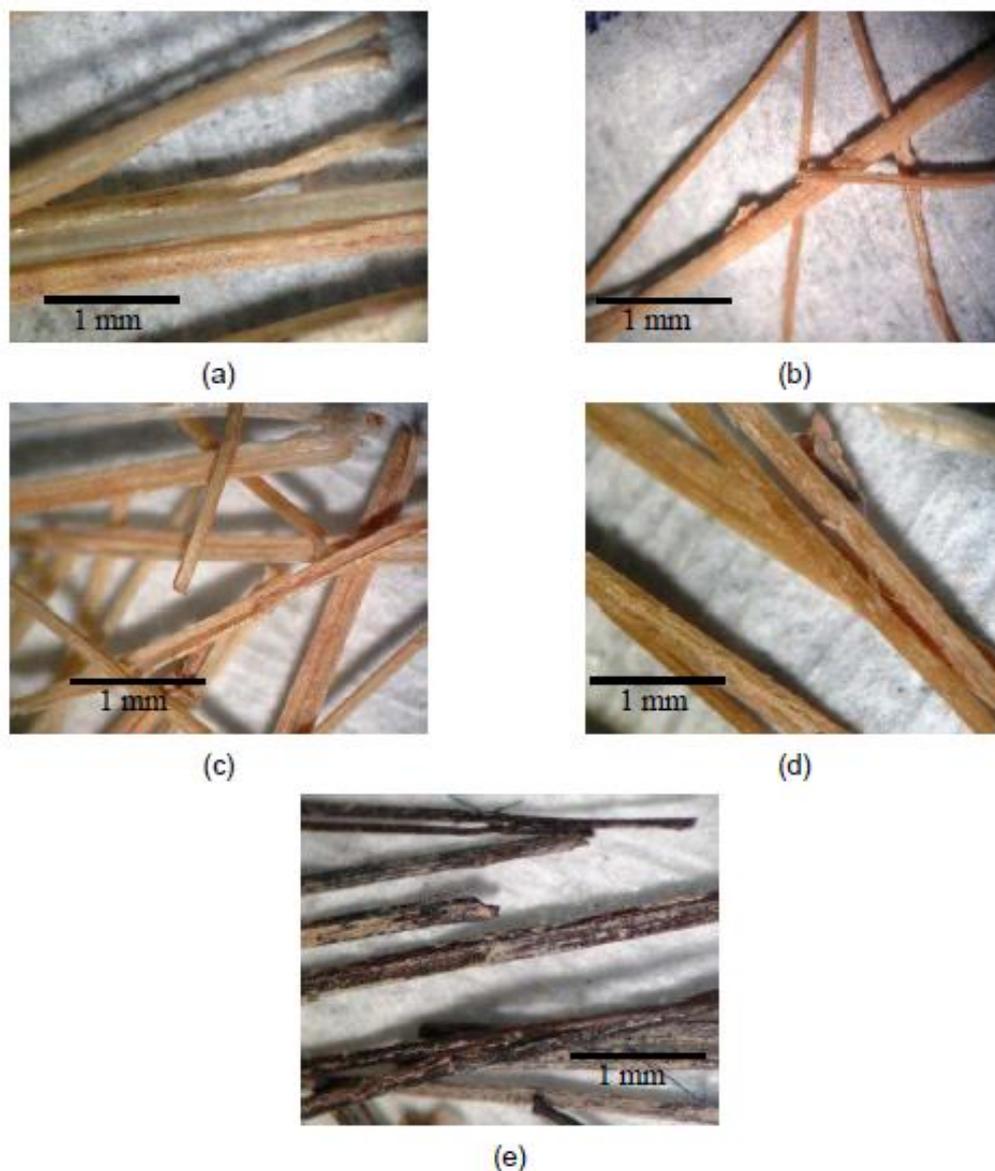


Figura 8 – Imagem das fibras de sisal após aquecimento (a) 23°C, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C e (e) 250°C. (MELO FILHO, 2012)

Analisando a Figura 8, pode se verificar que, até a temperatura de 150°C, as fibras não apresentaram alterações significativas na textura ou coloração. A partir de 200°C, houve um leve escurecimento e, a 250°C, as fibras apresentaram coloração quase preta, rompendo-se com fragilidade bastante acentuada (MELO FILHO, 2012).

A partir dos resultados, das análises e das discussões feitas por Melo Filho (2012), observa-se que o comportamento mecânico dos compósitos teve relação bem próxima aos resultados da análise termogravimétrica (TGA), isto é, a estabilidade das fibras até 220°C-230°C verificada nos ensaios de TGA influenciou fortemente na estabilidade mecânica dos compósitos.

2.4.3 Exposição a ataque ácido

Ensaio de durabilidade acelerado com o uso de ataque ácido em concreto e compósitos cimentícios são diferenciados de acordo com o tipo e a fonte do ácido. Os principais ácidos que afetam a estrutura do concreto estão apresentados na Tabela 7, na qual constam informações sobre o pH do ácido puro e agressividade relatada do ataque no concreto (MARCOS-MESON et al., 2019).

Tabela 7 – Ácidos que mais afetam a estrutura do concreto

Ácido	Fórmula	pH	Natureza	Força*	Ataque
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	1 – 3	Inorgânico	Forte (-3,0)	Muito alto
Ácido Clorídrico	HCl	1 – 3	Inorgânico	Forte (-7,0)	Alto
Ácido Nítrico	HNO ₃	1 – 3	Inorgânico	Forte (-1,3)	Alto
Ácido Carbônico	H ₂ CO ₃	4 – 5	Inorgânico	Fraco (6,3)	Baixo
Ácido Acético	C ₂ H ₄ O ₂	3 – 4	Orgânico	Fraco (4,8)	Alto
Ácido Lático	C ₃ H ₆ O ₃	2 – 4	Orgânico	Fraco (3,9)	Alto
Ácido Cítrico	C ₆ H ₈ O ₇	2 – 3	Orgânico	Fraco (6,3)	Baixo

*Força do ácido dissolvido na água, expresso como a constante de acidez logarítmica negativa (pKa).

Fonte: Adaptado de MARCOS-MESON et al. (2019)

De acordo com Marcos-Meson et al. (2019), a maioria dos estudos utilizou ácido sulfúrico como agente de exposição em compósitos de matriz cimentícia. A concentração utilizada foi na faixa de 2 a 10% em peso, resultando em valores iniciais de pH que variam entre 0 e 0,4 e que, devido à lixiviação, aumentam até um pH de 2,5. Marcos-Meson et al. (2019) ainda apontam que as taxas de erosão química são altamente dependentes do pH da solução, ou seja, uma maior concentração de ácido com renovação constante da fonte de ácido resulta em grandes taxas de erosão.

Joorabchian (2010) realizou testes para verificar a resistência de misturas de concreto frente à invasão de ácido sulfúrico. Para os estudos realizados, o autor imergiu amostras de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura após 28 dias de cura em câmara úmida com 98% de umidade relativa em diferentes soluções ácidas. O

ácido sulfúrico utilizado para preparar soluções com concentrações de 3%, 5% e 7% possuíam concentração de 98%. Os parâmetros preliminares obtidos foram o peso inicial de todas as amostras e a resistência à compressão média de três amostras. As resistência e peso das amostras foram verificados a cada 2 semanas, em um total de 4 fases (portanto, o tempo total do ensaio foi de 8 semanas). As soluções eram agitadas uma vez por semana para distribuição uniforme do ácido sulfúrico.

De acordo com Marcos-Meson et al. (2019), a maioria das pesquisas analisa o desempenho elástico do material frente a ações de degradação, assim, enfatizando a perda de resistência à compressão, à tração e ao cisalhamento, e as propriedades físicas da matriz, como profundidade de erosão química e perda de massa. Esse tipo de abordagem fornece algumas informações acerca da integridade geral do reforço, no entanto, limita a visão dos fenômenos de deterioração que afetam as fibras.

2.4.4 Exposição a ciclos de molhagem e secagem

Um método bastante utilizado para analisar a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais é o envelhecimento acelerado por ciclos de molhagem e secagem. A Figura 9 ilustra as curvas tensão x deflexão para compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibra de sisal submetidos a ciclos de molhagem e secagem.

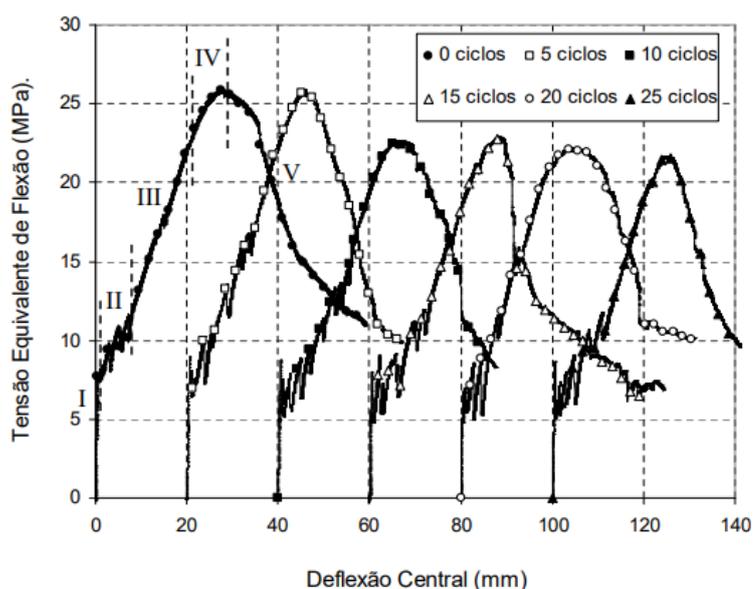


Figura 9 – Curvas “tensão x deflexão” para compósitos submetidos a 0, 5, 10, 15, 20 e 25 ciclos de molhagem e secagem (MELO FILHO, 2012)

Ao analisar a Figura 9, observa-se que a tensão última (verificada na região IV do gráfico) sofreu uma redução de cerca de 20% na comparação entre o ensaio referência (zero ciclos) e o ensaio com maior número de ciclos (vinte e cinco). A baixa redução observada por Melo Filho (2012) se deu em compósitos que tinham 50% de metacaulim misturados ao cimento Portland. Tal fato, segundo o autor, foi suficiente para consumir praticamente 100% de hidróxido de cálcio (CH), isso melhorou a durabilidade dos compósitos se comparados aos produzidos sem metacaulim.

2.4.5 Compósitos de argamassa leve reforçados com CA

A adição da casca do arroz em argamassa leve teve estudos de durabilidade realizados por Jauberthie *et al.* (2003). Os compósitos foram mantidos durante sete dias sob temperatura de 20°C e umidade relativa (UR) de 100% para cura inicial. Após o período de cura inicial, as amostras foram separadas sob duas condições de umidade e temperatura. Em uma delas, as amostras foram submetidas à temperatura de 20°C com umidade relativa do ar de 50% e, na outra, a uma temperatura de 20°C e umidade relativa de 95%. A Tabela 8 apresenta os resultados de resistência mecânica obtidos para cada caso após um ano.

Tabela 8 – Propriedades físicas da argamassa com um ano de idade

Armazenamento	Densidade (kg/m ³)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Módulo de flexão (GPa)
UR 50%	1110	7,20	20,60	1,00	0,80
UR 95%	1145	6,50	23,80	2,60	1,40

Fonte: Adaptado de JAUBERTHIE et al. (2003)

Conforme os dados apresentados na Tabela 8, verifica-se que a resistência à tração na flexão em três pontos reduziu, aproximadamente, 10% quando as amostras foram expostas a uma umidade relativa maior. Em relação à resistência à compressão axial, observa-se que houve evolução, elevando, aproximadamente, 15% quando submetidas a uma umidade relativa de 95%.

A pesquisa realizada por Jauberthie et al. (2003) sugere que, em alta concentração de umidade, haja um aumento da atividade pozolânica, o que gera aumento de resistência à compressão. No entanto, a alta UR causa redução do grau de reforço das fibras, o que, além de gerar menor resistência à tração na flexão, reduz a ductilidade dos compósitos.

2.4.6 Métodos de aprimorar a durabilidade

A capacidade de biomassas lignocelulósicas para resistir a fatores externos (como variações de temperatura e umidade, ataque de sulfatos e cloretos) e danos internos (como alcalinidade do aglutinante, compatibilidade entre fibras e matriz de cimento e mudanças volumétricas) está definindo a durabilidade do compósito de materiais cimentícios com biomassa. Geralmente, são adotadas duas abordagens: uma delas é aprimorar a biomassa com algum tipo de tratamento e a outra é modificar a matriz para minimizar as desvantagens da biomassa – evitar que a alta alcalinidade do cimento Portland acelere a degradação dos materiais orgânicos (LOAN e NAVARD, 2016).

Atualmente, vários são os tratamentos utilizados para melhorar a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais. Grande parte deles é focada em limitar a ação da água proveniente do ambiente nas fibras, dessa forma, reduzindo liberação de carboidratos na matriz (VO; NAVARD, 2016).

2.4.6.1 Revestimento das fibras vegetais

A incorporação de produtos que reduzem a absorção de água e álcalis é utilizada para revestimento das fibras. Em diversas pesquisas, essa abordagem tem se mostrado satisfatória e obtido bons resultados. Ghavami (2005), por exemplo, revestiu hastes de bambu com uma fina camada de epóxi e, em seguida, areia fina, tal metodologia aumentou a impermeabilização, minimizou o inchamento e o encolhimento das fibras, e ampliou a adesão fibra-matriz.

O uso de materiais naturais para revestimento das fibras também já foi testado e teve eficácia comprovada. Tolêdo Filho et al. (2003) imergiu fibras de sisal e de coco em uma suspensão de sílica ativa por 10 minutos e, após a secagem ao ar por 15 minutos, incorporou à matriz cimentícia, tal procedimento aumentou a capacidade de deformação do concreto frente aos esforços mecânicos.

O revestimento de fibras de linho com uma mistura de cimento e sacarose revelou alguns resultados positivos. A presença de microporosidade na camada de revestimento resolveu o problema do atraso no tempo de endurecimento e reduziu a retração por secagem e a absorção de água, levando a um aumento na resistência à compressão. Além disso, a presença de sacarose térmica melhorou a ligação fibra-matriz, mas prejudicou a condutividade térmica. (KHAZMA *et al.*, 2008).

2.4.6.1 Tratamentos físicos

Algumas modificações físicas nas fibras vegetais também já foram testadas para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas. Pela ação do calor, como secagem em forno, o encolhimento pode ser reduzido e parte ou todas as suas frações de hemicelulose degradadas. Como resultado, os enchimentos tornam-se menos suscetíveis a ataques de micro-organismos (BEDERINA et al., 2012).

O tratamento térmico também pode melhorar a força de adesão entre fibras e matriz de cimento. Uma combinação de compressão e temperatura (120°C, 160°C e 200°C) foi testada por Motta, John e Agopyan (2010). Nesse tratamento, fibras de sisal foram aquecidas até determinada temperatura e mantidas por 5 min antes da aplicação da compressão. A força de compressão com uma taxa de 15 N/min e uma carga máxima de 90 MPa foi mantida durante 5 minutos na direção perpendicular ao comprimento da fibra. O tratamento levou a um aumento da rigidez da fibra do sisal e a uma diminuição da absorção de umidade.

2.4.6.2 Tratamentos químicos

Os pré-tratamentos químicos da biomassa são muito utilizados em todos os setores técnicos em que ela é usada. Por meio do tratamento químico, é possível remover seletivamente compostos da estrutura das fibras vegetais e/ou modificar quimicamente sua superfície ou seu interior. Tal tipo de tratamento permite melhorar o processamento e as propriedades de uso do produto final (VO; NAVARD, 2016).

Conforme visto no item 2.3.1 deste trabalho, a hidratação do cimento Portland pode ser inibida por alguns extrativos presentes em algumas plantas lignocelulósicas. Para resolver esse problema (falta de compatibilidade fibra-matriz), Jorge, Pereira e Ferreira (2004) indicam que podem ser retirados os extrativos que causam o retardo da hidratação por meio de tratamentos químicos.

Vários extratos que podem ter efeitos que prejudiquem o desempenho do compósito podem ser removidos em água. O procedimento, neste caso, é mergulhar e lavar as fibras naturais na água. Ainda é recomendada a utilização de água fria, visto que ela mostrou melhorar a compatibilidade fibra-cimento (JORGE; PEREIRA; FERREIRA, 2004).

Um dos fatores que dificultam a produção de compósitos cimentícios reforçados por fibras vegetais é o inchamento e o encolhimento das fibras, pois acaba afetando a ligação fibra-matriz e, por consequência, o desempenho mecânico. De acordo com Fernández Carrasco et al. (2015), é possível estabilizar a dimensão das fibras por meio de ciclos de molhagem e secagem antes de incorporar a fibra vegetal à matriz cimentícia. Desta maneira, haverá incremento de resistência à flexão e à compressão.

Outro método de melhorar o desempenho térmico é tratar as fibras com água fervente por 2 horas e lavá-las até que a cor da água fique clara, desta maneira, as fibras ficarão mais rígidas e duras. Segundo Ali, Li e Chouw (2013), esse tratamento melhora a ligação fibra-matriz e, por conseguinte, a resistência à tração. De acordo com Pacheco-Torgal e Jalali (2011), outra maneira de melhorar a ligação fibra-matriz é fazer tratamento alcalino. Com esse tratamento, é possível remover impurezas e hemicelulose de massa molar baixa, neste caso, também é incrementada a resistência das fibras.

Outros tratamentos menos convencionais utilizados para tratar fibras vegetais e melhorar o desempenho dos compósitos são: modificação da superfície das fibras com alcóxido de titânio, incorporação de sulfato de alumínio já na mistura dos materiais para formar o compósito, tratamento das fibras com sulfato ferroso, cozimento das fibras para extração da lignina, tratamentos antimicrobianos para melhorar a durabilidade das fibras, tratamentos com amido catiônico e cinza volante para melhorar a dispersão durante a mistura e reduzir o tempo de pega do compósito (VO; NAVARD, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, está apresentada a metodologia da pesquisa dividida em três etapas. Inicialmente, está ilustrado o fluxograma geral simplificado, na sequência, seguem as características dos materiais utilizados e, no último, item estão descritos os métodos experimentais adotados.

Para a elaboração dos métodos experimentais, foi priorizado o uso de normas nacionais elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pois este trabalho pode ser utilizado como ponto de partida para o desenvolvimento de produtos com finalidade comercial em pesquisas futuras. No entanto, nas análises de dosagem e durabilidade, utilizaram-se trabalhos e normas internacionais quando verificada falta de referências na literatura nacional. Desta forma, foi possível desenvolver uma gama maior de análises para averiguar a funcionalidade do Compósito desenvolvido.

3.1 FLUXOGRAMA DA PESQUISA

O fluxograma ilustrado na Figura 10 define a proposta da metodologia da pesquisa em ordem cronológica. A primeira etapa exposta no fluxograma corresponde à dosagem de um traço a partir da determinação da quantidade de aditivo superplastificante a ser utilizado, da quantidade de casca de arroz e da quantidade de areia natural a ser incorporada ao Traço Referência, a dosagem visa obter uma resistência à compressão axial média de 1,20 MPa e o menor valor isolado de 1,00 MPa, assim, atendendo aos requisitos da NBR 13438 (ABNT, 2013a).

Na sequência, são apresentados os ensaios que serão utilizados para verificar a durabilidade do compósito desenvolvido. Para analisar se o compósito, mesmo contendo biomassa, apresenta boa durabilidade; serão aplicados quatro métodos experimentais para gerar degradação:

- O primeiro deles é o tratamento químico, com o qual se buscará acelerar a degradação dos três principais componentes orgânicos da casca do arroz: celulose, hemicelulose e lignina;
- O segundo tratamento é o térmico, no qual será acelerada a perda de água da biomassa e a eliminação dos componentes orgânicos voláteis por meio da aplicação de altas temperaturas;

- O terceiro é o envelhecimento acelerado. Nesse tratamento, será analisada a influência do uso de banho-maria com temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ à resistência dos compósitos;
- O quarto tratamento é o envelhecimento natural do compósito. Nessa etapa, será definida a evolução da resistência em tempos de até um ano sem ataques agressivos.

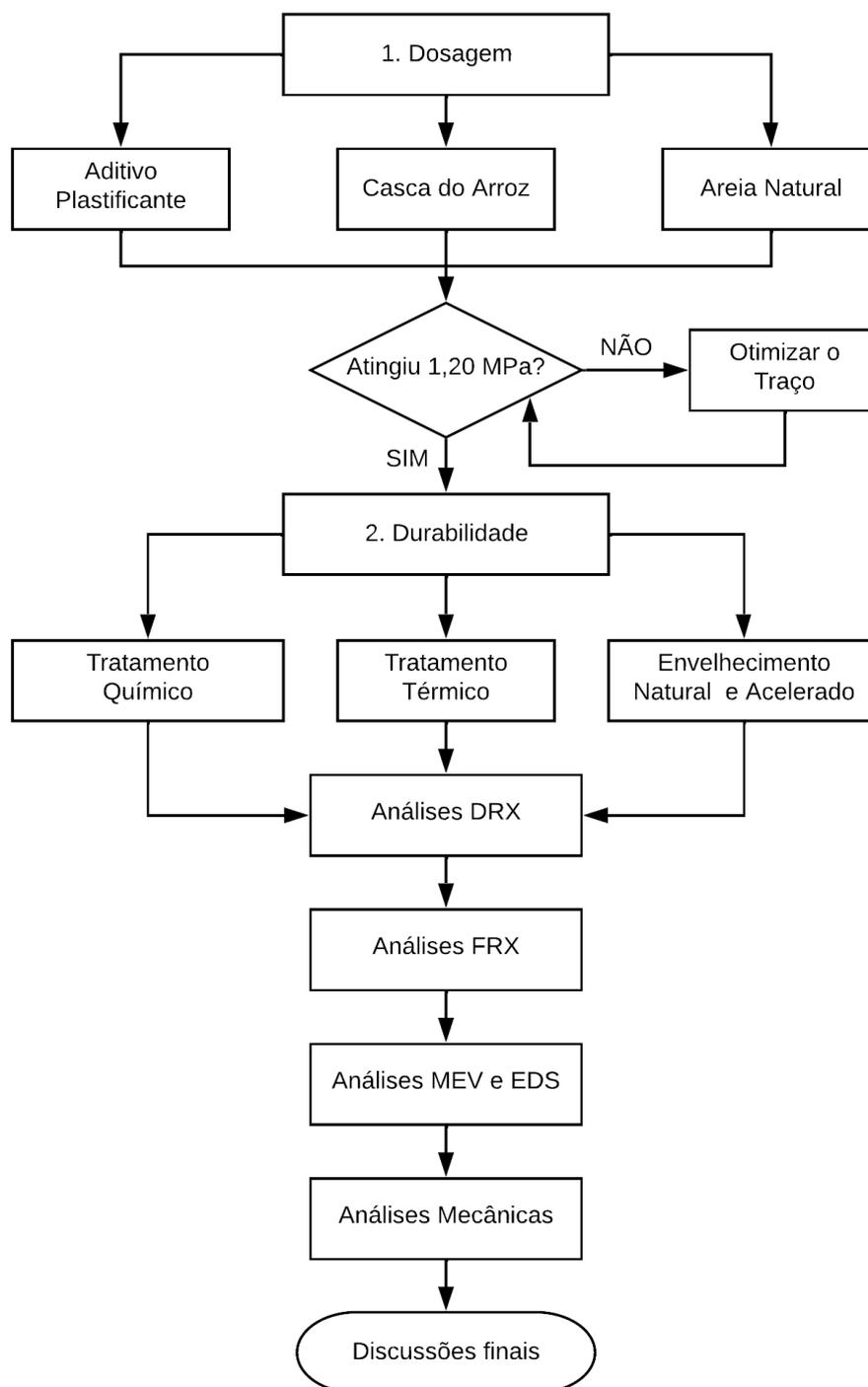


Figura 10 – Fluxograma simplificado da pesquisa (Elaboração própria)

3.2 MÉTODOS

Neste tópico, são abordados os métodos utilizados para definição do traço, dimensões das amostras, parâmetros de controle de qualidade e todos os ensaios realizados para definir a durabilidade do produto a ser desenvolvido.

3.2.1 Dosagem

A dosagem dos compósitos foi realizada por tentativa e erro, esse é o método mais utilizado para dosar concreto celular, conforme referenciado no item 2.1.3.3 deste trabalho. Como o concreto celular é o material que possui estrutura física mais próxima do compósito desenvolvido, foram utilizadas suas técnicas de fabricação, mistura e dosagem para produzir os compósitos.

A definição do traço foi realizada com a finalidade de atingir uma resistência média de, pelo menos, 1,20 MPa e resistência mínima isolada de 1,00 MPa, conforme requisito estabelecido pela NBR 13438 (ABNT, 2013a) para blocos de concreto celular autoclavado. Como na norma essas resistências estão correlacionadas com uma densidade menor que 450 kg/m³, a dosagem também foi realizada para atingir a menor densidade possível. Sabe-se que o concreto celular, quando curado em autoclave, possui aumento substancial de resistência e redução de densidade, o que torna muito difícil atingir a mesma relação com o material curado em temperatura ambiente, caso dos compósitos desenvolvidos nesta pesquisa.

O traço utilizado como base para esta pesquisa foi embasado nos parâmetros definidos por Pachla (2017) e está apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 – Traço utilizado como base para realizar a dosagem

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)
Pachla17	1	-	0,40	2,8

Fonte: Adaptado de Pachla (2017)

A proporção dos materiais apresentados na Tabela 9 gerou uma massa específica no estado fresco (MEF) de 820,40 kg/m³, uma massa específica no estado endurecido (MEE) de 735,51 kg/m³ e uma resistência à compressão axial média de 3,16 MPa no trabalho referenciado (PACHLA, 2017). Como a resistência atingida é 263,30% da resistência média almejada nesta pesquisa, a nova proporção tem potencial de reduzir substancialmente a massa específica do compósito.

Ao reproduzir o traço utilizado como base para esta pesquisa, que será a partir de agora denominado de Pachla17, houve algumas alterações: o aditivo incorporador não foi o mesmo utilizado por Pachla (2017), portanto, a proporção indicada pelo fabricante teve divergência (1 litro de aditivo para 40 litros de água na pesquisa anterior foi alterado para 1 litro de aditivo para 50 litros de água nesta pesquisa).

Além da proporção do aditivo incorporador de ar, também teve de ser adicionado aditivo plastificante ao Traço Pachla17, pois o aditivo incorporador aqui utilizado não apresentava características que melhorassem a fluidez do concreto. O cimento Portland era do tipo CPV-ARI-RS e, nesta reprodução, foi CPV-ARI.

A partir das condições expostas, o Traço Pachla17 teve uma pequena alteração. Conforme observa-se na Tabela 10, foi adicionado 0,5% de aditivo plastificante sobre a massa do aglomerante. Mesmo assim, a nomenclatura para o traço segue sendo a mesma.

Tabela 10 – Traço Pachla17 utilizado na pesquisa

Traço	Cimento (kg)	Casca (l)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
Pachla17	1	-	0,40	2,8	0,005

Fonte: elaboração própria

A partir do volume de espuma exposto na Tabela 10, foi adicionada casca de arroz em 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. A partir dessas dosagens, foi realizada uma análise verificando as massas específicas, a consistência e as resistências à compressão axial e à tração na flexão, assim, determinando qual é o percentual adequado de CA. A Tabela 11 apresenta os traços utilizados para determinar o teor de casca de arroz.

Tabela 11 – Adição de casca de arroz ao Traço Pachla17

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
Pachla17	1	-	0,40	2,8	0,005
T.10%CA*	1	0,28	0,40	2,8	0,005
T.20%CA	1	0,56	0,40	2,8	0,005
T.30%CA	1	0,84	0,40	2,8	0,005
T.40%CA	1	1,12	0,40	2,8	0,005
T.50%CA	1	1,40	0,40	2,8	0,005

* T.10%CA: Traço com adição de 10% de casca de arroz em relação à espuma.

Fonte: elaboração própria

Para reduzir o custo de produção do compósito, torná-lo economicamente viável e reduzir a retração por secagem foi adicionada areia natural de granulometria fina (item 3.3.2 deste trabalho) à mistura. Dessa forma, melhora-se a capacidade estrutural da matriz e reduz-se o consumo de cimento Portland. Para isso, foram feitas as substituições de areia em relação à massa do cimento Portland nos percentuais de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% no traço com a incorporação ideal de casca de arroz (volume ideal de casca de arroz discutido no item 4.1.6 deste trabalho). A Tabela 12 apresenta os traços estudados.

Tabela 12 – Substituição de cimento Portland por areia ao T.20%CA.

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Areia (kg)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
T. 20%CA*	1	0,56	-	0,40	2,8	0,005
T.10%Ar**	0,90	0,56	0,10	0,40	2,8	0,005
T.20%Ar	0,80	0,56	0,20	0,40	2,8	0,005
T.30%Ar	0,70	0,56	0,30	0,28	2,8	0,005
T.40%Ar	0,60	0,56	0,40	0,24	2,8	0,005
T.50%Ar	0,50	0,56	0,50	0,20	2,8	0,005

*T. 20%CA: Traço com casca de arroz que obteve o melhor desempenho – justificado no item 4.1.
 ** T. 10% Ar: Traço T.20%CA com substituição de 10% de cimento por areia.

Fonte: elaboração própria

Conforme observa-se na Tabela 12, houve redução da quantidade de água inserida na mistura em função da redução do consumo de cimento. Optou-se por manter a quantidade de água para a redução de até 20% de cimento, pois a mistura ficou com espalhamento satisfatório e ficou com acabamento adequado.

Quando ocorreu a redução de 30%, 40% e 50% do consumo de cimento, a mistura passou a ficar fluida em excesso, impossibilitando a moldagem das amostras. Além disso, após 48 horas da moldagem, ainda não foi possível realizar o desmolde. Desta maneira, optou-se por reduzir a quantidade de água mantendo o fator água/aglomerante de 0,40.

Com a definição do teor ideal de casca de arroz (CA) e de areia para produzir um compósito com baixa retração e propriedades mecânicas de acordo com a NBR 13438 (ABNT, 2013a), o ajuste final no traço a ser estudado se deu na redução da massa específica e melhora da consistência. A Figura 11 ilustra o organograma dos processos utilizados para definir o traço ideal para esta pesquisa.

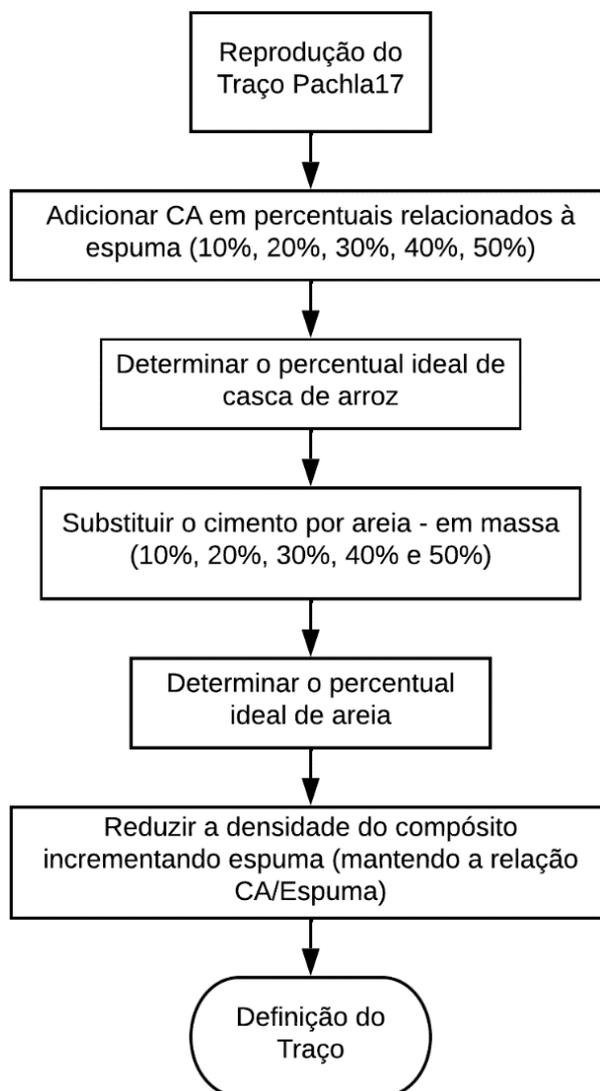


Figura 11 – Fluxograma de processos para definição do traço (Elaboração própria)

3.2.2 Método de mistura

A matriz cimentícia do compósito foi produzida com espuma pré-formada. As primeiras matérias-primas adicionadas no misturador foram os materiais sólidos, cimento e areia – na primeira fase, foi adicionado apenas o cimento (traços sem areia). Na sequência, foi adicionada a água da mistura e o plastificante, para, então, realizar a incorporação da espuma pré-formada. O último material a ser adicionado foi a casca de arroz, visto que, antes de adicioná-la, foi aferida a massa específica no estado fresco a fim de verificar se as propriedades eram similares às do Traço Pachla17. Para considerar MEF similar, foi adotado um desvio máximo permitido de 10% entre as misturas. A Figura 12 ilustra o organograma da mistura.

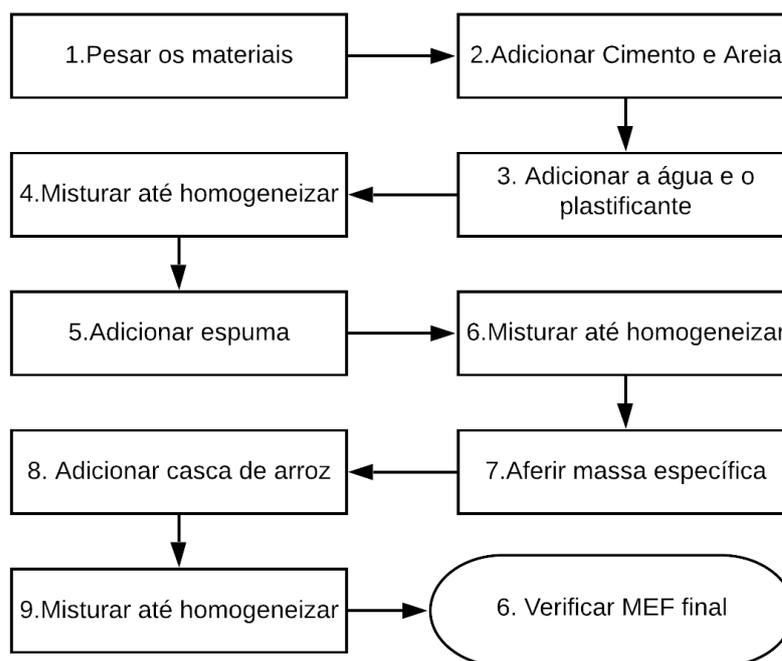


Figura 12 – Fluxograma de processos para a mistura dos materiais (Elaboração própria)

3.2.3 Consistência e fluidez

Conforme definido na revisão bibliográfica, é comum que, para caracterizar o concreto celular espumoso no estado fresco, seja aferida sua fluidez por meio do cone de Marsh. O ensaio foi realizado com 1,50 litros de amostra de concreto espumoso sendo despejado no cone de Marsh. A saída do funil foi obstruída manualmente até que todo volume fosse adicionado. Na sequência, foi colocada uma proveta sob o cone, a abertura foi liberada e o tempo de vazão foi cronometrado. O aparato está ilustrado na Figura 13.

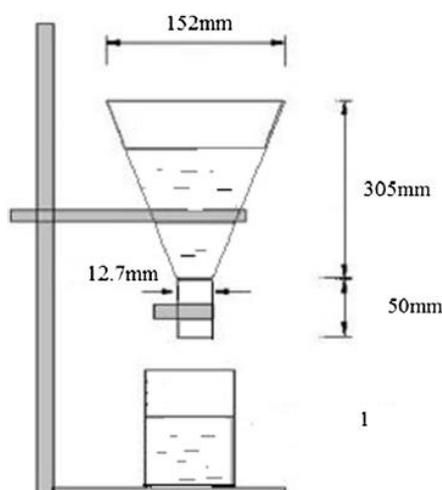


Figura 13 – Teste do cone de Marsh Modificado (RAJ; SATHYAN; MINI, 2019)

Para definir a fluidez ideal, foram testados diversos percentuais de aditivo plastificante e superplastificante. Os testes foram feitos com teores de 0,3%, 0,5%, 0,6%, 0,7%, 0,8% e 1,0% de plastificante e com 0,5% de superplastificante. Nas tentativas realizadas, foi observado que, quando utilizado mais de 0,5% de plastificante, a espuma tornava-se instável, assim, os poros ficavam maior e havia aumento da massa específica rapidamente, ficando um concreto de baixa qualidade. O superplastificante foi testado apenas em um percentual, pois sua incompatibilidade com a espuma foi verificada já no primeiro teste.

Com a impossibilidade de utilizar maiores quantidades de aditivo plastificante, ou superplastificante, a fluidez obtida para o Traço Pachla17 foi de 13%, sendo classificado, segundo Nambiar, Ramamurthy e Asce (2008), como um concreto com fluxo muito baixo que, provavelmente, dependerá de equipamentos de adensamento.

É importante salientar que não foi encontrado, na literatura, nenhum autor que afirme que o uso de concreto celular com baixa fluidez tenha seu uso inviabilizado, portanto, optou-se por manter a estabilidade da espuma pré-formada em detrimento de atingir um fluxo de dispersão médio ou alto, uma vez que o uso de adensamento também está relacionado com as peças que serão produzidas, dependendo, desta forma, do tipo de fôrma utilizado.

Ao adicionar a casca de arroz ao concreto celular espumoso, a determinação do índice de fluidez fica de difícil realização utilizando o funil de Marsh devido a sua pequena abertura, pois a casca acaba obstruindo a passagem do material e afeta o fluxo no tempo definido.

Para seguir analisando a consistência nos traços com casca de arroz, foi realizado o ensaio de índice de consistência por meio do mini-slump. Para realizar o ensaio do índice de consistência, foi utilizada a NBR 13276 (ABNT, 2016). A Figura 14 ilustra os procedimentos adotados para definir a consistência de todos os traços desenvolvidos.

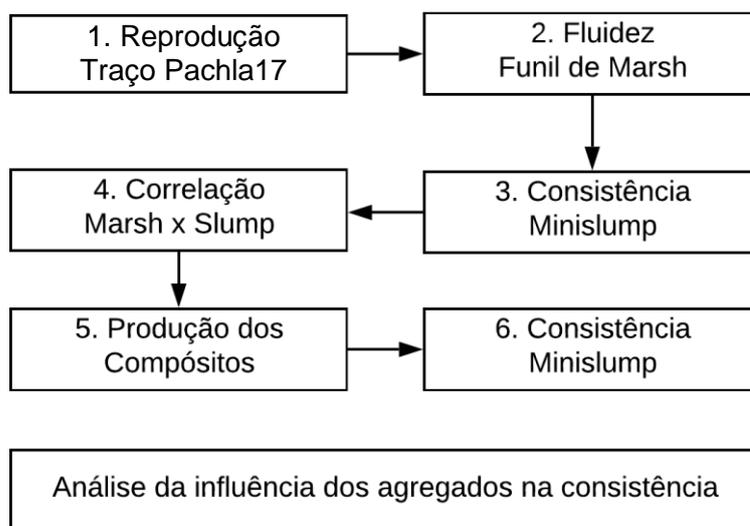


Figura 14 – Fluxograma de processos para definir a consistência (Elaboração própria)

3.2.4 Massa Específica

Para analisar se a massa específica dos compósitos se manteve estatisticamente semelhante entre concretagens, foi aferida a massa específica no estado fresco sempre após a finalização da mistura. O tempo decorrido entre a retirada da amostra e a determinação de sua massa não transcendeu 3 minutos em nenhuma análise realizada.

A massa específica no estado fresco (MEF) foi aferida de acordo com a NBR 12644 (ABNT, 2014) visando manter todos os materiais produzidos com a menor dispersão possível, uma vez que as propriedades dos compósitos são correlacionadas com sua densidade. A MEF foi obtida por meio da divisão do valor da massa do compósito pelo volume do recipiente utilizado (Equação 1).

$$MEF = \frac{m_{comp}}{V_{rec}} \cdot 1000 \quad (1)$$

Sendo:

MEF = massa específica no estado fresco (kg/m^3);

m_{comp} = massa do compósito no estado fresco (kg);

V_{rec} = volume do recipiente utilizado para aferição do volume (L).

Após definir a MEF dos materiais desenvolvidos, foi verificada a massa específica no estado endurecido (MEE) a fim de ponderar a influência da massa específica nas características dos compósitos. Para realizar a aferição da MEE, os corpos de prova foram deixados em estufa a 105°C durante 24 horas. A massa específica no estado endurecido foi obtida por meio da divisão da massa da amostra por seu volume (Equação 2).

$$MEE = \frac{m_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (2)$$

Sendo:

MEE = massa específica no estado endurecido (kg/m³);

$m_{amostra}$ = massa do compósito no estado endurecido (kg);

$V_{amostra}$ = volume do recipiente utilizado para aferição do volume (m³).

3.2.5 Moldagem das amostras

Neste item, são descritas as amostras utilizadas para definir o traço ideal do compósito e as amostras que serão utilizadas para estudar a durabilidade e definir a resistência dos materiais quando utilizados como blocos de vedação.

3.2.5.1 Amostras para definição do traço

Na definição do traço, foi determinada a resistência à compressão axial e à tração na flexão. Como não existem normas que definam os parâmetros de ensaios para obter os valores de resistência à compressão e à tração na flexão de concreto celular, foi utilizada a NBR 13279 (ABNT, 2005), que apresenta os requisitos para argamassa de revestimento.

Conforme definido nos itens 3.2.2 e 3.2.3, os agregados utilizados (areia e casca de arroz) possuem granulometria inferior a 4,75 mm, o que enquadra a mistura final do compósito com as mesmas características granulométricas das argamassas. Destarte, para definir o traço com as quantidades ideais de casca de arroz e de areia, foram moldadas amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Foram moldados oito corpos de prova prismáticos, sendo quatro para ensaio aos sete dias de cura e quatro para ensaio aos vinte e oito dias de cura. Nenhuma amostra foi adensada, visto que esse procedimento influencia negativamente nas propriedades propostas para o compósito (baixa massa específica, alta porosidade, e bom desempenho térmico e acústico).

Após a mistura, as amostras foram mantidas durante 48 horas em câmara úmida com temperatura de 23°C e umidade relativa do ar de 95%, após a desmoldagem, elas foram mantidas na câmara úmida sob as mesmas condições.

3.2.5.2 Produção de blocos de vedação

A partir da definição do traço ideal, foram realizadas duas reproduções, utilizando misturadores diferentes e datas diferentes. Esse procedimento foi feito para verificar a reprodutibilidade do Compósito analisado. Para realizar a caracterização do Compósito, foram produzidos blocos conforme os requisitos estabelecidos pela NBR 13438 (ABNT, 2013a), pois, desta forma, as amostras seguem o padrão normativo usual no Brasil.

Os blocos foram produzidos com dimensões de 650 mm x 600 mm x 70 mm. A partir dos blocos moldados, foram retirados os corpos de prova cúbicos de 70 mm x 70 mm x 70 mm para ensaios de resistência à compressão axial, conforme preconiza a NBR 13438 (ABNT, 2013b).

As dimensões dos blocos foram aferidas com uma escala metálica de resolução de 1 mm e duas réguas metálicas retilíneas. Foram medidas três dimensões tomando como referência o centro de cada retângulo, conforme ilustrado na Figura 15.

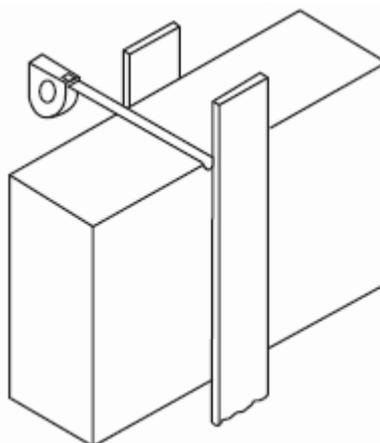


Figura 15 – Determinação das dimensões dos blocos (NBR 13.438 (ABNT, 2013a))

Com os resultados obtidos, além de confirmar a reprodutibilidade por meio de mistura realizada em equipamentos e dias distintos, foram comparadas as resistências entre as amostras extraídas dos blocos e das amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

3.2.6 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de tração na flexão foram embasados na NBR 13279 (ABNT, 2005). Foram realizadas quatro medições para cada traço em duas idades (7 e 28 dias). A Equação 3 apresenta a expressão utilizada para determinar a resistência à tração na flexão.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad (3)$$

Sendo:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

3.2.7 Resistência à compressão

Neste item, estão apresentadas as metodologias de ensaio e de cálculo de resistência à compressão axial, bem como, os ensaios feitos para definir o traço e para caracterizar os blocos de vedação.

3.2.7.1 Definição do traço

Primeiramente, a resistência à compressão axial foi aferida de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Para determinar a resistência à compressão axial, foram utilizadas as metades dos corpos de prova rompidos no ensaio de flexão, portanto, foram ensaiadas seis amostras para cada idade. A Equação 4 apresenta a expressão adotada. Para esse ensaio, foi aplicada uma carga de 500 N/s.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4)$$

Sendo:

R_c = resistência à compressão (MPa);

F_c = carga máxima aplicada (N).

A partir dos ensaios de tração na flexão e compressão axial realizados nas amostras prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, foram determinadas as resistências individuais, as resistências médias e os desvios absolutos máximos. A partir dos valores encontrados, foi definido o melhor traço.

3.2.7.2 Resistência dos blocos de vedação

A resistência à compressão axial para produção dos blocos foi realizada conforme a NBR 13440 (ABNT, 2013b). Para a extração dos CP's, foi utilizado um dispositivo de corte a seco. Após a extração, todas as superfícies foram retificadas para garantir paralelismo entre as faces e os corpos de prova foram deixados em estufa a 105°C até estabelecer uma variação de massa igual ou menor a 1 grama.

Ao estabelecer a secagem das amostras, elas foram pesadas a fim de estabelecer a MEE. Na sequência, os CP's foram deixados por 4 horas em repouso à temperatura ambiente e, após esse período, foi realizado o ensaio de compressão axial. A velocidade de carregamento à compressão foi de 0,05 MPa/s, valor este definido a partir dos requisitos impostos pela NBR 13440 (ABNT, 2013b), conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Velocidade de compressão

Classe	Velocidade do carregamento à compressão
C 12	
C 15	0,05 MPa/s
C 25	
C 45	0,10 MPa/s

Fonte: Adaptado de NBR 13440 (ABNT, 2013b)

A resistência à compressão foi determinada pela média aritmética das resistências à compressão dos corpos de prova. A resistência de cada corpo de prova foi calculada pela Equação 3.

$$f_{cb} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

Sendo:

f_{cb} = resistência à compressão do corpo de prova (MPa);

F = carga máxima suportada pelo corpo de prova (N);

A = área da seção transversal comprimida (mm²).

3.2.8 Difração de raios x

Os ensaios de difração de raios x foram realizados em ambiente com temperatura controlada e estabilizada em 25°C. O tipo de análise utilizado foi o pó total, para isso, todas as cascas analisadas foram pulverizadas após extração das amostras de concreto. O equipamento utilizado no ensaio é da marca Bruker modelo D8 Advance.

As amostras foram levemente maceradas em graal de ágata e depositadas em porta amostra padrão. Para a leitura no equipamento, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Passo: 0,015°;
- Tempo de contagem: 0,2 s;
- Ângulo de varredura: 3° a 70°;
- Voltagem: 40 kV;
- Corrente: 30 mA.

Todas as discussões acerca dos resultados obtidos a partir da difração de raios x serão focadas na identificação dos compostos químicos e análise dos compostos relacionados com a casca de arroz *in natura* e a evolução da sua degradação. As análises não serão aprofundadas no ponto de vista das reações do cimento Portland e dos elementos químicos dele, embora diversas fases apareçam nos difratogramas em função da interação fibra-matriz.

3.2.9 Fluorescência de raios x

Os ensaios de fluorescência de raios x foram realizados no mesmo laboratório dos ensaios de difração, em ambiente com temperatura estabilizada em 25°C. Para as análises de fluorescência de raios x foram preparadas pérolas fundidas a fim de evitar a leitura isolada de pontos que poderiam desconsiderar por completo a presença da fibra vegetal. A curva de calibração utilizada foi a CementQuant. O equipamento utilizado no ensaio é da marca Bruker, modelo S2 Puma.

3.2.10 Microscopia eletrônica de varredura

A Figura 16a ilustra as amostras de casca antes de serem metalizadas e a Figura 16b ilustra as amostras após a metalização com uma lâmina de ouro. Para metalização das amostras, foi utilizada uma corrente de pulverização de 50 mA e um tempo de pulverização de 90 segundos.

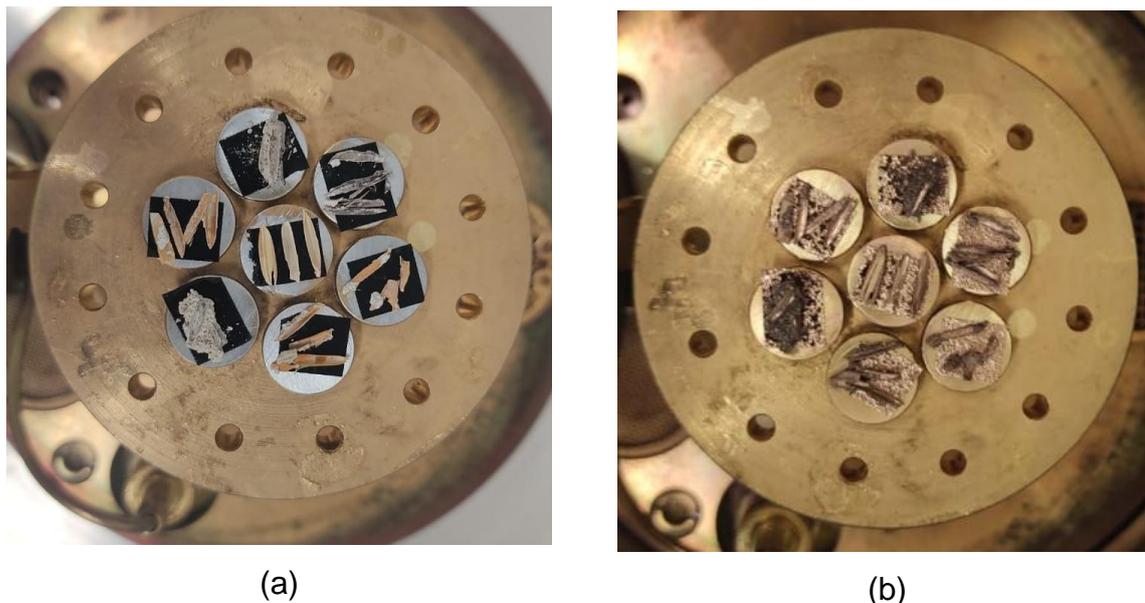


Figura 16 – Amostras da casca antes da metalização (a) e após a metalização (b)
(Elaboração própria)

Os parâmetros das análises de microscopia foram definidos a partir dos ensaios realizados em pesquisas anteriores, pois sabe-se que, para garantir qualidade às imagens, são necessárias adaptações no momento do ensaio. Inicialmente, foram geradas imagens de acordo com os parâmetros utilizados por (JAUBERTHIE *et al.*, 2003), tais parâmetros já foram descritos no item 2.4.1.4 deste trabalho e são apresentados junto às imagens geradas nas análises de durabilidade que constam no Capítulo 5.

3.2.11 Análise de durabilidade

As análises de durabilidade foram realizadas visando degradar as parcelas orgânicas da casca de arroz. Para a análise completa dos resultados, após os ensaios de durabilidade, os compósitos foram caracterizados por meio de:

- Ensaio de tração na flexão em três pontos e de compressão axial de prismas e cubos para verificar a evolução do comportamento mecânico do compósito;
- Difração de raios X, para possibilitar a determinação qualitativa e quantitativa das fases mineralógicas;
- Identificação da composição química a partir de fluorescência de raios x para validar as análises de DRX e quantificar os elementos químicos com maior precisão; e

- Microscopia eletrônica de varredura a fim de visualizar as condições das fibras vegetais e quantificar os possíveis componentes químicos originados ou modificados (EDS).

3.2.11.1 Deterioração da Hemicelulose e da Lignina

Segundo Pacheco e Jalali (2011), o tratamento alcalino é o método mais comum usado para remover impurezas orgânicas, bem como, hemicelulose de massa molar baixa. Soluções aquosas de hidróxido de sódio são usadas para remover constituintes não celulósicos como a lignina e a hemicelulose (SIXTA *et al.*, 2004). Em função dessa característica, os compósitos foram imersos em solução aquosa de hidróxido de sódio e água deionizada por períodos de 42 e 56 dias contados a partir do vigésimo oitavo dia de cura em câmara úmida.

3.2.11.2 Deterioração da Celulose

A celulose é degradada ou oxidada em meio ácido e na presença de fungos e bactérias por clivagem das ligações glicosídicas. Além disso, temperaturas elevadas também geram degradação da celulose levando a produtos gasosos e carvão (VO; NAVARD, 2016). Em face dessa característica, a aceleração da deterioração da celulose se deu por introdução de energia térmica e química em amostras do compósito desenvolvido.

Para o tratamento térmico, os compósitos foram submetidos à temperatura de 100°C por 24 horas, e 300°C e 650°C durante 60 minutos. A temperatura foi definida a partir de análise termogravimétrica realizada por Carvalho (2015), em que se verificou que a casca de arroz possui três regiões de variação de massa.

A primeira região compreendida entre 40°C e 150°C gera a perda de água, por isso a utilização dos 100°C. A segunda região compreendida entre 215°C e 350°C representa a eliminação dos compostos orgânicos voláteis presente no material, por isso a utilização dos 300°C. E a terceira região compreendida entre 350°C e 690°C gera a combustão do carbono e calcinação da fibra, por isso a utilização dos 650°C.

Como não existem normas nacionais específicas para avaliar a resistência de misturas de concreto à invasão de ácido sulfúrico, optou-se por referenciar a ASTM C267:2020 para o teste de durabilidade do compósito frente ao ataque ácido.

A ASTM C267:2020 define o método de teste padrão para a resistência química de argamassas, rejuntas e concreto polimérico. Portanto, para o tratamento químico, os compósitos foram submetidos a uma solução aquosa feita com água deionizada e ácido sulfúrico. A solução utilizada possuía uma concentração de 3% e pH 1. As amostras ficaram imersas nessa solução por períodos de duas semanas, durante quatro fases, resultando em um tempo total de ensaio de oito semanas (56 dias), mesmo procedimento adotado por Joorabchian (2010).

3.2.11.3 Envelhecimento Natural

Os ensaios de envelhecimento natural foram realizados com base na metodologia utilizada por Pimentel (2004). A fim de verificar a durabilidade dos compósitos, foi realizado envelhecimento natural com duas metodologias diferentes. Em uma delas, as amostras foram expostas em ambiente externo por um período de 365 dias.

O estudo foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale, cuja localização geográfica é latitude: 30°04'03.5"S e longitude: 51°07'14.6"W e, aproximadamente, 10 metros de altitude. A temperatura média é de 19,5°C e a intensidade pluviométrica média é de 1397 mm (CLIMATE-DATA.ORG, 2020). A Figura 17 ilustra a condição de armazenamento das amostras em ambiente externo.



Figura 17 – Amostras submetidas a intempéries naturais
(Elaboração própria)

A segunda metodologia utilizada para analisar a durabilidade dos compósitos após o envelhecimento natural foi armazenar as amostras dentro do laboratório, em um ambiente protegido de intempéries externas. As amostras ficaram sob essa condição por um período de 365 dias, assim como as expostas ao ambiente externo, o que possibilitou realizar uma comparação entre os dois tipos de ambientes a que os compósitos podem estar expostos. A Figura 18 ilustra o armazenamento das amostras em ambiente interno.



Figura 18 – Bancadas para ensaio de durabilidade interno
(Elaboração própria)

3.2.11.4 Envelhecimento Acelerado

O envelhecimento acelerado foi realizado por meio da imersão das amostras em água com temperatura de $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 56 dias. O equipamento utilizado para o controle da temperatura é ilustrado na Figura 19. Essa metodologia seguiu o exposto na pesquisa de Pimentel (2004).



Figura 19 – Controle de temperatura das amostras
(Elaboração própria)

3.3 MATERIAIS

Neste tópico, estão apresentados os materiais utilizados para produção do compósito. Os materiais estão ilustrados sem indicar marca utilizada e terão suas principais características físicas e químicas descritas.

3.3.1 Cimento Portland

Como o uso previsto dos compósitos é na indústria de pré-moldados, principalmente na fabricação de blocos e painéis, utilizou-se CP V ARI a fim de possibilitar o ganho acelerado de resistência.

De acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2020), o CP V possui os limites de material carbonático definidos entre 0 e 10%, e o restante – de 90 a 100% – é de clínquer e gipsita. Como verificado por Jones e McCarthy (2005) e Koh, Lee Yeoh (2006), a adição de alguns materiais pozolânicos na produção de concreto celular eleva sua retração, portanto, além de propiciar o desmolde e o ganho de resistência mais rápido, o uso de CP V ARI possibilita menor retração.

3.3.2 Areia natural

A incorporação de areia mineral ao compósito foi realizada para reduzir custo de produção. Além disso, buscou-se reduzir a retração com adição da areia, visto que, conforme Jones e McCarthy (2005), ela auxilia na estruturação do material e reduz a retração por secagem. A areia utilizada é natural e sua curva granulométrica está ilustrada na Figura 20.

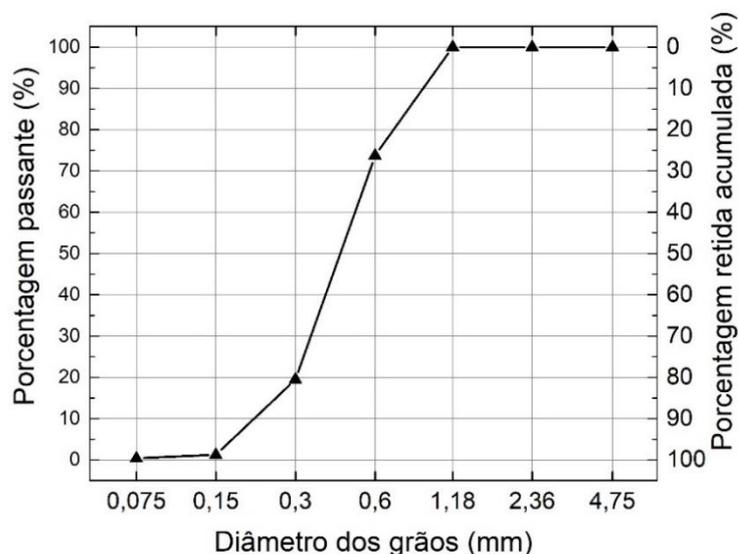


Figura 20 – Curva granulométrica da areia (Elaboração própria)

Como pode ser observado na Figura 20, a areia não apresenta material retido nas peneiras de malha com abertura entre 4,75 mm e 1,18 mm. Portanto, pode-se afirmar que a areia é caracterizada como fina e possui uma granulometria uniforme.

Para a produção dos compósitos propostos, essas características são positivas. Devido à baixa dimensão dos grãos, ela apresenta maior área superficial que as areias médias e grossas, o que, de acordo com Ramamurthy e Narayanan (2000), é um fator positivo, visto que aumenta a capacidade de adsorção do agregado e, por conseguinte, reduz a retração por secagem. A análise do percentual retido para cada malha pode ser melhor observada na Figura 21, na qual está apresentada a curva discreta da granulometria da areia.

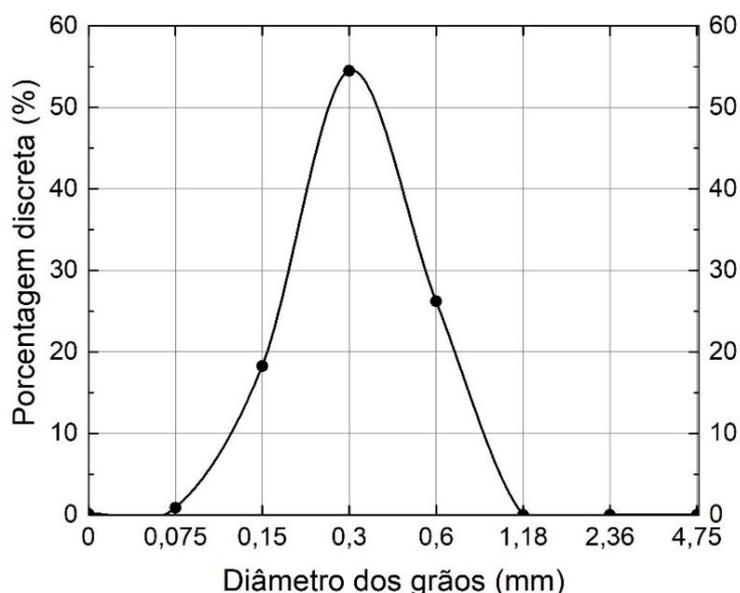


Figura 21 – Curva granulométrica discreta da areia (Elaboração própria)

Por meio da análise discreta da composição granulométrica da areia utilizada, verifica-se que 54,50% dos grãos ficaram retidos na peneira de malha de abertura 0,30 mm. Ao considerar a faixa de abertura entre 0,15 mm e 0,60 mm, observa-se que 98,98% dos grãos estão retidos entre essas aberturas de malha, comprovando a característica de curva granulométrica uniforme.

A massa unitária da areia utilizada foi aferida de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006) e foi estabelecida em 1,74 g/cm³. A massa específica da areia seca em estufa por 24 horas a 105°C foi aferida em 2,54 g/cm³, enquanto a massa específica da areia saturada superfície seca foi aferida em 2,57 g/cm³, gerando, portanto, uma massa específica de 2,62 g/cm³. As massas específicas foram definidas a partir da NBR NM 52 (ABNT, 2009).

3.3.3 Casca do Arroz

A casca do arroz foi utilizada *in natura* conforme ilustrado na Figura 22. Ela foi armazenada em ambiente seco e fechado. Não foi realizado qualquer tipo de tratamento físico ou químico para sua incorporação na mistura.



Figura 22 – Casca de arroz
(Elaboração própria)

3.3.3.1 Formato e granulometria da casca de arroz

A casca de arroz possui formato alongado, sendo que, em duas direções, ela apresenta pequenas dimensões, possibilitando a passagem em peneira de 1,18 mm de abertura, já na terceira direção, ela apresenta a maior dimensão, o que acarreta a sua retenção na abertura de malha de 1,18 mm. A Figura 23 ilustra a curva granulométrica da casca de arroz utilizada.

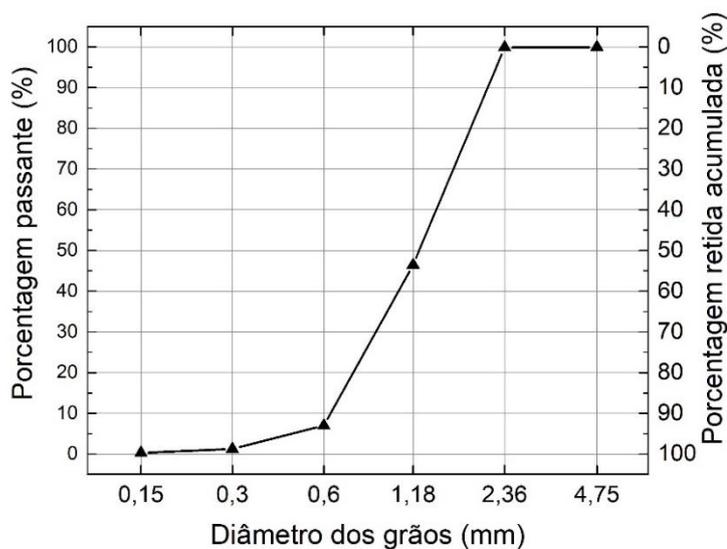


Figura 23 – Curva granulométrica da casca de arroz
(Elaboração própria)

Como pode ser observado na Figura 23, a casca de arroz apresenta granulometria uniforme, tal condição fica mais clara quando observada a curva granulométrica discreta (Figura 24). Ao analisar a curva granulométrica discreta, pode-se verificar que 92,87% do material fica retido nas peneiras de abertura de 1,18 mm e 2,36 mm.

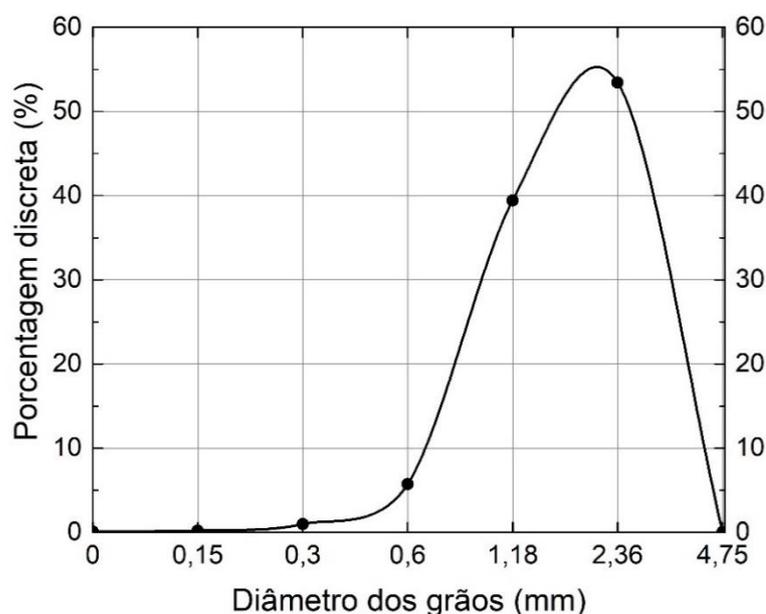


Figura 24 – Curva granulométrica discreta da casca de arroz (Elaboração própria)

A parcela da casca retida nas peneiras de 2,36 mm de abertura é muito semelhante à da casca retida na peneira de 1,18 mm. O percentual de 53,44% da casca retida na peneira 2,36 mm foi restringido pela dimensão maior na casca, enquanto os 39,43% retidos na peneira 1,18 mm foram passantes na malha 2,36 mm pelas dimensões menores.

Na Figura 25, são ilustrados os volumes de casca retidos em cada abertura de malha. Pode-se observar que, na peneira de abertura de 4,75 mm, houve pequenos resíduos de palha do arroz, provavelmente oriundos do beneficiamento do grão, o percentual retido desses resíduos foi de 0,03%. Nas aberturas de 2,36 mm e 1,18 mm, verifica-se que a casca possui as mesmas características. Nas peneiras de 0,60 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e no fundo, verifica-se que há presença de pó com variações granulométricas. Provavelmente, esse pó seja proveniente do beneficiamento do grão ou do transporte destes materiais.

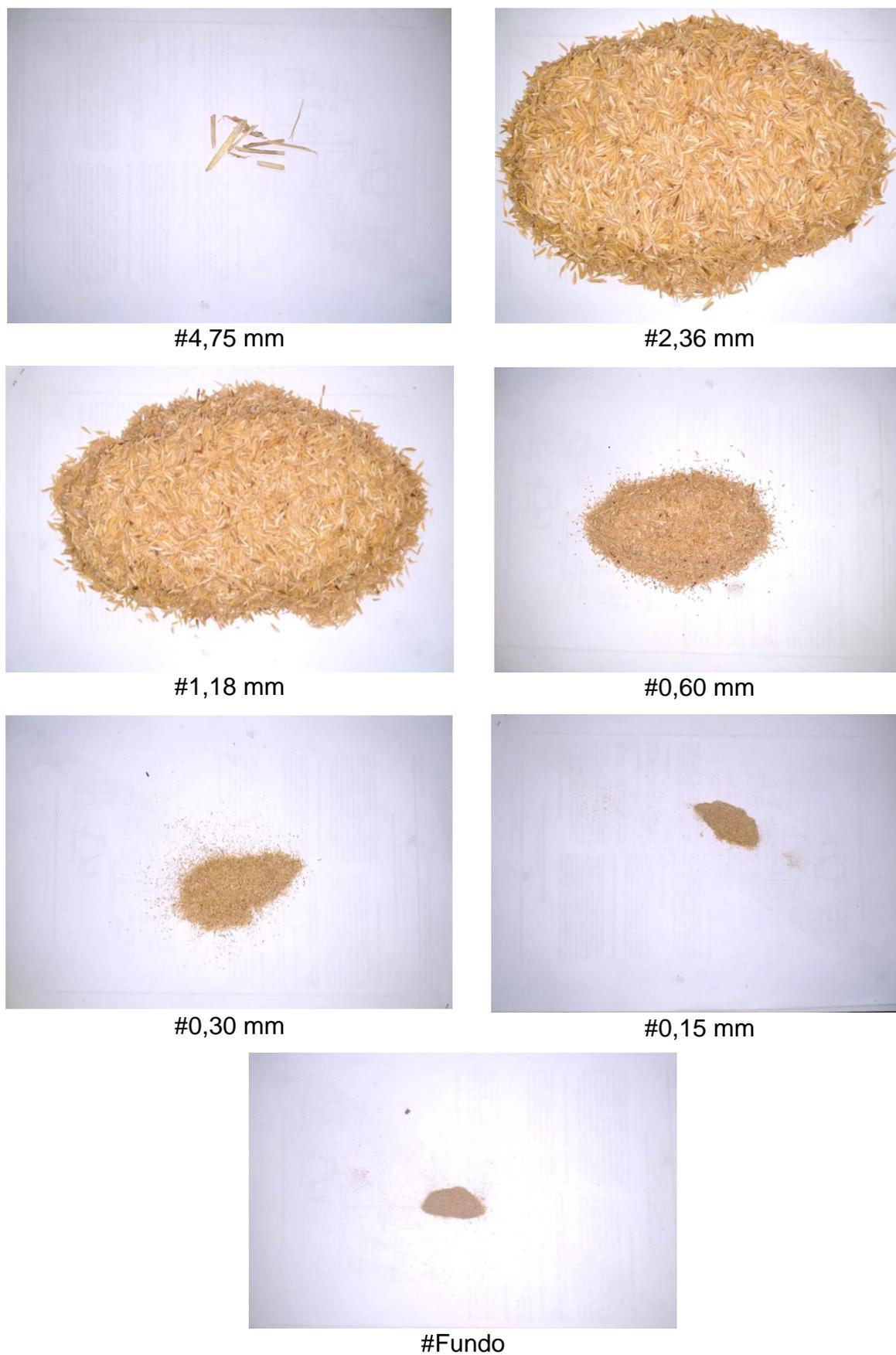


Figura 25 – Característica da casca de arroz retida em cada peneira
(Elaboração própria)

3.3.3.1 Difração de raios x

Para determinar a composição química da casca de arroz *in natura*, foi realizado primeiramente análise de difração de raios x (*Figura 26*).

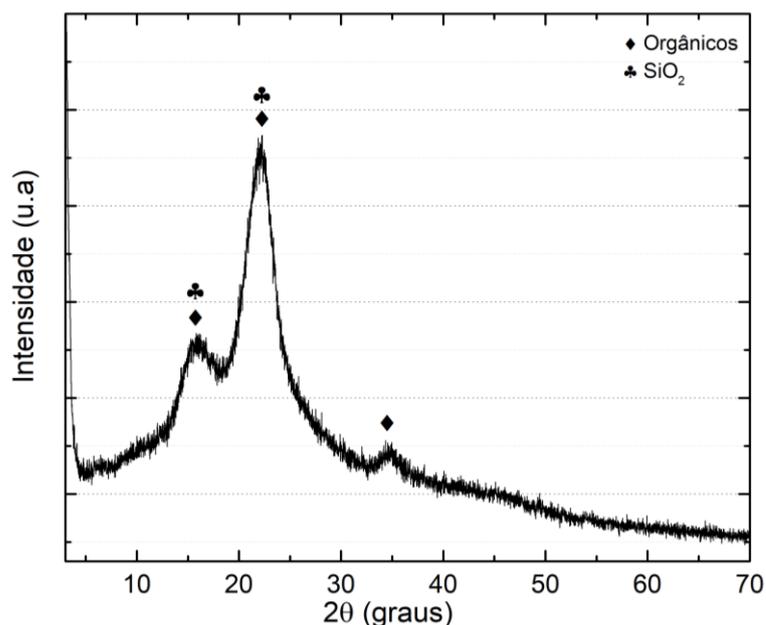


Figura 26 – Difratoograma da casca de arroz *in natura* (Elaboração própria)

Conforme verifica-se na Figura 26, existem três picos relevantes, sendo eles em 15,8°, 22,3° e 34,7°, aproximadamente. De acordo com Zainuddin *et al.* (2013), esses picos indicam a presença de celulose I, o que também foi verificado em análise própria, na qual se constatou que os picos de, aproximadamente, 15°, 22 a 23° e 34° representam celulose (C₆H₁₀O₅) referente ao ICDD #00-060-1502.

Como referenciado por Reyes *et al.* (1998), Kuhad e Singh (1993) e Carvalho (2015), a matéria orgânica da casca de arroz também possui lignina e hemicelulose. Como esses polímeros naturais possuem variações de fórmulas químicas e várias delas coincidem com os picos identificados em, aproximadamente, 15°, 22 a 23° e 34°, os difratogramas serão limitados a identificar essas regiões com ascendência significativa da linha de base como materiais “Orgânicos”.

Além da presença dos materiais orgânicos descritos acima, também foi constatada a presença de materiais silicosos (SiO₂), como o dióxido de silício (ICDD #00-034-0717) e a cristobalita (ICDD #96-900-8227). O dióxido de silício teve boa compatibilidade estabelecida nos halos amorfos de 15° e 22,3°, e a cristobalita teve boa compatibilidade estabelecida no halo de 22,3°.

Como os materiais silicosos tiveram correspondência nos mesmos picos que corresponderam com os materiais orgânicos, verificou-se a necessidade de realizar ensaios de fluorescência de raios x e de espectroscopia por energia dispersiva para comprovar a presença de dióxido de silício e de silício, uma vez que a existência dos materiais orgânicos é evidente.

3.3.3.2 Fluorescência de raios x

Para quantificar de maneira mais precisa os compostos químicos presentes na casca de arroz *in natura*, foi realizado ensaio de fluorescência de raios x. A Tabela 14 apresenta a composição encontrada.

Tabela 14 – Composição química da casca de arroz *in natura*

Composição Química	Peso
SiO ₂	12,386 %
Al ₂ O ₃	0,000 %
Fe ₂ O ₃	0,010 %
CaO	0,157 %
MgO	0,022 %
SO ₃	0,082 %
Na ₂ O	0,018 %
K ₂ O	0,003 %
P ₂ O ₅	0,056 %
TiO ₂	0,003 %
Cr ₂ O ₃	0,000 %
Mn ₂ O ₃	0,034 %
ZnO	0,002 %
SrO	0,000 %

Fonte: elaboração própria

Como o ensaio não consegue identificar compostos orgânicos, que são maioria no caso da fibra natural, observa-se que o dióxido de silício é o material mais abundante. O percentual de 12,38% para o dióxido de silício observado no ensaio de fluorescência de raios x também valida a identificação dos picos no difratograma da casca de arroz (*Figura 26*). A quantificação dos compostos químicos é confirmada, uma vez que os percentuais ficam próximos em ambos os ensaios.

A presença de silício ilustra o potencial do uso da fibra em materiais cimentícios e comprova que os picos observados em 15° e 22,3° também representam a presença de sílica. Como observado na *Figura 26*, a ascensão linha de base compreendida

entre 10° e 40° ainda indica que o óxido de silício pode ser amorfo. A compreensão de que a afirmação de que ele pode ser amorfo e não de que ele é amorfo se dá pelo fato de que a ascensão da linha de base pode ser causada também pelos elementos orgânicos identificados em 15° , $22,3^\circ$ e 34° .

Os demais óxidos identificados têm percentuais muito baixos, todos próximos de zero e, provavelmente, são oriundos de impurezas do próprio equipamento ou do porta amostras. O único óxido identificado, além do óxido de silício, que poderia existir em pequenas quantidades na casca de arroz, é o óxido de cálcio e o óxido de potássio. A provável origem do óxido de cálcio é do grão de arroz, que apresenta cálcio em sua composição e pode gerar resíduos na casca após o seu beneficiamento. O óxido de potássio pode ter origem do solo ou de fertilizantes utilizados.

3.3.3.3 Microscopia eletrônica de varredura

Para estudar a microestrutura da casca de arroz, foram geradas imagens da superfície externa, da superfície interna e da seção transversal interna dela. A Figura 27 ilustra, à esquerda, a superfície externa da casca e, à direita, a superfície interna em ampliações de 200 e de 1200 vezes.

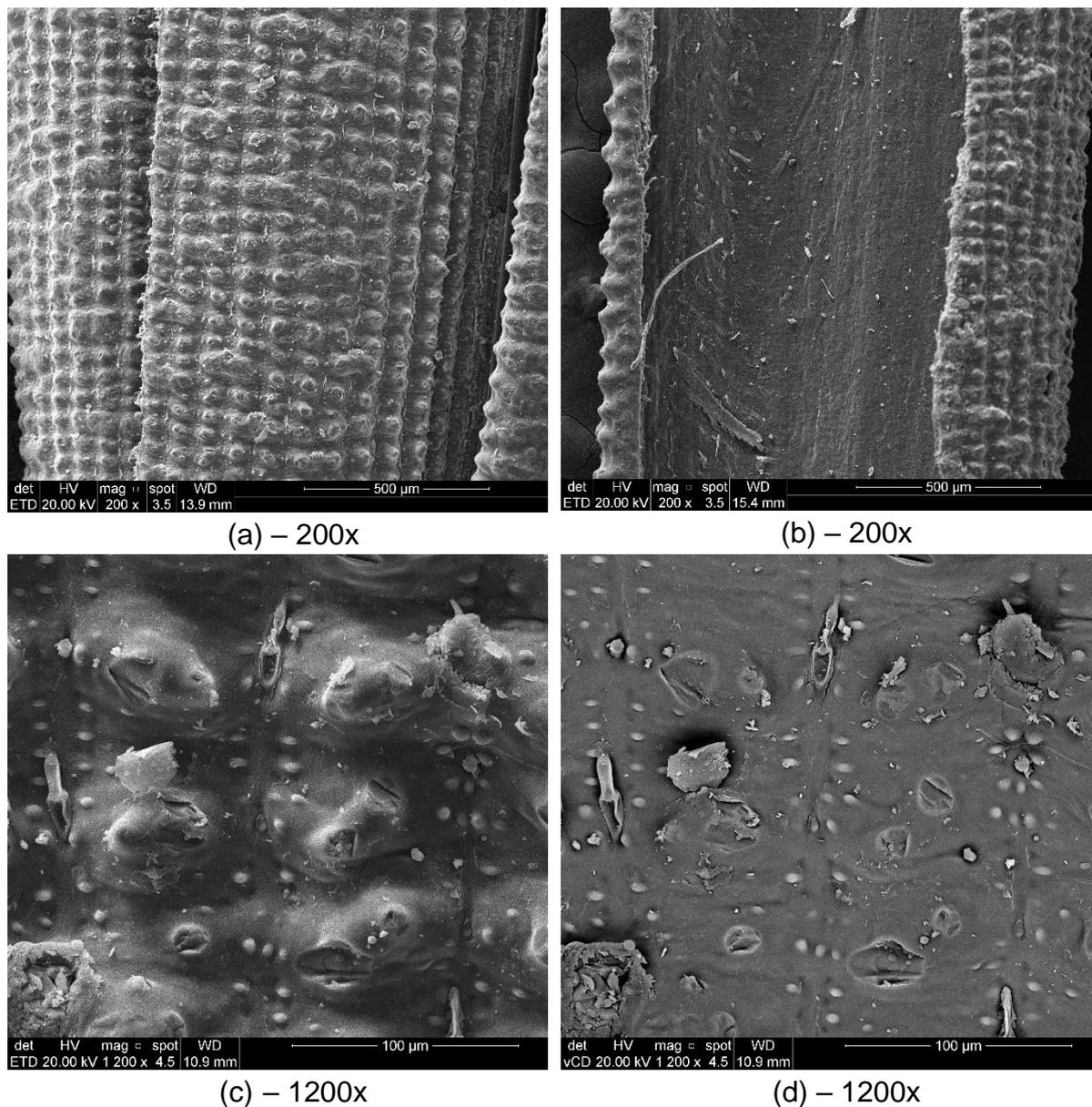
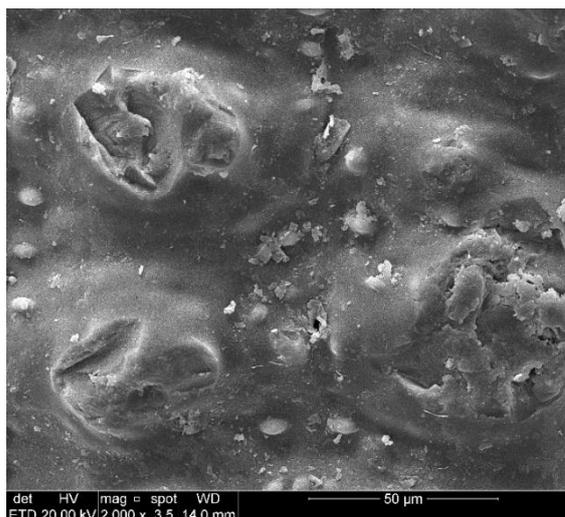
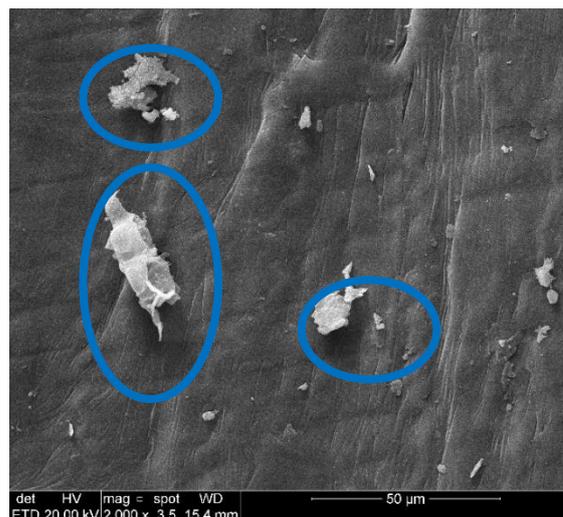


Figura 27 – Análise da superfície externa da casca de arroz com ampliação de 200x (a) e ampliação de 1200x (c) e da superfície interna com ampliação de 200x (b) e ampliação de 1200x (d)
(Elaboração própria)

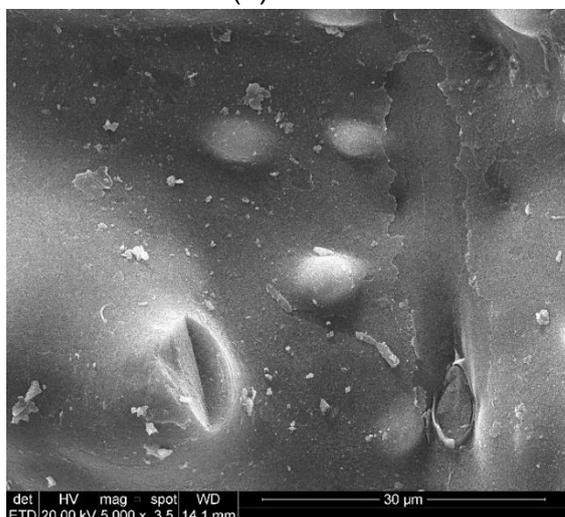
Além das ampliações de 200 vezes e de 1200 vezes apresentadas na Figura 27, foram geradas ampliações de 2000 e de 5000 vezes que estão ilustradas na Figura 28.



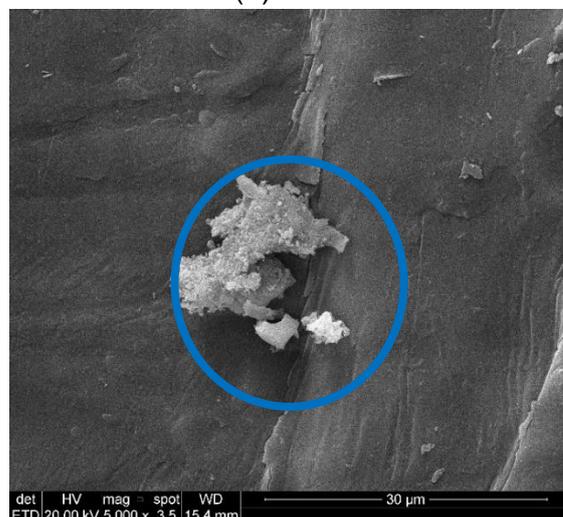
(a) – 2000x



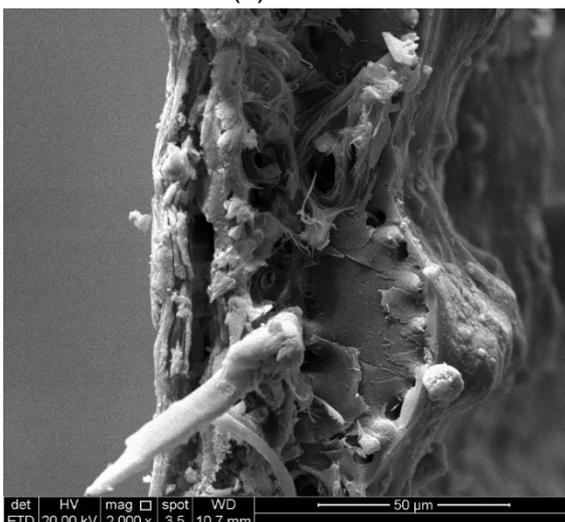
(b) – 2000x



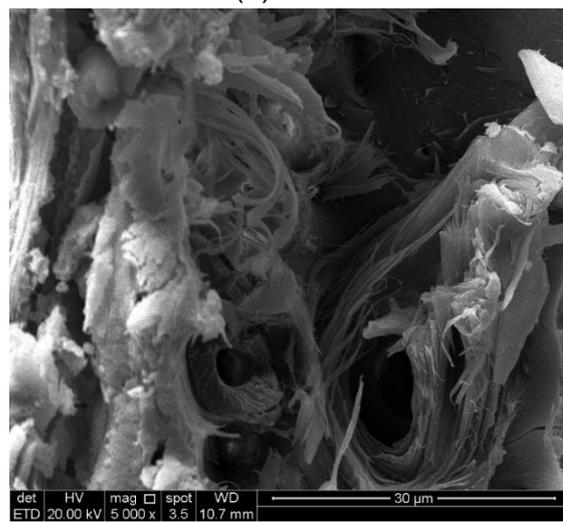
(c) – 5000x



(d) – 5000x



(e) – 2000x



(f) – 5000x

Figura 28 – Análise da superfície externa da casca de arroz com ampliação de 2000x (a) e de 5000x (c), da superfície interna com ampliação de 2000x (b) e de 5000x (d) e da seção transversal interna com ampliação de 2000x (e) e de 5000x (f) (Elaboração própria)

Analisando as imagens ilustradas na Figura 27 e na Figura 28, verifica-se que a superfície externa apresenta rugosidade superior à da superfície interna. Além disso, é possível notar que ambas as superfícies apresentam pequenas partículas, que devem ser decorrentes dos processos do cultivo ou do beneficiamento do arroz e ficam impregnadas às fibras. A composição química destas partículas (identificadas em azul na Figura 28) está apresentada no Item 3.3.3.4 (Tabela 18).

A Figura 28 também apresenta a estrutura interna da casca, em que ela foi partida ao meio e foram geradas imagens com ampliação de 2000x e 5000x para fazer uma análise de sua composição química (Item 3.3.3.4 – Tabela 17). Visualmente, com as imagens apresentadas, é possível constatar que a casca possui estrutura interna fibrosa e tem poucos vazios internos, mesmo tendo passado por processos de secagem durante o beneficiamento do arroz.

3.3.3.4 Espectroscopia por energia dispersiva

Após as análises visuais apresentadas no Item 3.3.3.3 (Microscopia eletrônica de varredura), foram analisadas as composições químicas da casca de arroz a partir de espectroscopia por energia dispersiva (EDS). Para identificar os elementos químicos presentes na casca e entender em qual parte dela eles estão presentes, foram realizadas leituras na superfície externa, na superfície interna e na estrutura interna da casca de arroz. A Figura 29 ilustra a superfície externa analisada e as demarcações em branco a área em que foi realizada a leitura.

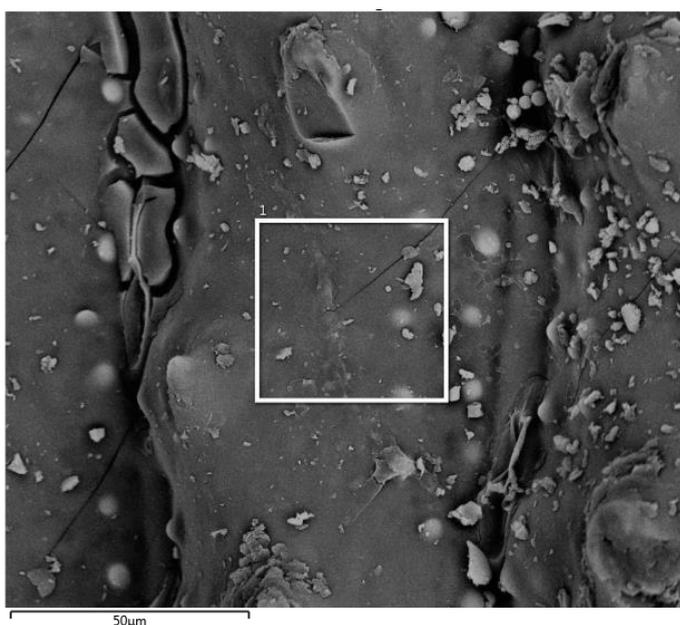


Figura 29 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz *in natura* (Elaboração própria)

A composição química da área ilustrada na Figura 29 está apresentada na Tabela 15. Os elementos identificados e quantificados são o silício, o oxigênio e o carbono, indicando que a presença de silício e oxigênio é bastante relevante na superfície da fibra, ficando com percentuais bastante acima do carbono.

Tabela 15 – Composição química da superfície externa da casca de arroz *in natura* obtida a partir de EDS

Espectro	1
C	3,72%
O	52,39%
Si	43,89%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Como pode-se observar, o silício apresenta mais de 40% da composição da superfície externa, sendo este um percentual bastante relevante e acima dos valores identificados no ensaio de fluorescência de raios x (12,38% para o dióxido de silício).

A Figura 30 ilustra a área da superfície interna em que foi realizada a identificação dos elementos químicos a partir de EDS. Novamente, foram identificados o silício, o oxigênio e o carbono.

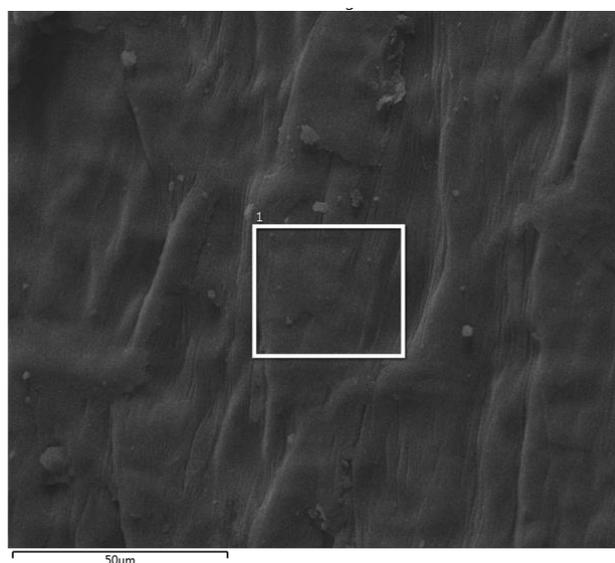


Figura 30 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz *in natura* (Elaboração própria)

O percentual em peso dos elementos químicos identificados na Figura 30 está apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Composição química da superfície interna da casca de arroz *in natura* obtida a partir de EDS

Espectro	1
C	38,70%
O	36,91%
Si	24,39%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Assim como na superfície externa, também foi identificado um percentual superior de silício na superfície interna quando comparado aos valores obtidos nos ensaios de difração e fluorescência de raios x.

Para entender melhor a variação de silício identificada nas leituras a partir de fluorescência e difração de raios x com a leitura realizada por espectroscopia por energia dispersiva, a casca foi seccionada e, então, foram realizadas três leituras na sua estrutura interna. A Figura 31 apresenta seção transversal interna da casca com ampliação de 2000x em que foram demarcadas 3 áreas para leitura.

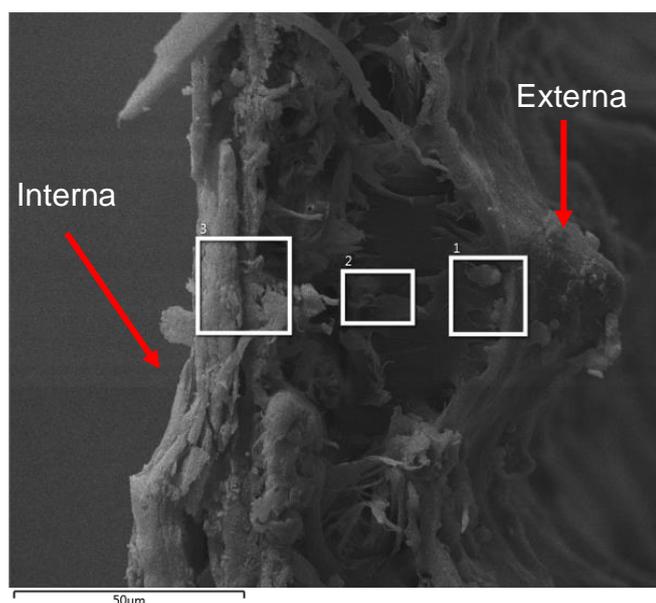


Figura 31 – Microanálise da estrutura interna da casca de arroz *in natura* (Elaboração própria)

A demarcação das três áreas ilustradas na *Figura 31* foi realizada visando identificar e quantificar os elementos químicos existentes na proximidade com a superfície externa (área 1), com a estrutura interna (área 2) e com a superfície interna (área 3). Os percentuais, em massa, são apresentados na *Tabela 17*.

Tabela 17 – Composição química da estrutura interna casca de arroz *in natura* obtida a partir de EDS

Espectro	1	2	3
C	44,19%	52,87%	50,24%
O	39,87%	45,74%	41,50%
Si	15,93%	1,39%	7,92%
Ca	-	-	0,34%
Total	100,00%	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Conforme pode ser verificado na Tabela 17, os percentuais de silício variam significativamente entre as regiões nas quais foram aferidas as leituras. Nas proximidades da superfície externa, foram identificadas as maiores quantidades de silício, os valores são significativamente diferentes da leitura apresentada na Tabela 15, porque a área demarcada compõe uma grande região interna da casca.

A área 2, que está inteiramente compreendida dentro da seção transversal da casca, apresenta a menor quantidade de silício. Isso é um indicativo de que a origem do silício na casca é de algum fator externo, como momento da secagem dos grãos, transporte, solo ou ventos que incidem na planta.

A área 3, que representa a parte interna da casca e a superfície interna, apresenta valores intermediários de silício quando comparada com as áreas 1 e 2, os valores diferem significativamente da Tabela 16 porque, nesta análise, grande parte da região estudada está na estrutura interna da casca.

Os fatos expostos acima indicam que o óxido de silício identificado nos ensaios de difração de raios x e de fluorescência de raios x é oriundo das superfícies da casca de arroz e que a parte interna tem quantidades muito baixas (próximas de 1%). Por esta razão, os quantitativos apresentados variam significativamente a depender do ensaio utilizado, e, nas análises de difração e fluorescência, os percentuais aferidos foram menores.

Em relação ao pequeno percentual de cálcio identificado na superfície interna da casca de arroz (área 3), é importante destacar que, possivelmente, ele é residual do grão de arroz, que ali estava em contato. De qualquer forma, os valores encontrados na leitura de espectroscopia foram tão pequenos que são praticamente irrelevantes, mas justificam o percentual de óxido de cálcio encontrado no ensaio de fluorescência de raios x.

Encerradas as análises da casca em sua superfície interna, externa e na sua estrutura interna, foram analisadas as partículas identificadas nas imagens estudadas anteriormente para identificar sua composição. A Figura 32 ilustra uma dessas partículas com ampliação de 2000x.

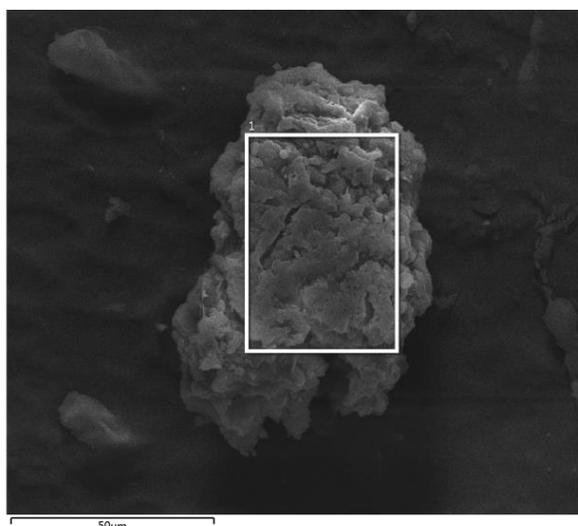


Figura 32 – Microanálise de partículas identificadas nas superfícies da casca (Elaboração própria)

Os elementos químicos identificados e quantificados na área 1 ilustrada na Figura 32 estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Composição química das partículas identificadas nas superfícies da casca de arroz obtida a partir de EDS

Espectro	1
O	77,91%
Mg	3,64%
Si	8,18%
K	10,27%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

A composição química das partículas identificadas na superfície da casca, indicou a presença de potássio e de magnésio e não apresentou quantidades de carbono (Tabela 18). Essa leitura indica que as partículas não são de origem orgânica e não são parte da estrutura da casca, uma vez que não apresentam carbono em sua composição. O potássio e o magnésio, provavelmente, são originados do solo. Eles podem ser colocados na casca durante cultivo (pelo vento ou pela água), durante a colheita e/ou durante o transporte. A pequena quantidade identificada pode ser ocasionada devido a limpeza da fibra durante o beneficiamento.

3.3.4 Aditivo Incorporador de Ar

O aditivo incorporador de ar utilizado é biodegradável neutro. Sua densidade a uma temperatura de 25°C é de 1,026 g/mL, seu pH é de 7,34 e não possui odor. O aditivo foi armazenado em local seco, arejado em temperatura ambiente, protegido de luz solar direta e ficou sobre estrados.

3.3.5 Aditivo Plastificante

O aditivo plastificante utilizado é formado por uma mistura balanceada de éteres orgânicos, com densidade que varia entre 1,05 e 1,10 g/cm³. O uso de plastificante nesta mistura ocorreu para limitar o fator água/cimento em 0,50, desta forma, sua dosagem foi realizada para atingir consistência adequada e não elevar a relação água/cimento.

3.3.6 Espuma

O gerador de espuma utilizado possui uma tensão de alimentação de 220 V, uma tensão de comando de 24 VCC e tem uma capacidade de vazão de 50 litros por minuto. A produção da espuma se deu com uma pressão de trabalho de 2,5 bar e uma pressão do compressor de 120 psi. O fornecimento da pressão foi realizado a partir de um compressor central.

A produção da espuma foi realizada com a diluição do aditivo incorporador de ar em água, a dosagem utilizada foi de 1 litro de aditivo para 50 litros de água. A densidade da espuma utilizada foi de, aproximadamente, 50 g/L, em função das condições ambientais no dia das concretagens, a densidade da espuma pode sofrer pequenas variações. A Figura 33 ilustra a espuma produzida.



Figura 33 – Espuma pré-formada
(Elaboração própria)

4. DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Neste capítulo, estão apresentados os resultados obtidos durante a definição dos traços a serem utilizados. Todas as discussões acerca das propriedades de cada traço foram realizadas buscando utilizar ilustração de fotos e gráficos.

4.1 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CASCA DE ARROZ

Neste item, foram apresentados os estudos realizados a fim de determinar o percentual de casca de arroz a ser incorporado no concreto leve. Para a definição da quantidade de CA considerada ideal nesta pesquisa, foram levados em conta cinco parâmetros, sendo eles:

- Massa específica no estado endurecido;
- Consistência – mini-slump;
- Análise visual;
- Resistência à compressão; e
- Resistência à tração na flexão em três pontos.

Para definir o melhor traço para sequência da pesquisa, os parâmetros estudados serão classificados com uma nota de 1 a 5 por meio de ponderações nos parâmetros quantitativos (resistência, massa específica e consistência) e com notas de 1 a 5 atribuídas pelo parâmetro qualitativo (análise visual). As análises quantitativas consistirão em determinar o melhor e o pior resultado obtido atribuindo nota 5 para o melhor e nota 1 para o pior e as demais notas serão definidas por interpolação linear.

4.1.1 Análise das massas específicas

Entre a finalização da mistura e o processo de moldagem, foi aferida a massa específica no estado fresco (MEF) a fim de registrar possíveis variações entre os traços, uma vez que a espuma pré-formada apresenta grande instabilidade em função de variações de temperatura e da umidade relativa do ar. Passados 27 dias de cura em câmara úmida e 1 dia em estufa com temperatura de 100°C, as amostras foram novamente pesadas antes de realizar os ensaios mecânicos. A Figura 34 ilustra a relação entre a MEF e a MEE (Figura 34).

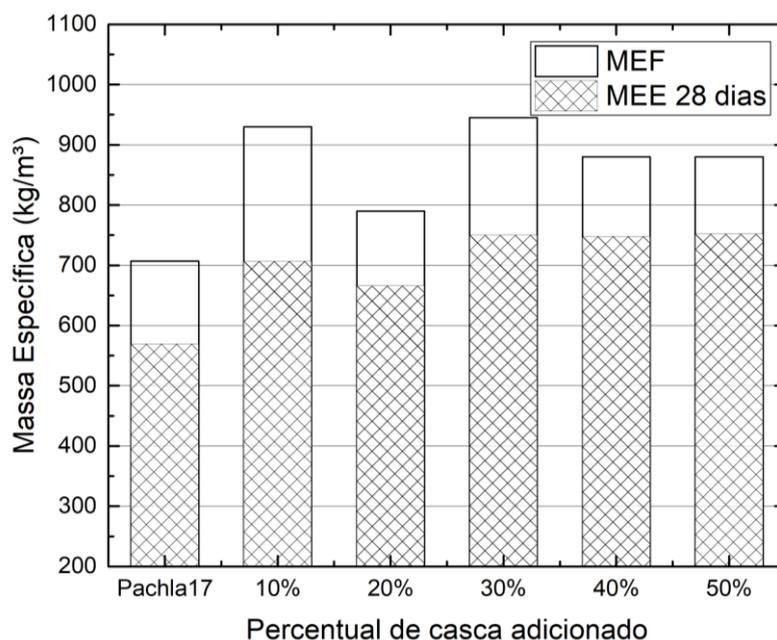


Figura 34 – Comparação MEF e MEE 28 dias dos traços com CA (Elaboração Própria)

Conforme pode-se observar na Figura 34, as amostras apresentaram redução de massa específica após o processo de cura e a secagem em estufa. A maior perda de massa ocorreu no T.10%CA com uma redução de 23,98% e a menor perda de massa ocorreu no T.50%CA com uma redução de 14,55% em relação à MEF. O valor médio de todas as reduções dos traços com CA foi de 18,21%. As elevadas reduções de massa após a secagem podem ser atribuídas à alta porosidade dos compósitos e da matriz cimentícia que acaba gerando facilidade de reter a água da mistura e, posteriormente, em perdê-la quando exposta a temperaturas mais elevadas.

A massa específica no estado endurecido foi aferida em quatro amostras para cada traço. A Tabela 19 apresenta os valores médios, o desvio padrão (D.P.) e o coeficiente de variação (C.V.).

Tabela 19 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura dos Traços com CA

Traço	MEE (kg/m³)	D.P. (kg/m³)	C.V. (%)
Pachla17	569,34	15,75	3%
T.10%CA	707,03	17,76	3%
T.20%CA	666,02	6,77	1%
T.30%CA	750,37	8,47	1%
T.40%CA	748,05	10,33	1%
T.50%CA	751,95	15,79	2%

Fonte: elaboração própria

A partir dos dados apresentados na Tabela 19, foi plotado um gráfico com os valores de massa específica do estado endurecido (MEE) aos 28 dias de cura e as barras de erro (D.P.) a fim de analisar se existe diferença estatisticamente significativa (Figura 35).

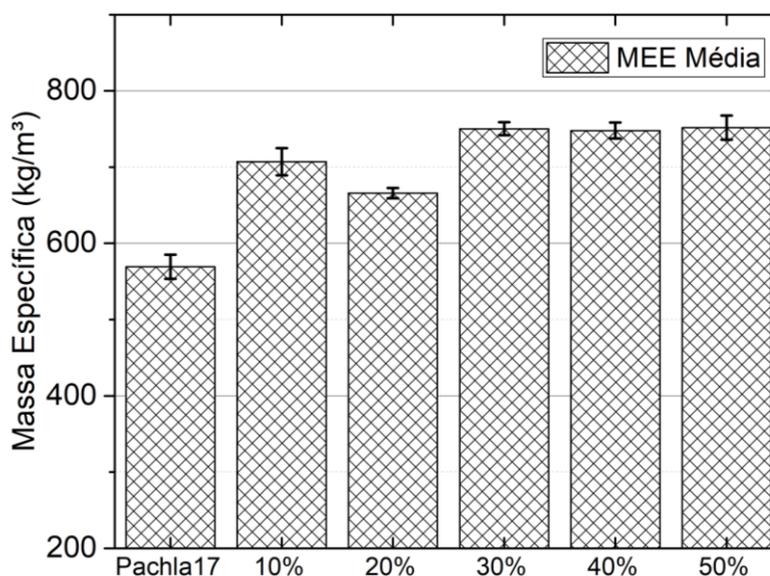


Figura 35 – MEE 28 dias com análise de desvio padrão dos traços com CA (Elaboração Própria)

Observa-se, na Figura 35, que os traços com 30%, 40% e 50% de adição de CA apresentaram valores médios muito próximos, portanto, não se pode afirmar que são estatisticamente diferentes. No entanto, os traços Pachla17, T.10%CA e T.20%CA apresentaram variações que indicam diferença estatisticamente significativa. Assim, optou-se por dar a mesma nota para os traços com 30%, 40% e 50% de adição de CA, enquanto os traços Pachla17, T.10%CA e T.20%CA tiveram os valores médios utilizados para calcular as notas. O traço com nota 5 foi o Traço Pachla17, pois obteve a menor massa específica, e o traço com nota 1 foi o T.50%CA. As notas dos traços com 10% e 20% de adição de CA foram calculadas por meio de interpolação linear. A Tabela 20 apresenta as notas atribuídas para cada traço.

Tabela 20 - Notas atribuídas em função da MEE aos 28 dias de cura

Traço	Pachla17	T.10%CA	T.20%CA	T.30%CA	T.40%CA	T.50%CA
Nota	5,00	1,98	2,88	1,00	1,00	1,00

Fonte: elaboração própria

4.1.2 Análise da fluidez e da consistência

A análise da fluidez foi realizada com o funil de Marsh a fim de classificar o concreto quanto a sua necessidade de adensamento. Em função das características deste ensaio, a fluidez foi aferida apenas para o Traço Pachla17, em que se obteve uma vazão de 190 ml em 20 segundos com uma amostra de concreto fresco de volume de 1500 ml, portanto, a vazão foi de 12,67%. Esse percentual é característico de um concreto celular com fluxo muito baixo (NAMBIAR; RAMAMURTHY; ASCE, 2008). Esse fluxo, por consequência, indica a necessidade do auxílio de equipamentos mecânicos para realizar o adensamento adequado.

Além da análise da fluidez para caracterizar a matriz, foi realizado o ensaio de consistência por meio de mini-slump para todos os traços. Desta forma, foi possível verificar a influência da casca de arroz nas propriedades relacionadas à trabalhabilidade do concreto no estado fresco. A Tabela 21 apresenta os valores médios de espalhamento obtidos para cada traço.

Tabela 21 – Índice de consistência obtido no mini-slump dos traços com CA

Traço	Índice de Consistência (mm)
Pachla17	144,75
T.10%CA	186,50
T.20%CA	180,50
T.30%CA	112,50
T.40%CA	91,50
T.50%CA	80,00

Fonte: elaboração própria

A partir dos dados apresentados na Tabela 21, pode-se verificar que o traço com 10% de adição de casca de arroz (CA) teve incremento no espalhamento em relação ao Traço Pachla17, no entanto, conforme o volume de casca foi elevado, o diâmetro de espalhamento foi sendo reduzido. Essa condição indica que a casca de arroz contribui para o índice de consistência (espalhamento) até 20% de adição.

Tais resultados podem ser atribuídos ao formato da CA que tende a melhorar a consistência em comparação com o Traço Pachla17. O decréscimo do espalhamento em função do aumento de teor de CA pode ser explicado pelo fato da CA ser adicionada seca à mistura, assim, ela tende a absorver mais água e, portanto, reduzir a relação água/cimento do material, que, segundo Valore (1954) *apud* Amran, Farzadnia e Ali (2015), pode prejudicar a consistência.

Para definir uma nota a este critério, utilizou-se análise quantitativa, isto é, definiu-se nota 5 para o T.10%CA e nota 1 para o T.50%CA. As notas dos demais traços podem ser observadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Notas atribuídas em função da consistência das amostras com CA

Traço	Pachla1 7	T.10%CA	T.20%CA	T.30%CA	T.40%CA	T.50%CA
Nota	3,43	5,00	4,77	2,22	1,43	1,00

Fonte: elaboração própria

4.1.3 Análise visual

Para definir o percentual ideal de casca de arroz, também foi realizada uma análise visual do material produzido. A Figura 36 ilustra as amostras produzidas com os diferentes percentuais de casca de arroz, na imagem, é possível observar a superfície superior das amostras (parte que não ficou em contato com os moldes).

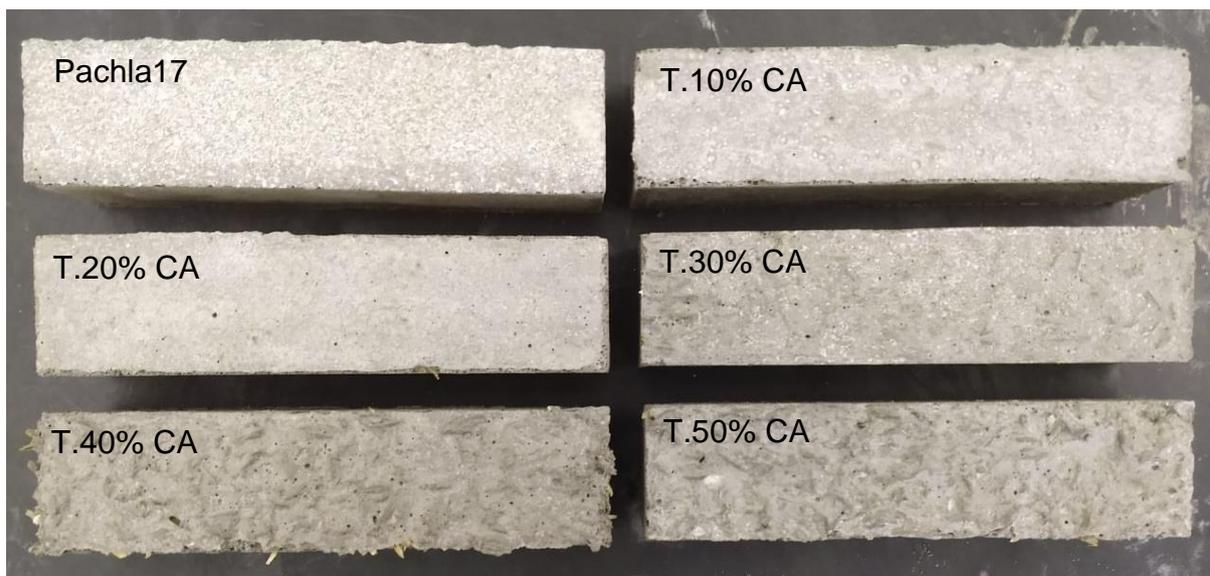


Figura 36 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de CA (Elaboração própria)

Como pode ser verificado na Figura 36, a partir de 30% de adição de casca de arroz, é possível observar que a superfície superior das amostras fica marcada pelas fibras. No entanto, ao analisar as superfícies que ficaram em contato com a fôrma, observa-se que o acabamento fica satisfatório até a adição de 30% de casca de arroz, visto que se veem algumas fibras soltas apenas no T.40%CA e no T.50%CA (Figura 37).

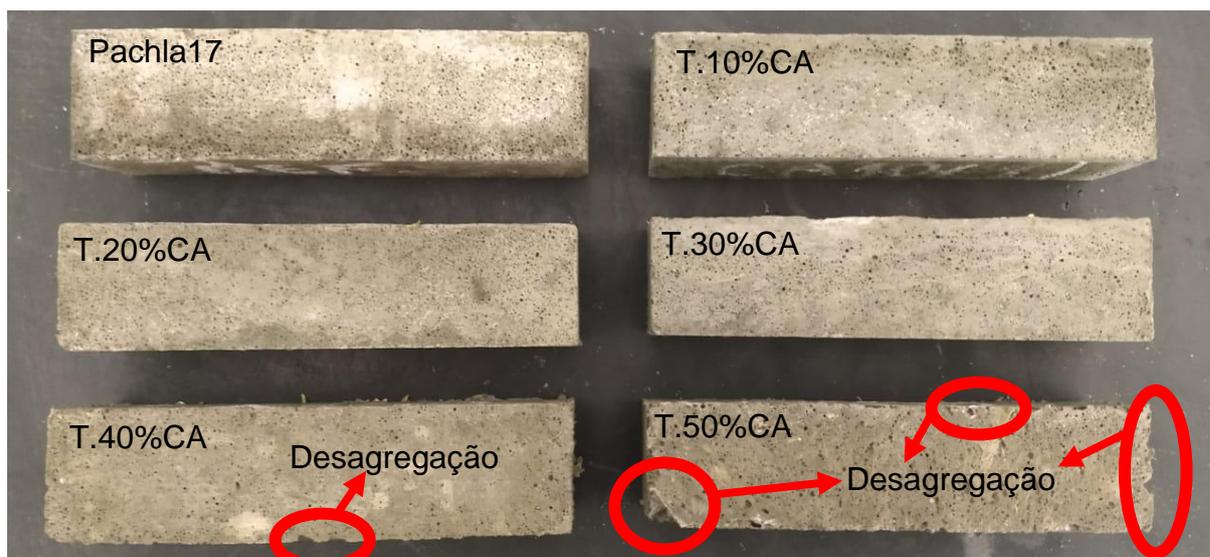


Figura 37 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de CA (Elaboração própria)

A partir das análises visuais das amostras (Figura 36 e Figura 37), definiu-se que os compósitos com 10%, 20% e 30% de casca apresentaram bom acabamento de maneira geral. Embora o T.30%CA tenha apresentado marcas visuais de casca de arroz na superfície superior, nenhuma fibra ficou exposta como nos traços com adição de 40% e 50% de CA.

A partir das análises visuais realizadas, atribuiu-se nota máxima para os traços Pachla17, T.10%CA e T.20%CA. Para o traço T.30%CA, foi atribuída nota 4, visto que a face superior apresentou uma redução na qualidade de acabamento superficial. A nota 2 foi atribuída para o traço “T.40%CA”, uma vez que se observaram diversas fibras expostas e problemas de acabamento em todas as faces, e a nota 1 para o traço “T.50%CA”, que, além de todos os problemas verificados no “T.40%CA”, também apresentou desagregação da matriz gerada pela grande quantidade de casca de arroz (Figura 37). A Tabela 23 apresenta as notas definidas.

Tabela 23 - Notas atribuídas em função da análise visual das amostras com CA

Traço	Pachla17	T.10%CA	T.20%CA	T.30%CA	T.40%CA	T.50%CA
Nota	7	5	5	4	2	1

Fonte: elaboração própria

4.1.4 Resistência à compressão axial

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 7 dias de cura, logo após a retirada das amostras da câmara úmida, e aos 28 dias de cura, ficando 27 dias em câmara úmida e 1 dia em estufa a 100°C. Cada traço em cada idade teve oito amostras e, a partir da definição das resistências médias, foi definido o desvio padrão e o coeficiente de variação. A Tabela 24 apresenta os dados relativos à resistência aos 7 dias de cura.

Tabela 24 – Resistência à compressão axial aos 7 dias de cura dos traços com CA

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Pachla17	1,85	0,24	13%
T.10%CA	2,81	0,18	6%
T.20%CA	2,87	0,29	10%
T.30%CA	2,79	0,16	6%
T.40%CA	2,40	0,25	10%
T.50%CA	2,47	0,24	10%

Fonte: elaboração própria

Analisando os valores apresentados na Tabela 24, verifica-se que os coeficientes de variação ficaram em níveis aceitáveis, o maior foi de 13% e os demais ficaram todos iguais ou menores a 10%, portanto, conclui-se que os valores médios representam de maneira adequada a resistência à compressão atingida. As resistências obtidas aos 28 dias de cura são apresentadas na Tabela 25.

Tabela 25 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura dos Traços com CA

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Pachla17	2,47	0,19	8%
T.10%CA	2,92	0,39	13%
T.20%CA	2,56	0,11	4%
T.30%CA	2,57	0,10	4%
T.40%CA	2,47	0,06	2%
T.50%CA	2,26	0,10	4%

Fonte: elaboração própria

Conforme apresentado na Tabela 25, pode-se concluir que os coeficientes de variação se mantiveram reduzidos e ficaram ainda menores que aos 7 dias de cura. Novamente, pode-se afirmar que os valores médios representam bem os resultados de resistência à compressão axial.

Para realizar a comparação entre as resistências à compressão aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura, foi plotado um gráfico de colunas com as barras de erro (desvio padrão) para cada resultado (Figura 38).

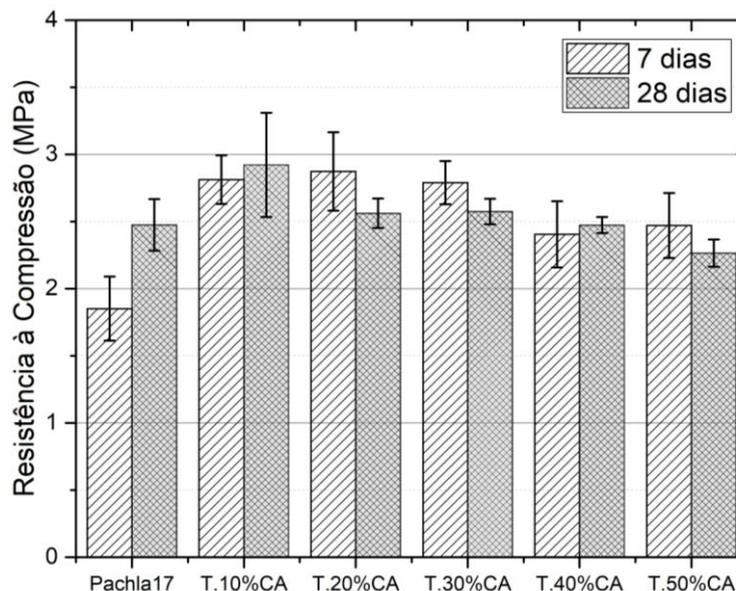


Figura 38 – Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com CA (Elaboração própria)

Analisando a Figura 38, observa-se que o único traço que apresentou acréscimo de resistência estatisticamente significativo aos 28 dias de cura foi o Traço Pachla17. Os traços com adição de casca de arroz apresentaram valores médios inferiores em todos os volumes de CA, exceto o T.10%CA e o T.40%CA. Mesmo assim, todos os traços com adição de CA apresentaram os valores médios obtidos aos 28 dias de cura dentro das margens de erro obtidas por meio do desvio padrão.

O fato de a resistência não ter sido incrementada dos 7 para os 28 dias de cura nos compósitos com CA provavelmente ocorreu pelo fato das fibras orgânicas reterem grandes volumes de água durante a mistura e, ao serem expostas a temperatura de 100°C pelo período de 24 horas, terem liberado essa água de maneira acelerada, causando, assim, microfissuração oriunda de poro pressão. Tal condição pode ter reduzido a resistência da matriz.

Para definir as notas de cada traço a partir das resistências à compressão axial, foram utilizadas as resistências aos 28 dias de cura. A nota máxima (5) foi atribuída ao T.10%CA, que obteve a maior resistência, e a nota mínima foi atribuída ao T.50%CA, que obteve a menor resistência. As demais notas foram calculadas a partir de interpolação linear. A Tabela 26 apresenta as notas de cada traço.

Tabela 26 - Notas atribuídas em função da resistência à compressão

Traço	Pachla17	T.10%CA	T.20%CA	T.30%CA	T.40%CA	T.50%CA
Nota	2,29	5,00	2,81	2,89	2,28	1,00

Fonte: elaboração própria

4.1.5 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

Neste item, são apresentadas as resistências à tração na flexão em 3 pontos obtidas aos 7 dias de cura e aos 28 dias de cura. Os valores médios apresentados na Tabela 27 e na Tabela 28 foram obtidos a partir do rompimento de quatro amostras em cada idade para cada traço.

Tabela 27 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 7 dias de cura

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Pachla17	0,71	0,08	11%
T.10%CA	1,18	0,04	4%
T.20%CA	1,23	0,15	12%
T.30%CA	2,25	0,14	6%
T.40%CA	2,17	0,16	7%
T.50%CA	1,79	0,19	11%

Fonte: elaboração própria

Os resultados apresentados na Tabela 27 indicam baixos coeficientes de variação (todos abaixo de 15%) e, portanto, valores médios representativos. Como pode ser observado, a adição de casca aumentou significativamente a resistência à tração na flexão em todos os percentuais se comparados ao Traço Pachla17, indicando que, inicialmente, ela atua como um bom componente de reforço.

Tabela 28 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Pachla17	1,06	0,11	11%
T.10%CA	1,26	0,20	16%
T.20%CA	1,33	0,13	10%
T.30%CA	1,77	0,08	5%
T.40%CA	1,74	0,12	7%
T.50%CA	1,51	0,07	5%

Fonte: elaboração própria

A fim de analisar os resultados obtidos na Tabela 28, foi plotado um gráfico de colunas comparando as resistências de todos os traços e os períodos de 7 e 28 dias de cura (Figura 39).

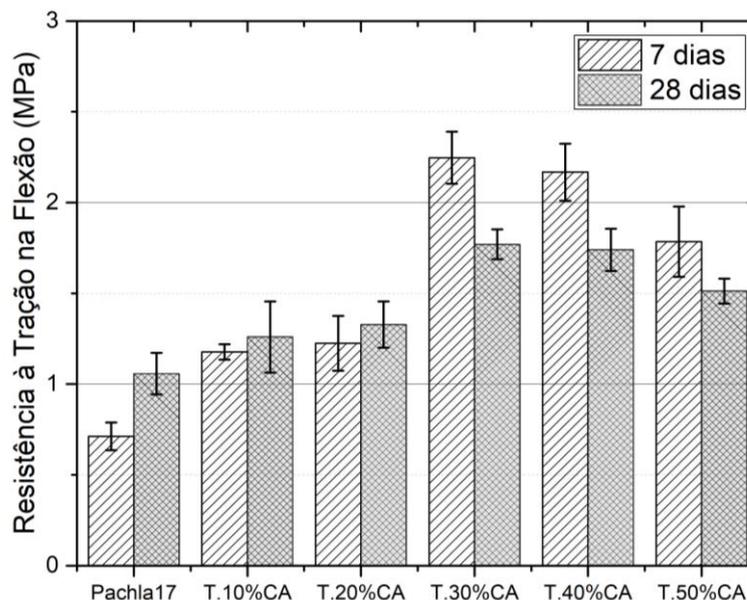


Figura 39 – Comparação da resistência à tração aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com casca de arroz (Elaboração própria)

A partir da Figura 39, pode-se concluir que o Traço Pachla17 foi o único que teve incremento de resistência dos 7 para os 28 dias de cura. O T.10%CA e o T.20%CA, mesmo que apresentem um ganho na resistência média, não foram superiores de maneira estatisticamente significativa. Os traços com adição de 30%, 40% e 50% apresentaram redução de resistência e, a partir das barras de erro, pode-se verificar que essa redução é significativa.

Novamente, observa-se que houve perda de resistência (T.30%CA, T.40%CA e T.50%CA) e não houve aumento de resistência (T.10%CA e T.20%CA) nos traços com adição de casca de arroz aos 28 dias de cura. Essa condição de perda de resistência à compressão e à tração pode ser atribuída à perda de água que a casca de arroz sofre à temperatura de 100°C, visto que, conforme Carvalho (2015), em uma faixa de temperatura de 40°C a 150°C, a casca perde a água de sua composição, portanto, se considerado que, nos compósitos, a casca ainda possui água absorvida durante a mistura, as perdas são mais significativas, o que acarreta em poro pressão na matriz e, conseqüentemente, microfissuração que gera redução de resistência.

Além da constatação de que a perda de água gera microfissuração, as maiores perdas de resistência nas adições superiores a 30% de CA também podem ser atribuídas ao fato de que a resistência agregada pela casca inicialmente era maior devido seu volume de adição ser maior. Desta forma, todos os fenômenos de perda de água, poro pressão e microfissuração tendem a ocorrer de maneira mais significativa.

Outro fenômeno que pode ter ampliado a redução da resistência é a redução de volume das fibras que é causada pela perda de água, o que interfere na interface fibra-matriz e reduz a aderência, gerando uma queda maior na resistência à tração na flexão que à compressão axial, conforme verifica-se comparando a Figura 38 e a Figura 39.

Mesmo com as reduções na resistência à tração na flexão, todos os compósitos com adição de casca apresentaram valores finais superiores ao Traço Pachla17, o que caracteriza de maneira positiva a adição da casca. De qualquer forma, é importante considerar que, em usos práticos, os compósitos não sofrerão com temperaturas tão altas nas primeiras idades, portanto, a tendência é de que a casca perca a água absorvida durante a mistura de maneira mais lenta ao longo do tempo e, por consequência, os produtos não tenham decréscimo tão significativo nas resistências.

A partir dos valores de resistência, foi atribuída nota máxima para o T.30%CA e nota mínima para o Traço Pachla17. As demais notas foram calculadas a partir de interpolação linear e são apresentadas na Tabela 29. Nota-se que, mesmo sofrendo a maior queda de resistência, os traços com 30% e 40% de adição de casca de arroz obtiveram as maiores notas respectivamente.

Tabela 29 - Notas atribuídas em função da resistência à tração na flexão

Traço	Pachla17	T.10%CA	T.20%CA	T.30%CA	T.40%CA	T.50%CA
Nota	1,00	2,14	2,52	5,00	4,83	3,55

Fonte: elaboração própria

4.1.6 Definição da quantidade de casca de arroz

Após definir as notas para os 5 parâmetros analisados de maneira individual, foram plotados gráficos do tipo radar para analisar os pontos fortes e os pontos fracos de cada traço. A Figura 40 apresenta um gráfico para cada traço e os 5 vértices representam os parâmetros definidos para definir o traço da sequência da pesquisa.

As legendas de cada vértice traduzem-se da seguinte forma:

- Espalhamento refere-se ao índice de consistência realizado por meio do mini-slump;
- MEE refere-se a massa específica no estado endurecido aferida aos 28 dias de cura;
- Compressão refere-se à resistência à compressão axial aos 28 dias de cura;
- Tração refere-se à resistência à tração na flexão aferida aos 28 dias de cura; e
- Visual refere-se à condição de acabamento das superfícies das amostras de cada traço.

Quanto maior a área preenchida pelo traço nos gráficos, melhor é seu desempenho de maneira global. Como as notas são limitadas entre 1 e 5, quanto mais próximo os pontos estiverem aos vértices externos dos gráficos, melhor é a avaliação do parâmetro analisado. De maneira geral, analisando isoladamente cada traço, pode-se verificar que os traços com 10% e com 20% de adição de CA são superiores aos demais traços analisados, enquanto isso, os traços com pior desempenho são os traços com 40% e 50% de CA (Figura 40).

Analisando cada traço, fica relativamente complicado de definir o melhor desempenho, visto que os pontos destacados em cada parâmetro também devem ser levados em consideração. Para simplificar as análises, foram plotados gráficos com sobreposições para analisar análises comparativas mais assertivas, tais gráficos do tipo radar estão representados na Figura 41.

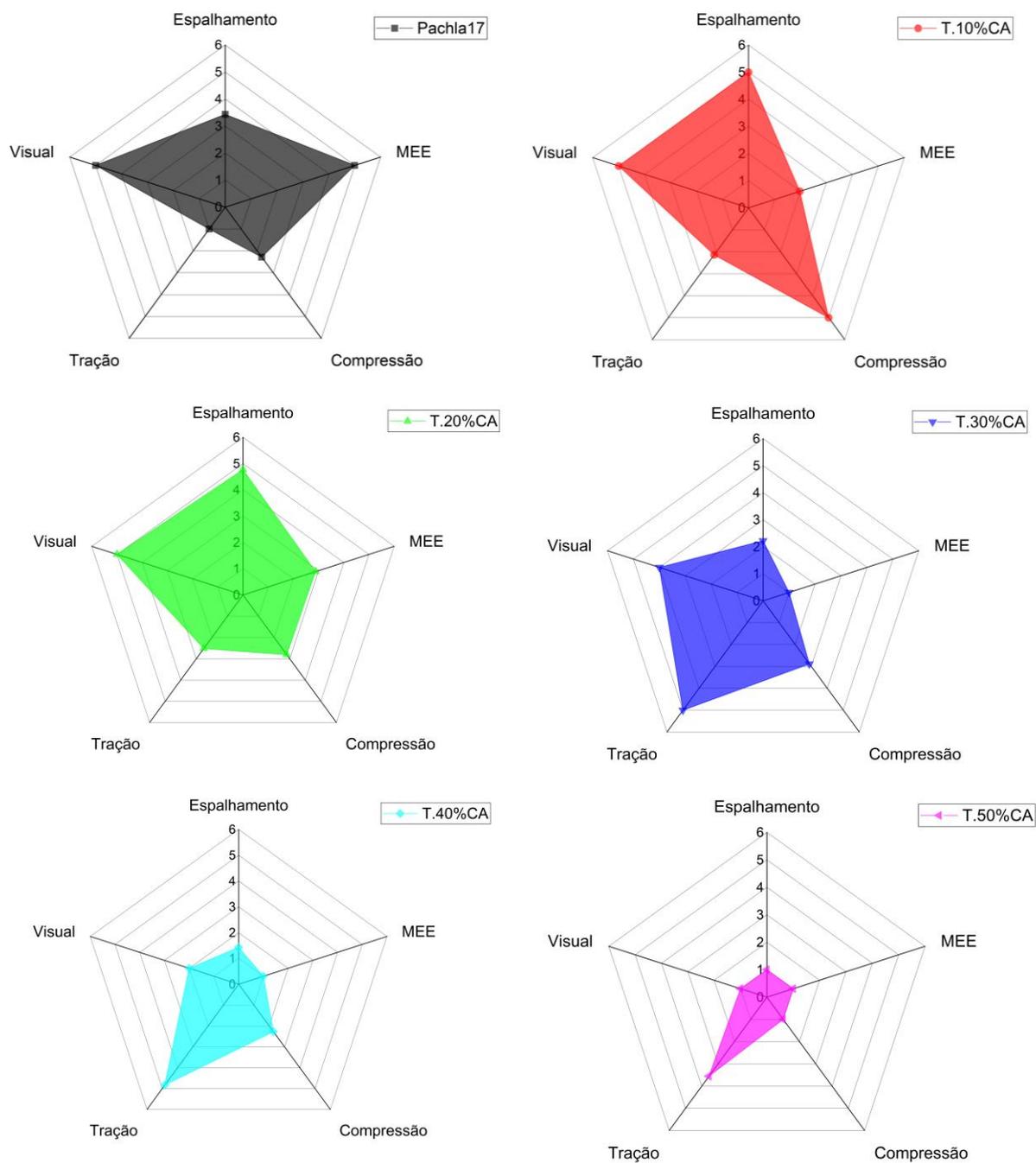


Figura 40 – Gráficos de radar das notas obtidas por cada traço com CA (Elaboração própria)

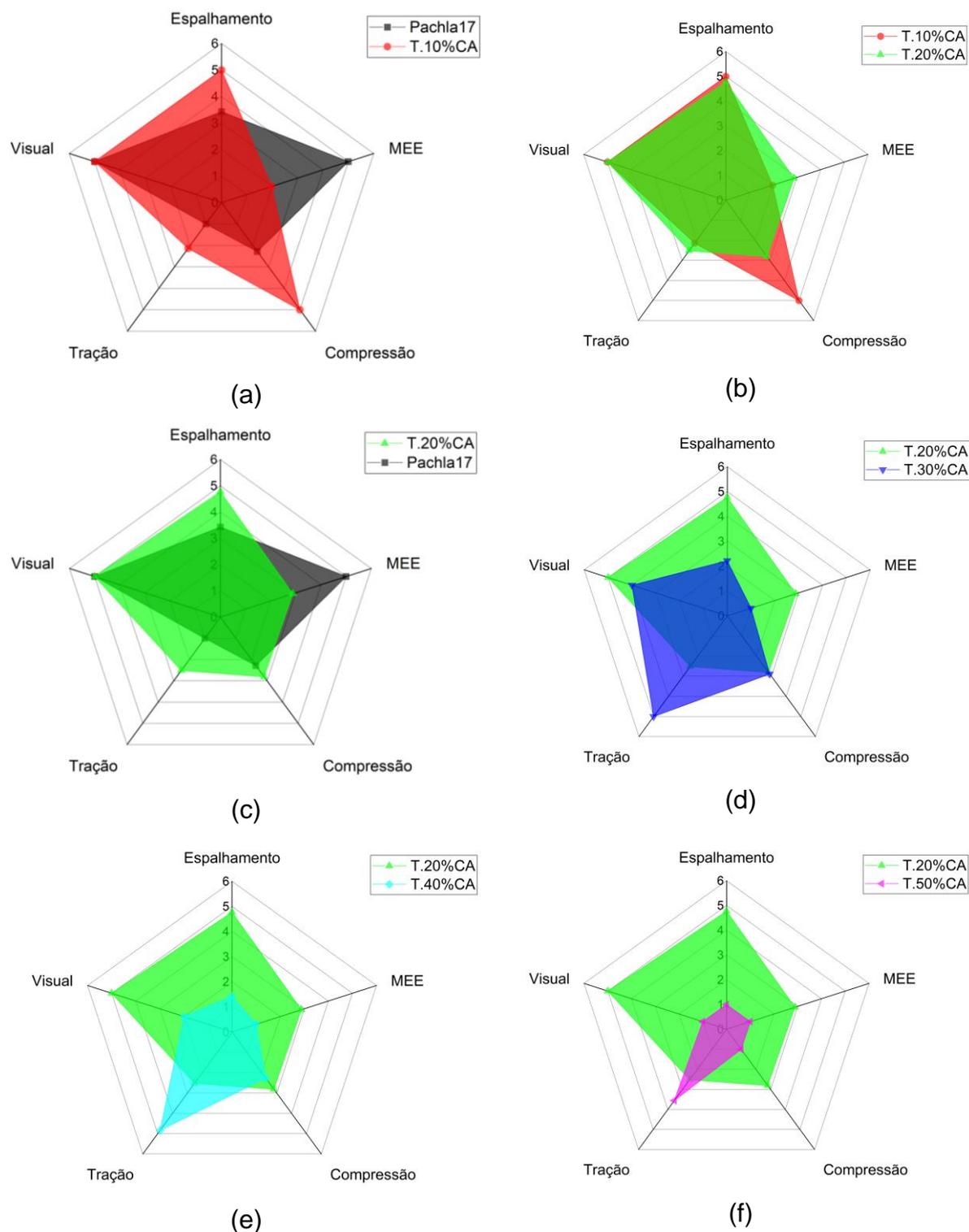


Figura 41 – Gráficos de radar para comparação dos traços (a) Traço Pachla17 e T.10%CA; (b) T.10%CA e T.20%CA; (c) Traço Pachla17 e T.20%CA; (d) T.20%CA e T.30%CA; (e) T.20%CA e T.40%CA; (f) T.20%CA e T.50%CA (Elaboração própria)

A primeira análise comparativa foi entre o Traço Pachla17 e o T.10%CA (Figura 41a) a fim de verificar se a incorporação de casca de arroz era vantajosa. Ao analisar as comparações, verifica-se que o T.10%CA apresenta maior área, três pontos com melhor desempenho, um ponto de mesmo desempenho e um ponto com desempenho inferior. Portanto, conclui-se que existe vantagem na incorporação de 10% de casca de arroz.

Como o T.10%CA apresentou melhor desempenho que o Traço Pachla17, ele passou a ser comparado com o T.20%CA (Figura 41b). Nessa comparação, observa-se uma variação menor nas áreas e dois pontos de vantagem para o T.10%CA, dois pontos de vantagem para o T.20%CA e um ponto de empate. Sendo assim, pelos parâmetros aqui definidos, conclui-se que os traços apresentaram desempenho semelhante e, para a sequência das análises comparativas, optou-se por utilizar o traço com 20% de CA, pois ele apresenta maior uso do resíduo, o que possibilita menor custo de matéria-prima para produção.

A terceira comparação foi realizada a partir do T.20%CA e do Traço Pachla17 (Figura 41c) para verificar se a adição de 20% de casca também era positiva em relação à matriz de concreto celular. Observando a Figura 41c, verifica-se que o T.20%CA apresenta desempenho superior ao Traço Pachla17.

A quarta análise comparativa foi entre o T.20%CA e o T.30%CA, no qual se observa larga vantagem para o traço com 20% de adição de casca (Figura 41d). A quinta análise realizada foi entre o T.20%CA e o T.40%CA, novamente, o traço com 20% de casca apresenta desempenho superior (Figura 41e). Por fim, foi analisado o desempenho do T.20%CA em relação ao T.50%CA, e constatou-se que o traço com 20% de CA apresenta desempenho superior de maneira geral. Desta forma, a partir de todas as análises realizadas, definiu-se, para sequência da pesquisa, utilizar uma adição de 20% de casca de arroz.

4.2 REDUÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO

Assim como no item 4.1, a escolha do melhor percentual de areia foi embasada em cinco parâmetros: massa específica no estado endurecido, consistência, análise visual, resistência à compressão e resistência à tração na flexão em três pontos. As notas também foram estabelecidas conforme descrito no Item 4.1.

4.2.1 Análise das massas específicas

A relação das massas específicas no estado fresco e no estado endurecido foi realizada para mapear as variações causadas pelos materiais utilizados. A Figura 42 ilustra a relação entre ambas as massas específicas aferidas.

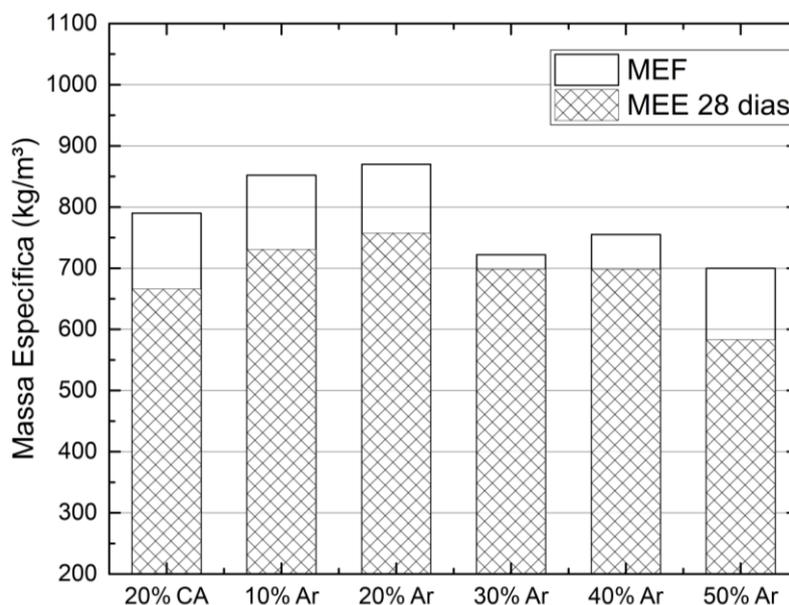


Figura 42 – Comparação MEF e MEE 28 dias dos traços com areia (Elaboração Própria)

Ao comparar a variação das massas específicas, verificou-se que o Traço Pachla17, isto é, sem casca e sem areia, obteve uma redução de 19,47% de sua massa específica durante o processo de cura por 28 dias, já a redução média dos traços com casca foi verificada em 18,21%, e a redução média dos traços com casca e areia foi aferida em 10,94%.

A redução da variação das massas específicas indica que houve menores variações de volume e massa, o que, provavelmente, também gerou menor retração das amostras. Tal condição era esperada pela capacidade de adsorção de água por parte da areia utilizada, essa adsorção gera a possibilidade de reter mais água nas amostras e manter o volume estável durante o processo de cura.

A Tabela 30 apresenta os valores médios, o desvio padrão (D.P.) e o coeficiente de variação (C.V.) das massas específicas dos traços em que foi incorporada areia. Todos os valores médios foram obtidos a partir da análise de quatro amostras.

Tabela 30 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura dos traços com areia

Traço	MEE (kg/m ³)	D.P. (kg/m ³)	C.V. (%)
T.20%CA	666,02	6,77	1%
T.10%Ar	730,96	15,49	2%
T.20%Ar	757,32	54,46	7%
T.30%Ar	698,24	11,77	2%
T.40%Ar	698,24	16,99	2%
T.50%Ar	583,01	6,07	1%

Fonte: elaboração própria

A Figura 43 ilustra um gráfico de coluna com as barras de erro obtidas a partir do desvio padrão. Analisando as margens de desvio, pode-se concluir que os traços com 10%, 30% e 40% se sobrepõem estatisticamente ao traço com 20% de areia incorporada. O traço com 50% teve uma redução substancial na massa específica, possivelmente causada pela redução excessiva do consumo de cimento. De maneira geral, observa-se que a substituição de cimento por areia até um percentual de 40% gerou incremento na densidade das amostras.

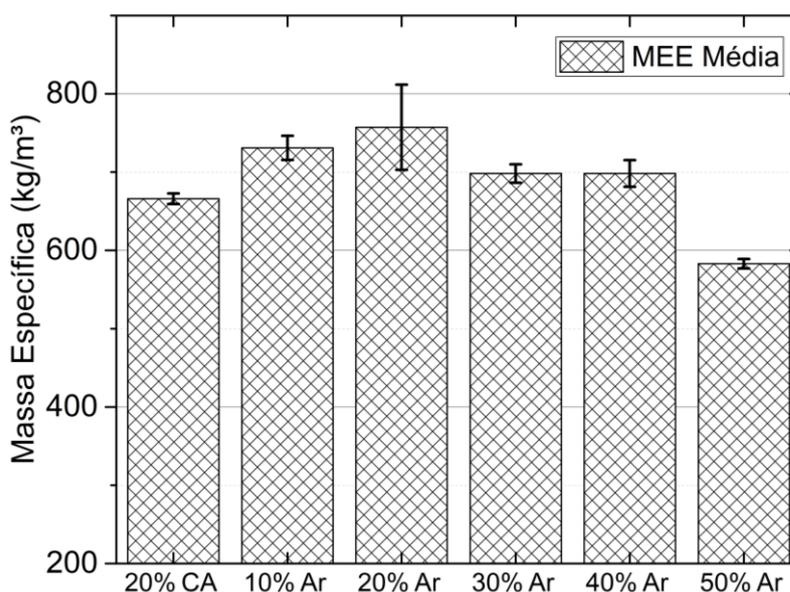


Figura 43 – MEE 28 dias com análise de desvio padrão dos traços com areia (Elaboração Própria)

A Tabela 31 apresenta as notas atribuídas para cada traço em função da massa específica no estado endurecido após secagem em estufa. O traço T.20%Ar teve atribuída a menor nota, pois apresentou a maior massa específica. O traço T.50%Ar teve atribuída a maior nota, pois apresentou a menor massa específica. As demais notas foram calculadas por meio de interpolação linear.

Tabela 31 - Notas atribuídas em função da MEE aos 28 dias de cura

Traço	T.20%CA	T.10%Ar	T.20%Ar	T.30%Ar	T.40%Ar	T.50%Ar
Nota	3,10	1,61	1,00	2,36	2,36	5,00

Fonte: elaboração própria

4.2.2 Análise da fluidez e da consistência

A Tabela 32 apresenta os valores dos índices de consistência obtidos a partir dos ensaios de mini-slump. Conforme pode-se verificar, não houve grande variação entre os espalhamentos para os traços com até 20% de substituição de cimento por areia. Como foi realizado apenas um ensaio para cada amostra no estado fresco, a proximidade dos resultados indica que há tendência de que não exista uma diferença significativa para estes traços.

Os traços com 30%, 40% e 50% de areia tiveram redução no índice de consistência, possivelmente, pelo fato de que o volume de água adicionado à mistura também foi reduzido, uma vez que o fator água/aglomerante foi mantido em 0,4 para estes três traços.

Tabela 32 – Índice de consistência obtido no mini-slump dos traços com areia

Traço	Índice de Consistência (mm)
T.20%CA	180,50
T.10%Ar	179,50
T.20%Ar	180,50
T.30%Ar	175,20
T.40%Ar	173,15
T.50%Ar	170,80

Fonte: elaboração própria

Com base nos valores de abatimento das misturas, optou-se por não reduzir o volume de água para os traços com 10% e 20% de areia, pois não houve alteração significativa nestes traços em relação à consistência e à massa específica. Além disso, pode-se verificar que a resistência à compressão axial e à tração na flexão também não teve influência que remetesse à necessidade de alterar a quantidade de água na mistura.

A Tabela 33 apresenta as notas atribuídas em função do índice de consistência de cada traço. Com os maiores índices, os traços T.20%CA e T.20%Ar ficaram com nota máxima e o T.50%Ar, com o menor índice, ficou com a menor nota.

Tabela 33 - Notas atribuídas em função da consistência das amostras com areia

Traço	T.20%CA	T.10%Ar	T.20%Ar	T.30%Ar	T.40%Ar	T.50%Ar
Nota	5,00	4,59	5,00	2,81	1,97	1,00

Fonte: elaboração própria

4.2.3 Análise visual

A análise visual dos compósitos pode ser observada na Figura 44. A superfície das amostras ilustrada é a que estava em contato com o molde, uma vez que foi onde se observaram diferenças entre os traços.



Figura 44 – Compósitos produzidos para determinar o percentual ideal de areia (Elaboração própria)

A partir das análises visuais, foram atribuídas notas máximas para os traços com 10% e 20% de areia, assim como já fora atribuído nota 5,00 para o traço T.20%CA no item 4.1.3. Para os traços com 30% e 40% de areia, foi definida nota 4,00, pois, como pode-se observar nos detalhes em vermelho, o aspecto deles ficou mais heterogêneo, apresentando algumas marcas escuras. Já o traço com 50% de areia recebeu a menor nota, uma vez que, além de apresentar as mesmas manchas observadas nos traços com 30% e 40%, também foi observado que o material sofria com desagregação ao ser manuseado. As notas são apresentadas na Tabela 34.

Tabela 34 - Notas atribuídas em função da análise visual das amostras

Traço	T.20%CA	T.10%Ar	T.20%Ar	T.30%Ar	T.40%Ar	T.50%Ar
Nota	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	3,00

Fonte: elaboração própria

4.2.4 Resistência à compressão axial

A Tabela 35 e a Tabela 36 apresentam as resistências à compressão axial aos 7 e aos 28 dias de cura. Com exceção do T.10%Ar, pode-se verificar que a resistência reduziu dos 7 aos 28 dias de cura, possivelmente, porque a secagem em estufa a 100°C prejudicou as propriedades do compósito.

Tabela 35 – Resistência à compressão axial aos 7 dias de cura dos traços com areia

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.20%CA	2,87	0,29	10%
T.10%Ar	2,47	0,19	8%
T.20%Ar	1,65	0,19	12%
T.30%Ar	1,60	0,24	15%
T.40%Ar	0,98	0,18	19%
T.50%Ar	0,53	0,04	7%

Fonte: elaboração própria

Tabela 36 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura dos traços com areia

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.20%CA	2,56	0,11	4%
T.10%Ar	2,80	0,30	11%
T.20%Ar	1,85	0,31	17%
T.30%Ar	1,36	0,09	6%
T.40%Ar	0,79	0,07	9%
T.50%Ar	0,48	0,02	5%

Fonte: elaboração própria

Os dados apresentados na Tabela 35 e na Tabela 36 foram plotados em um gráfico de colunas para facilitar a visualização dos resultados obtidos. A Figura 45 ilustra os valores médios, bem como, suas barras de erro geradas pelo desvio padrão. A partir das barras de erro, pode-se afirmar que as resistências à compressão se mantiveram estatisticamente semelhantes aos 7 e aos 28 dias de cura para todos os traços, quando analisados de maneira individual.

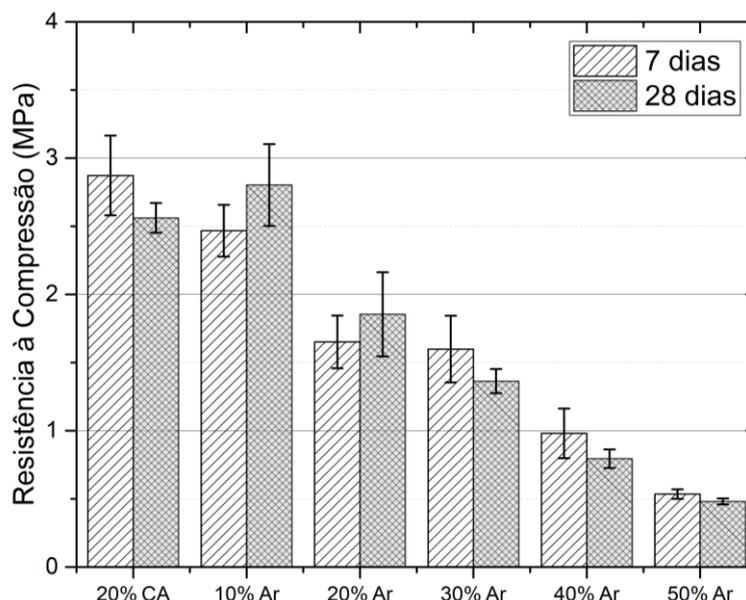


Figura 45 – Comparação da resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com areia (Elaboração própria)

A partir da leitura da Figura 45, é fácil comprovar que a substituição de cimento por areia passou a reduzir a resistência a partir dos 20%. Ao analisar o traço com 10% de areia, pode-se verificar que a resistência se mostrou estatisticamente semelhante ao traço sem areia (T.20%CA).

As notas atribuídas para as resistências foram realizadas a partir de interpolação linear entre a nota máxima para o T.10%Ar (maior resistência) e a nota mínima para o T.50%Ar (menor resistência). A Tabela 37 apresenta as notas obtidas.

Tabela 37 - Notas atribuídas em função da resistência à compressão

Traço	T.20%CA	T.10%Ar	T.20%Ar	T.30%Ar	T.40%Ar	T.50%Ar
Nota	4,58	5,00	3,37	2,52	1,54	1,00

Fonte: elaboração própria

4.2.5 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

Os valores médios das resistências à tração na flexão aferidos aos 7 e aos 28 dias de cura são apresentados na Tabela 38 e na Tabela 39. Os valores foram obtidos a partir da média de quatro amostras por traço.

Tabela 38 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 7 dias de cura dos traços com areia

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.20%CA	1,23	0,15	12%
T.10%Ar	1,20	0,17	14%
T.20%Ar	1,07	0,11	10%
T.30%Ar	1,00	0,10	10%
T.40%Ar	0,75	0,16	22%
T.50%Ar	0,32	0,02	7%

Fonte: elaboração própria

Tabela 39 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura dos traços com areia

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.20%CA	1,33	0,13	10%
T.10%Ar	1,44	0,16	11%
T.20%Ar	1,22	0,19	16%
T.30%Ar	1,04	0,04	4%
T.40%Ar	0,82	0,03	4%
T.50%Ar	0,37	0,02	6%

Fonte: elaboração própria

Para simplificar a análise da influência da areia na resistência à tração na flexão, foi plotado um gráfico de colunas e barras de erro obtidas pelo desvio padrão de cada traço. A Figura 46 ilustra o gráfico plotado.

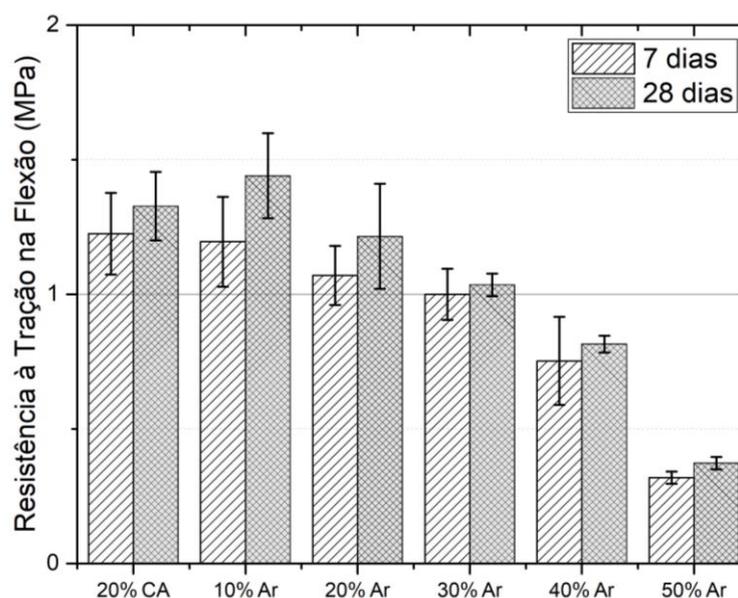


Figura 46 – Comparação da resistência à tração aos 7 e aos 28 dias de cura dos traços com areia
(Elaboração própria)

Analisando as resistências obtidas, pode-se verificar que, para a substituição de 10% de cimento por areia, não houve diferença estatística nos dados, uma vez que as barras de erro estão sobrepostas. A partir da substituição de 20% de cimento por areia, verificou-se uma queda nas resistências com certa linearidade, principalmente se comparadas as resistências aferidas aos 28 dias de cura.

É importante constatar que, ao contrário da queda nas resistências de compressão verificadas aos 28 dias de cura, quando comparadas aos 7 dias de cura (Figura 45), na resistência à tração na flexão, foi verificado um aumento na resistência, mesmo que apenas no T.20%Ar esse aumento tenha sido estatisticamente diferente ao comparar as barras de erro.

Tabela 40 - Notas atribuídas em função da resistência à tração na flexão

Traço	T.20%CA	T.10%Ar	T.20%Ar	T.30%Ar	T.40%Ar	T.50%Ar
Nota	4,58	5,00	4,16	3,48	2,66	1,00

Fonte: elaboração própria

4.2.6 Definição do percentual de areia

Da mesma maneira que foi definido o percentual ideal de casca, foram plotados gráficos do tipo radar para definir o percentual ideal de areia, utilizando os parâmetros apresentados anteriormente. As legendas de cada vértice traduzem-se da seguinte forma:

- Espalhamento refere-se ao índice de consistência realizado por meio do mini-slump;
- MEE refere-se à massa específica no estado endurecido aferida aos 28 dias de cura;
- Compressão refere-se à resistência à compressão axial aos 28 dias de cura;
- Tração refere-se à resistência à tração na flexão aferida aos 28 dias de cura; e
- Visual refere-se à condição de acabamento das superfícies das amostras de cada traço.

A Figura 47 ilustra os gráficos de radar para cada traço de maneira individual, unindo, desta forma, as notas apresentadas nas tabelas compreendidas entre os itens 4.2.1 e 4.2.5 deste trabalho. Quanto maior a área demarcada no gráfico, melhor é o desempenho do traço estudado.

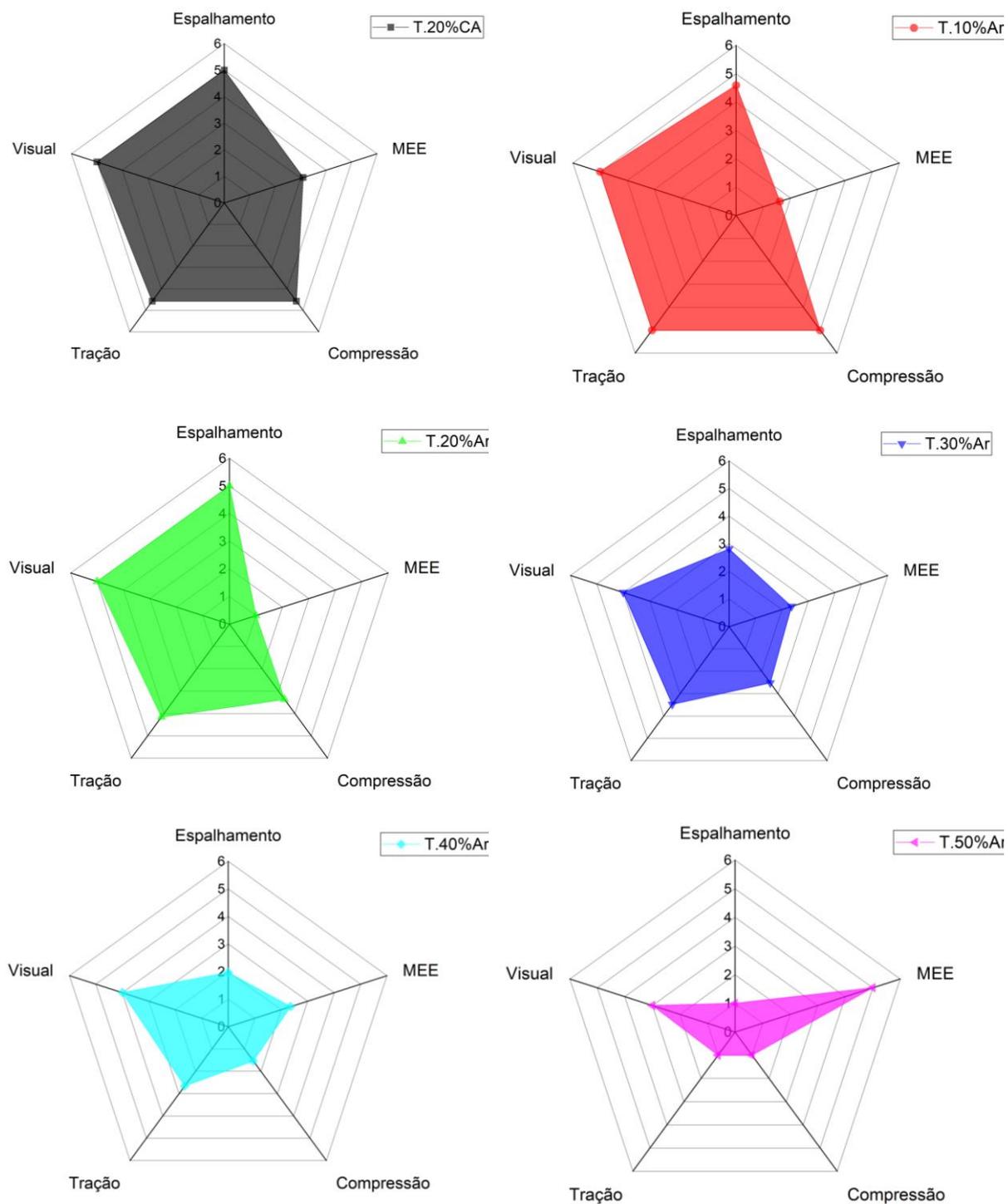


Figura 47 – Gráficos de radar das notas obtidas por cada traço com areia (Elaboração própria)

A Figura 48 ilustra a comparação entre os traços de dois a dois e a Figura 48f apresenta a comparação de todos os traços no mesmo gráfico.

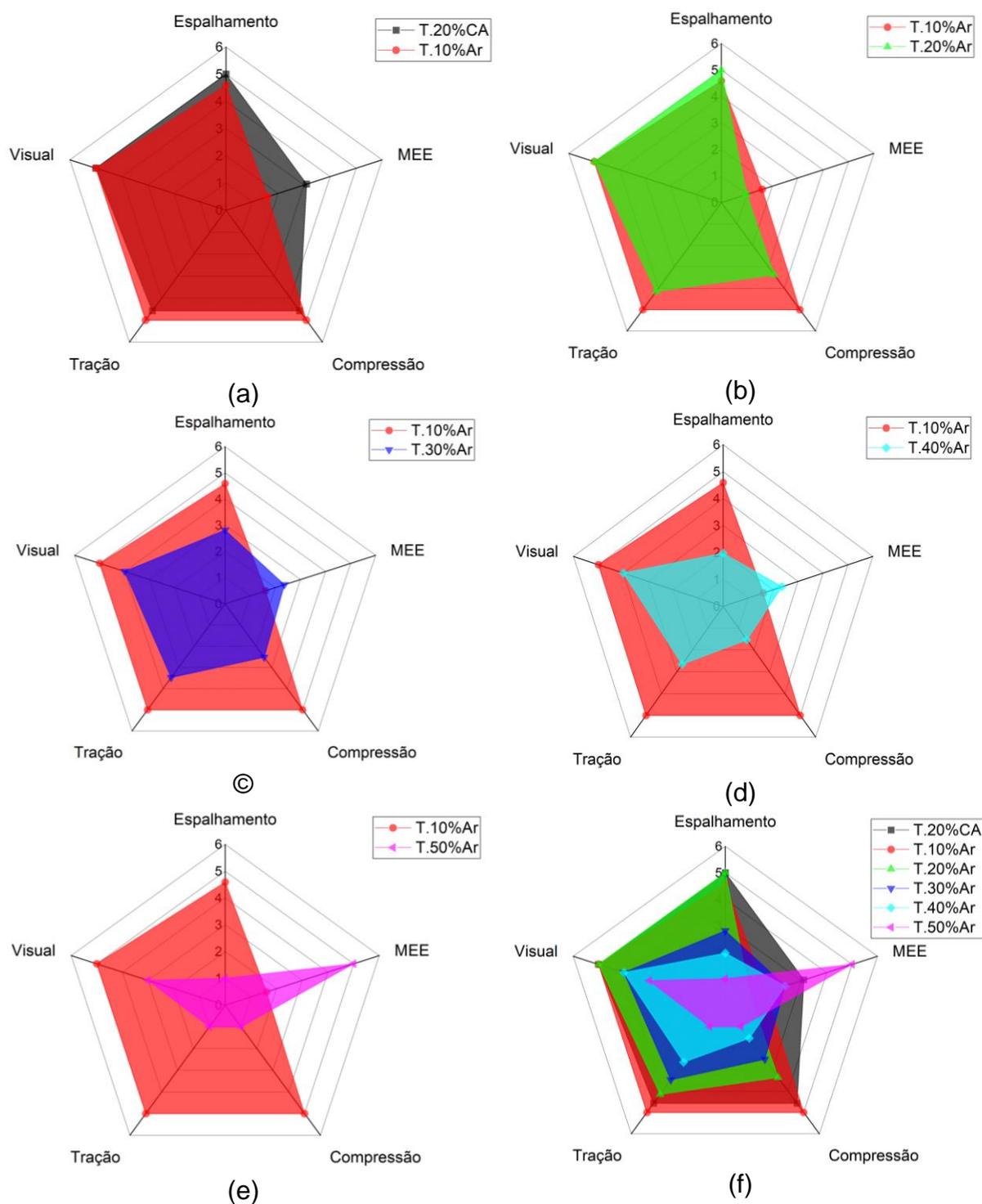


Figura 48 – Gráficos de radar para comparação dos traços (a) T.20%CA e T.10%Ar; (b) T.10%Ar e T.20%Ar; (c) T.10%Ar e T.30%Ar; (d) T.10%Ar e T.40%Ar; (e) T.10%Ar e T.50%Ar; (f) Todos os traços (Elaboração própria)

Como pode-se observar na Figura 48, os traços T.20%CA e T.10%Ar apresentaram pouca diferença no que tange desempenho, ficando o traço com 10% de areia e 20% de casca (T.10%Ar) com desempenho superior em resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão, enquanto o traço com 20% de casca de arroz sem areia (T.20%CA) obteve melhores resultados na massa específica e no espalhamento. Por conta deste empate entre os desempenhos analisados, foi definido o T.10%Ar para seguir as comparações, uma vez que, com desempenho equivalente, ele apresenta menor consumo de cimento e, por consequência, menor custo de produção. A comparação do traço com 10% de areia com os traços com 20%, 30%, 40% e 50% indicam um desempenho superior de maneira muito relevante para o T.10%Ar.

4.3 OTIMIZAÇÃO DO TRAÇO

Com o traço T.10%Ar definido, para seguimento da pesquisa, buscou-se reduzir a massa específica e, concomitantemente, o consumo de cimento. Em função da resistência estar acima do definido pelas normas técnicas em vigor, a massa específica foi reduzida para buscar melhor desempenho termoacústico e menor custo.

Nas primeiras tentativas de redução da massa específica, foi aumentado o volume de espuma e mantida a proporção de 20% de casca de arroz sobre o total da espuma utilizada, obtendo-se, portanto, as dosagens indicadas na Tabela 41.

Tabela 41 – Traços utilizados na primeira tentativa de otimização.

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Areia (kg)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
Pachla17	1	-		0,40	2,80	0,0050
T.10%Ar	1	0,62	0,11	0,44	3,10	0,0055
Teste 1	1	0,80	0,11	0,44	4,00	0,0055
Teste 2	1	0,97	0,11	0,44	4,88	0,0055

Fonte: elaboração própria

As massas específicas no estado fresco estão apresentadas na Tabela 42 e as massas específicas no estado endurecido estão apresentadas na Tabela 43.

Tabela 42 – Massa Específica no Estado Fresco

Traço	MEF (kg/m³)
T.10%Ar	852,00
Teste 1	684,00
Teste 2	580,00

Fonte: elaboração própria

Tabela 43 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 7 dias de cura

Traço	MEE (kg/m³)	D.P. (kg/m³)	C.V. (%)
T.10%Ar	730,96	15,49	2%
Teste 1	658,17	15,53	2%
Teste 2	574,22	20,30	4%

Fonte: elaboração própria

As resistências da primeira tentativa de otimização do traço T.10%Ar estão apresentadas na Tabela 44.

Tabela 44 – Resistência aferidas aos 28 dias para otimização do traço T.10%Ar

Compressão Axial				Tração na flexão			
Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.10%Ar	2,80	0,30	11%	T.10%Ar	1,44	0,16	11%
Teste 1	1,30	0,16	12%	Teste 1	0,84	0,13	15%
Teste 2	0,80	0,05	6%	Teste 2	0,62	0,06	10%

Fonte: elaboração própria

Analisando os valores obtidos, constatou-se que o Teste 1 seria adequado para produção de blocos por conta das resistências à compressão obtidas, enquadrando-se próximo da classe C12 de acordo com a NBR 13438 (ABNT, 2013a), já o Teste 2 não obteve valores que sejam aceitos por nenhuma norma técnica.

O Teste 1 obteve resistência à compressão de 46,42% da resistência do T.10%Ar e resistência à tração na flexão de 58,33%, enquanto a massa específica ficou em 90,04% do traço T.10%Ar. Por conta destes resultados, o traço não foi considerado satisfatório, uma vez que as resistências caíram excessivamente e a massa específica não teve redução tão significativa.

O motivo dos resultados insatisfatórios ocorreu em face do excesso de adição de casca e espuma. Como estes materiais estavam relacionados entre si na dosagem, ao aumentar a espuma, a proporção de casca ficou muito grande para o consumo de cimento utilizado. Desta forma, foi realizada mais uma tentativa de otimização aumentando somente o volume de espuma adicionada. A Tabela 45 apresenta o traço utilizado nesta tentativa.

Tabela 45 – Traços utilizados na segunda tentativa de otimização.

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Areia (kg)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
Pachla17	1	-		0,40	2,80	0,0050
T.10%Ar	1	0,62	0,11	0,44	3,10	0,0055
Teste 3	1	0,62	0,11	0,44	3,60	0,0055

Fonte: elaboração própria

Como pode ser observado na Tabela 45, o volume de espuma foi aumentado, mas o volume de casca foi mantido. Com essa condição, obteve-se a massa específica no estado fresco (Tabela 46) e a massa específica no estado endurecido (Tabela 47) aos 28 dias de cura após 24 horas na estufa a 100°C.

Tabela 46 – Massa Específica no Estado Fresco

Traço	MEF (kg/m³)
T.10%Ar	852,00
Teste 3	737,00

Fonte: elaboração própria

Tabela 47 – Massa Específica no Estado Endurecido aos 28 dias de cura

Traço	MEE (kg/m³)	D.P. (kg/m³)	C.V. (%)
T.10%Ar	730,96	15,49	2%
Teste 3	646,12	13,92	2%

Fonte: elaboração própria

Nesta segunda tentativa, em que se variou apenas o volume de espuma, observa-se que a massa específica no estado fresco foi reduzida em 13,49% e a massa específica no estado endurecido foi reduzida em 11,60%. Ao verificar que a redução das massas específicas foi similar à obtida na primeira tentativa no traço denominado de Teste 1, foram aferidas as resistências à compressão axial (Tabela 48) e à tração na flexão em três pontos (Tabela 49).

Tabela 48 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.10%Ar	2,47	0,19	8%
Teste 3	1,72	0,08	4%

Fonte: elaboração própria

Tabela 49 – Resistência à tração na flexão aos 28 dias de cura

Traço	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
T.10%Ar	1,44	0,16	11%
Teste 3	0,92	0,05	5%

Fonte: elaboração própria

O traço denominado de Teste 3 foi considerado como traço ideal para seguimento da pesquisa, visto que, com essa dosagem, foi possível reduzir a massa específica obtida inicialmente e atingir valores de resistência que são aceitos pela NBR 13438 (ABNT, 2013a). Com os valores obtidos, pode-se classificar o traço desenvolvido como concreto C15, no qual a resistência média é superior ou igual a 1,5 MPa e o menor valor isolado é superior ou igual a 1,2 MPa. No entanto, a massa específica alcançada não se enquadrou na faixa indicada (<500kg) pela NBR 13438 (ABNT, 2013b), o que é facilmente explicado pelo fato do concreto ser curado em temperatura ambiente sem passar por cura em autoclave.

5. ANÁLISES DE DURABILIDADE DO COMPÓSITO DESENVOLVIDO

Após a definição dos traços, foram realizadas novas concretagens para efetivar a realização de diversas análises de durabilidade. Foram analisados dois traços para fins de estudo da degradação da casca de arroz na vida útil dos materiais. O primeiro deles é uma adaptação do Traço Pachla17 e o segundo o traço otimizado já foi descrito no item 4.3.

A Tabela 50 apresenta a nomenclatura e a dosagem que foram utilizadas nas análises microestruturais e de desempenho mecânico. Depois de todos os estudos de dosagem realizados no Capítulo 4, os traços foram definidos visando manter apenas diferença na quantidade de casca utilizada. Desta forma, a única variável nos materiais é o uso da fibra vegetal.

Tabela 50 – Traços utilizados nas análises de durabilidade

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Areia (kg)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Plastificante (kg)
Referência*	1	-	0,11	0,44	3,60	0,0055
Compósito**	1	0,62	0,11	0,44	3,60	0,0055

* Traço Referência é o Traço Pachla17 com adição de 10% de areia

** O Compósito é o traço otimizado no item 4.3 anteriormente denominado como Teste 3

Fonte: elaboração própria

É importante reforçar que o Traço Referência (apresentado na Tabela 50) apresenta as características de concreto celular que é regulamentado no Brasil pelas normas apresentadas no item 2.1.3.5 e o Compósito apresenta como matriz o concreto celular convencional e como componente de reforço a casca de arroz sem qualquer tipo de tratamento.

5.1 DURABILIDADE – ENVELHECIMENTO NATURAL E ACELERADO

As análises de envelhecimento natural foram realizadas nas amostras que permaneceram em ambiente interno, protegido de intempéries climáticas, em ambiente externo, em que ficaram submetidas às variações de temperatura e umidade, e em câmara úmida, todas durante o período de 365 dias.

Além desses processos de envelhecimento, também foram analisados os resultados obtidos a partir das amostras que permaneceram por 56 dias em banho-maria, que foi a metodologia utilizada para acelerar o envelhecimento dos corpos de prova. Os corpos de prova após os diferentes tipos de envelhecimento estudados são apresentados nas Figuras 49, 50, 51 e 52.

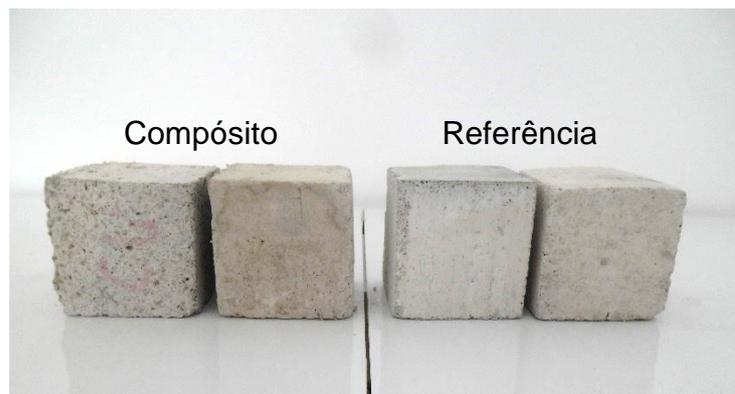


Figura 49 – Amostras após 56 dias em banho-maria
(Elaboração própria)

As amostras que foram submetidas ao envelhecimento acelerado, em banho-maria, não apresentaram problemas visuais (Figura 49). Não foi observado surgimento de fissuração em nenhum dos traços. A mesma condição foi observada nos corpos de prova que permaneceram pelo período de 365 dias em câmara úmida (Figura 50) e nas amostras que permaneceram por 365 dias em ambiente interno (Figura 51).

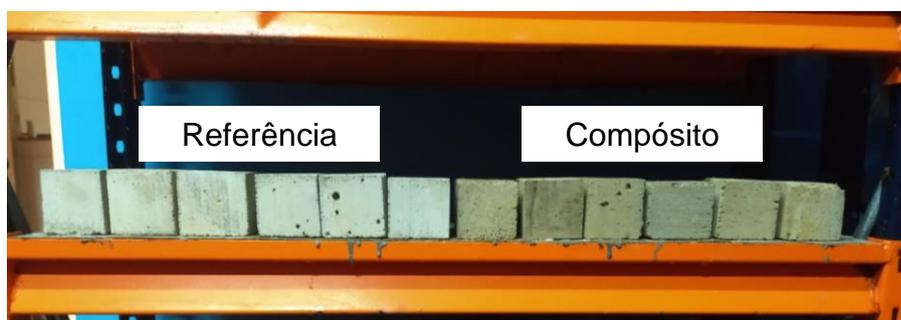
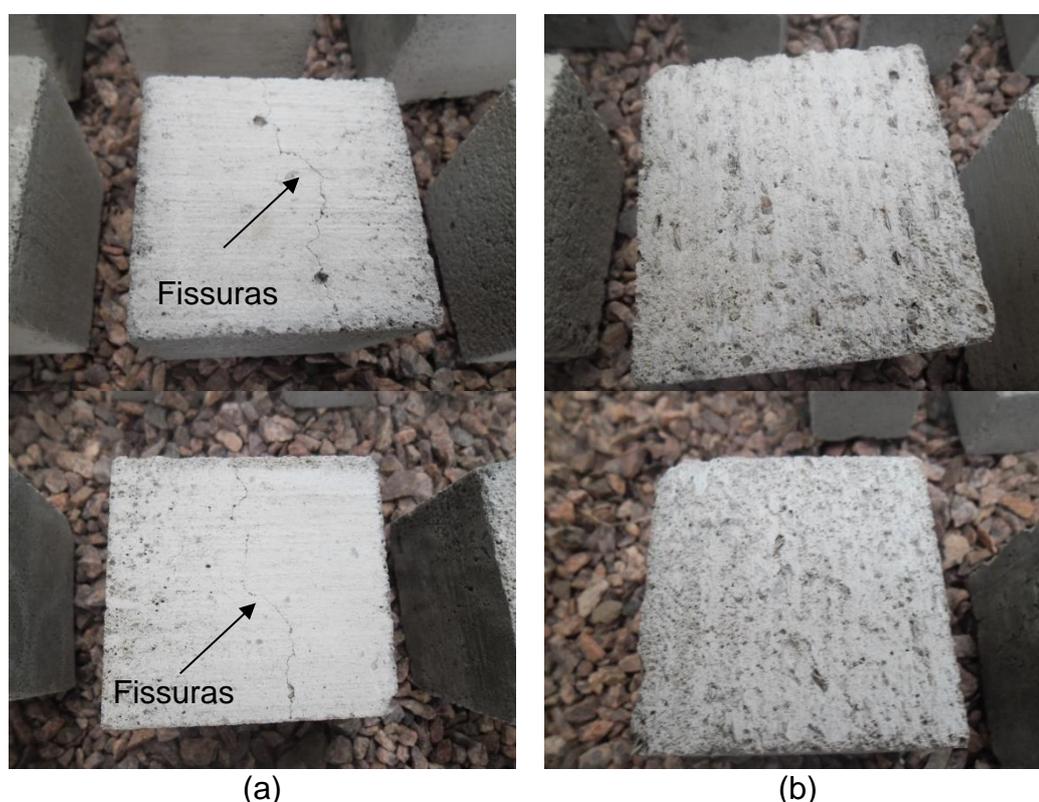


Figura 50 – Amostras após 365 dias em câmara úmida
(Elaboração própria)



Figura 51 – Amostras após 365 dias em ambiente interno
(Elaboração própria)

A diferença na aparência superficial das amostras pode ser observada com facilidade quando expostas às intempéries, variações de temperatura e umidade a que o ambiente externo conduziu. Mesmo o Compósito tendo fibras vegetais sem qualquer tratamento (casca de arroz), observa-se que, esteticamente, seu desempenho frente à agressividade ambiental foi superior, uma vez que não houve qualquer tipo de fissuração observada (Figura 52b). Já as amostras do Traço Referência apresentaram elevada fissuração (Figura 52a), sendo visíveis em todas as amostras analisadas.



(a) (b)
Figura 52 – Amostras após 365 dias em ambiente externo
(Elaboração própria)

A não propagação das fissuras no Compósito é um bom indicativo de que a casca auxilia no desempenho do material. Mesmo após um ano dentro da matriz cimentícia, ela consegue manter sua capacidade resistente de alguma forma. Nas análises microestruturais (Itens 5.1.1, 5.1.2, 5.1.3 e 5.1.4), foram discutidas as possibilidades para a manutenção de resistência das fibras (o que evita a propagação das fissuras) observadas em macroescala.

Após a ruptura das amostras, foram extraídas as cascas dos Compósitos. A Figura 53 ilustra a condição que ela foi extraída. Como o aspecto de todas as fibras foi similar (365 dias em câmara úmida, em ambiente interno, em ambiente externo e 56 dias em banho-maria), optou-se por fazer apenas uma ilustração.



Figura 53 – Casca de Arroz extraída do Compósito

Após a extração das cascas, elas foram adequadamente preparadas para os ensaios de difração de raios x, fluorescência de raios x e microscopia eletrônica de varredura (conforme descrito nos itens 3.3.8, 3.3.9 e 3.3.10).

5.1.1 Análise química a partir de difração de raios x

A Figura 54 apresenta a comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca retirada do Compósito que permaneceu por 28 dias em câmara úmida.

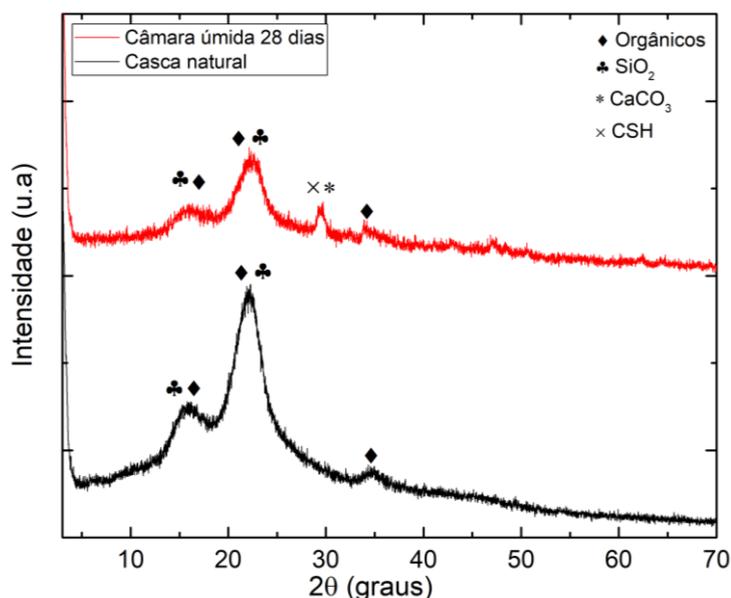


Figura 54 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias e 365 dias de cura em câmara úmida (Elaboração própria)

Como pode-se verificar no difratograma da casca que foi extraída da matriz aos 28 dias de cura (Figura 54) ainda existe a presença de materiais orgânicos, identificados majoritariamente como celulose, lignina e hemicelulose. Além dos materiais celulósicos, também foi identificada a calcita (CaCO_3), o dióxido de silício (SiO_2) e a possível presença de o silicato de cálcio hidratado (C-S-H – sob a fórmula química $\text{Ca}_{1,5}\text{SiO}_3\text{xH}_2\text{O}$). Salienta-se que o C-S-H tem fórmula química variável, mas optou-se por colocar neste trabalho a fórmula que foi compatível com o pico identificado na Figura 54.

O primeiro aspecto que pode ser observado é uma significativa redução da ascensão da linha de base compreendida entre os ângulos de 10° e 40° da casca *in natura* para a casca que estava inserida no Compósito. Este fato indica uma redução do amorfismo dos materiais encontrados (celulósicos e silicosos) constatando que, em apenas 28 dias de cura, o cimento já causou reações químicas relevantes na casca de arroz.

É possível identificar que houve uma redução na intensidade dos picos de $15,8^\circ$, $22,3^\circ$ e $34,7^\circ$, indicando que tais fases foram parcialmente consumidas pelos produtos gerados na hidratação do cimento Portland, sendo o principal responsável a calcita.

Outro aspecto relevante a ser observado é o surgimento de um pico com maior cristalinidade em, aproximadamente, $2\theta = 29,5^\circ$, o qual é compatível com silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e calcita (CaCO_3), ambos resultados de reações de hidratação do cimento Portland. Os códigos ICDD são, respectivamente, #00-033-0306 e #00-043-0697.

Como os materiais orgânicos e o dióxido de silício foram identificados nos mesmos picos, conforme ilustrado na Figura 54, a quantificação levou em consideração as duas fases. O fato de haver dióxido de silício na casca *in natura* foi comprovado por análise de fluorescência de raios x e foi discutido no item 3.3.3.2.

5.1.1.1 Compósito submetido a banho-maria

Para realizar a comparação da casca em seu estado natural, da casca extraída do Compósito com 28 dias de cura em câmara úmida e da casca extraída do Compósito que sofreu o envelhecimento acelerado, os difratogramas foram todos plotados na Figura 55.

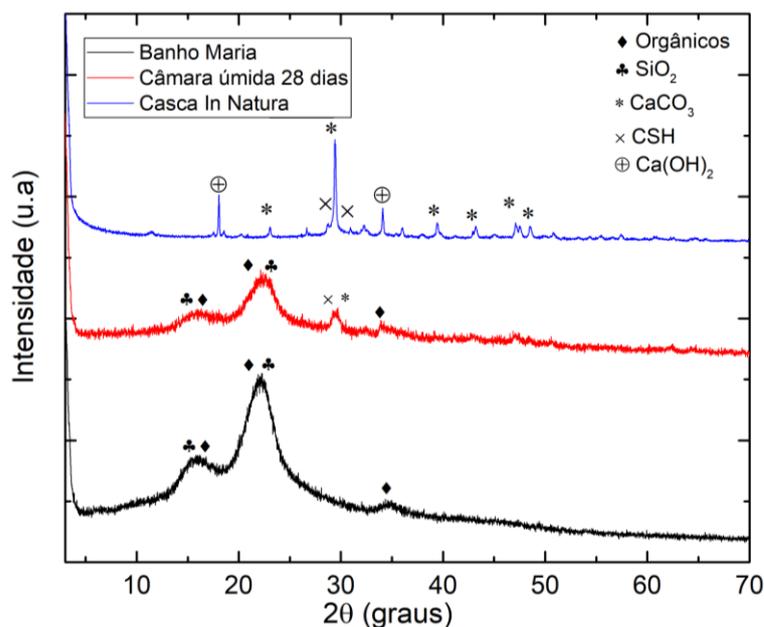


Figura 55 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido banho-maria por 56 dias (Elaboração própria)

Analisando o difratograma apresentado na Figura 55, observa-se a presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 – ICDD #01-076-0571), calcita (CaCO_3 – ICDD #00-043-0697) e a possível existência de silicato de cálcio hidratado (C-S-H – ICDD #00-033-0306) na casca extraída das amostras que permaneceram em banho maria. Conforme é possível verificar no Compósito que permaneceu por 56 dias em banho-maria, já não é possível encontrar material celulósico, indicando que o envelhecimento natural degradou definitivamente os polímeros naturais nos 56 dias em que o material ficou submerso na água com temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$.

Na comparação entre os três difratogramas (Figura 55), pode-se verificar a redução do material orgânico já aos 28 dias sem qualquer tipo de agente agressivo, esta redução foi discutida no item 5.1.1. Já na comparação do difratograma da casca extraída do Compósito que sofreu envelhecimento acelerado com os outros dois, é possível constatar que não foram identificados picos de materiais orgânicos de maneira consistente, indicando que os polímeros naturais foram degradados.

Por este motivo, não foi realizada nenhuma análise para quantificar as fases químicas presentes nos materiais, uma vez que, no difratograma da casca do Compósito que estava em banho-maria, foram encontrados apenas compostos provenientes da matriz.

O fato de haver a degradação completa dos polímeros naturais (principalmente lignina, celulose e hemicelulose) ocorre porque a lignina é solúvel em álcali quente, oxidável e facilmente condensável. Durante a mistura para preparar a matriz cimentícia, a reação química entre cimento e água libera calor. Além disso, o tratamento em banho-maria também é uma fonte de calor durante um longo período e acelera a degradação da lignina. Devido ao aumento da temperatura e da alcalinidade do cimento hidratado, promove-se a dissolução de carboidratos de baixa massa molar a partir da biomassa, enfraquecendo as estruturas das peças da planta (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

Os produtos de cimento hidratado ainda podem degradar a celulose em certa medida, levando a um novo aumento do montante de carboidratos solúveis (VO; NAVARD, 2016). A deterioração de materiais lignocelulósicos por meio do cimento hidratado gera a mineralização de fibras por Ca^{2+} ou outros cátions da suspensão de cimento (SEDAN *et al.*, 2007). Essa mineralização, devido à migração de produtos de hidratação, especialmente $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para o lúmen da fibra, paredes e vazios, está associada à fragilização da fibra (MISHRA *et al.*, 2004).

5.1.1.2 Compósito com 365 dias em câmara úmida

Como o principal intuito das análises de difração de raios x é identificar se ainda há matéria orgânica nas fibras após os períodos e tratamentos realizados, foi plotado um difratograma no qual estão as leituras geradas para a casca do Compósito que permaneceu por 365 dias em câmara úmida, para a casca do Compósito que permaneceu por 28 dias em câmara úmida e para a casca *in natura* (Figura 56).

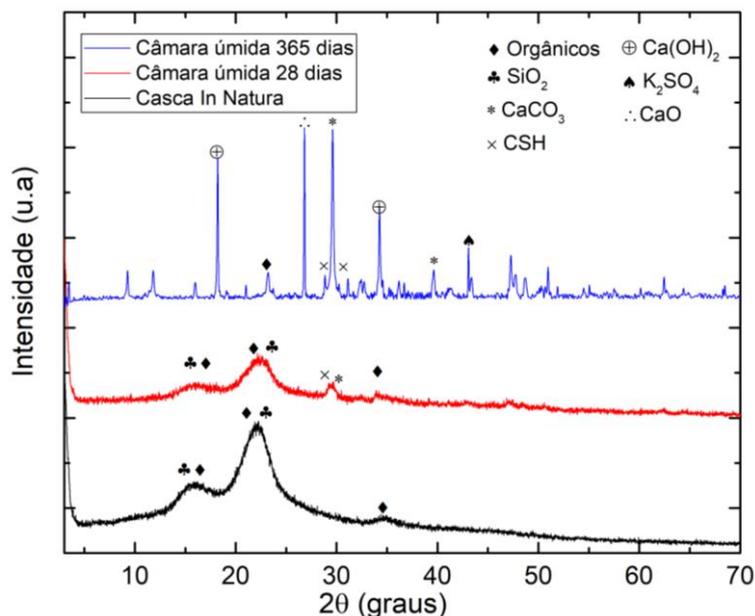


Figura 56 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (Elaboração própria)

Para realizar as análises, foram identificados os principais picos, em que foram encontrados os seguintes compostos químicos: três picos de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD #00-043-0697), três picos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 – ICDD #01-076-0571), um pico de sulfato de potássio (K_2SO_4 – ICDD #00-044-1414), um pico de óxido de cálcio (CaO – ICDD #00-028-0775) e possivelmente dois picos de silicato de cálcio hidratado (C-S-H – ICDD #00-033-0306).

Ao comparar os três difratogramas ilustrados na Figura 56, é possível verificar que os picos de material orgânico, identificados, principalmente, como celulose, hemicelulose e lignina nos difratogramas da casca *in natura* e da casca do Compósito com 28 dias de cura, podem ser identificados em pequenas intensidades após o Compósito permanecer por um ano em câmara úmida.

5.1.1.3 Compósito com 365 dias em ambiente interno

Para facilitar as análises e comparações, foram ilustrados os três difratogramas da casca de arroz sob diferentes períodos e condições na Figura 57.

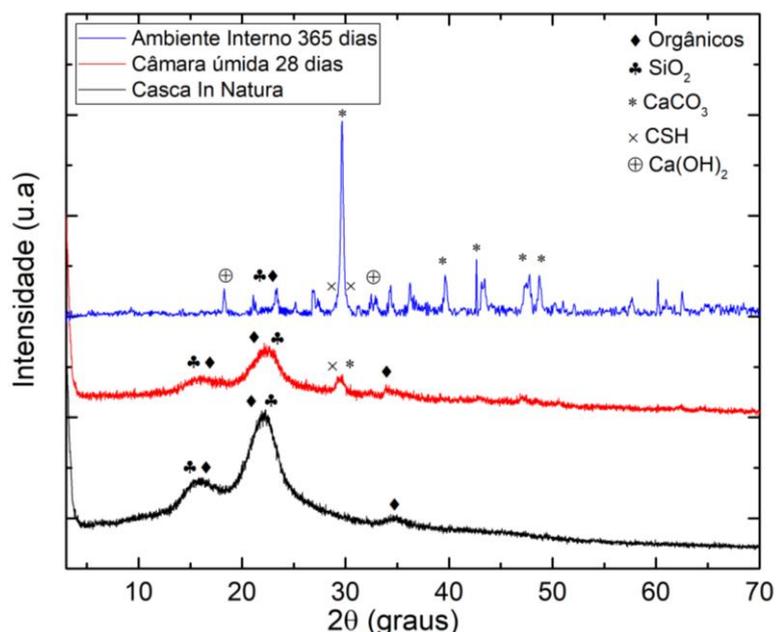


Figura 57 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias em ambiente interno (Elaboração própria)

Analisando o difratograma da casca extraída do Compósito após 365 dias em ambiente protegido de intempéries, identificaram-se cinco picos de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD #00-043-0697), dois picos de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 – ICDD #01-076-0571), possivelmente dois picos de silicato de cálcio hidratados (C-S-H – ICDD #00-033-0306) e, entre os 20 e 25° , uma leve ascensão da linha de base que pode indicar a presença de celulose, hemicelulose e lignina. Ao comparar os difratogramas ilustrados na Figura 57, verifica-se que a existência sugerida de material orgânico é muito pequena.

5.1.1.4 Compósito com 365 dias em ambiente externo

Assim como na casca extraída do Compósito que esteve em ambiente interno (Figura 57), a casca extraída do Compósito que ficou em ambiente externo também apresentou uma leve ascensão da linha de base que converge com uma característica de materiais lignocelulósicos. Para facilitar as comparações da evolução da deterioração da casca, foram ilustrados os difratogramas da casca *in natura*, da casca extraída aos 28 dias de cura e da casca extraída aos 365 dias na Figura 58.

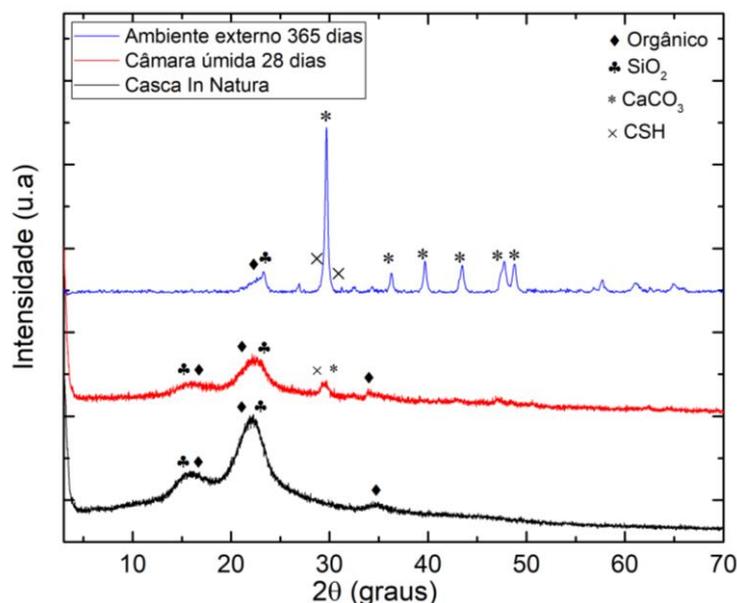


Figura 58 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito com 365 dias em ambiente externo (Elaboração própria)

Conforme pode ser visualizado, a ascensão na linha de base observada entre os 20 e 25° da casca extraída aos 365 dias é bastante similar às ascensões observadas na casca *in natura* e na casca extraída aos 28 dias de cura (Figura 58).

A maior degradação em ambiente interno e externo, quando comparada com a degradação observada em câmara úmida no mesmo período, pode ser justificada pela redução significativa da água na estrutura do Compósito. Após serem retirados da câmara úmida com 28 dias de cura, os materiais que permaneceram por um ano com umidade relativa ambiente sofreram maior encolhimento, o que, provavelmente, gerou a quebra dos polímeros naturais transformando-os em gás carbônico e água.

5.1.2 Fluorescência de raios x

Neste item, estão apresentados os resultados encontrados nos ensaios de fluorescência de raios x. Os óxidos identificados na casca de arroz extraída dos compósitos submetidos a banho-maria por 56 dias, em câmara úmida por 365 dias, em ambiente interno por 365 dias e em ambiente externo por 365 dias estão apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido aos envelhecimentos naturais e acelerado

Composição Química	Banho Maria	Peso		
		365 dias Câmara Úmida	365 dias Ambiente Interno	365 dias Ambiente Externo
SiO ₂	18,340 %	17,268%	15,399 %	15,262 %
Al ₂ O ₃	0,955 %	1,488 %	1,197 %	1,277 %
Fe ₂ O ₃	1,866 %	1,683 %	1,380 %	1,480 %
CaO	32,994 %	33,849 %	28,860 %	30,529 %
MgO	3,215 %	2,772 %	2,232 %	2,724 %
SO ₃	1,479 %	1,244 %	1,034 %	1,201 %
Na ₂ O	0,077 %	0,111 %	0,107 %	0,115 %
K ₂ O	0,092 %	0,440 %	0,347 %	0,309 %
P ₂ O ₅	0,079 %	0,075 %	0,064 %	0,063 %
TiO ₂	0,179 %	0,210 %	0,175 %	0,183 %
Cr ₂ O ₃	0,007 %	0,016 %	0,016 %	0,016 %
Mn ₂ O ₃	0,059 %	0,059 %	0,062 %	0,062 %
ZnO	0,017 %	0,020 %	0,013 %	0,014 %
SrO	0,078 %	0,157 %	0,145 %	0,125 %

Fonte: elaboração própria

Assim como na casca de arroz *in natura*, foi identificado um percentual relevante de dióxido de silício na casca extraída dos Compósitos submetidos a banho-maria (Tabela 51). O percentual de 18,34%, possivelmente, é superior ao observado na casca *in natura* pelo fato de que, após a degradação do material orgânico (já discutida no Item 5.1.1.1), o peso inicial da fibra foi reduzido, ou seja, na realidade, a quantidade total de óxido de silício não aumentou. Outra possibilidade é que o acréscimo de SiO₂ seja causado pela composição química do cimento.

Além do óxido de silício, o óxido de cálcio também foi identificado em elevada quantidade óxido de cálcio. O óxido de cálcio identificado é compatível com os picos de C-S-H, de carbonato de cálcio e de hidróxido de cálcio identificados no item 5.1.1 no ensaio de difração de raios x (*Figura 55*). Todos esses compostos químicos são introduzidos na fibra pela matriz cimentícia.

Os óxidos quantificados após 365 dias em câmara úmida confirmam os compostos químicos identificados no ensaio de difração de raios X. Além disso, há clara demonstração de que a matriz cimentícia está presente na casca de maneira muito significativa, principalmente pelo quantitativo de óxido de cálcio. Quanto ao percentual de óxido de silício, pode-se verificar que a variação entre a quantidade da casca extraída das amostras em 56 dias em banho-maria e da casca extraída das amostras após 365 dias em câmara úmida é muito parecida.

O quantitativo dos óxidos obtidos a partir do ensaio de FRX da casca extraída do Compósito submetido ao ambiente interno por 365 dias está apresentado na Tabela 51.

Analisando os óxidos quantificados após 365 dias em ambiente interno, pode-se verificar que a quantidade de dióxido de silício é similar à identificada nas cascas extraídas dos compósitos que permaneceram em câmara úmida e em banho-maria. O óxido de cálcio também apresenta resultado similar aos aferidos para as cascas extraídas dos Compósitos submetidos à câmara úmida e a banho-maria.

As leituras que referentes à casca extraída de compósitos que ficaram em ambiente externo são muito similares às da casca extraída das amostras que ficaram em ambiente interno, portanto, todas as análises realizadas são similares.

Possivelmente, a similaridade entre as fibras que foram submetidas ao ambiente interno e externo, tanto nos óxidos presentes aferidos a partir de fluorescência de raios x quanto nos materiais orgânicos aferidos nos difratogramas se dá pelo fato de, em um período de um ano, não haver agressividade ambiental à estrutura interna dos materiais. A Figura 51 e a Figura 52, apresentadas no Item 5.1, comprovam que não houve fissuração superficial das amostras que tinham reforço da casca, o que indica que a degradação da fibra em ambos os ambientes foi causada em sua maior parte pela alcalinidade da matriz e que as intempéries não tiveram grande contribuição para deterioração da casca de arroz.

5.1.3 Análise em microscopia eletrônica de varredura

Neste item, estão apresentadas as imagens obtidas das cascas de arroz extraídas dos compósitos que foram submersos em água a 60°C por 56 dias, amostras que ficaram em câmara úmida por 365 dias, amostras que foram submetidas a intempéries naturais por 365 dias e amostras que ficaram em ambiente interno protegido de intempéries por 365 dias.

5.1.3.1 Compósito submetido a banho-maria

A Figura 59 ilustra a superfície da casca *in natura* (à esquerda) e a superfície da casca extraída dos compósitos que ficaram submersos em água quente (à direita). Na ampliação de 200 vezes, é possível observar que a parte mais baixa do relevo da casca apresenta-se fissurada, sendo a maior parte das fissuras orientadas em sentido longitudinal.

Além da degradação física da casca, é possível constatar que a superfície apresenta muito material aderido, que, conforme as análises químicas anteriormente realizadas já identificaram, são partículas cimentícias provenientes da matriz.

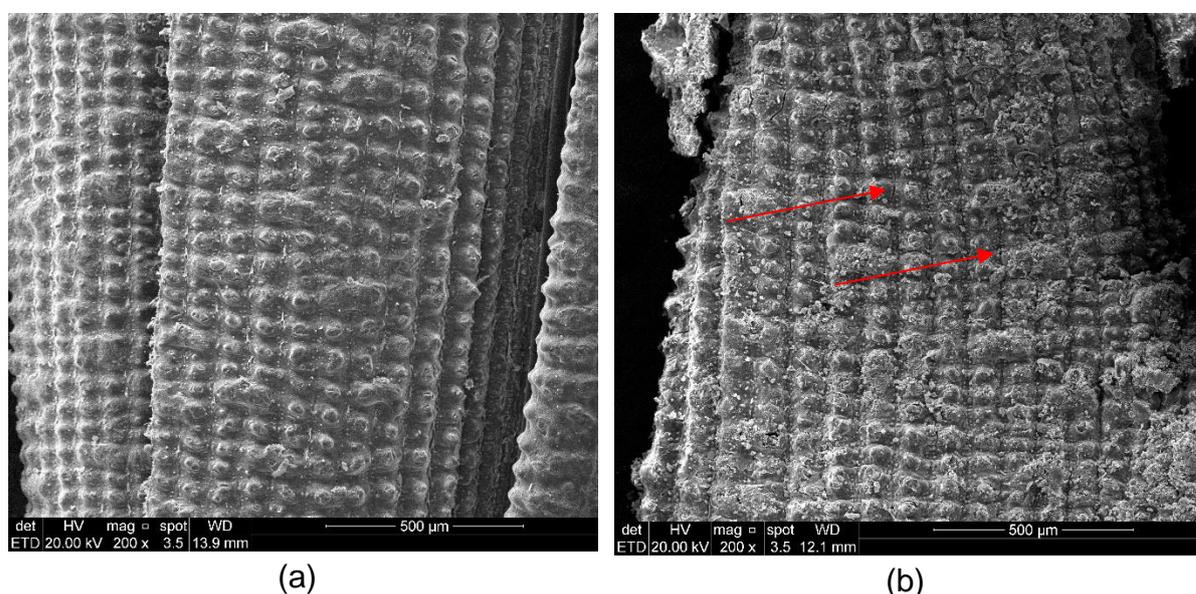


Figura 59 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em banho-maria (b) – ampliação de 200 vezes
(Elaboração própria)

A imagem com ampliação de 2000 vezes foi gerada para visualizar o formato das partículas cimentícias identificadas e as alterações superficiais que ocorreram na casca. A Figura 60 ilustra a imagem gerada com essa magnificação e indica uma possível presença de C-S-H (estruturas esponjosas destacadas em vermelho).

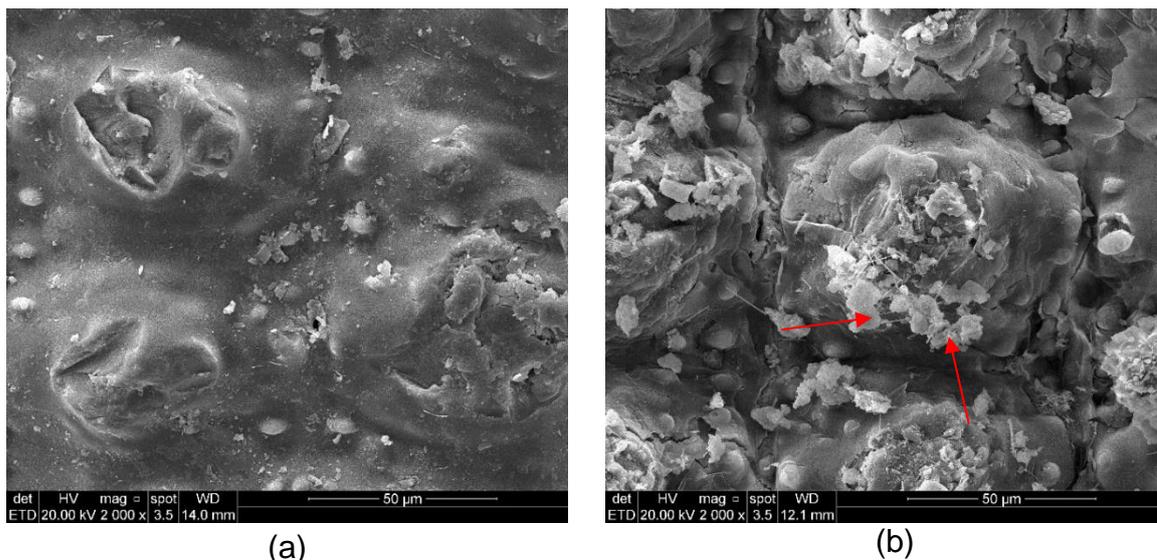


Figura 60 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em banho-maria (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

A Figura 61 apresenta a superfície da casca com uma ampliação de 2000 vezes. Assim como nos demais ataques realizados, é possível verificar que a casca apresentou pequenos pontos de fissuração (destacados em vermelho), no entanto, as partículas cimentícias aderidas à casca compensam parcelas da perda de resistência mecânica oriunda dessas fissuras pelo efeito cola que geram.

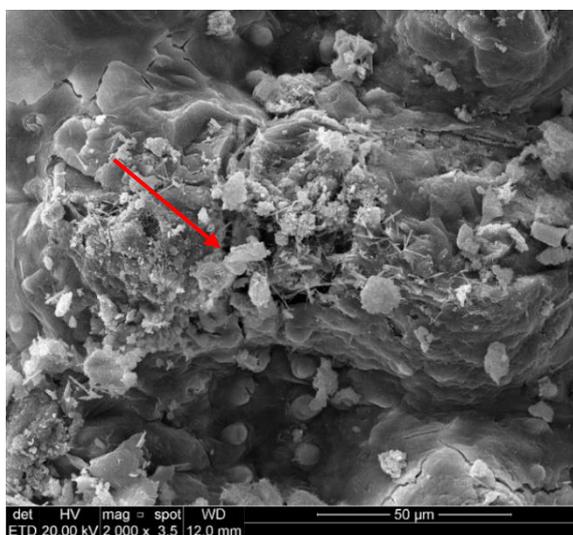


Figura 61 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Com a ampliação de 5000 vezes (Figura 62 e Figura 63), aumentam as possibilidades de que houve formação de C-S-H e de agulhas de etringita na superfície da casca.

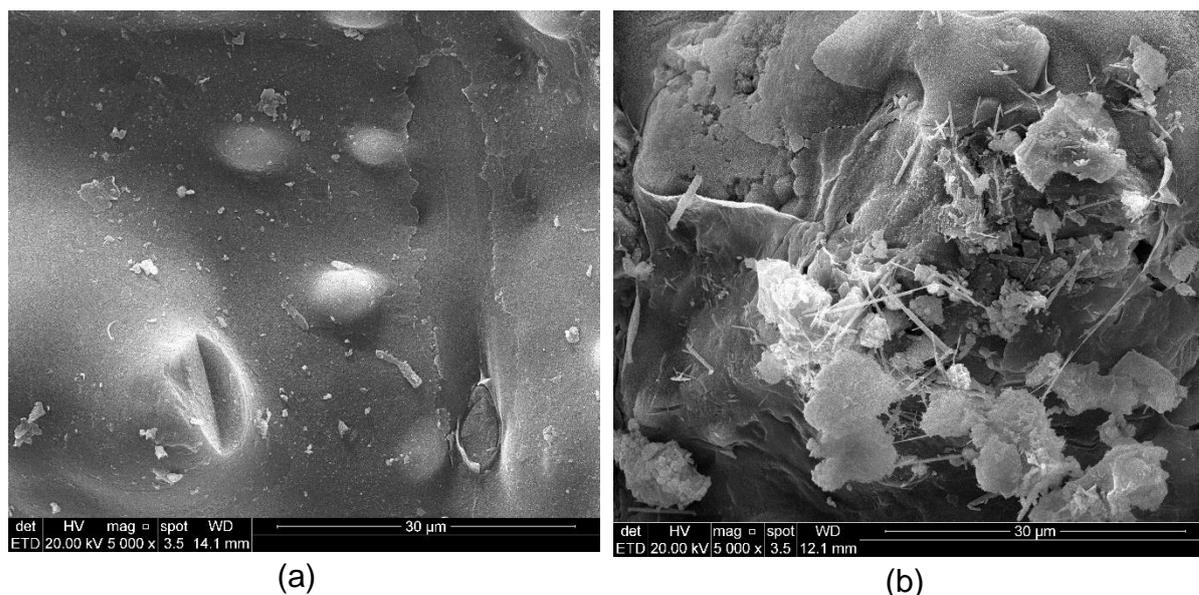


Figura 62 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Na Figura 63, também com ampliação de 5000 vezes, é bastante visual a capacidade das partículas cimentícias ligarem as duas extremidades das fissuras que ocorrem na casca. Na imagem, estão destacadas algumas dessas partículas que, nitidamente, mantêm a casca estável mesmo após a sua fissuração.

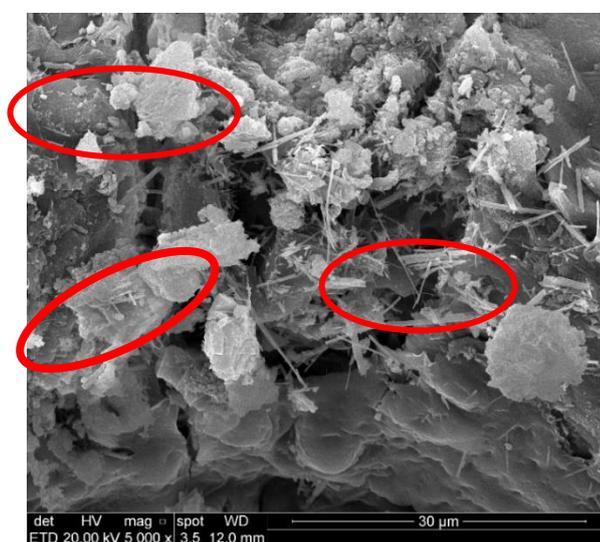


Figura 63 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Por fim, foi gerada uma imagem com ampliação de 20.000 vezes (Figura 64). Mesmo constatando que a espessura da fissura destacada em vermelho é, aproximadamente, $0,8\ \mu\text{m}$, verifica-se acomodação de partículas na parte interna, indicando a boa capacidade de aderência e ancoragem que a matriz cimentícia e a casca de arroz apresentam.

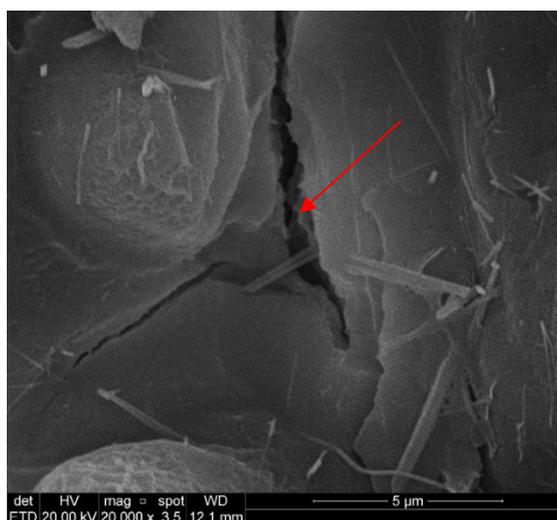


Figura 64 – Casca retirada do Compósito ampliação de 20000 vezes (Elaboração própria)

5.1.3.2 Compósito submetido a câmara úmida por 365 dias

A Figura 65 ilustra a casca em seu estado natural (Figura 65a) e a casca extraída do Compósito (Figura 65b) com ampliação de 200 vezes.

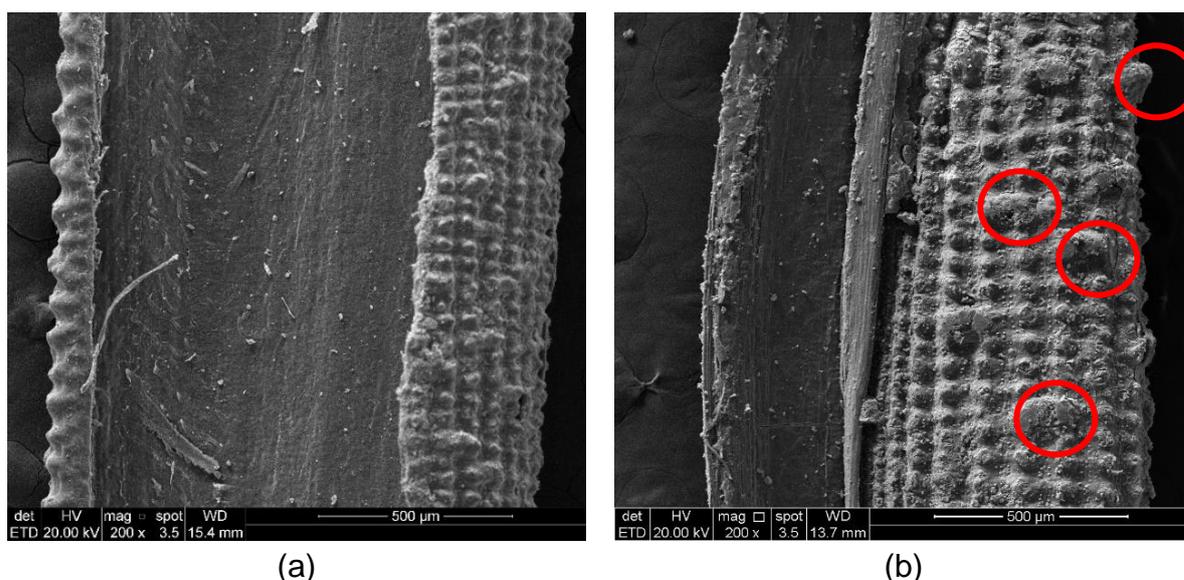


Figura 65 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Como é possível verificar na ampliação de 200 vezes, a casca extraída do Compósito possui, em sua superfície externa, pequenos relevos que são oriundos da matriz cimentícia (Figura 65a destaques em vermelho). Nesta ampliação, não é possível realizar muitas observações da condição estrutural das fibras.

Para melhorar as análises e entender qual é o estado de degradação da fibra após permanecer por um ano dentro do Compósito, foram geradas imagens com ampliação de 2000 vezes (Figura 66).

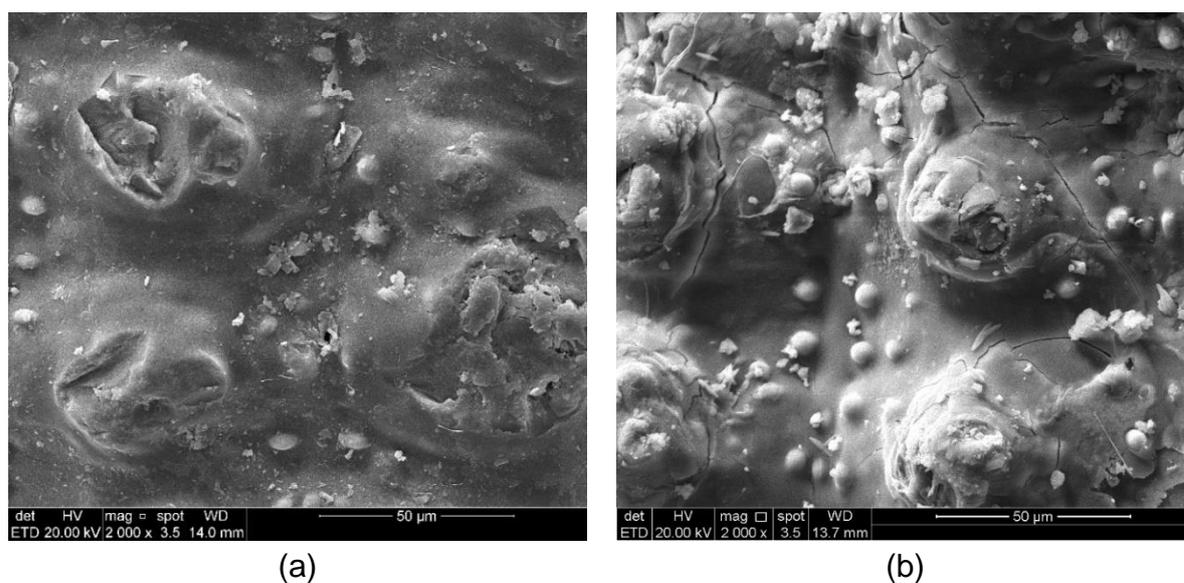


Figura 66 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Na ampliação de 2000 vezes (Figura 66), já é possível verificar que a casca apresenta microfissuras na superfície externa (Figura 66b) quando comparada com a casca em seu estado natural (Figura 66a). Também é possível observar que, mesmo após a extração da fibra da matriz cimentícia, sempre existem resquícios de materiais cimentícios em sua superfície.

Como as fissuras apresentam dimensões muito pequenas, foi gerada ampliação de 2000 vezes da superfície interna da casca extraída do Compósito após 365 dias para verificar se a fissura também poderia ser observada na superfície interna, o que indicaria se a degradação estrutural ocorre em toda a seção transversal. A Figura 67 ilustra a superfície interna da casca.



Figura 67 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Ao analisar a superfície interna da casca, pode-se verificar que não há evidência de que as fissuras observadas na superfície externa contemplem toda a espessura da casca. Conforme pode-se verificar na Figura 67, não existem fissuras aparentes na superfície interna da fibra.

Na ampliação com ampliação de 5000 vezes (Figura 68), pode-se comparar a superfície externa da casca em seu estado natural (Figura 68a) e após permanecer por um ano dentro do Compósito que esteve em câmara úmida (Figura 68b).

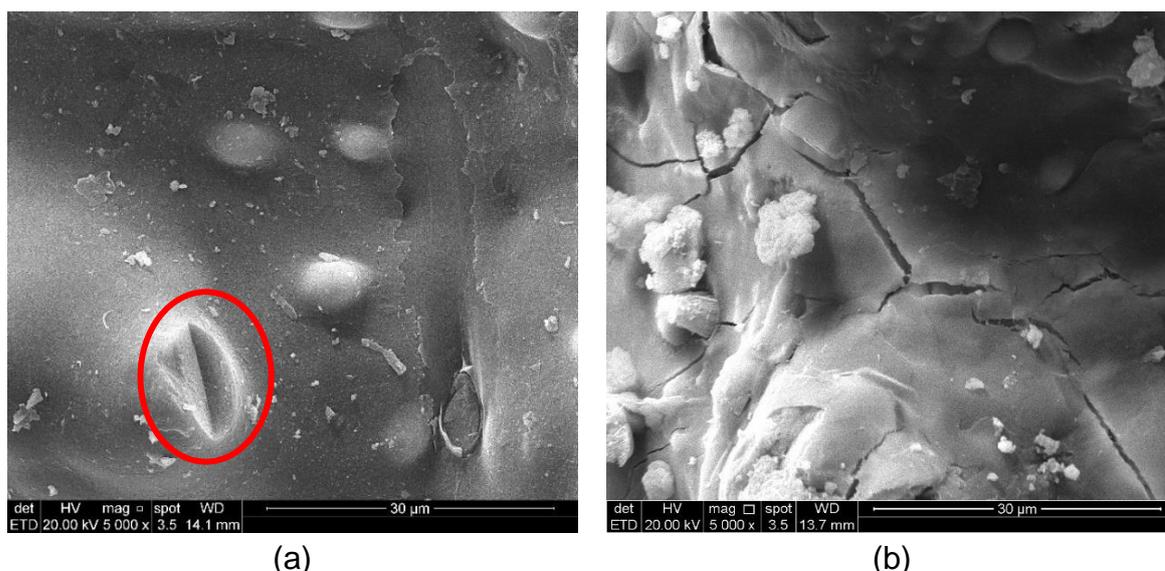


Figura 68 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

As constatações a serem realizadas a partir das imagens com ampliação de 5000 vezes são as mesmas já apresentadas nas ampliações de 2000 vezes, ou seja, a fibra apresenta relevante fissuração na superfície externa e superfície interna íntegra.

Além da análise quanto à integridade estrutural, analisando a Figura 68, é possível identificar diversos elementos oriundos da matriz cimentícia. Esses elementos da matriz cimentícia ajudam a calcificar a casca. Essa calcificação ocorre devido à migração de produtos de hidratação, especialmente Ca(OH)_2 , para o lúmen da fibra, paredes e vazios, e foi observada tanto em macroescala, ao manusear as fibras para realização dos ensaios, como também em microescala.

A calcificação da casca após ela permanecer na matriz cimentícia pode ser verificada em microescala (Figura 68) pelo fato de que, em seu estado natural, existe uma certa maleabilidade de sua estrutura (Figura 68a – destaque em vermelho), após o contato com a matriz cimentícia, ela fica craquelada (Figura 68b). Essa calcificação pode compensar a perda de resistência gerada pela degradação da celulose observada nas análises de difração e raios x.

Além da possibilidade de compensar parcialmente a resistência à tração na flexão perdida pela degradação da celulose, a calcificação da casca pode gerar incremento da resistência à compressão axial. Essa sugestão é devido à inexistente contribuição da casca *in natura* nesse quesito do desempenho mecânico. Após a calcificação e as reações químicas que ocorrem entre o dióxido de silício da casca *in natura* com o hidróxido de cálcio, formando o C-S-H, pode haver algum incremento de resistência à compressão axial.

5.1.3.3 Compósito submetido a ambiente interno por 365 dias

A Figura 69 ilustra as superfícies externas e internas da casca de arroz em seu estado natural e da casca de arroz extraída do Compósito que permaneceu por 365 dias em ambiente interno, isto é, protegido de intempéries.

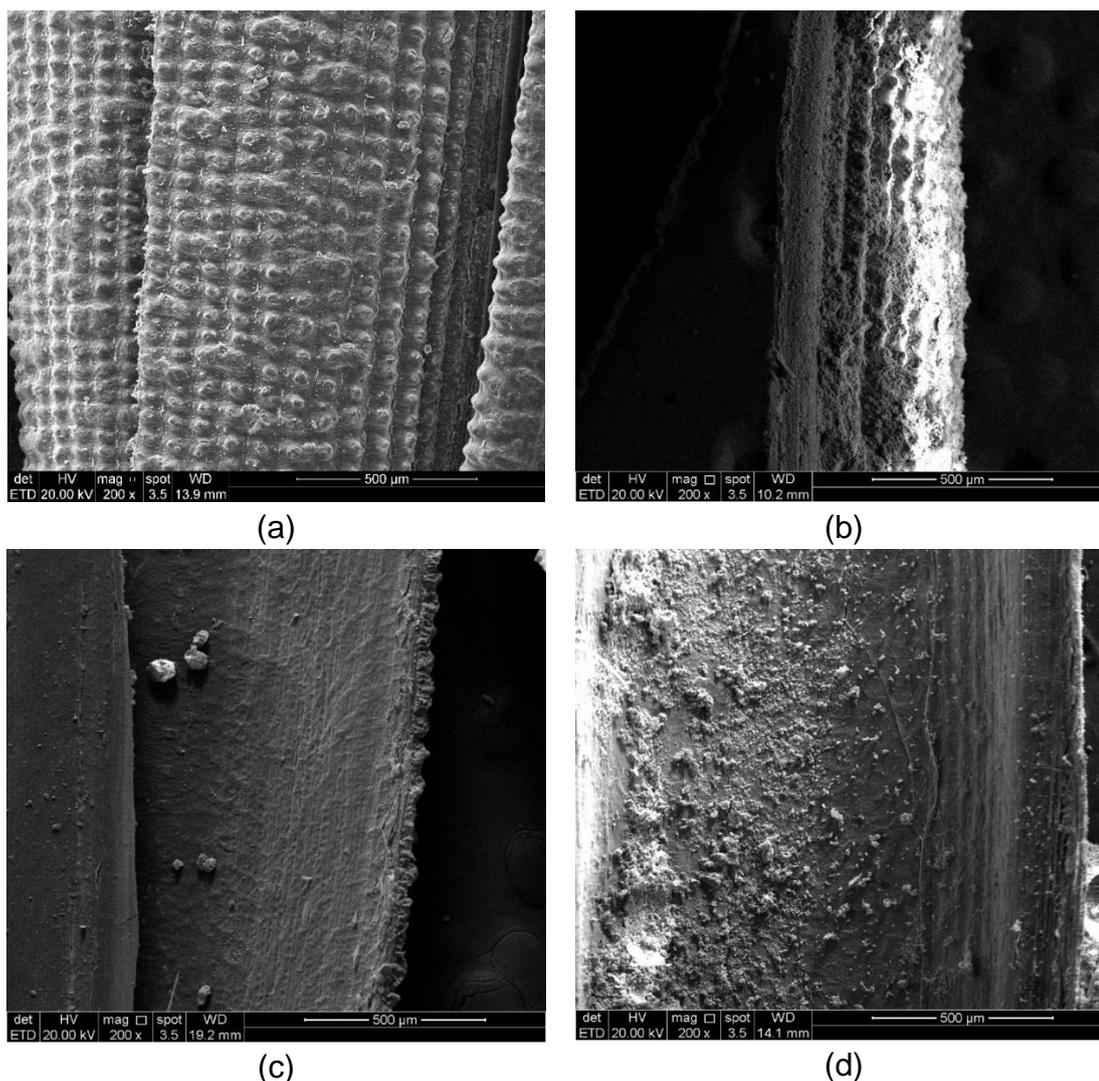


Figura 69 – Superfície externa da casca *in natura* (a), superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b), superfície interna da casca *in natura* (c) e superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (d) – ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Com a ampliação de 200 vezes ilustrada na Figura 69, é possível identificar que ambas as superfícies da casca extraída do Compósito apresentam resíduos da matriz cimentícia. No entanto, a ampliação é insuficiente para analisar a condição da estrutura da fibra, motivo pelo qual foram geradas imagens com ampliação de 2000 vezes (Figura 70).

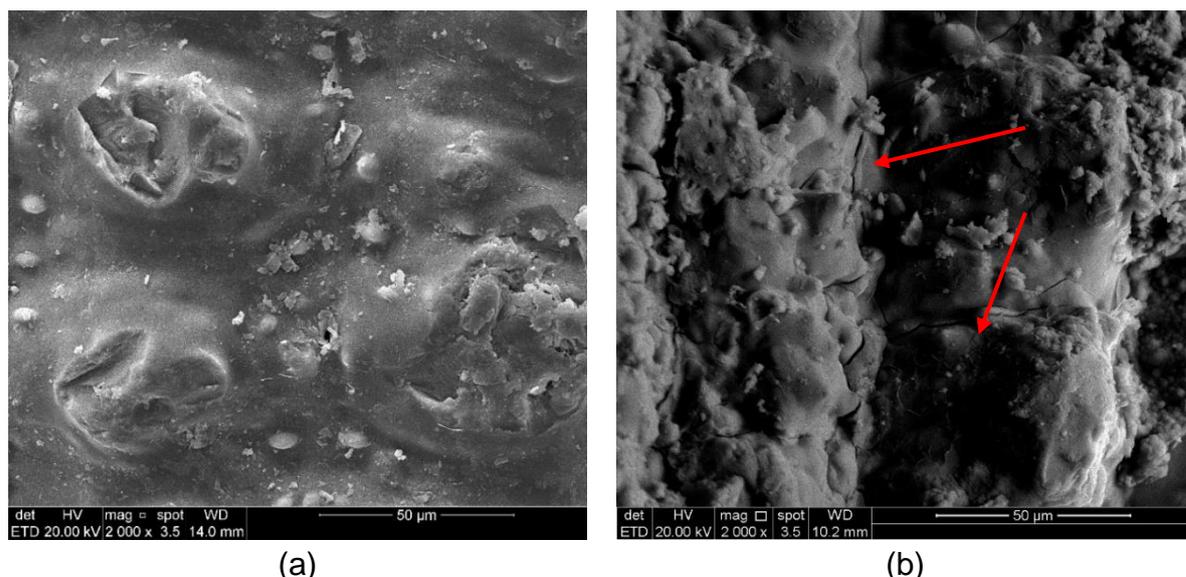


Figura 70 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Ao comparar a superfície externa da casca extraída do Compósito (Figura 70b) e a superfície da casca *in natura* (Figura 70a), pode-se observar que houve calcificação da fibra que esteve em contato com a matriz. Essa observação foi possível na sua extração e no manuseio para realização do ensaio.

Mesmo havendo fissuração (destacado em vermelho na Figura 70b), é possível constatar que as reações químicas entre os produtos da hidratação do cimento e a superfície da fibra vegetal reduzem as perdas estruturais que ocorrem na fibra devido à degradação da celulose. Esse fato é comprovado observando que, na superfície interna da casca (Figura 71), não é possível identificar elevada fissuração.

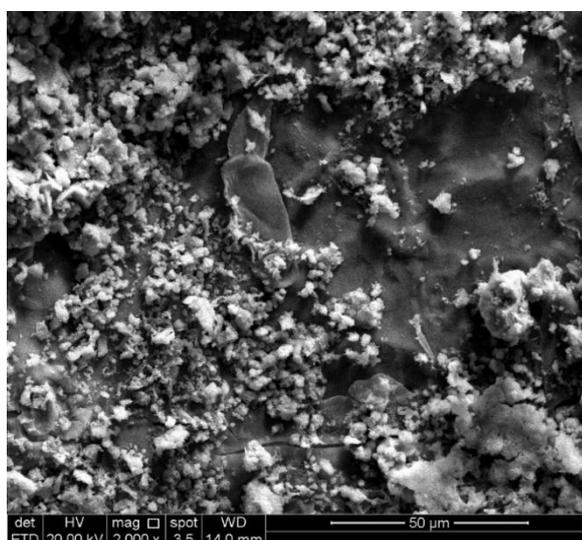


Figura 71 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Para melhor visualização da estrutura da casca, também foi gerada ampliação de 5000 vezes da superfície externa (Figura 72) e da superfície interna (Figura 73).

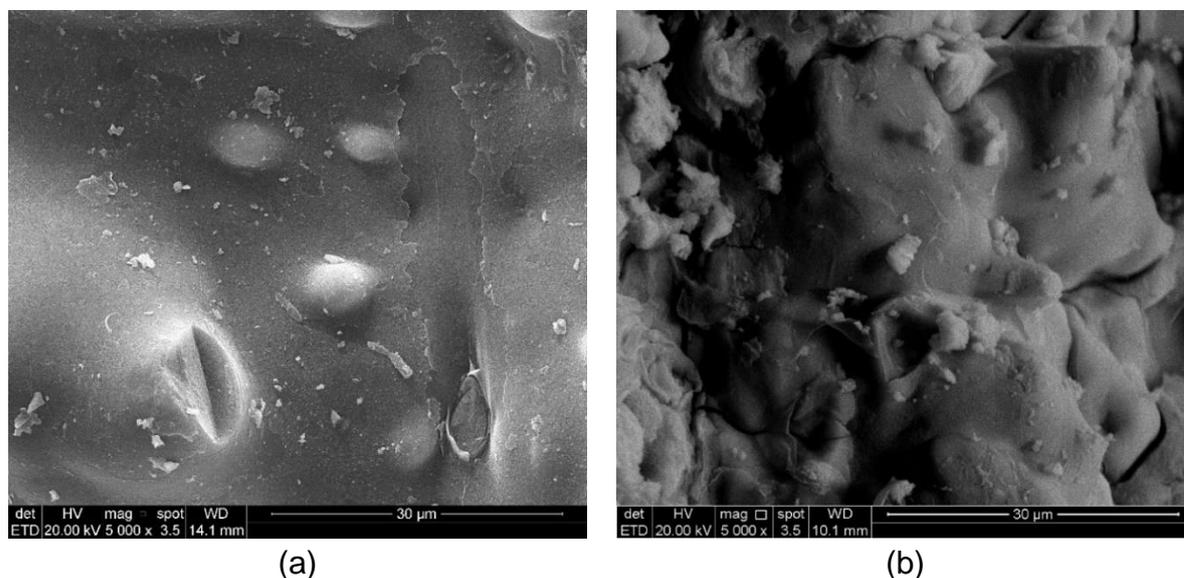


Figura 72 – Casca *in natura* (a) casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Ao comparar a condição da superfície externa da casca de arroz *in natura* (Figura 72a) e da casca extraída do Compósito (Figura 72b), pode-se constatar que a superfície da casca extraída da matriz apresenta sua estrutura totalmente coberta pelos produtos gerados nas reações químicas do cimento Portland. Essa situação atenua o fato de que a maior parte da celulose já está degradada, uma vez que o formato geométrico e a estrutura da casca são mantidas a partir de produtos.

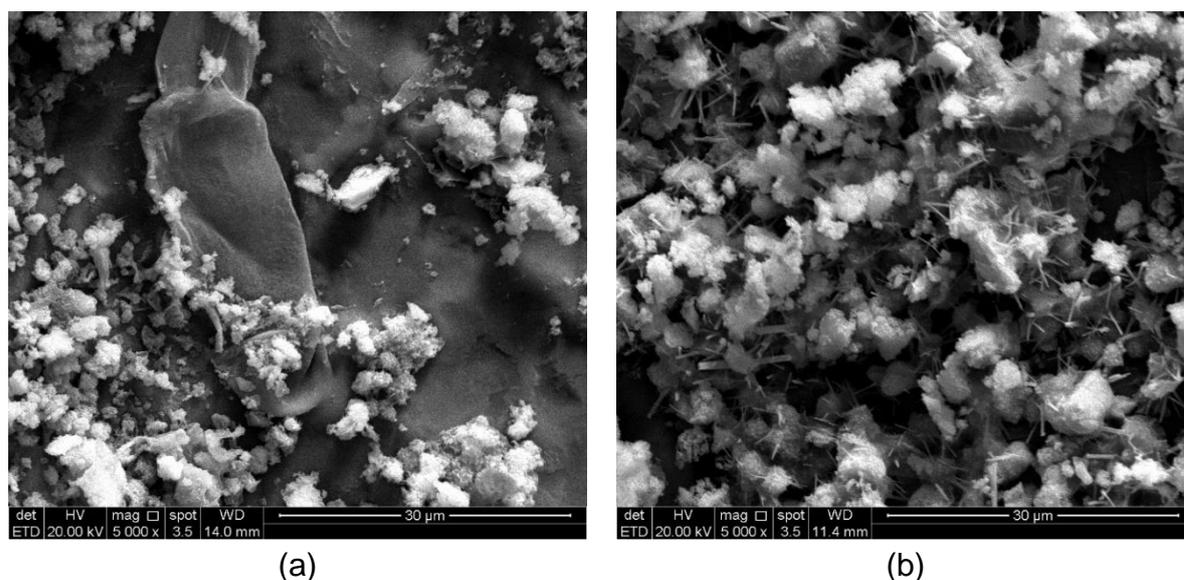


Figura 73 – Casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Ao analisar as imagens com ampliação de 5000 vezes, pode-se identificar a formação das agulhas de etringita (Figura 73b), que acabam aderindo fortemente à superfície da casca e não são possíveis de retirar integralmente. A identificação e produtos cimentícios na superfície interna e na superfície externa da casca indicam que a deterioração causada pela alcalinidade da matriz ocorre em suas duas superfícies simultaneamente.

5.1.3.4 Compósito submetido a ambiente externo por 365 dias

As superfícies da casca de arroz em seu estado natural e da casca de arroz extraída do Compósito após 365 dias de cura em ambiente externo com exposição às intempéries climáticas estão ilustradas em ampliação de 200 vezes na Figura 74.

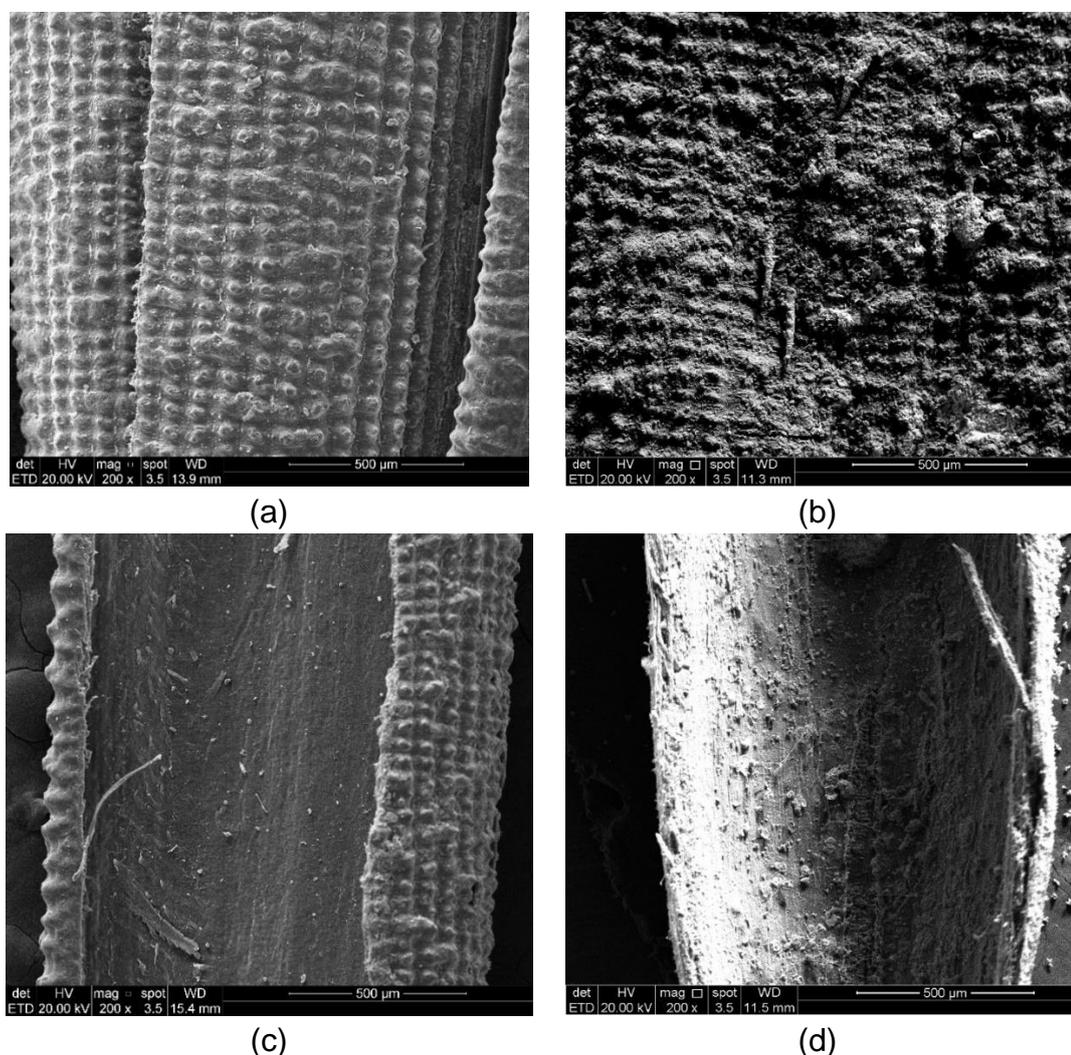
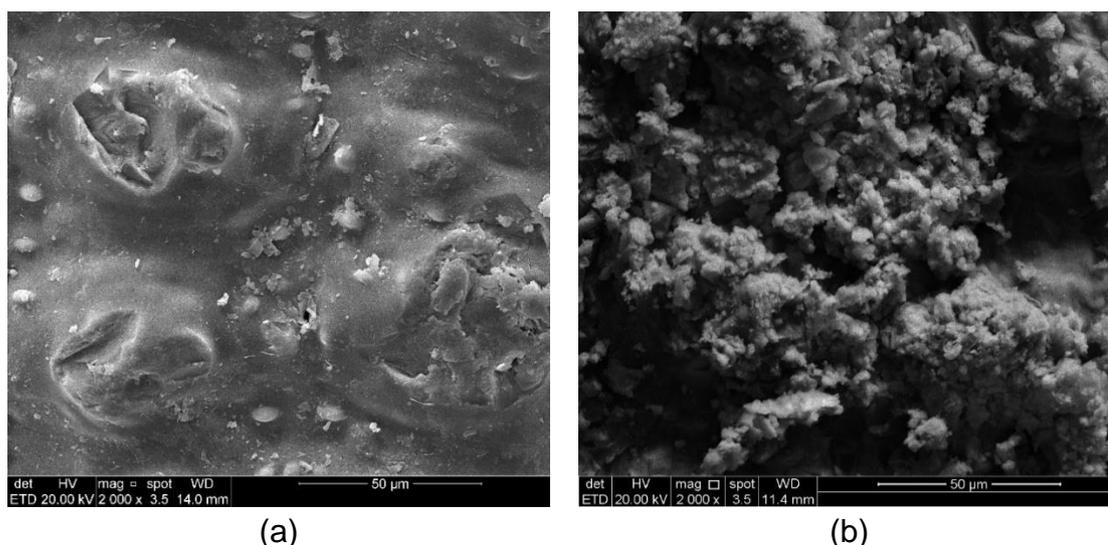


Figura 74 – Superfície externa da casca *in natura* (a), superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b), superfície interna da casca *in natura* (c) e superfície externa da casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (d), – ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Na ampliação de 200 vezes (Figura 74), não é possível analisar a estrutura adequadamente. A única observação pertinente nesta escala de ampliação é de que todas as superfícies da casca apresentam elevada quantidade de material oriundo da matriz cimentícia. Para melhorar a qualidade das análises, foram realizadas ampliações de 2000 vezes da superfície externa (Figura 75) e da superfície interna (Figura 76) da casca de arroz.



(a) (b)
Figura 75 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Como pôde ser observado na Figura 74b e Figura 75b, a superfície externa da casca de arroz apresenta-se completamente coberta pelos produtos oriundos da matriz cimentícia. Ao comparar a casca em seu estado natural (Figura 74a e Figura 75a) com a casca extraída do Compósito fica evidente a diferença estrutural entre ambas as fibras, além disso, não é possível verificar qualquer tipo de fissuração em nenhuma das cascas. A não identificação de fissuração da casca extraída do Compósito dar-se-á, provavelmente, pelo fato de que os produtos da matriz cimentícia sobrepõem os danos causados por ela nas fibras da casca.

A superfície interna da casca extraída do Compósito, com ampliação de 2000 vezes, está ilustrada na Figura 76.

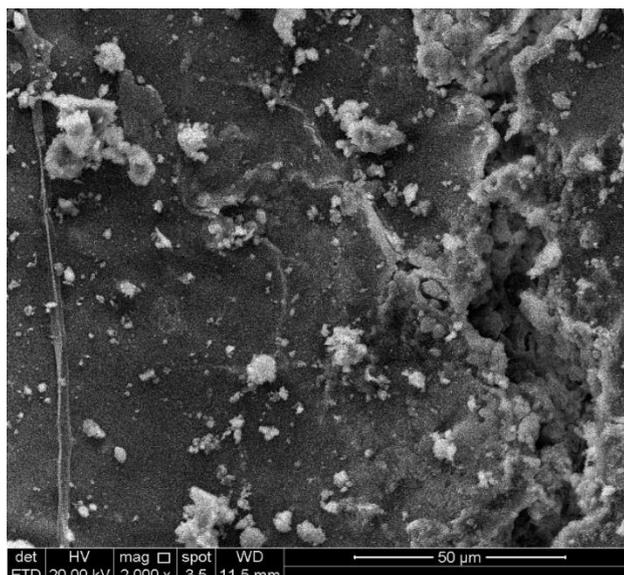


Figura 76 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Ao analisar a estrutura interna da casca de arroz com a ampliação de 2000 vezes (Figura 76), é possível verificar a existência de produtos oriundos da matriz cimentícia, no entanto, em menor quantidade. A superfície interna da casca apresenta menor quantidade de material cimentício provavelmente pelo fato de sua estrutura ser mais lisa e ficar mais protegida devido à forma geométrica da casca.

A ampliação de 5000 vezes da superfície externa da casca de arroz está apresentada na Figura 77.

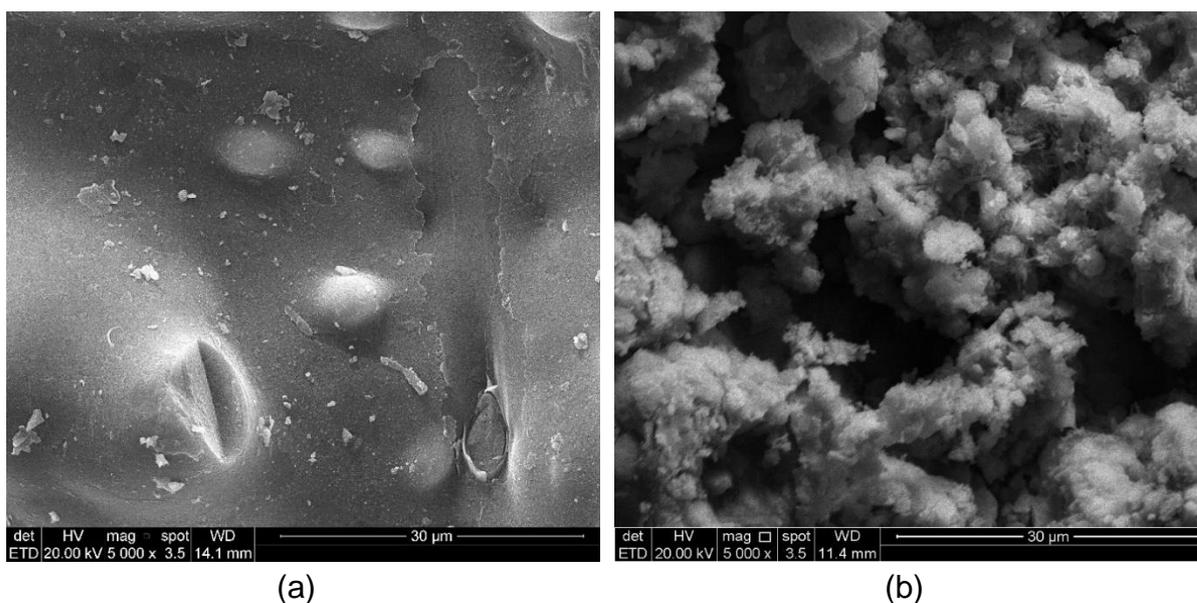


Figura 77 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Conforme pode-se verificar na comparação entre a superfície da casca em seu estado natural (Figura 77a) e da casca extraída do Compósito (Figura 77b), a cobertura da casca é integralmente feita por produtos cimentícios. A aparência esponjosa da casca extraída do Compósito remete à formação de C-S-H, que já foi identificado no ensaio de difração de raios x. Essa formação de C-S-H na superfície da casca poderia possibilitar que as perdas de resistência mecânica, após a degradação da celulose, sejam atenuadas ou, até mesmo, extintas.

5.1.4 Espectroscopia por energia dispersiva

Neste item, serão apresentadas as leituras dos espectros nas fibras extraídas de amostras que permaneceram por 365 dias em câmara úmida, em ambiente interno e em ambiente externo, e para amostras que foram submetidas a envelhecimento acelerado a partir de banho-maria por 56 dias.

5.1.4.1 Compósito submetido a banho-maria

A região da casca extraída dos compósitos submetidos a banho-maria em que foram aferidos os espectros de elementos químicos está ilustrada na Figura 78.

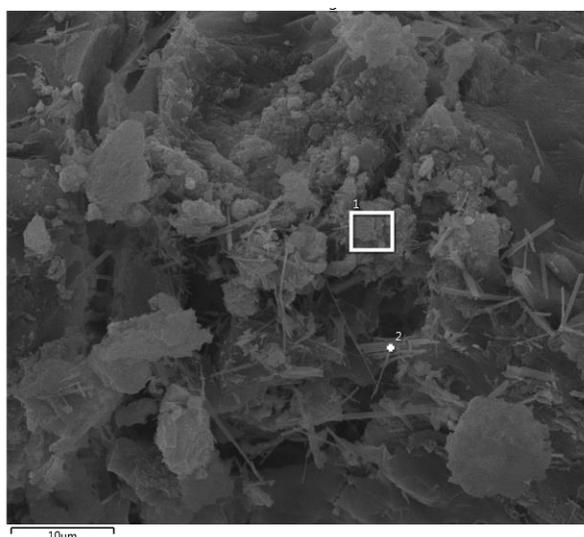


Figura 78 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria (Elaboração própria)

Como é possível verificar na imagem, a superfície apresentada, inicialmente, estava com a matriz cimentícia cobrindo quase sua totalidade, dificultando uma leitura mais precisa da condição da casca de arroz. Mesmo assim, os elementos foram identificados e quantificados (Tabela 52).

Tabela 52 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria

Espectro	1	2
C	22,18%	15,08%
O	51,93%	55,35%
Mg	1,52%	0,00%
Al	1,30%	2,19%
Si	4,97%	3,99%
Ca	18,08%	23,38%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Como pode-se verificar analisando os dados dispostos na Tabela 52, a matriz cimentícia acabou afetando muito os elementos identificados. Diante desta observação, optou-se por realizar uma nova análise com o dobro da ampliação e buscando uma área em que a matriz cimentícia fosse influenciar menos na identificação dos elementos químicos. A Figura 79 apresenta a área analisada.

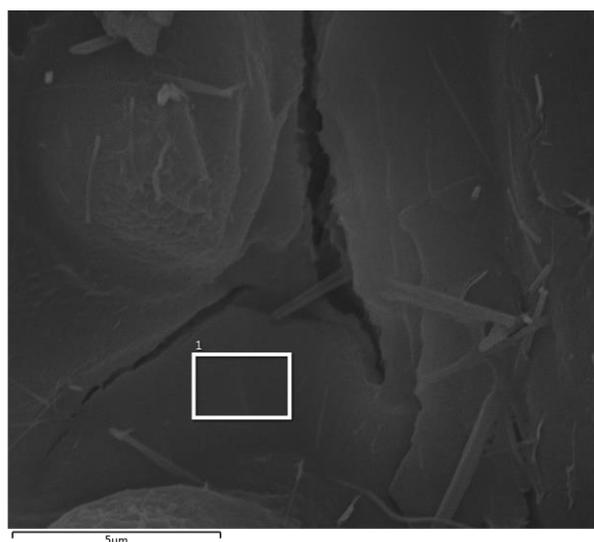


Figura 79 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria (Elaboração própria)

A Tabela 53 apresenta os valores obtidos na área identificada na Figura 79.

Tabela 53 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída de Compósito submetido a banho-maria

Espectro	1
C	14,46%
O	50,39%
Si	11,93%
Ca	23,21%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Agora com uma influência menor da matriz cimentícia, é possível identificar (Tabela 53) que a casca extraída dos compósitos que permaneceram em banho-maria não teve redução muito elevada na quantidade de carbono. Ainda assim, a quantidade de sílica reduziu mais de 50% em relação à casca *in natura* (Tabela 15). Mesmo buscando uma área que não apresentasse visualmente resquícios da matriz cimentícia (Figura 79), é possível constatar, a partir da Tabela 53, que o cálcio está presente na estrutura da fibra em quantidades relevantes, o que indica o elevado ataque alcalino a que as fibras ficam submetidas dentro da matriz e a importância da sílica que foi identificada na superfície externa da casca, que acaba protegendo, mesmo que parcialmente, a estrutura da casca.

5.1.4.2 Compósito submetido à câmara úmida por 365 dias

A identificação e quantificação dos elementos químicos encontrados na casca de arroz extraída do Compósito que permaneceu por 365 dias em câmara úmida estão apresentadas na Figura 80 e na Tabela 54, respectivamente.

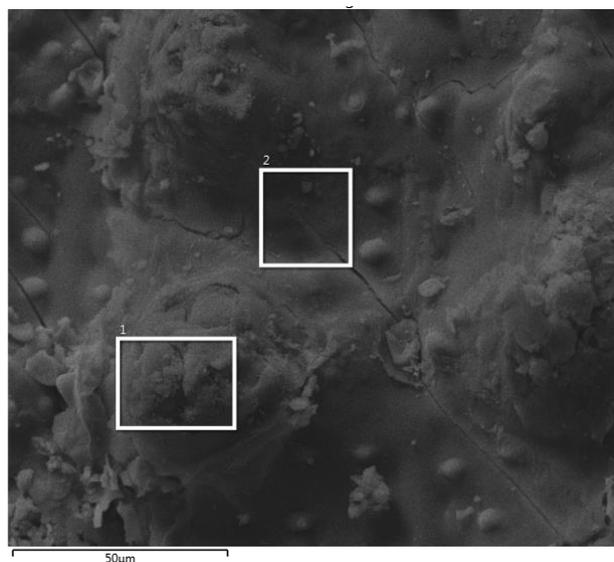


Figura 80 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (Elaboração própria)

As áreas demarcadas em branco e numeradas em 1 e 2 que estão ilustradas na Figura 80 demonstram em que foram aferidas as leituras dos elementos químicos. As áreas foram escolhidas a fim de identificar se havia variação significativa dos elementos químicos nas partes da superfície que apresentam relevo mais alto que nas demais.

A leitura da Tabela 54 possibilita verificar que os elementos identificados foram os mesmos e que as quantidades aferidas foram similares. A alta quantidade de cálcio indica que a matriz cimentícia consegue atingir todas as superfícies da casca, independentemente da variação de relevo que ela apresenta.

Tabela 54 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS

Espectro	1	2
C	11,35%	13,64%
O	52,57%	46,76%
Al	0,20%	0,33%
Si	13,23%	13,08%
K	2,60%	1,63%
Ca	20,06%	24,55%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

A análise elementar da superfície interna também foi realizada. A *Figura 81* ilustra a superfície interna da casca extraída do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida.

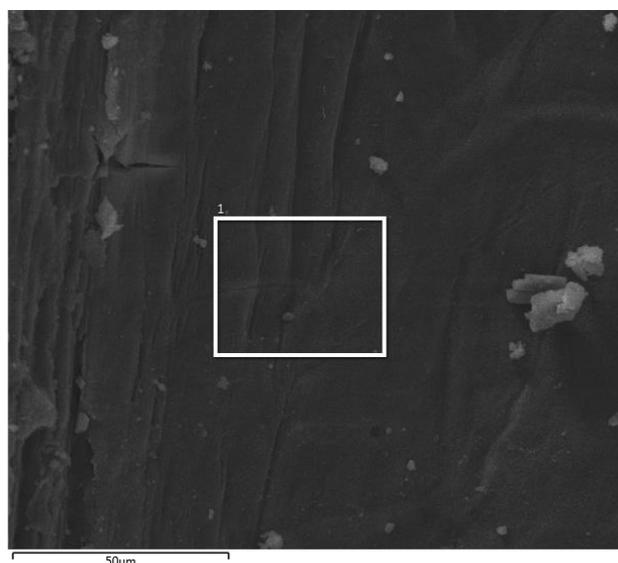


Figura 81 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída do Compósito com 365 dias de cura em câmara úmida (Elaboração própria)

Os elementos químicos identificados e quantificados na área destacada em branco na Figura 81 estão apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS

Espectro	1
C	20,78%
O	48,62%
Si	10,06%
K	0,94%
Ca	19,60%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Com exceção do carbono, os demais elementos químicos quantificados tiveram percentuais similares na superfície externa (Tabela 54) e na superfície interna da casca (Tabela 55). A identificação de maior percentual de carbono, possivelmente, ocorreu pelo fato de que, na superfície interna, foi identificada menor quantidade de material cimentício.

5.1.4.3 Compósito submetido a ambiente interno por 365 dias

A Figura 82 ilustra a superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito após 365 dias de cura em ambiente interno, isto é, protegido das intempéries. As áreas demarcadas em branco são os locais em que foi realizada a espectroscopia por energia dispersiva para identificação e quantificação dos elementos químicos.

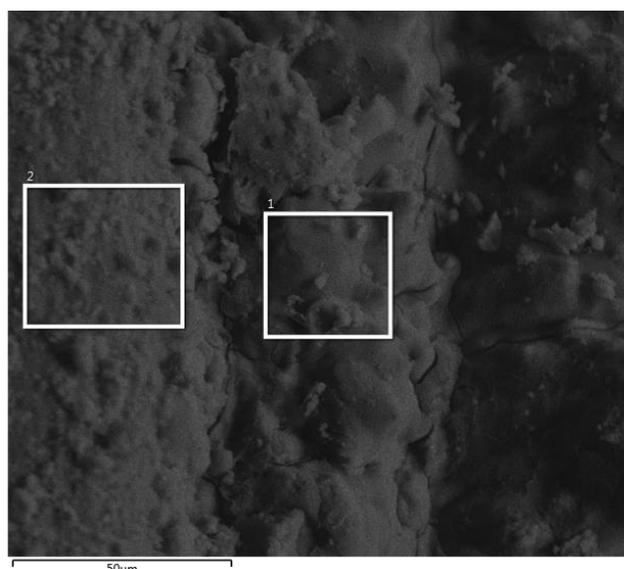


Figura 82 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (Elaboração própria)

Na imagem apresentada na Figura 82, foram delimitadas duas áreas de leitura para identificação dos elementos químicos em função da diferença visual apresentada pela estrutura. Enquanto o relevo central (em que foi realizada a leitura da área 1) apresenta uma superfície mais lisa, o relevo da extremidade esquerda (em que foi realizada a leitura da área 2) apresenta uma superfície mais rugosa. Em vista disso, para averiguar se havia diferença química significativa nestas áreas, foram realizadas duas leituras. Os elementos químicos identificados e quantificados nas áreas destacadas da Figura 82 estão apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS

Espectro	1	2
C	13,10%	27,05%
O	54,58%	55,72%
Al	-	0,53%
Si	14,43%	6,28%
Ca	17,89%	9,81%
Fe	-	0,60%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Como pode-se observar na Tabela 56, as áreas demarcadas na Figura 82, além de apresentar diferença no aspecto visual, também apresentam significativa variação na composição química. Enquanto a área 2 apresentou carbono em maiores quantidades, a área 1 apresentou silício e cálcio em maiores percentuais.

A análise da superfície interna da casca extraída do Compósito foi realizada nas áreas definidas na Figura 83.

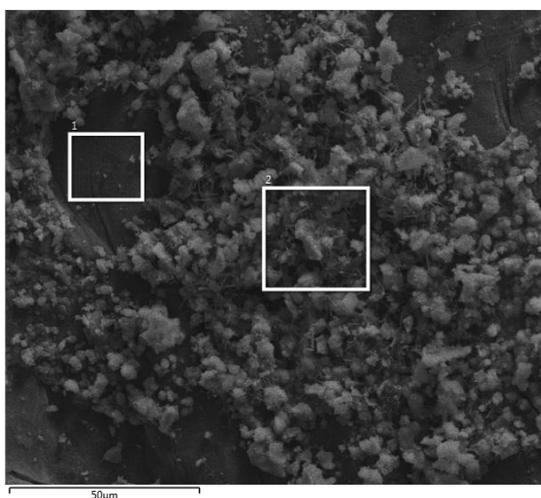


Figura 83 – Microanálise da superfície interna da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente interno (Elaboração própria)

Na superfície interna, foram definidas duas áreas para o estudo, pois foi identificada uma heterogeneidade na aderência da matriz cimentícia com a fibra (Figura 83). Enquanto na área 1 a superfície não apresenta (na ampliação e 2000 vezes) formas que remetem a produtos oriundos da matriz cimentícia, na área 2, existem formas que remetem a agulhas de etringita e a estrutura esponjosa, à C-S-H. A Tabela 57 apresenta os elementos químicos identificados em ambas as áreas.

Tabela 57 – Composição química da superfície interna casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS

Espectro	1	2
C	10,70%	13,59%
O	41,05%	48,11%
Mg	-	0,78%
Al	-	0,62%
Si	16,63%	7,67%
Ca	31,62%	28,01%
Fe	-	1,21%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Ao analisar os resultados apresentados pela Tabela 57, é interessante observar que, embora na ampliação de 2000 vezes não possa ser observado material cimentício em algumas partes da superfície da casca de arroz, as diferenças químicas entre essas áreas com as áreas nas quais é evidente a existência de produtos oriundos das reações do cimento Portland não é muito relevante. Tal fato pode ser verificado ao comparar os percentuais de carbono, oxigênio e cálcio que são similares em ambas as áreas. Os pequenos percentuais de magnésio, alumínio e ferro constatados na área 2 são muito baixos para afirmar que há diferença relevante, uma vez que o equipamento, algumas vezes, não realiza a identificação de elementos em quantidades menores que 1%.

O único elemento químico que teve variação significativa no percentual encontrado foi o silício. Neste caso, houve uma diferença de mais de 100% entre o percentual em peso encontrado na área 1 e na área 2. Essa diferença, possivelmente, se dá pelo fato da área 1, mesmo com produtos cimentícios, estar com maior possibilidade de fazer a identificação da superfície original da fibra. Sendo assim, enquanto na casca *in natura* havia um percentual de, aproximadamente, 24% (Tabela 16), na área em que a casca está mais exposta, é identificado um percentual maior de silício que na área em que a superfície está coberta completamente por produtos cimentícios.

5.1.4.4 Compósito submetido a ambiente externo por 365 dias

A casca extraída do Compósito que permaneceu por 365 dias em ambiente externo, isto é, exposto às intempéries climáticas, tem a superfície na qual foi realizada a identificação e quantificação dos elementos químicos ilustrada na Figura 84.

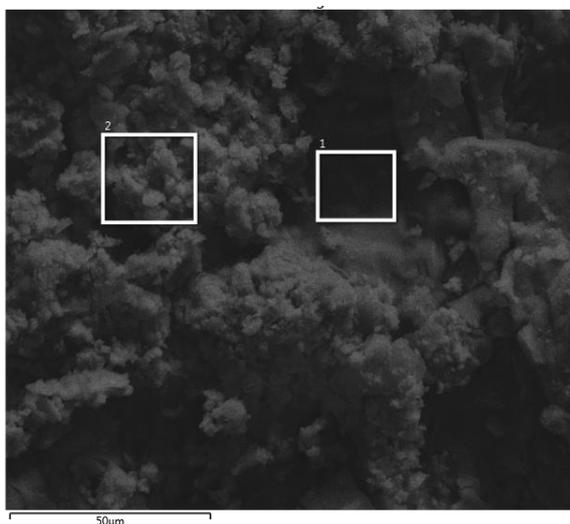


Figura 84 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito com 365 dias de cura em ambiente externo (Elaboração própria)

As áreas destacadas na Figura 84 foram escolhidas pela variação de relevo que ficou aparente na superfície. Além disso, a área 1 apresenta menor quantidade de produtos oriundos da matriz cimentícia e, na área 2, eles são visualizados em toda a região. Os elementos quantificados estão apresentados na Tabela 58.

Tabela 58 – Composição química da superfície externa casca de arroz extraída do Compósito obtida a partir de EDS

Espectro	1	2
C	25,95%	15,53%
O	52,38%	51,65%
Mg	1,24%	0,82%
Al	0,88%	0,92%
Si	6,87%	4,56%
Ca	12,14%	25,63%
Fe	0,56%	0,89%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Os percentuais identificados em ambas as áreas são similares para todos os elementos, exceto o carbono e o cálcio. Esse fato constata que os produtos oriundos da matriz cimentícia podem ser identificados em todas as regiões da casca, mesmo onde visualmente ela aparenta não ter aderência de grandes quantidades.

A variação significativa nas quantidades de carbono e silício são em função das áreas nas quais foi realizada a identificação dos elementos químicos. A área 1, por apresentar menor quantidade visual de produtos cimentícios, apresenta maior quantidade de carbono (assim como a casca *in natura* – Tabela 15) e menor quantidade de cálcio. Já na área 2, que apresenta a superfície completamente coberta por produtos cimentícios, foi aferida menor quantidade de carbono e maior quantidade de cálcio.

5.1.5 Análise das resistências à tração na flexão dos prismas

Após diferentes períodos em câmara úmida, ambiente interno, ambiente externo e banho-maria, foram determinadas as resistências à tração na flexão de três amostras prismáticas para cada idade. A Tabela 59 apresenta os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação para os diferentes tratamentos e diferentes períodos.

Tabela 59 – Resistências à tração na flexão dos prismas após envelhecimento natural

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	1,52	0,04	3%	0,88	0,04	4%
Ambiente Interno 180 dias	1,24	0,02	2%	1,32	0,04	3%
Ambiente Interno 365 dias	1,06	0,05	4%	1,43	0,10	7%
Ambiente Externo 180 dias	0,75	0,05	6%	0,67	0,03	4%
Ambiente Externo 365 dias	0,47	0,04	8%	0,76	0,06	8%
Acelerado 56 dias	0,67	0,07	10%	0,60	0,06	10%

Fonte: elaboração própria

Para facilitar a visualização e comparação dos resultados obtidos, foram plotados gráficos com as resistências médias e os desvios padrões. A Figura 85 apresenta a comparação das resistências obtidas para os prismas que permaneceram por 180 e 365 dias em ambiente interno com os prismas que foram utilizados como base referencial (28 dias em câmara úmida).

A Figura 86 ilustra a comparação dos resultados obtidos para os prismas que permaneceram expostos às intempéries (ambiente externo) durante 180 e 365 dias, novamente, com o referencial de 28 dias de cura em câmara úmida.

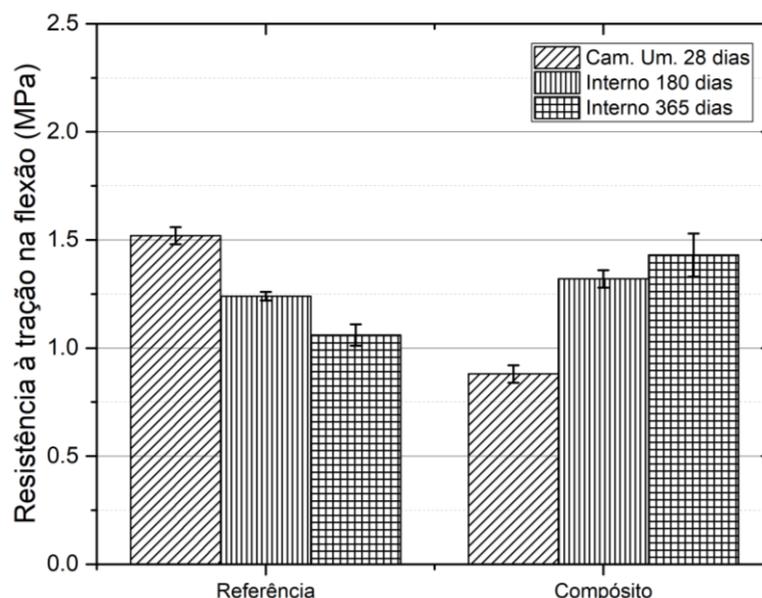


Figura 85 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após 365 dias expostos a ambiente interno (Elaboração própria)

Na comparação entre os resultados médios obtidos para o Traço Referência e o Compósito desenvolvido fica evidente que, quando ambos estão em ambiente interno, portanto livre de intempéries, o Compósito incrementa o desempenho mecânico à tração na flexão, enquanto o Traço Referência acaba reduzindo sua capacidade resistente (Figura 85).

A melhora do desempenho mecânico à tração na flexão também pode ser observada nas amostras que foram submetidas a diversas intempéries por um período de 365 (ambiente externo).

A Figura 87 apresenta a comparação dos maiores prazos estudados nesta pesquisa, sendo plotados os valores médios e desvios padrões para os períodos de 365 dias em ambiente interno e externo, o período de 56 dias para envelhecimento acelerado (em banho-maria) e os resultados obtidos aos 28 dias em câmara úmida.

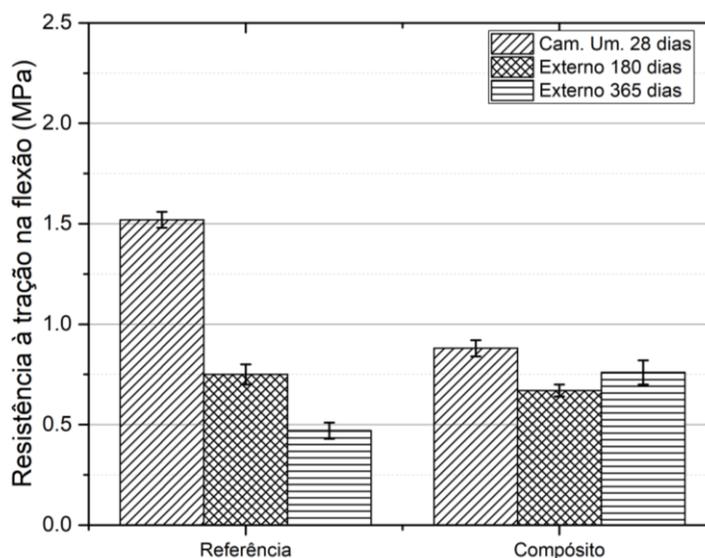


Figura 86 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após 365 dias expostos a ambiente externo (Elaboração própria)

Como pode-se observar na Figura 86, enquanto o Traço Referência apresentou queda brusca na resistência média, o Compósito obteve diferenças menores, as quais estão apresentadas na Tabela 60 e são discutidas a partir da análise estatística embasada na Tabela 61.

Para finalizar as comparações das propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, foram reunidos os valores médios e os desvios padrões dos maiores períodos de exposição em ambiente interno e externo, o envelhecimento acelerado em banho-maria e o valor utilizado como base referencial na Figura 87.

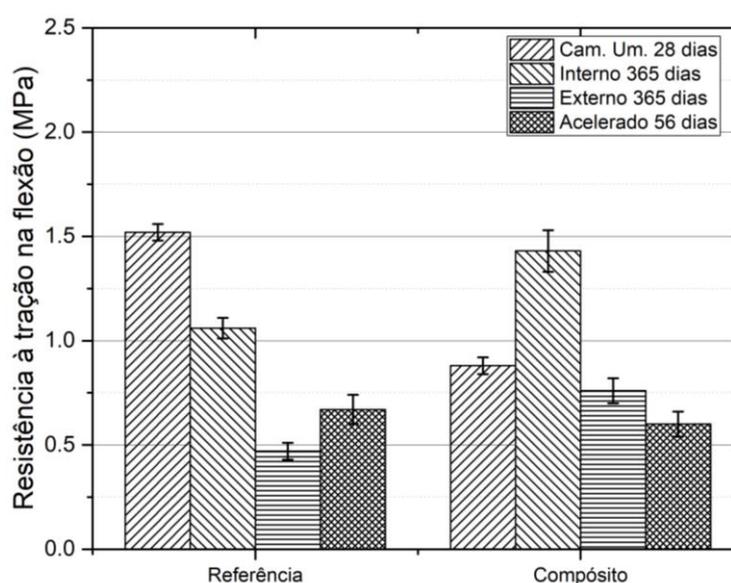


Figura 87 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após tratamentos de longo prazo (Elaboração própria)

A comparação entre os valores médios obtidos dos diferentes tipos de envelhecimento e dos diferentes prazos com os resultados obtidos após 28 dias em câmara úmida está apresentada na Tabela 60.

Tabela 60 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Ambiente Interno 180 dias	-18%	+50%
Ambiente Interno 365 dias	-30%	+62%
Ambiente Externo 180 dias	-51%	-23%
Ambiente Externo 365 dias	-69%	-14%
Acelerado 56 dias	-56%	-31%

Fonte: elaboração própria

A verificação da variabilidade estatística entre todos os tipos e prazos de envelhecimento foi realizada utilizando a análise das variâncias pelo método de Tukey com 95% de confiança. A Tabela 61 apresenta se há variação estatisticamente significativa entre as amostras de cada envelhecimento.

Tabela 61 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural

Tratamento	Diferença Significativa?	
	Referência	Compósito
Ext. 180 dias – Acelerado	Não	Não
Int. 180 dias – Int. 365 dias	Sim	Não
Ext. 180 dias – Ext. 365 dias	Sim	Não
28 dias – Ext. 365 dias	Sim	Não
Ext. 365 dias – Acelerado	Sim	Não
28 dias – Ext. 180 dias	Sim	Sim
28 dias – Int. 180 dias	Sim	Sim
28 dias – Int. 365 dias	Sim	Sim
28 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 180 dias – Ext. 180 dias	Sim	Sim
Int. 180 dias – Ext. 365 dias	Sim	Sim
Int. 180 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 365 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 365 dias – Ext. 180 dias	Sim	Sim
Int. 365 dias – Ext. 365 dias	Sim	Sim

Fonte: elaboração própria

Analisando conjuntamente os resultados ilustrados na Figura 87, os percentuais apresentados na Tabela 60 e a análise estatística apresentada na Tabela 61, pode-se afirmar que o desempenho mecânico do Compósito é superior quando comparado ao do Traço Referência.

A primeira leitura que possibilita a afirmação supracitada é a pequena redução na resistência do Compósito quando comparados os valores obtidos aos 28 dias de cura com os valores extremos (ambiente externo 365 e banho-maria). Enquanto os valores chegaram a uma redução de 69% e 56% para o Traço Referência, o Compósito apresentou reduções de apenas 23% e 14%, para ambiente externo e banho-maria, respectivamente (Tabela 60).

Na segunda leitura, que possibilita concluir que o Compósito apresentou melhor desempenho, apresenta-se o fato de que, ao comparar as variações de resistência obtidas em período de 180 dias e período de 365 dias sob mesma exposição, não há diferença estatisticamente significativa. Essa verificação confere com a identificação de que a degradação da matéria orgânica, em ambos os ambientes, foi semelhante (itens 5.1.3.3 e 5.1.3.4).

No Traço Referência, a redução da resistência continuou a ser significativa entre os 180 e 365 dias de maneira significativa. No Compósito, embora seja observada uma pequena redução, ela não foi relevante para afirmar que a propriedade mecânica realmente sofreu perda de desempenho. Isso pode indicar que o Compósito já tem sua perda de resistência mais relevante nos primeiros 180 dias, sendo que, na sequência, a curva de desempenho passa a ser mais linear.

No envelhecimento acelerado, novamente, observa-se que o desempenho do Traço Referência é reduzido de maneira mais significativa que o desempenho do Compósito (Tabela 60). A baixa redução na resistência das amostras que permaneceram por 365 dias em ambiente externo é causada pela capacidade das fibras de reduzirem a fissuração gerada pela variação de temperatura e umidade das amostras (conforme pode ser observado na Figura 52).

A verificação do melhor desempenho do Compósito, mesmo após a degradação de boa parte das fibras apresentadas no item 5.1.1, é uma confirmação da hipótese levantada nas análises de microscopia eletrônica de varredura e nas análises de espectroscopia por energia dispersiva. Ou seja, embora haja a degradação dos polímeros naturais, a possível formação de C-S-H na superfície e nos lumens da casca geram uma compensação para manter o desempenho mecânico ou reduzi-lo em menor intensidade.

5.1.6 Análise das resistências à compressão axial dos prismas

A partir das amostras rompidas à tração na flexão, foram ensaiadas as metades dos prismas à compressão. Os valores médios bem como os desvios padrões e os coeficientes de variação obtidos a partir de 6 amostras cada estão apresentados na Tabela 62.

Tabela 62 – Resistências à compressão axial dos prismas após envelhecimento natural

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	2,37	0,08	3%	1,78	0,07	4%
Ambiente Interno 180 dias	2,85	0,11	4%	2,30	0,04	2%
Ambiente Interno 365 dias	2,80	0,13	5%	2,40	0,20	8%
Ambiente Externo 180 dias	3,23	0,06	2%	1,78	0,03	2%
Ambiente Externo 365 dias	2,50	0,12	5%	1,83	0,05	3%
Acelerado 56 dias	1,51	0,12	8%	1,25	0,12	10%

Fonte: elaboração própria

Para realizar as comparações de maneira visual, foram plotados gráficos de coluna com os valores médios das amostras deixadas em ambiente interno (Figura 88), em ambiente externo (Figura 89) e dos maiores prazos de envelhecimento analisados (Figura 90).

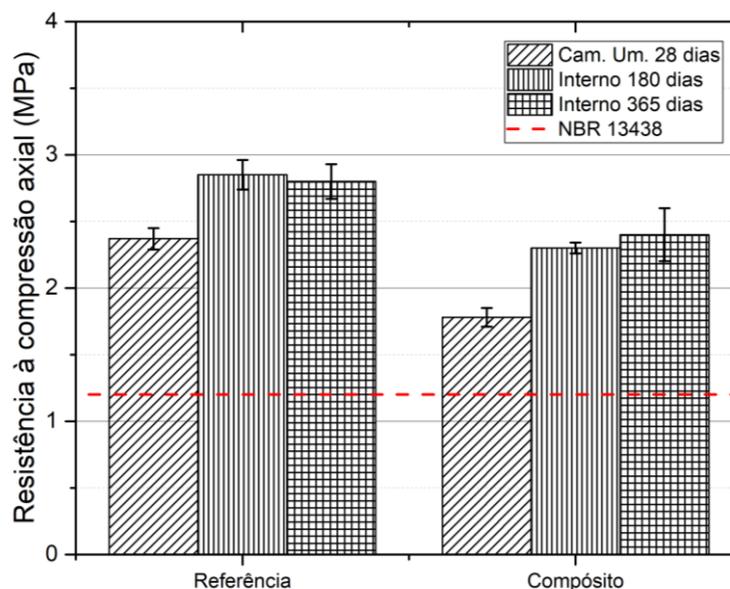


Figura 88 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após 365 dias expostos a ambiente interno (Elaboração própria)

Ao comparar os resultados à compressão axial dos prismas (Figura 88) com os resultados à compressão axial dos cubos (item 5.1.7 – Figura 92), é possível observar que a variação foi similar, não havendo redução significativa de desempenho nem para o Traço Referência nem para o Compósito.

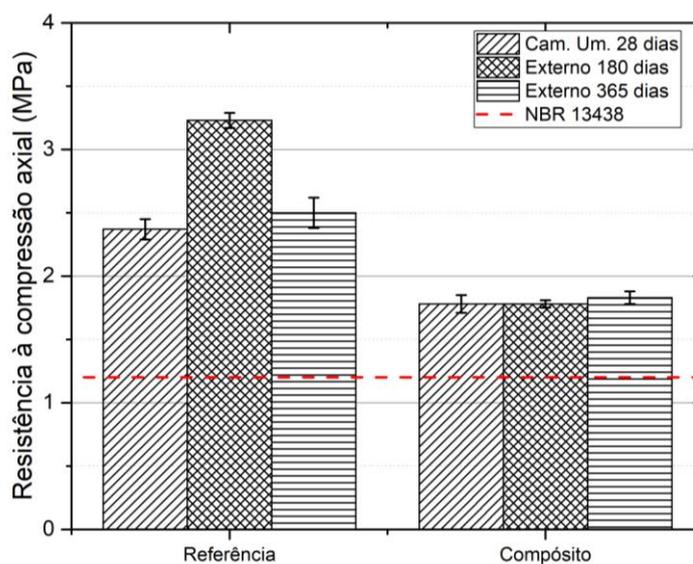


Figura 89 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após 365 dias expostos a ambiente externo (Elaboração própria)

Na comparação das resistências obtidas pelos prismas expostos às intempéries (ambiente externo), novamente, é possível observar que não houve perda de desempenho mecânico nem para o Traço Referência nem para o Compósito (Figura 89).

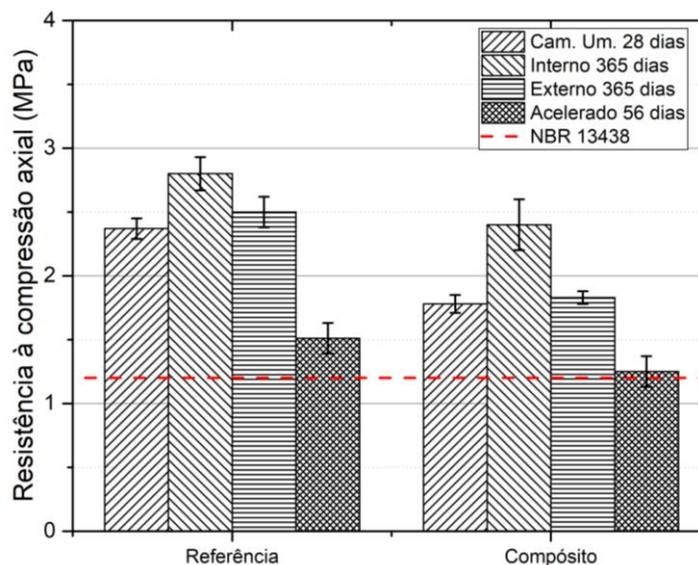


Figura 90 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após tratamentos de longo prazo (Elaboração própria)

Ao comparar as resistências à compressão axial dos prismas (Figura 90), é possível verificar que a pior situação para a degradação das amostras foi o envelhecimento em banho-maria (acelerado). Enquanto as amostras que ficaram em ambiente interno por 365 dias obtiveram incremento no desempenho mecânico, ao comparar-se com os 28 dias de cura em câmara úmida, as amostras que estiveram submetidas às intempéries durante os 365 dias mantiveram um desempenho muito similar ao observado aos 28 dias de cura.

A identificação da metodologia mais agressiva para as amostras nas análises em macroescala realizadas a partir dos ensaios mecânicos de compressão e de tração na flexão convergem com todas as análises de composição químicas e de microestrutura realizadas anteriormente, o que gera uma boa confiabilidade a todos os resultados obtidos.

Todos os valores médios, independentemente do tratamento, mantiveram-se acima do valor mínimo normatizado de acordo com a NBR 13438 (ABNT, 2013). Embora o desvio padrão apresentado na Figura 90 varie para baixo do requisito médio da referida norma, o Compósito pode ser considerado como adequado, uma vez que,

conforme apresentado na Tabela 2, o valor mínimo isolado aceito pela norma é de 1,00 MPa para concretos C12, os quais apresentam resistência média mínima de 1,20 MPa. Das seis amostras caracterizadas neste ensaio, o menor valor isolado foi de 1,09 MPa, ficando, portanto, dentro dos requisitos normativos.

A Tabela 63 apresenta os percentuais de variação nas resistências à compressão axial para as diferentes exposições das amostras comparadas com as resistências obtidas aos 28 dias de cura em câmara úmida.

Tabela 63 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito	Diferença estatística?	
			Referência	Compósito
Ambiente Interno 180 dias	20%	29%	Sim	Sim
Ambiente Interno 365 dias	18%	35%	Sim	Sim
Ambiente Externo 180 dias	37%	0%	Sim	Não
Ambiente Externo 365 dias	5%	2%	Não	Não
Acelerado 56 dias	-36%	-30%	Sim	Sim

Fonte: elaboração própria

Ao analisar as variações de resistência, pode-se observar que o envelhecimento natural em ambiente interno teve incremento em relação aos 28 dias e foi estatisticamente significativo ao realizar análise das variâncias pelo método de Tukey com nível de confiança de 95%.

As amostras que permaneceram por 365 dias em ambiente externo mostraram uma resistência média equivalente à resistência obtida aos 28 dias de cura em câmara úmida. As amostras que sofreram envelhecimento acelerado em banho-maria foram as únicas que tiveram redução estatisticamente significativa da resistência média tanto para o Traço Referência quanto para o Compósito. É interessante a observação de que a redução da resistência média é similar para ambos os traços estudados.

A combinação de todos os tipos de tratamento e todos os períodos analisados para verificar se as diferenças médias foram estatisticamente significativas são apresentados na Tabela 64.

Tabela 64 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural

Tratamento	Diferença Significativa?	
	Referência	Compósito
Int. 180 dias – Int. 365 dias	Não	Não
28 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
28 dias – Ext. 180 dias	Sim	Não
Ext. 180 dias – Ext. 365 dias	Sim	Não
28 dias – Int. 180 dias	Sim	Sim
28 dias – Int. 365 dias	Sim	Sim
28 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 180 dias – Ext. 180 dias	Sim	Sim
Int. 180 dias – Ext. 365 dias	Sim	Sim
Int. 180 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 365 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 365 dias – Ext. 180 dias	Sim	Sim
Int. 365 dias – Ext. 365 dias	Sim	Sim
Ext. 180 dias – Acelerado	Sim	Sim
Ext. 365 dias – Acelerado	Sim	Sim

Fonte: elaboração própria

Conforme verifica-se na Tabela 64, a maioria das comparações gerou diferenças significativas, excetuando-se as comparações internas de 180 e 365 dias para ambos os traços, as comparações em ambiente externo 365 dias e câmara úmida durante 28 dias para ambos os traços, e externo 180 e 365 dias para o Compósito e externo 180 dias e 28 dias em câmara úmida para o Compósito.

5.1.7 Análise das resistências à compressão axial dos cubos

As análises de durabilidade a partir de envelhecimento natural, isto é, sem tratamentos químicos e térmicos, consistiram em expor as amostras cúbicas em diferentes períodos em câmara úmida (Tabela 65), em ambiente interno (Tabela 66), em ambiente externo (Tabela 67) e em banho-maria (Tabela 68).

A Tabela 65 apresenta os valores médios obtidos a partir de três amostras para 28 dias, 56 dias, 180 dias e 365 dias. Além dos valores médios, também estão apresentados o desvio padrão (D.P.) e o coeficiente de variação.

Tabela 65 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em câmara úmida

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	3,00	0,26	9%	1,86	0,05	3%
Câmara Úmida 56 dias	3,57	0,42	12%	2,13	0,04	2%
Câmara Úmida 180 dias	3,65	0,10	3%	2,20	0,20	9%
Câmara Úmida 365 dias	3,33	0,12	3%	2,03	0,15	8%

Fonte: elaboração própria

Para facilitar a análise dos resultados apresentados pela Tabela 65, foi plotado um gráfico dos valores médios e desvio padrão obtidos. A Figura 91 ilustra, em colunas, os valores médios das amostras que permaneceram em câmara úmida e, em linha pontilhada, o valor mínimo exigido pela NBR 13438 (ABNT, 2013)

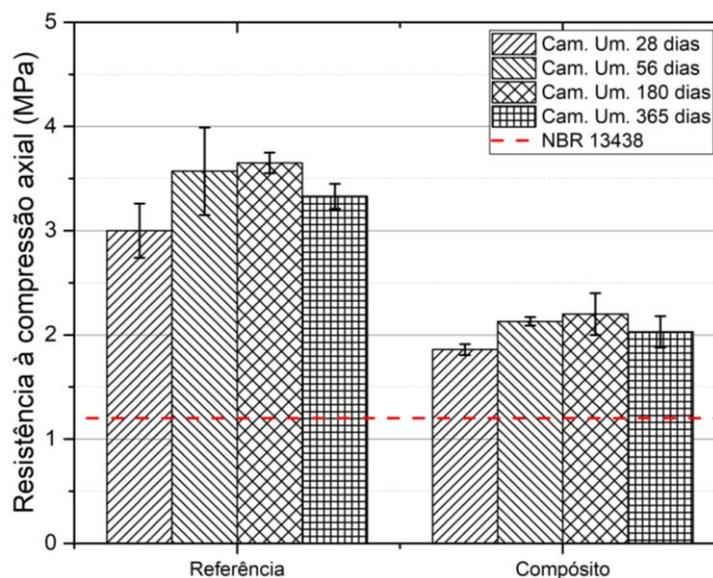


Figura 91 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após diferentes períodos em câmara úmida (Elaboração própria)

A partir da Figura 91, é possível verificar que ambos os traços estudados mantiveram o requisito mínimo normatizado mesmo após o período de um ano em câmara úmida. Além disso, pode-se observar, a partir das barras de desvio padrão, que as variações a partir de 28 dias de cura são muito pequenas, haja visto a proximidade das barras de erro.

Durante o mesmo período em que foram estudadas as amostras cúbicas em câmara úmida, também foram deixadas amostras em ambiente interno, dentro do laboratório, para verificar o impacto deste ambiente na durabilidade dos compósitos.

A Tabela 66 apresenta os valores médios, bem como, desvio padrão e coeficiente de variação para as amostras que permaneceram no ambiente interno por 180 e 365 dias. Também consta na tabela o valor médio das amostras que permaneceram por 28 dias em câmara úmida.

Tabela 66 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente interno

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	3,00	0,26	9%	1,86	0,05	3%
Ambiente Interno 180 dias	2,47	0,06	2%	2,10	0,26	13%
Ambiente Interno 365 dias	3,03	0,21	7%	2,00	0,10	5%

Fonte: elaboração própria

A Figura 92 ilustra os valores médios e o desvio padrão que foram apresentados na Tabela 66.

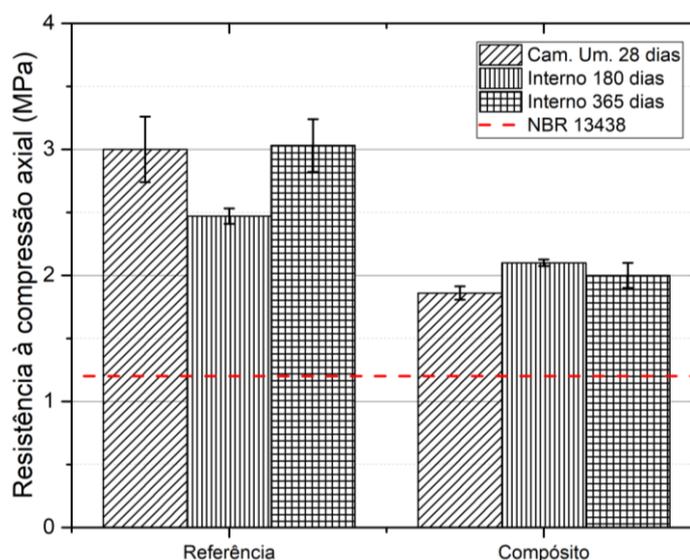


Figura 92 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após 365 dias expostos a ambiente interno (Elaboração própria)

Assim como observado em todos os períodos em que as amostras permaneceram em câmara úmida (Figura 91), as amostras que permaneceram em ambiente interno (Figura 92) também mantiveram, após um ano, o requisito necessário para atender às exigências normativas nacionais. Da mesma forma, pode-se verificar, pela proximidade das barras de desvio padrão, que o Compósito não teve decréscimo significativo de resistência, haja visto a proximidade das barras de desvio padrão.

Em paralelo ao tempo das amostras que foram deixadas em câmara úmida e das amostras que foram deixadas em ambiente interno, foram expostas amostras em ambiente externo durante o período de 365 dias. Durante o período analisado, foram rompidos cubos em 180 dias e 365 dias de cura, as resistências médias obtidas, bem como, o desvio padrão e os coeficientes de variação são apresentados na Tabela 67.

Tabela 67 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente externo

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	3,00	0,26	9%	1,86	0,05	3%
Ambiente Externo 180 dias	2,83	0,23	8%	2,23	0,25	11%
Ambiente Externo 365 dias	3,00	0,17	6%	2,17	0,21	10%

Fonte: elaboração própria

Os valores apresentados na Tabela 67 estão ilustrados na Figura 93.

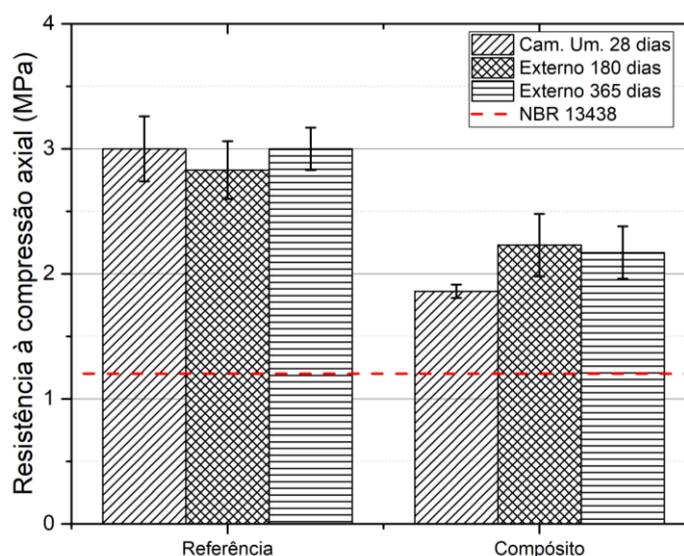


Figura 93 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após 365 dias expostos a ambiente externo (Elaboração própria)

Mesmo submetidos a diversas intempéries durante o período de um ano, pode-se observar que nenhum dos traços estudados apresentou redução significativa de resistência (Figura 93). Além de não sofrerem redução de resistência, pode-se verificar que tanto o Compósito quanto o Traço Referência mantiveram um desempenho acima do requisito mínimo normatizado.

A análise de durabilidade por envelhecimento acelerado está apresentada na Tabela 68. O envelhecimento acelerado foi realizado utilizando banho-maria, conforme já descrito na metodologia (item 3.2.11.4), e buscou-se analisar o comportamento dos materiais simulando uma ação mais profunda de intempéries.

Tabela 68 – Resistências à compressão axial dos cubos após envelhecimento em ambiente externo

Condição	Referência			Compósito		
	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
Câmara Úmida 28 dias	3,00	0,26	9%	1,86	0,05	3%
Acelerado 56 dias	1,60	0,10	6%	1,28	0,07	5%

Fonte: elaboração própria

A partir da Tabela 68, fica evidente que as amostras sofreram uma perda de resistência maior se comparadas às demais exposições (câmara úmida, ambiente interno e ambiente externo). Para facilitar a visualização, foi plotado um gráfico reunindo os maiores prazos e tipos de exposição a que as amostras foram submetidas e o envelhecimento acelerado (Figura 94).

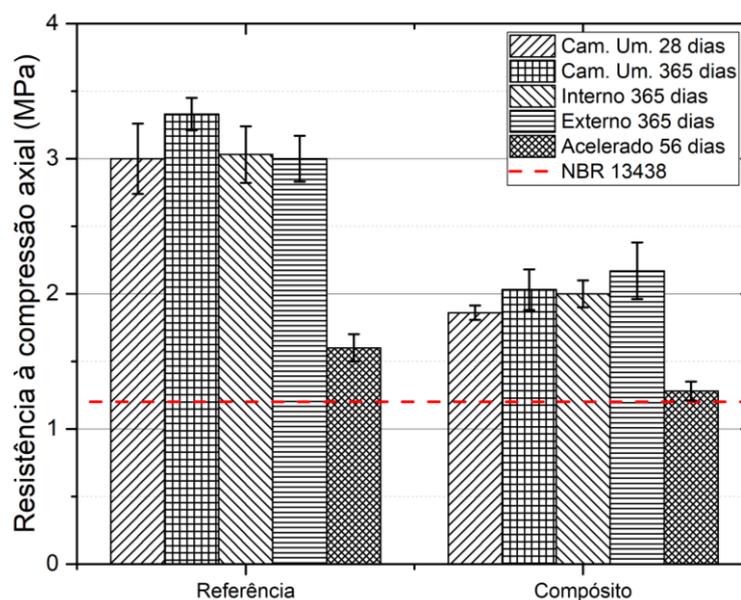


Figura 94 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após tratamentos de longo prazo (Elaboração própria)

A partir da interpretação do gráfico apresentado na Figura 94, pode-se constatar que o envelhecimento acelerado foi o tratamento que mais reduziu a resistência e causou danos a ambos os traços. Essa redução de resistência em conjunto com a degradação dos compostos orgânicos do Compósito, discutida no Item 5.1.1.1,

indicam que a metodologia para simular o envelhecimento acelerado conseguiu atingir ao objetivo de simular prazos maiores, que seriam impossibilitados pelo tempo disponível para realização desta pesquisa.

Mesmo mostrando ser um tratamento mais agressivo, verifica-se que ambos os materiais mantêm o desempenho suficiente para atender aos requisitos mecânicos regulamentados no país (NBR 13438, ABNT 2013). Mais uma vez, o uso da casca de arroz mostrou-se eficiente na incorporação ao concreto celular.

Para analisar as relações de resistência dos tratamentos realizados com o valor utilizado como base referencial (câmara úmida 28 dias), foram calculadas as perdas ou calculados os incrementos de resistência média entre cada tratamento e o valor obtido aos 28 dias de cura. A Tabela 69 apresenta os percentuais encontrados.

Tabela 69 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Câmara Úmida 56 dias	19%	14%
Câmara Úmida 180 dias	22%	18%
Câmara Úmida 365 dias	11%	9%
Ambiente Interno 180 dias	1%	7%
Ambiente Interno 365 dias	1%	7%
Ambiente Externo 180 dias	-6%	20%
Ambiente Externo 365 dias	0%	16%
Acelerado 56 dias	-47%	-31%

Fonte: elaboração própria

Ao analisar os percentuais obtidos (Tabela 69), é possível constatar que o Compósito teve redução de desempenho menos significativa que o Traço Referência, que é um material normatizado, aprovado para construção em todo o território nacional. No entanto, para fazer uma análise mais adequada das relações de resistência obtidas a partir dos tratamentos e dos períodos analisados, é necessário, primeiramente, verificar se existe diferença estatisticamente significativa.

Para a análise estatística, foi realizada análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com nível de confiança de 95%. A Tabela 70 apresenta os tratamentos estudados e determina se há diferença estatisticamente significativa entre os valores médios obtidos entre eles.

Tabela 70 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes períodos por envelhecimento natural

Tratamento	Diferença Significativa?	
	Referência	Compósito
28 dias – 56 dias	Não	Não
28 dias – 365 dias	Não	Não
28 dias – Int. 180 dias	Não	Não
28 dias – Int. 365 dias	Não	Não
28 dias – Ext. 180 dias	Não	Não
28 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
56 dias – 180 dias	Não	Não
56 dias – 365 dias	Não	Não
56 dias – Int. 365 dias	Não	Não
56 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
365 dias – Int. 365 dias	Não	Não
365 dias – Ext. 180 dias	Não	Não
365 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
Int. 180 dias – Int. 365 dias	Não	Não
Int. 180 dias – Ext. 180 dias	Não	Não
Int. 180 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
Int. 365 dias – Ext. 180 dias	Não	Não
Int. 365 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
Ext. 180 dias – Ext. 365 dias	Não	Não
28 dias – 180 dias	Sim	Não
56 dias – Int. 180 dias	Sim	Não
56 dias – Ext. 180 dias	Sim	Não
180 dias – 365 dias	Sim	Não
180 dias – Int. 180 dias	Sim	Não
180 dias – Int. 365 dias	Sim	Não
180 dias – Ext. 180 dias	Sim	Não
180 dias – Ext. 365 dias	Sim	Não
365 dias – Int. 180 dias	Sim	Não
28 dias – Acelerado	Sim	Sim
56 dias – Acelerado	Sim	Sim
180 dias – Acelerado	Sim	Sim
365 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 180 dias – Acelerado	Sim	Sim
Int. 365 dias – Acelerado	Sim	Sim
Ext. 180 dias – Acelerado	Sim	Sim
Ext. 365 dias – Acelerado	Sim	Sim

Fonte: elaboração própria

Ao analisar os resultados obtidos nas comparações de todos os tratamentos com o envelhecimento acelerado, pode-se concluir que há diferença estatisticamente significativa tanto para o Traço Referência quanto para o Compósito (Tabela 70). Havendo essa diferença significativa, pode-se concluir de maneira definitiva que o Compósito teve um desempenho superior ao Traço Referência, uma vez que a redução foi de 31% e 47%, respectivamente.

As amostras que permaneceram por 180 dias em câmara úmida foram estatisticamente diferentes das demais para o Traço Referência e foram semelhantes para o Compósito, mas, neste caso, ambos tiveram incremento de resistência. Novamente, as hipóteses e considerações acerca das reações químicas e dos produtos gerados nas superfícies da casca que foram realizadas nas análises microestruturais podem ser verificadas nos resultados em macroescala.

5.2 DURABILIDADE – ATAQUE QUÍMICO COM HIDRÓXIDO DE SÓDIO

O estudo da durabilidade do Compósito analisado com hidróxido de sódio foi realizado conforme descrito no item 3.2.11.1. Após períodos de 42 e 56 dias, observou-se que o Traço Referência e o Compósito não sofreram deterioração visual. A Figura 95 ilustra os cubos que permaneceram em câmara úmida e em hidróxido de sódio por 42 e 56 dias, à esquerda, estão as amostras com casca de arroz (Compósitos) e, à direita, as amostras de concreto celular (Traço Referência).



Figura 95 – Amostras após tratamento em NaOH
(Elaboração própria)

Para entender o comportamento das fibras após os ataques, elas foram extraídas das amostras que ficaram 56 dias em solução de hidróxido de cálcio e, então, foram realizadas análises de difração de raios x, fluorescência de raios x, imagens em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva. Na sequência, para definir a influência da degradação da casca de arroz, foram analisadas as resistências à tração na flexão e à compressão axial nos prismas e à compressão axial nos cubos (itens 5.3.5, 5.3.6 e 5.3.7).

A Figura 96 ilustra as cascas extraídas do Compósito e utilizadas para as análises microestruturais. Todas as análises micro foram realizadas na sequência dos ensaios mecânicos e foram feitas a fim de melhorar o entendimento dos resultados obtidos e possibilitar uma leitura mais completa das influências da casca de arroz em materiais cimentícios após sua degradação.



Figura 96 – Casca de Arroz do Compósito que ficou 56 dias em NaOH (Elaboração própria)

5.2.1 Análise química a partir de difração de raios x

Para facilitar as análises da condição da casca após a exposição do Compósito à solução alcalina, foi plotado um difratograma (Figura 97) com os resultados obtidos para a casca *in natura*, para a casca extraída do Compósito após 28 dias de cura em câmara úmida e para a casca extraída da solução química de soda caustica (NaOH).

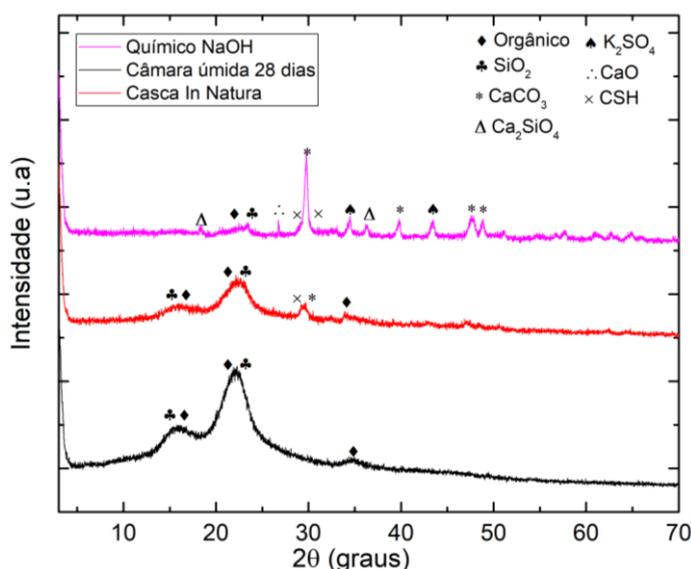


Figura 97 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a solução de hidróxido de sódio (Elaboração própria)

No difratograma ilustrado na Figura 97, foram identificados picos de silicato de cálcio (Ca_2SiO_4 – ICDD #00-029-0369 e ICDD #00-024-0234), picos de sulfato de potássio (K_2SO_4 – ICDD #00-044-1414), picos de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD

#00-043-0697), possivelmente picos de silicato de cálcio hidratados (C-S-H – ICDD #00-033-0306), um pico de óxido de cálcio (CaO – ICDD #00-028-0775) e, próximo dos 22°, a presença de material orgânico (C₆H₁₀O₅ – ICDD #00-060-1502).

Ao comparar a condição da fibra natural (casca *in natura*) com a fibra extraída do Compósito que permaneceu em câmara úmida por 28 dias, fica evidente a redução das intensidades de materiais orgânicos. Mesmo assim, aos 28 dias, a casca que está no Compósito ainda apresenta picos em condição amorfa que indicam a existência de polímeros naturais (Figura 97).

A redução constatada indica que, para a degradação completa da matéria orgânica, é necessário um período maior e que a degradação atingida é inferior quando comparada à degradação observada nas amostras que foram analisadas após 365 dias em ambiente interno e externo.

5.2.2 Fluorescência de raios x

A análise de fluorescência de raios x foi realizada para quantificar os óxidos presentes na casca após ataque químico ao Compósito e para auxiliar nas análises de DRX. A Tabela 71 apresenta os percentuais dos óxidos identificados na casca.

Tabela 71 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido à solução de hidróxido de sódio

Composição Química	Peso
SiO ₂	15,649 %
Al ₂ O ₃	0,000 %
Fe ₂ O ₃	1,524 %
CaO	30,996 %
MgO	2,256 %
SO ₃	0,994 %
Na ₂ O	2,489 %
K ₂ O	0,154 %
P ₂ O ₅	0,081 %
TiO ₂	0,148 %
Cr ₂ O ₃	0,005 %
Mn ₂ O ₃	0,055 %
ZnO	0,014 %
SrO	0,147 %

Fonte: elaboração própria

Conforme pode-se verificar na Tabela 71, o óxido com maior percentual foi o óxido de cálcio, o qual também foi identificado em grandes picos no ensaio de difração de raios x (item 5.2.1). Também foi encontrada uma quantidade de óxido de silício similar à encontrada na casca *in natura*, no entanto, o óxido de silício identificado aqui pode ser referente aos elementos presentes no C-S-H.

Os demais elementos químicos identificados no ensaio de fluorescência de raios x foram todos encontrados também no ensaio de difração de raios x, o que confere maior confiabilidade nos resultados apresentados no item 5.2.1.

5.2.3 Análise em microscopia eletrônica de varredura

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas nas cascas extraídas das amostras que permaneceram por 56 dias em solução alcalina (Figura 96). Para analisar detalhadamente qual foi a influência conjunta da matriz cimentícia e da solução de hidróxido de sódio na casca de arroz, foram feitas imagens em microscopia eletrônica de varredura utilizando diferentes configurações.

Em função dos diversos aspectos a serem analisados, foram geradas imagens com aumento de 200 vezes (Figura 98 e 99), imagens com aumento de 2000 vezes (Figura 100 e Figura 101) e imagens com aumento de 5000 vezes (Figura 102 e 103).

A Figura 98 ilustra a comparação da superfície externa da casca de arroz *in natura* (à esquerda – Figura 98a) e da casca de arroz retirada do Compósito (à direita – Figura 98b).

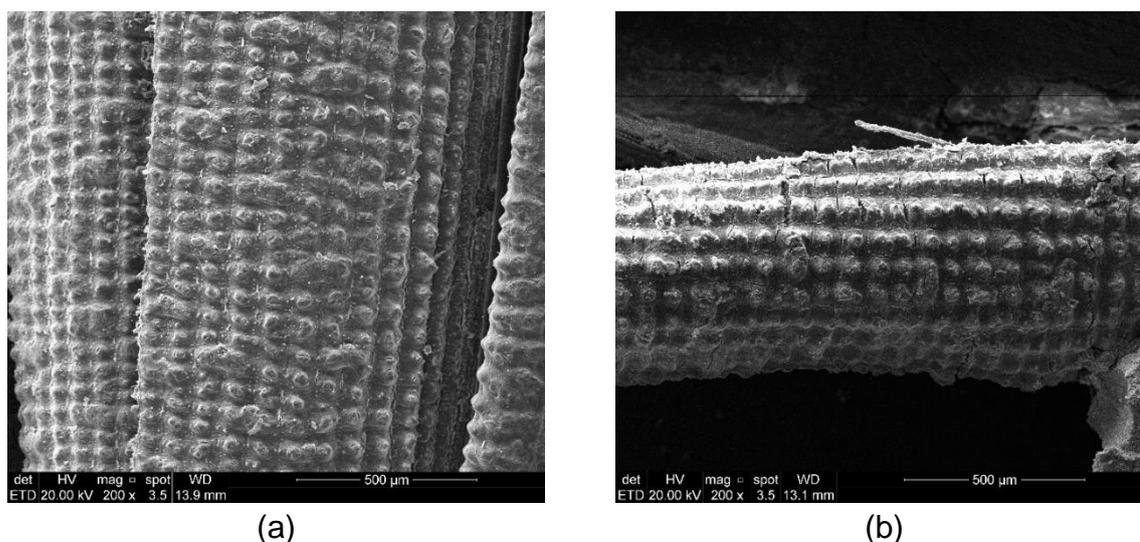


Figura 98 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito (b) – ampliação de 200 vezes
(Elaboração própria)

Como pode ser observado na Figura 98, a casca de arroz *in natura* apresenta maior integridade estrutural, não sendo possível observar fraturas ou qualquer marca de deterioração que seja relevante. Já a casca de arroz retirada do Compósito submetido à solução alcalina apresenta elevada deterioração estrutural, sendo possível observar grandes fissuras e desprendimento de algumas fibras.

A degradação observada nas fibras ilustradas na Figura 98 tem influência química, comprovada a partir das análises de DRX e FRX. No entanto, é pertinente considerar que parte das fissuras e do desprendimento de algumas fibras seja de origem mecânica, visto que, visualmente, foi verificado que a casca reduz a retração da matriz cimentícia e reduz a fissuração decorrente de mudanças de temperaturas. Ambas as situações destacadas geram esforços internos de tração na casca de arroz, o que pode contribuir na geração das fissuras que são observadas na ampliação da imagem em 200X (Figura 98) e não na imagem em escala macro (Figura 96).

Na Figura 99, é apresentada a casca de arroz extraída do Compósito que estava em solução alcalina, no entanto, o ângulo da imagem buscou ilustrar tanto a superfície externa quanto a superfície interna da fibra.

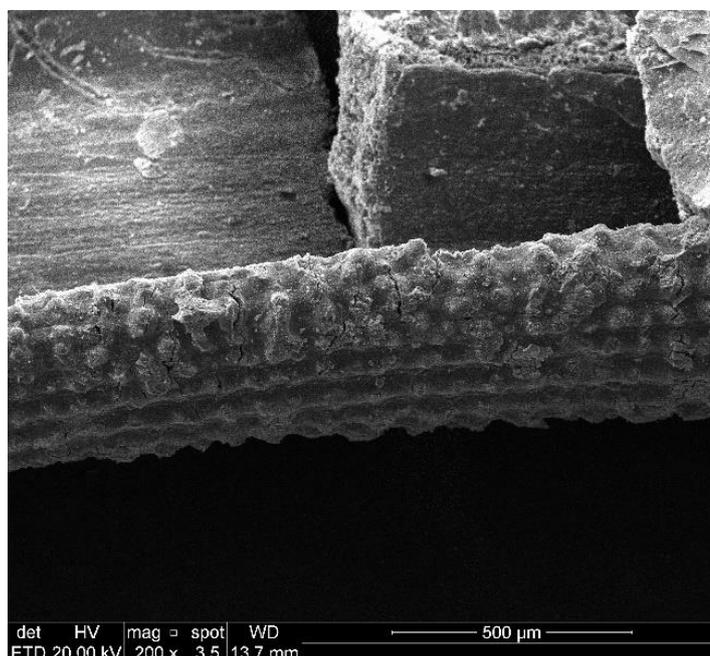


Figura 99 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Assim como verificado na Figura 98, pode-se verificar diversas fissuras na superfície externa, mas, na superfície interna, a quantidade dessas fissuras é visualmente menor. Além da deterioração da casca, pode-se observar que a casca

apresenta pequenos detritos agregados em sua superfície, tanto externa quanto internamente. Por conta desses detritos, e das fissuras observadas, foram geradas imagens com ampliação maior, a fim de verificar quais compostos podem ser observados.

A Figura 100 ilustra a casca de arroz *in natura* (à esquerda – Figura 100a) e a casca de arroz extraída do Compósito (à direita – Figura 100b) ampliadas em duas mil vezes. Nesta imagem, é perceptível a diferença da integridade da casca de arroz que estava no Compósito que permaneceu por 56 dias em solução alcalina. Enquanto a casca *in natura* não apresenta nenhuma fissura, a casca do Compósito está bastante deteriorada e com fissuras de diversos tamanhos.

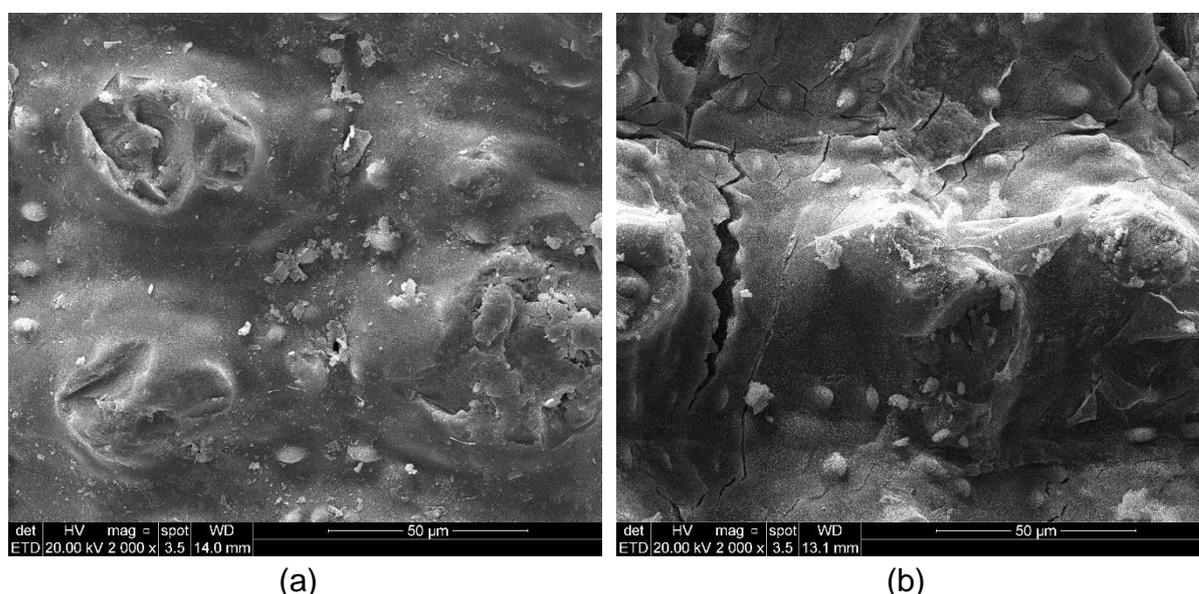


Figura 100 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 2000 vezes
(Elaboração própria)

A partir da análise da Figura 101, em que a imagem foi focada nos detritos observados na casca, pode-se verificar que eles são partes da matriz cimentícia que permaneceram aderidas mesmo após o ataque básico e a extração da casca da matriz. Em vermelho, foram destacadas formas que se assemelham com agulhas de etringita e, em azul, foram destacadas formas de aparência esponjosa que indicam a formação de C-S-H, o que indica que os resíduos remanescentes na casca eram da matriz cimentícia.

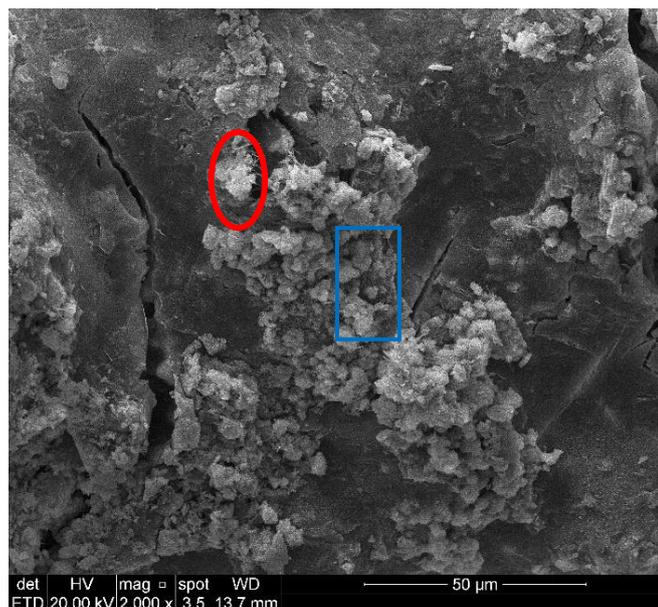


Figura 101 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Para melhor visualizar a possível formação de etringita e a formação do C-S-H, e visualizar as microfissuras da casca, foram realizadas imagens com ampliação de cinco mil vezes (Figura 102 e Figura 103).

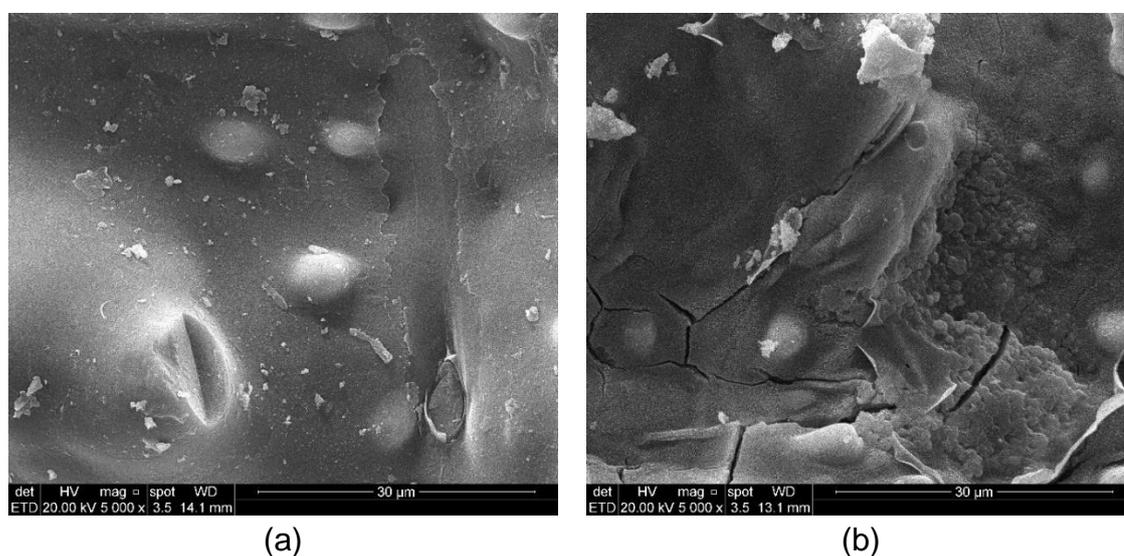


Figura 102 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

A Figura 102 ilustra a ampliação das cavidades da casca de arroz, sendo apresentada, à esquerda (Figura 102a), a casca de arroz *in natura* e, à direita (Figura 102b), a casca de arroz extraída do Compósito. Como pode ser observado, a casca de arroz *in natura* apresenta ótima integridade estrutural, mesmo com ampliação de

cinco mil vezes, já a casca extraída do Compósito está extremamente fraturada, confirmando todas as hipóteses de degradação sugeridas nas imagens e análises anteriores.

A Figura 103 ilustra partes da matriz cimentícia aderidas à casca de arroz. Conforme pode-se observar, foram formadas as agulhas de etringitas, destacadas anteriormente, e o C-S-H, também exposto anteriormente. A presença da fissura destacada em vermelho com o cobrimento dos detritos da matriz cimentícia explicam porque, mesmo com a degradação da casca de arroz, o Compósito não deve obter perdas de resistência à compressão axial e as perdas de resistência à tração na flexão podem ser mitigadas.

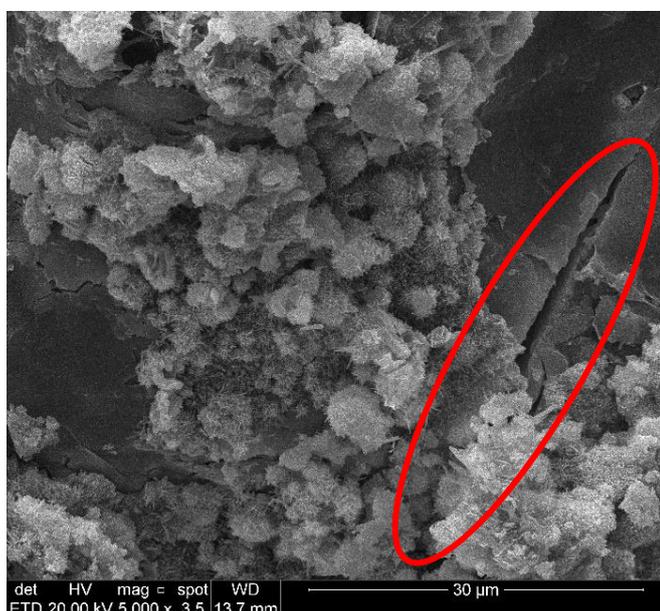


Figura 103 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

5.2.4 Espectroscopia por energia dispersiva

Para incrementar as análises e dar maior elucidação aos resultados obtidos nos ensaios de difração de raios x e fluorescência de raios x, foi realizada espectroscopia por energia dispersiva na superfície externa da casca extraída do Compósito (Figura 104).

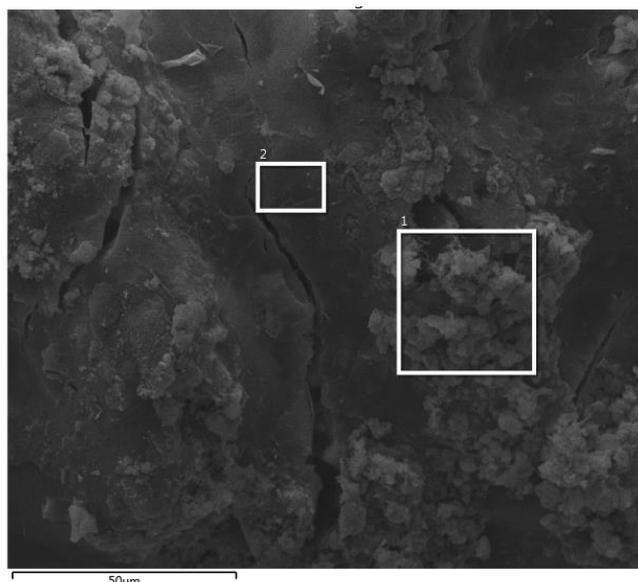


Figura 104 – Microanálise da superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito submetido a solução de hidróxido de sódio (Elaboração própria)

A casca extraída de amostras que permaneceram em solução de hidróxido de sódio tem a superfície externa e as áreas de leitura destacadas na Figura 104. As leituras obtidas nessas áreas estão apresentadas na Tabela 72.

Tabela 72 – Composição química da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de hidróxido de sódio obtida a partir de EDS

Espectro	1	2
C	13,74%	8,73%
O	50,03%	38,92%
Na	3,82%	2,72%
Si	8,72%	14,89%
Ca	23,70%	34,74%
Total	100,00%	100,00%

Fonte: elaboração própria

Ao comparar os valores obtidos a partir da casca aqui analisada com a casca em seu estado natural, analisada no item 3.3.3.4 – Tabela 15, observa-se uma redução nos percentuais de carbono e silício. Tal observação indica que houve quebra de polímeros naturais, que são compostos, principalmente, por cadeias de carbono e consumo do silício que havia na superfície, provavelmente por conta das reações químicas com o hidróxido de cálcio.

A hipótese de que o silício teve redução por conta das reações químicas com o hidróxido de cálcio fica mais forte a partir da observação do surgimento de cálcio em quantidades relevantes nas fibras da casca, comprovando que houve ataque da matriz de maneira significativa no período estudado.

Além dos demais elementos analisados, pode-se observar que o oxigênio não apresentou grandes modificações e houve o surgimento de pequenas quantidades de sódio. A presença de sódio nas fibras da casca de arroz é positiva, uma vez que comprovam que o ataque por meio de material básico (soda cáustica) foi eficiente, ou seja, o hidróxido de sódio conseguiu atingir a casca de arroz que estava protegida pela matriz cimentícia.

5.2.5 Análise das resistências à tração na flexão dos prismas

As resistências à tração na flexão dos prismas foram obtidas a partir da média de três amostras por idade e por traço. Os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação obtidos são apresentados na Tabela 73.

Tabela 73 – Resistências à tração na flexão dos prismas após ataque em hidróxido de sódio

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	1,52	0,04	3%	28 dias	0,88	0,04	4%
Base 42 dias	0,77	0,09	12%	Base 42 dias	0,68	0,01	1%
Base 56 dias	0,71	0,08	12%	Base 56 dias	0,66	0,04	5%

Fonte: elaboração própria

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos e apresentados na Tabela 73, eles foram plotados em forma de gráfico de colunas com barras de erro (Figura 105).

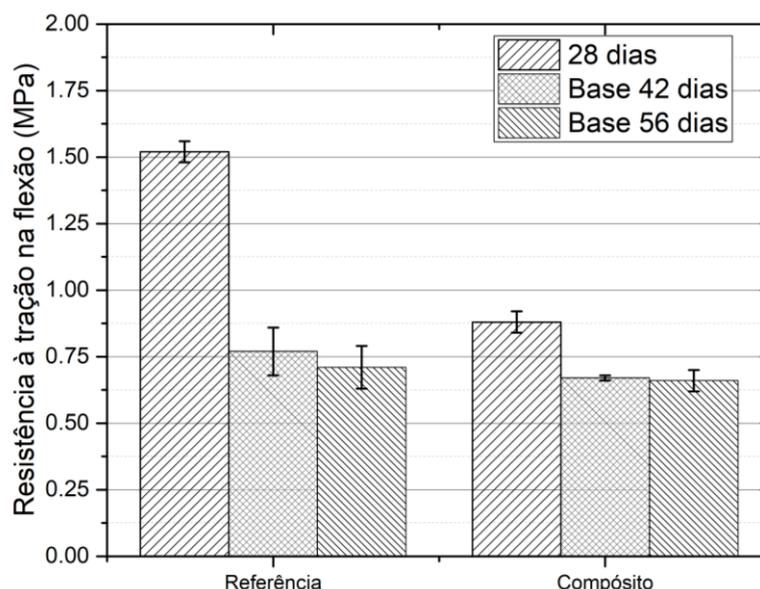


Figura 105 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após ataque em hidróxido de sódio (Elaboração própria),

Como pode ser observado na Figura 105, as resistências à tração na flexão reduziram após as amostras serem submetidas ao hidróxido de sódio. No entanto, as barras de erro indicam que a faixa dos valores médios não foi alterada entre os períodos de 42 e 56 dias, havendo mudanças significativas apenas para os resultados médios das amostras que permaneceram 28 dias em câmara úmida.

Para quantificar a perda de resistência das amostras submetidas à solução básica, foram determinadas as variações em percentual em relação às resistências obtidas para as amostras que permaneceram apenas em câmara úmida por 28 dias (Tabela 74). Essas perdas foram muito superiores para as amostras do Traço Referência, ficando duas vezes maiores quando comparadas com as perdas do Compósito.

Tabela 74 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Base 42 dias	-49%	-24%
Base 56 dias	-53%	-26%

Fonte: elaboração própria

Mesmo com o indicativo de que as variações foram estatisticamente significativas a partir da análise das barras de erro (Figura 105) e das variações de resistência (Tabela 74), foi realizada análise das variâncias pelo método de Tukey com nível de confiança de 95% (Tabela 75).

Tabela 75 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base)

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Base 42	Sim	28 dias – Base 42	Sim
28 dias – Base 56	Sim	28 dias – Base 56	Sim
Base 42 – Base 56	Não	Base 42 – Base 56	Não

Fonte: elaboração própria

A partir da análise das variâncias, verificou-se que, para ambos os traços, houve variação significativa para as amostras submetidas ao hidróxido de sódio quando comparadas com as amostras que permaneceram por 28 dias de cura em câmara úmida, no entanto, não houve diferença para as amostras que permaneceram em diferentes períodos em solução de hidróxido de cálcio.

5.2.6 Análise das resistências à compressão axial dos prismas

As resistências à compressão axial dos prismas 4 cm x 4 cm x 16 cm foram obtidas após a análise da resistência à tração na flexão em três pontos. Como foram utilizadas três amostras para aferir a resistência à tração na flexão, cada valor médio de compressão foi obtido a partir de seis amostras. A Tabela 76 apresenta os valores médios, os desvios padrões e os coeficientes de variação para os traços estudados e para os períodos de 28 dias em câmara úmida, 42 dias e 56 dias sob solução de hidróxido de sódio (base 42 dias e base 56 dias).

Tabela 76 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento químico em NaOH (Base)

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	2,37	0,08	3%	28 dias	1,78	0,07	4%
Base 42 dias	2,36	0,18	8%	Base 42 dias	2,01	0,12	6%
Base 56 dias	2,34	0,11	5%	Base 56 dias	1,90	0,07	3%

Fonte: elaboração própria

Novamente, para facilitar a interpretação dos resultados, foi plotado um gráfico com os valores médios e as barras de erro obtidas a partir dos desvios padrões (Figura 106).

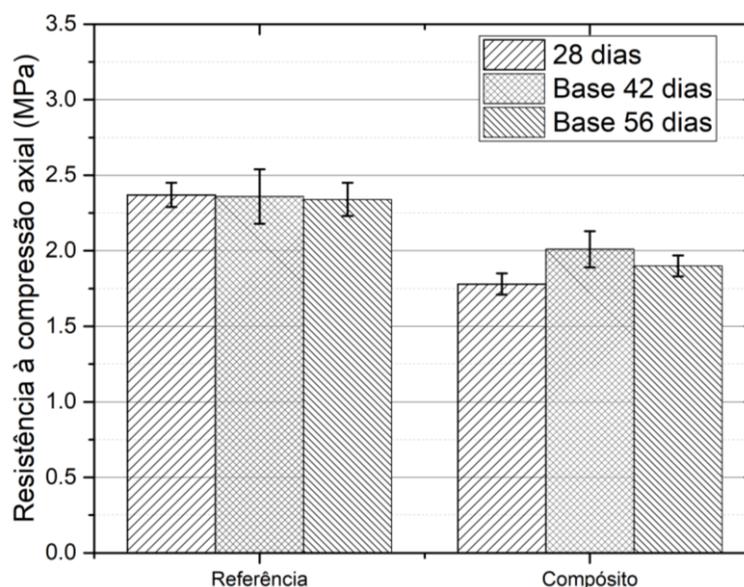


Figura 106 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após ataque em hidróxido de sódio (Elaboração própria)

Pode-se observar que, para o Traço Referência, as barras de erro indicam que a faixa de variação da resistência média obtida é a mesma para as amostras rompidas aos 28 dias de cura em câmara úmida e para as amostras que ficaram em solução básica por 42 e 56 dias (Figura 106).

Surpreendentemente, no Compósito, verificou-se que o valor da resistência média aumentou após as amostras serem submetidas à solução de hidróxido de sódio. Observando os valores médios e as barras de erro, verifica-se que as amostras rompidas aos 28 dias de cura tiveram valor médio inferior às amostras submetidas à solução básica e as barras de erro não ocupam a mesma faixa.

A fim de melhorar a análise dos resultados, foram calculadas as variações de resistência das amostras que ficaram na solução quando comparadas às amostras que ficaram apenas em câmara úmida (Tabela 77).

Tabela 77 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Base 42 dias	0%	+13%
Base 56 dias	-1%	+7%

Fonte: elaboração própria

Analisando as variações de resistência, verifica-se que, para o Traço Referência, elas praticamente inexistiram, ficando em 0% quando comparadas as amostras rompidas aos 28 dias de cura e as amostras rompidas após 42 dias, e foram reduzidas em 1% quando comparadas 28 dias de cura com 56 dias em solução básica. Para o Compósito, as variações foram maiores, chegando em 13% para 42 dias e 7% para 56 dias.

Diante das variações obtidas e analisadas a partir do desvio padrão e das variações das resistências médias, optou-se por verificar se há variação estatisticamente significativa utilizando ANOVA pelo método de Tukey com nível de confiança de 95% (Tabela 78).

Tabela 78 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base)

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Base 42	Não	28 dias – Base 42	Sim
28 dias – Base 56	Não	28 dias – Base 56	Sim
Base 42 – Base 56	Não	Base 42 – Base 56	Não

Fonte: elaboração própria

Com a análise da ANOVA, verifica-se que não há variação estatística significativa para nenhuma comparação quando analisado o Traço Referência e que existe variação significativa para as resistências médias do Compósito quando comparadas as amostras de 28 dias com as amostras que foram submetidas a ataque básico por 42 e 56 dias.

A comprovação estatística de que o Compósito melhorou de resistência mesmo após a degradação de, aproximadamente, 85% da matéria orgânica da casca (Item 5.2.1) é bastante pertinente para a validação do uso da casca como componente de reforço em blocos.

As análises e discussões realizadas no Item 5.2.3 indicam que a melhoria da resistência à compressão pode ser pelo fato da casca contribuir para reduzir a fissuração nas primeiras idades e por, posteriormente ao início de sua degradação, os compostos químicos do cimento Portland, como a etringita e o C-S-H, conseguirem reforçar a fibra e manter o desempenho mecânico adequado. Certamente, o silício identificado no estado natural potencializa que as reações químicas e a formação de C-S-H ocorram na microestrutura fibrosa da casca.

5.2.7 Análise das resistências à compressão axial dos cubos

Para os resultados de compressão axial dos cubos, foram ensaiadas três amostras para cada traço sob cada condição. A Tabela 79 apresenta os valores médios das resistências obtidas, bem como, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 79 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento térmico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	3,00	0,26	9%	28 dias	1,86	0,05	3%
Base 42 dias	2,90	0,26	9%	Base 42 dias	1,87	0,06	3%
Base 56 dias	2,86	0,35	12%	Base 56 dias	1,97	0,15	8%

Fonte: elaboração própria

Os valores indicados na Tabela 79 foram traduzidos para forma gráfica a fim de facilitar a visualização dos resultados. A Figura 107 apresenta os resultados médios e as barras de desvio padrão. Além dos valores obtidos, a linha pontilhada destacada em vermelho demarca a menor resistência aceita pela NBR 13438 (ABNT, 2013) para o concreto C12.

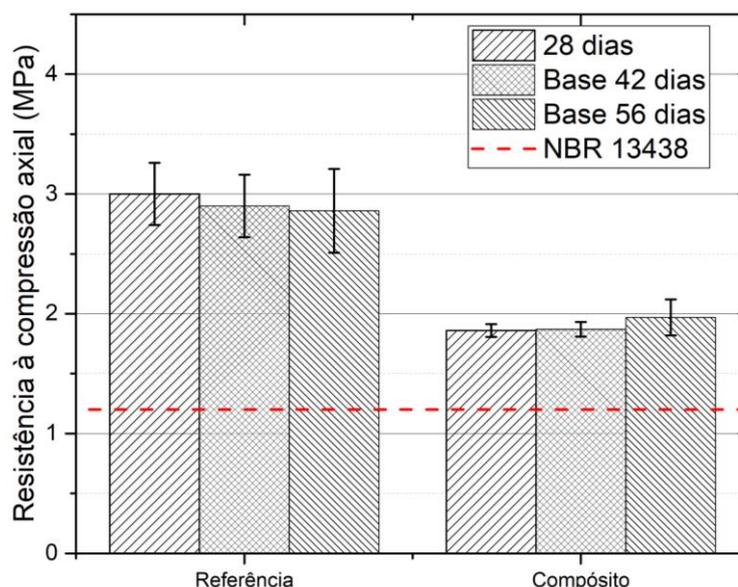


Figura 107 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após ataque em hidróxido de sódio (Elaboração própria)

Como pode-se observar na Figura 107, ambos os traços estão atendendo a resistência normativa mesmo após os períodos em que estiveram submetidos à solução de hidróxido de sódio. Além disso, é possível verificar que as barras de desvio

padrão indicam que os resultados, mesmo que decrescentes nos valores médios do Traço Referência e crescentes nos valores médios do Compósito, ocupam a mesma faixa de variação, indicando forte tendência para não haver variação estatisticamente significativa. De qualquer forma, foram calculados os percentuais de variação de resistência dos traços quando comparadas as resistências obtidas para cura em 28 dias de câmara úmida e para as resistências obtidas após ataque de hidróxido de sódio por 42 e 56 dias (Tabela 80).

Tabela 80 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Base 42 dias	-3%	0%
Base 56 dias	-5%	+6%

Fonte: elaboração própria

Em função das barras de desvio padrão indicarem grande proximidade entre os valores médios das resistências para cada traço e das variações de resistência terem sido pequenas (menor de 10% para todas as comparações), optou-se por realizar análise de variância (ANOVA) pelo método de Tukey com nível de confiança de 95%.

A Tabela 81 apresenta as comparações realizadas e indica que todos os resultados médios obtidos nos traços não possuem diferença estatisticamente significativa, o que converge com as análises realizadas pelo desvio padrão e pelas variações de resistência.

Tabela 81 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em NaOH (Base)

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Base 42	Não	28 dias – Base 42	Não
28 dias – Base 56	Não	28 dias – Base 56	Não
Base 42 – Base 56	Não	Base 42 – Base 56	Não

Fonte: elaboração própria

5.3 DURABILIDADE – ATAQUE QUÍMICO COM ÁCIDO SULFÚRICO

A preparação da solução aquosa com ácido sulfúrico foi realizada conforme descrito no item 3.2.11.2 deste trabalho. Foram preparados diversos recipientes nos quais foram emergidas três amostras cúbicas por idade (14, 28, 42 e 56 dias) e três amostras prismáticas para as idades de 42 e 56 dias. A Figura 108 ilustra o estado de

degradação das amostras submetidas à solução quando comparadas às amostras que foram retiradas da câmara úmida aos 28 dias de cura. À esquerda da Figura 108, pode-se observar as cinco amostras do Compósito e, à direita da Figura 108, pode-se observar as cinco amostras do Traço Referência.

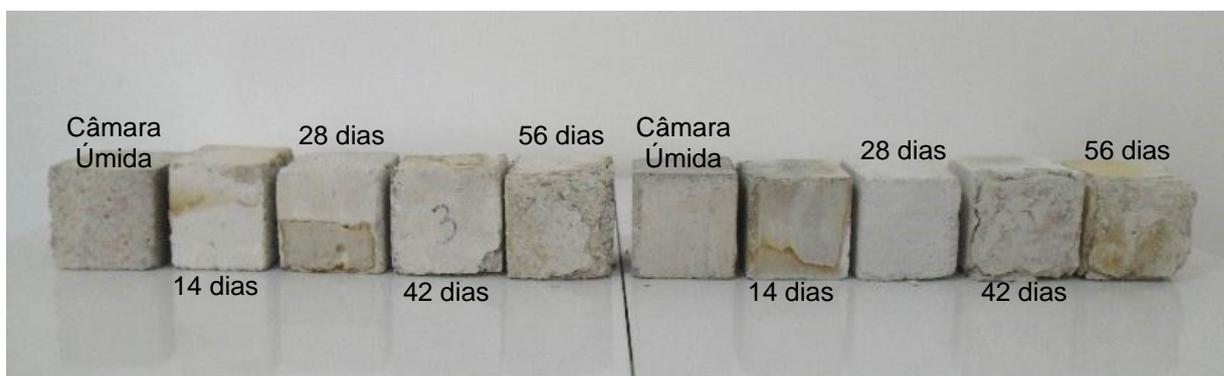


Figura 108 – Amostras após tratamento em H_2SO_4
(Elaboração própria)

Conforme pode-se observar na Figura 108, as amostras que permaneceram por 56 dias na solução ácida sofreram forte degradação tanto para o Traço Referência quanto para o Compósito. Essa degradação não permitiu que fossem realizados ensaios mecânicos nas amostras cúbicas e nas amostras prismáticas que permaneceram por 56 dias na solução ácida, uma vez que o material ficou quebradiço e a matriz cimentícia estava desagregando com o manuseio.

Para realização das análises microestruturais, a casca de arroz foi extraída das amostras que permaneceram por 42 dias na solução ácida, porque foram as amostras que apresentaram maior estado de degradação e que foram ensaiadas mecanicamente. A Figura 109 ilustra a condição das fibras após o ataque ácido no Compósito, como pode-se observar elas ficaram escuras.



Figura 109 – Casca de Arroz do Compósito que ficou 42 dias em H_2SO_4
(Elaboração própria)

5.3.1 Análise química a partir de difração de raios x

Para proporcionar uma análise visual adequada da situação da casca de arroz após o período em que o Compósito ficou na solução ácida, foram colocados na Figura 110 os difratogramas da casca de arroz *in natura*, da casca de arroz extraída do Compósito com 28 dias de cura em câmara úmida e da casca de arroz extraída do Compósito que foi submetida à solução ácida.

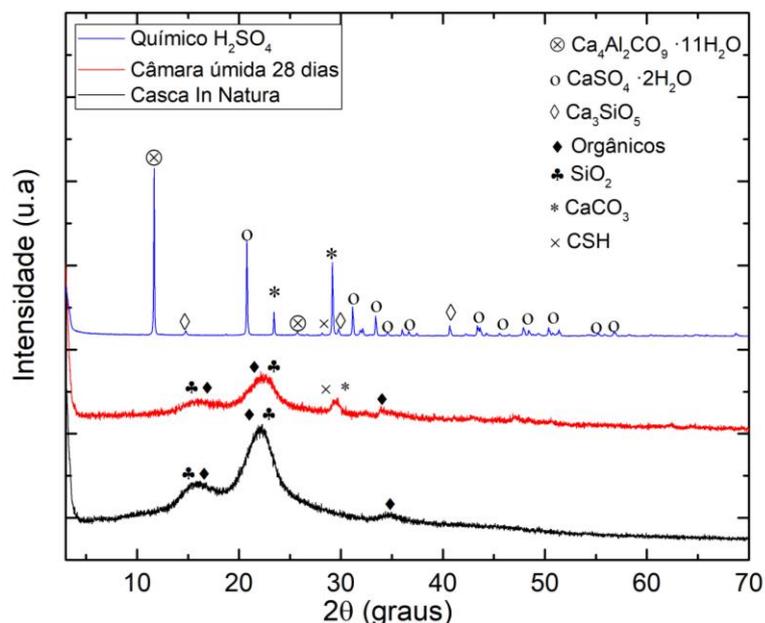


Figura 110 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a solução de ácido sulfúrico (Elaboração própria)

No difratograma ilustrado na Figura 110, foram identificados três picos de monocarboaluminato ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_9 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ – ICDD #00-014-0083), onze picos de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – ICDD #00-021-0816), dois picos de silicato de cálcio (Ca_3SiO_5 – ICDD #00-016-0407) e dois picos de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD #00-043-0697).

Ao analisar, na Figura 110, a casca de arroz extraída do Compósito que foi submetido ao tratamento ácido, essa não apresenta mais nenhum pico que indica a presença de materiais orgânicos e lignocelulósicos.

Os picos apresentados na fibra que sofreu ataque ácido são característicos da matriz cimentícia e da própria solução ácida (caso do sulfato de cálcio di-hidratado). Tal circunstância comprova que o tratamento ácido foi 100% eficiente em degradar as fibras vegetais, mesmo que protegidas pela matriz. Deve-se destacar que as cascas foram extraídas da parte mais externa das amostras e, portanto, quando utilizadas

amostras maiores e as fibras forem extraídas de partes mais protegidas, pode ser que ocorra a existência de matéria orgânica.

O maior problema verificado neste ensaio é a forte degradação que a matriz sofre. Mesmo atingindo a matéria orgânica da casca, o ácido sulfúrico acabou prejudicando muito a matriz, o que limitou o tempo de ensaio em 42 dias.

5.3.2 Fluorescência de raios x

A Tabela 82 apresenta os óxidos identificados na casca de arroz extraída do Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico.

Tabela 82 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico

Composição Química	Peso
SiO ₂	11,086 %
Al ₂ O ₃	0,000 %
Fe ₂ O ₃	0,330 %
CaO	20,277 %
MgO	0,000 %
SO ₃	28,023 %
Na ₂ O	0,006 %
K ₂ O	0,000 %
P ₂ O ₅	1,250 %
TiO ₂	0,095 %
Cr ₂ O ₃	0,000 %
Mn ₂ O ₃	0,019 %
ZnO	0,001 %
SrO	0,089 %

Fonte: elaboração própria

Conforme consta na Tabela 82, o dióxido de silício foi identificado em quantidade similar ao encontrado na casca de arroz *in natura*. Os outros óxidos identificados em grande quantidade são o óxido de cálcio, proveniente da matriz cimentícia, e o trióxido de enxofre, proveniente da solução química de ácido sulfúrico.

A identificação de grande percentual de trióxido de enxofre comprova que as fibras naturais da casca de arroz foram atingidas pelo ácido sulfúrico. O grande percentual de óxido de cálcio e silício identificados na superfície da casca indicam que, mesmo com a solução química, ainda pode ser observada a interação entre fibra matriz, uma vez que o óxido de cálcio é um componente da matriz cimentícia e o óxido de silício pode ser proveniente tanto da casca quanto da matriz ou de reações

químicas entre ambas. Desta forma, a presença destes elementos de maneira significativa na casca pode justificar a manutenção da resistência dos Compósitos submetidos à solução de ácido sulfúrico.

5.3.3 Análise em microscopia eletrônica de varredura

Com o intuito de analisar a estrutura da casca de arroz que permaneceu no Compósito submerso em solução de ácido sulfúrico por 56 dias, foram geradas imagens com microscópio eletrônico de varredura com ampliações de 200 vezes, 2000 vezes e 5000 vezes.

As primeiras imagens analisadas são das ampliações de 200 vezes e visam comparar a integridade da casca que estava no Compósito submetido a ataque ácido (Figura 111b) com a casca *in natura* (Figura 111a).

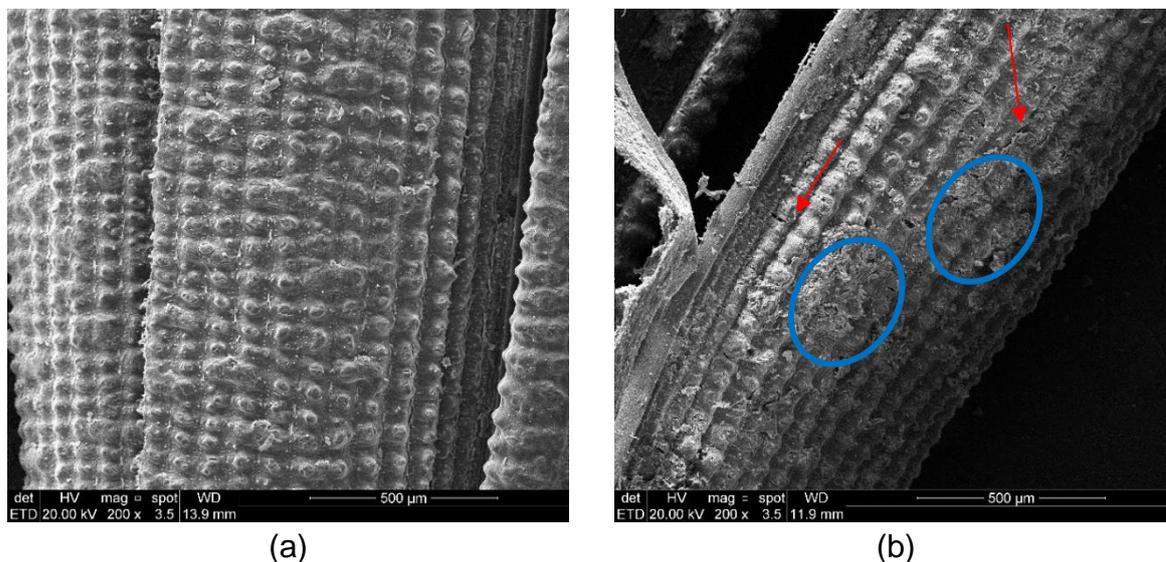


Figura 111 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em ácido sulfúrico (b) – ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Conforme pode-se analisar na Figura 111, a casca *in natura* apresenta maior integridade que a casca que foi submetida à solução de ácido sulfúrico. Pode-se verificar pequenas fraturas na casca retirada do Compósito (destacado em vermelho). Mesmo assim, como as imagens são da superfície externa da casca, não é possível afirmar que essas fissuras cortam toda espessura da fibra.

Além da observação das fissuras, é possível notar que a casca extraída do Compósito submetido à solução ácida apresenta sua superfície com elementos químicos aderidos (destacado em azul). Esses elementos necessitam de análise em ampliações maiores.

Com base nas duas observações realizadas na Figura 111, as próximas imagens foram geradas com o intuito de entender melhor as fibras analisadas. Primeiramente, foram geradas imagens da superfície interna da casca com ampliação de 200 vezes (Figura 112).

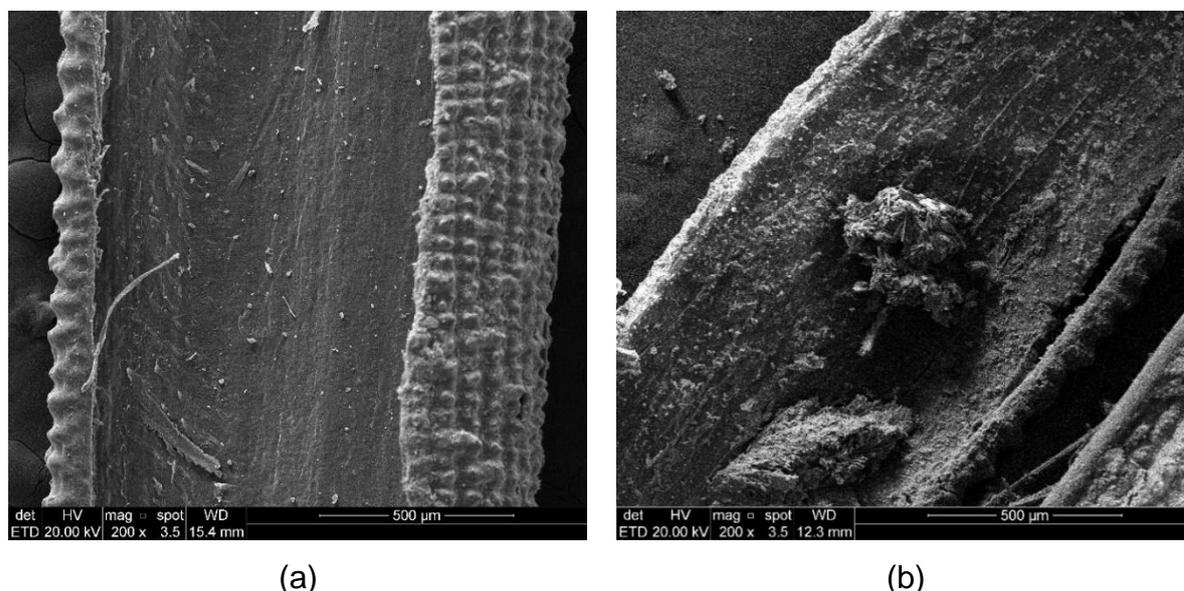
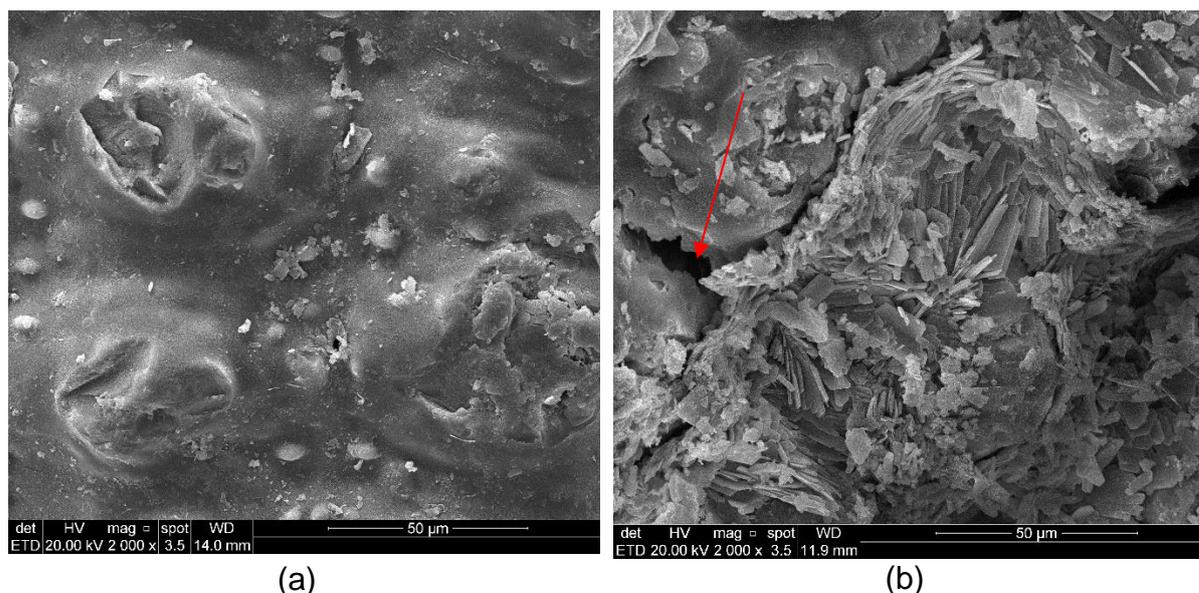


Figura 112 – Superfície interna da casca *in natura* (a) e da casca retirada do Compósito em solução ácida (b) – ampliação de 200 vezes

Analisando a imagem, não é possível concluir que as fissuras observadas na superfície externa da casca (Figura 111) cortam toda sua espessura, uma vez que, na Figura 112, não é possível constatar presença de nenhuma fissura. Assim como na superfície externa da casca, a superfície interna apresentou grande quantidade de material aderida na sua estrutura, sendo que, na superfície interna, visualmente, verifica-se que a distribuição é mais homogênea.

Ao comparar a superfície interna da casca *in natura* (Figura 112a) com a superfície interna da casca submetida à solução ácida, fica ainda mais evidente o quanto de material aderido está presente na casca extraída do Compósito.

A Figura 113 ilustra a comparação da superfície externa da casca *in natura* e da casca retirada do Compósito que permaneceu por 42 dias em solução ácida com ampliação de 2000 vezes.



(a) (b)
 Figura 113 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em ácido sulfúrico (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Com a Figura 113, é possível visualizar melhor o formato do material que fica aderido na casca, constatando-se que ele apresenta formato de cristais e revestem grande parte da fibra.

Além de verificar a presença destes cristais, é possível destacar as fissuras com a ampliação de 2000 vezes (destacado em vermelho na Figura 113b). Pode-se verificar que elas contornam as elevações existentes na casca *in natura*, mas que os cristais verificados acabam fechando grande parte delas, o que pode interferir positivamente no desempenho mecânico das fibras após formação das fissuras e sua deterioração.

Objetivando interpretar melhor os cristais formados, uma vez que eles foram constatados apenas nas fibras que estavam nos Compósitos submetidos a ataque ácido, o foco da imagem realizada na ampliação de 2000 vezes foi direcionado para um ponto em que havia apenas a presença destes cristais (Figura 114). Conforme pode-se observar, a estrutura dos cristais é íntegra e tem estruturas lisas sem qualquer tipo de falha relevante.

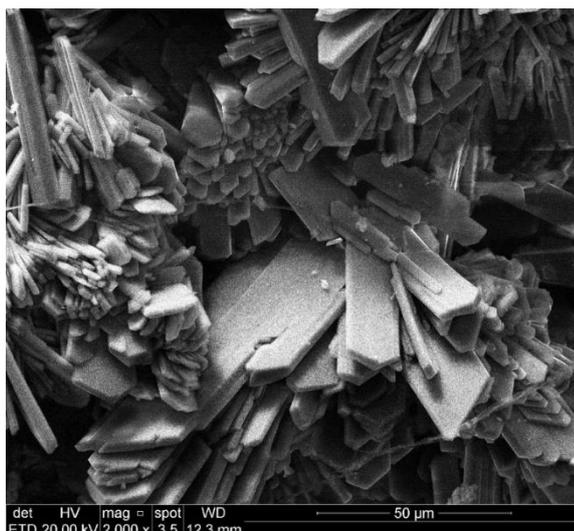
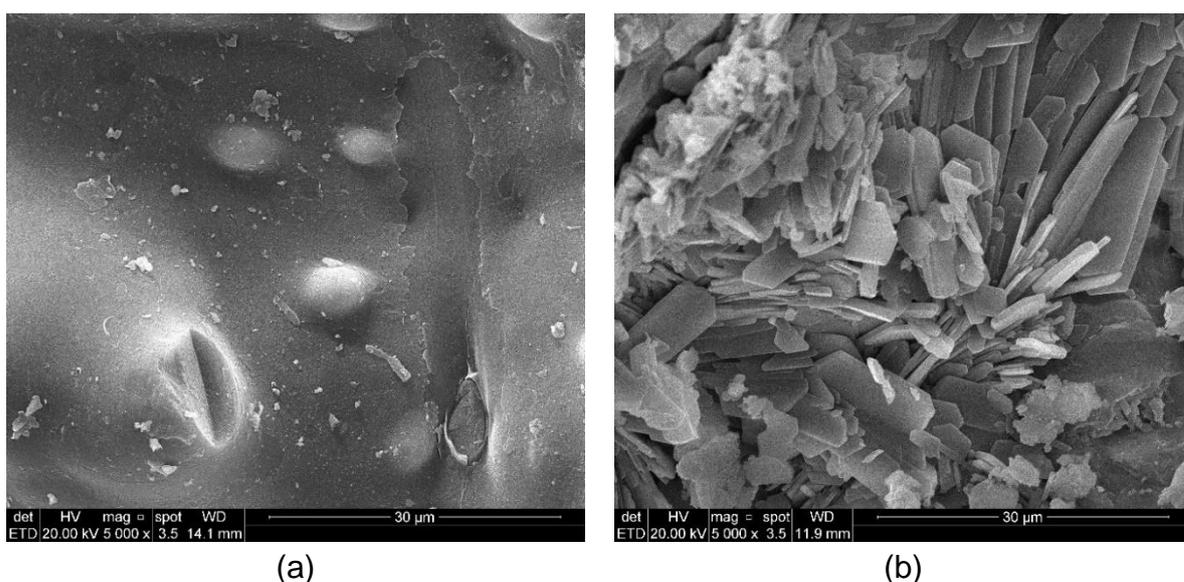


Figura 114 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes
(Elaboração própria)

Ainda na tentativa de entender melhor a formação e a composição destes cristais, foram geradas imagens com ampliação de 5000 vezes (Figura 115). Ao comparar a superfície da casca *in natura* nesta amplitude com a superfície da casca retirada do Compósito sujeito ao ataque ácido, observa-se que os cristais cobrem de maneira bastante homogênea e parecem muito bem ancorados nas fibras. Como não foi observada a formação destes cristais em nenhuma outra amostra analisada nesta pesquisa, a indicação é de que o elemento químico observado seja exclusivo das cascas sujeitas a ataque ácido.



(a)

(b)

Figura 115 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob tratamento em hidróxido de sódio (b) – ampliação de 5000 vezes
(Elaboração própria)

Para identificar o elemento que forma estes cristais e definir qual seria sua influência para os resultados mecânicos obtidos em macroescala, foram comparados todos os resultados obtidos nos ensaios de difração de raios x. Ao fazer as devidas análises, observou-se que o único elemento químico que é exclusivo da casca retirada do Compósito exposto a ácido sulfúrico é o sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Desta forma, sugere-se que os cristais encontrados nas superfícies externas e internas das cascas são sulfato de cálcio di-hidratado.

Como pode-se observar na Figura 116, a integridade destes cristais bem como a homogeneidade com que são distribuídos podem ter influenciado positivamente na resistência das fibras e do Compósito, já que ajudam a reduzir a perda de resistência, principalmente à tração, oriunda de microfissuras constatadas na Figura 113.

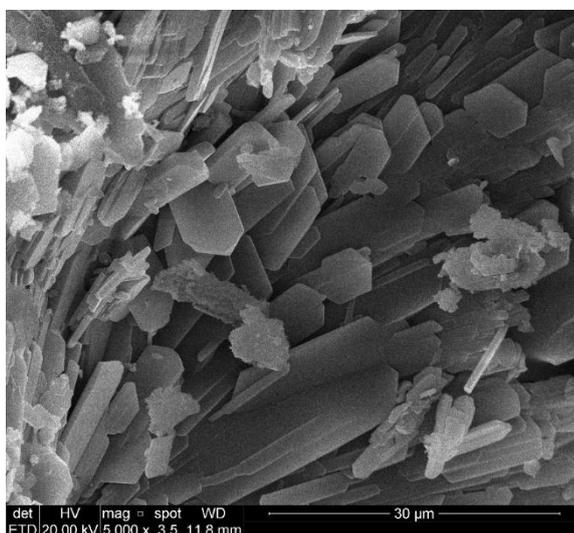


Figura 116 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

5.3.4 Espectroscopia por energia dispersiva

A espectroscopia da superfície da casca extraída das amostras que foram submetidas a ataque ácido ficou comprometida pela total cobertura da fibra pelo sulfato de cálcio di-hidratado. Mesmo assim, o ensaio foi realizado e foi feita a leitura de uma área maior da superfície, como ilustrado na Figura 117.

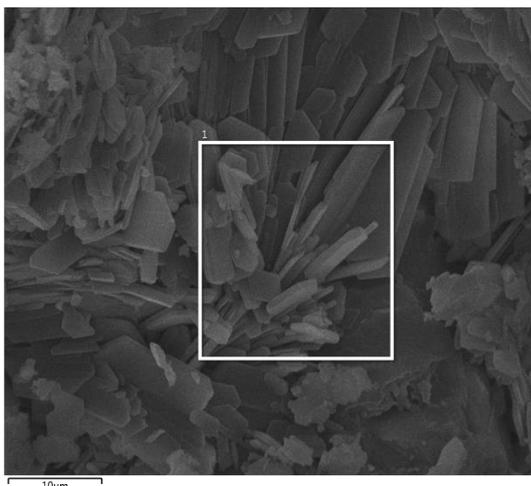


Figura 117 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico (Elaboração própria)

A área de leitura ilustrada na Figura 117 apresentou os espectros que estão relacionados e quantificados na Tabela 83.

Tabela 83 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à solução de ácido sulfúrico obtida a partir de EDS

Espectro	1
C	8,93%
O	56,78%
Si	5,64%
S	13,09%
Ca	15,55%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Ao comparar os resultados obtidos para a casca extraída do Compósito (Tabela 83) com os espectros aferidos na casca *in natura* (Tabela 15), pode-se constatar que houve redução significativas de carbono, o que corrobora com as análises realizadas no difratograma, em que se constatou degradação de material orgânico. Além da redução de carbono, também foi constatada uma redução significativa na presença de silício, que, ante um valor de pouco mais de 40% observado na superfície da casca *in natura*, reduziu para 5,64%.

A presença significativa de cálcio, mais de 15%, indica que a matriz cimentícia também agiu na fibra natural, podendo ser motivo da causa da redução do silício. Além da identificação do cálcio, foi observado o surgimento de sulfato, que é proveniente do ataque ácido realizado. A constatação de quantidades relevantes de sulfato indica

que a solução ácida, de fato, atingiu as fibras e cumpriu com o objetivo de degradar as fibras naturais.

5.3.5 Análise das resistências à tração na flexão dos prismas

Na análise da influência do ataque ácido nos prismas, foram analisadas amostras que permaneceram por 42 dias e por 56 dias submersas. Para cada traço, aos 42 dias, foram analisadas três amostras, das quais foram calculadas as médias, os desvios padrões e os coeficientes de variação (Tabela 84). Em função do avançado estado de degradação das amostras que permaneceram por 56 dias em solução ácida, tanto para o Traço Referência quanto para o Compósito, não foi possível realizar nenhum ensaio mecânico, pois a matriz estava desagregando e não suportava sequer o manuseio.

Tabela 84 – Resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	1,52	0,04	3%	28 dias	0,88	0,04	4%
Ácido 42 dias	1,36	0,04	3%	Ácido 42 dias	0,94	0,04	4%

Fonte: elaboração própria

Os valores apresentados na Tabela 84 foram plotados em forma gráfica e estão ilustrados na Figura 118.

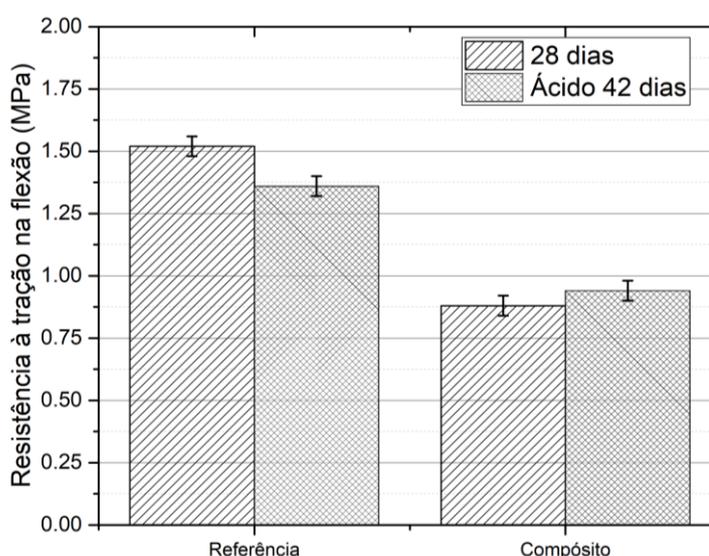


Figura 118 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico (Elaboração própria)

Como pode ser observado, o valor médio da resistência à tração na flexão do Traço Referência foi reduzido e, aparentemente, não ocupa a mesma faixa de variação que a resistência média das amostras que permaneceram por 28 dias em câmara úmida. Para o Compósito, os valores médios das amostras submetidas à solução ácida ficaram superior ao valor das amostras da câmara úmida, no entanto, as barras de eixo têm faixa coincidente, indicando que pode não haver variação estatisticamente significativa.

A fim de tornar as análises mais completas, foram calculados os percentuais de variação de resistência média para ambos os traços comparando as amostras que permaneceram por 42 dias em solução ácida com as amostras que permaneceram por 28 dias em câmara úmida. A Tabela 85 apresenta as variações, em que se pode verificar que o Traço Referência teve perda de resistência de, aproximadamente, 10% enquanto o Compósito teve ganho de resistência de, aproximadamente, 7%.

Tabela 85 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Ácido por 42 dias	-10%	+7%

Fonte: elaboração própria

Para definir se as variações de resistência estabelecidas na Tabela 85 apresentam significância estatística, foi realizada análise das variâncias pelo método de Tukey com 95% de confiança (Tabela 86).

Tabela 86 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H₂SO₄

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Ácido 42	Sim	28 dias – Ácido 42	Não

Fonte: elaboração própria

A partir da análise das variâncias, pode-se concluir que o aumento da resistência média do Compósito, após permanecer na solução ácida, não é relevante estatisticamente, ocupando valor semelhante ao das amostras que permaneceram na câmara úmida. Mesmo assim, com a diferença verificada no Traço Referência, pode-se concluir que o Compósito apresentou desempenho superior, uma vez que o material com casca não perdeu resistência e o Traço Referência teve queda aproximada de 10% da sua resistência média.

A verificação constatada anteriormente remete ao fato de que o ácido influenciou negativamente mais na matriz cimentícia que no componente de reforço, que, neste caso, é a fibra vegetal. Conforme constatado no Item 5.3.1, a casca de arroz foi degradada, no entanto, ao analisar conjuntamente os Itens 5.3.1 e 5.3.3, e identificar o surgimento de sulfato de cálcio di-hidratado na superfície da casca de arroz, é possível sugerir que houve uma compensação entre a perda gerada pela degradação dos polímeros naturais com o surgimento do sulfato de cálcio.

5.3.6 Análise das resistências à compressão axial dos prismas

A partir das extremidades dos prismas que foram rompidos à tração na flexão, foram realizados ensaios de compressão axial. No total, foram utilizadas seis amostras por idade e os valores médios, desvios padrões e coeficientes de variação obtidos estão apresentados na Tabela 87.

Tabela 87 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico

Traço Referência				Compósito Casca			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	2,37	0,08	3%	28 dias	1,78	0,07	4%
Ácido 42 dias	2,47	0,10	4%	Ácido 42 dias	1,70	0,08	5%

Fonte: elaboração própria

Os valores apresentados na Tabela 87 foram plotados em forma de gráfico de colunas com barras de erro e estão ilustrados na Figura 119.

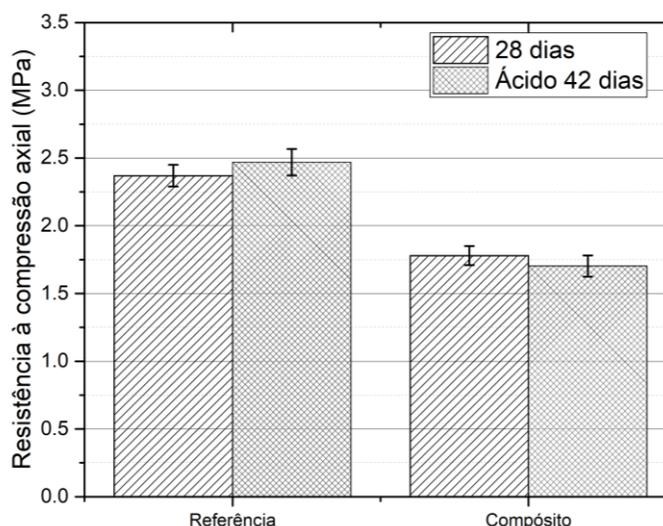


Figura 119 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após tratamento com ácido sulfúrico (Elaboração própria)

Como pode ser observado na Figura 119, para o Traço Referência, a resistência aumentou e, para o Compósito, a resistência reduziu, no entanto, em ambos os casos, as barras de erro ocupam faixas similares, o que indica que, estatisticamente, os valores são semelhantes.

As variações das resistências são apresentadas na Tabela 88. Em ambos os traços, os valores obtidos foram pequenos, menos de 5%. Embora o Traço Referência tenha aumentado o valor médio e o Compósito tenha reduzido, não é possível afirmar se houve diferença significativa no desempenho.

Tabela 88 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Ácido por 42 dias	+4%	-4%

Fonte: elaboração própria

Para verificar se, de fato, as variações aferidas na Tabela 88 foram significativas, foi realizada análise das variâncias pelo método de Tukey com 95% de confiança (Tabela 89). A partir desta análise, pode-se concluir que o Compósito não teve perda de desempenho mecânico após permanecer na solução ácida.

Tabela 89 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H₂SO₄

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Ácido 42	Não	28 dias – Ácido 42	Não

Fonte: elaboração própria

5.3.7 Análise das resistências à compressão axial dos cubos

As resistências à compressão axial dos cubos submetidos à solução ácida estão apresentadas na Tabela 90.

Tabela 90 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento com ácido sulfúrico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	3,00	0,26	9%	28 dias	1,86	0,05	3%
Ácido 14 dias	3,15	0,09	3%	Ácido 14 dias	2,03	0,21	10%
Ácido 28 dias	3,03	0,40	13%	Ácido 28 dias	2,00	0,30	15%
Ácido 42 dias	2,83	0,15	5%	Ácido 42 dias	1,72	0,26	12%

Fonte: elaboração própria

Os resultados apresentados na Tabela 90 foram representados graficamente na Figura 120.

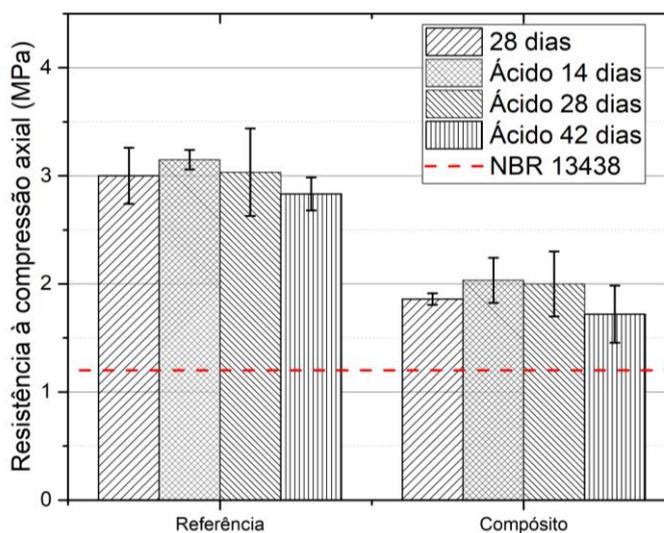


Figura 120 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após tratamento com ácido sulfúrico (Elaboração própria)

Embora os valores médios das resistências tenham aumentado, quando comparadas as amostras submetidas a 14 e 28 dias em solução ácida com as amostras que ficaram 28 dias em câmara úmida. No entanto, observa-se que as barras de erro plotadas a partir do desvio padrão ocupam as mesmas faixas, sendo este um forte indicativo de que as diferenças não são significativas e, portanto, o Traço Referência e o Compósito não perderam resistência após ataque ácido em períodos de 14 e 28 dias.

Ainda analisando a Figura 120, pode-se verificar que as amostras submetidas por 42 dias em solução ácida tiveram redução dos valores médios da resistência quando comparadas às amostras submetidas à solução ácida em menores idades e às amostras que ficaram em câmara úmida por 28 dias. Mesmo assim, aparentemente, as barras de erro ainda ocupam a mesma faixa e indicam que, mesmo pelo período de 42 dias, nenhum dos traços sofreu redução de resistência relevante.

É pertinente destacar que, depois de todos os períodos de exposição das amostras em solução ácida, as resistências médias se mantiveram atendendo ao requisito mínimo normativo da NBR 13438 (ABNT, 2013). Os valores ficaram com folga acima da resistência mínima de 1,00 MPa e foram superiores ao exigido para a resistência média da norma (C12), que exige 1,2 MPa.

Para detalhar melhor as variações estatísticas, foram calculadas as perdas de resistência (Tabela 91) e foi realizada a análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com 95% de confiança (Tabela 92).

Tabela 91 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
Ácido por 14 dias	+5%	+9%
Ácido por 28 dias	+1%	+7%
Ácido por 42 dias	-6%	-8%

Fonte: elaboração própria

Conforme apresentado na Tabela 91, as variações de resistência foram menores de 10% para todas as comparações realizadas. Na análise das variâncias, ficou comprovado que a degradação das amostras em solução ácida não varia a resistência média de maneira estatisticamente significativa para nenhum dos traços.

Tabela 92 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tempos em tratamentos químicos em H₂SO₄

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – Ácido 14	Não	28 dias – Ácido 14	Não
28 dias – Ácido 28	Não	28 dias – Ácido 28	Não
28 dias – Ácido 42	Não	28 dias – Ácido 42	Não
Ácido 14 – Ácido 28	Não	Ácido 14 – Ácido 28	Não
Ácido 14 – Ácido 42	Não	Ácido 14 – Ácido 42	Não
Ácido 28 – Ácido 42	Não	Ácido 28 – Ácido 42	Não

Fonte: elaboração própria

Diante de todas as análises realizadas para o tratamento químico utilizando ácido sulfúrico, é possível afirmar que não é indicado utilizar este tipo de solução para acelerar a degradação de fibras vegetais e analisar durabilidade. Essa afirmação é embasada no fato de que, com o ácido sulfúrico, há formação de sulfato de cálcio que pode mascarar perdas de resistência que haverá durante a vida útil de compósitos de matriz cimentícia reforçados por fibras vegetais.

5.4 DURABILIDADE – ATAQUE TÉRMICO

O ataque térmico nas amostras cúbicas e prismáticas foi realizado conforme descrito no item 3.2.11.2. A Figura 121 ilustra as amostras colocadas na mufla, todas elas foram colocadas sobre materiais refratários para não ficarem em contato com as resistências. Para reduzir a variação nos resultados devido à posição das amostras, elas foram colocadas intercaladas, isto é, metade das amostras do Compósito foi colocada no fundo da mufla e metade na frente (próximo à porta), mesmo procedimento adotado para as amostras do Traço Referência.



Figura 121 – Amostras dispostas em forno mufla para ataque térmico

Para a verificação das resistências mecânicas, foram ensaiadas três amostras cúbicas e três amostras prismáticas de cada traço para cada temperatura. Nas amostras submetidas a 100°C, não foi observada deterioração aparente para nenhum dos traços, a casca foi extraída e ficou com a aparência ilustrada na Figura 122.



Figura 122 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 100°C
(Elaboração própria)

Para as amostras submetidas a 300°C, observou-se que as amostras do Traço Referência sofreram fissuração superficial, enquanto o Compósito permaneceu íntegro. Mesmo assim, ao romper as amostras do Compósito, verificou-se que a casca havia se solidificado, não sendo possível extraí-la da matriz, e sua cor escureceu. A Figura 123 ilustra a condição do Compósito após exposição a 300°C por 60 minutos.



Figura 123 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 300°C
(Elaboração própria)

Nas amostras submetidas a 650°C, observou-se a mesma condição de fissuração que nas amostras submetidas a 300°C. As amostras do Traço Referência apresentaram elevada fissuração e as amostras do Compósito permaneceram com a estrutura íntegra (Figura 124).



Figura 124 – Amostras Referência (à esquerda) e Compósitos (à direita) após uma hora na mufla a 650°C
(Elaboração própria)

Em relação ao estado das fibras vegetais (casca de arroz), verificou-se que elas foram calcificadas e não foi possível realizar uma extração completa da matriz, o aspecto visual delas confundia-se com material cimentício. Diferentemente das fibras dos compósitos submetidos a 300°C, as fibras submetidas a 650°C ficaram com coloração clara, conforme pode-se observar na Figura 125.



Figura 125 – Casca de Arroz do Compósito submetido a 650°C
(Elaboração própria)

5.4.1 Análise química a partir de difração de raios x

Neste item, serão apresentados quatro subitens para apresentar os difratogramas das fibras extraídas dos Compósitos submetidos a 100°C, 300°C, 650°C e a comparação entre as três temperaturas. Os três primeiros subitens apresentam o difratograma isolado de cada temperatura e uma figura com os difratogramas de cada temperatura com o difratograma da casca de arroz *in natura* e com o difratograma da casca de arroz extraída do Compósito que permaneceu por 28 dias em câmara úmida. Após as análises isoladas para cada temperatura, é apresentada a análise conjunta das três temperaturas estudadas no último subitem.

5.4.1.1 Compósito submetido a 100°C

Para entender a condição da microestrutura da casca após o tratamento térmico em 100°C, foi plotado o difratograma em conjunto com a casca *in natura* e com a casca extraída do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida.

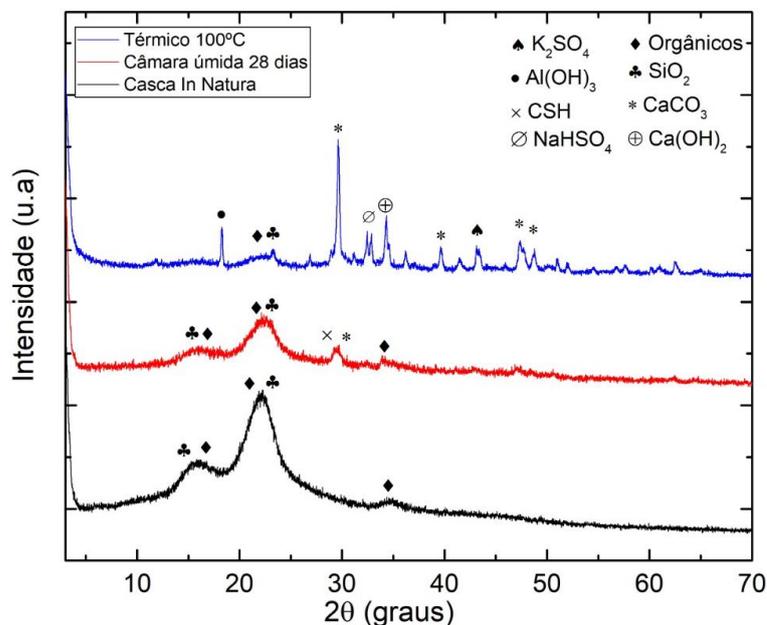


Figura 126 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 100°C (Elaboração própria)

Conforme especificado na Figura 126, os principais picos identificados são divididos da seguinte forma: um pico de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$ – ICDD #00-007-0324), quatro picos de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD #00-043-0697), um pico de bissulfato de sódio (NaHSO_4 – ICDD #00-025-0833), um pico de silicato de cálcio (Ca_3SiO_5 – ICDD #00-016-0407), um pico sulfato de potássio (K_2SO_4 – ICDD #00-044-1414), um de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – ICDD #01-076-0571), e um pico de materiais orgânicos e dióxido de silício ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ - ICDD #00-060-1502 e SiO_2 - ICDD #00-034-0717).

Analisando a comparação entre as cascas nas condições apresentadas na Figura 126, pode-se verificar que a presença de materiais lignocelulósicos foi drasticamente reduzida. Mesmo assim, é possível verificar que, entre os 22° e 23°, existe uma ascensão da linha de base, exatamente na posição que pode ser caracterizada como celulose I (Figura 126). De qualquer forma, a maioria dos picos

identificados apresenta um grau de cristalinidade superior ao observado na casca extraída do Compósito com 28 dias de cura em câmara úmida.

Ainda assim, mesmo com a drástica redução na quantidade de material orgânico, pode-se constatar que a temperatura de 100°C não é suficiente para degradar integralmente a fibra vegetal que está protegida na matriz cimentícia.

5.4.1.2 Compósito submetido a 300°C

Na Figura 127, estão ilustrados os três difratogramas da casca de arroz. Primeiro, o da casca extraída do Compósito submetido a 300°C, depois, o da casca extraída do Compósito que permaneceu em câmara úmida por 28 dias e, por último, da casca em seu estado natural.

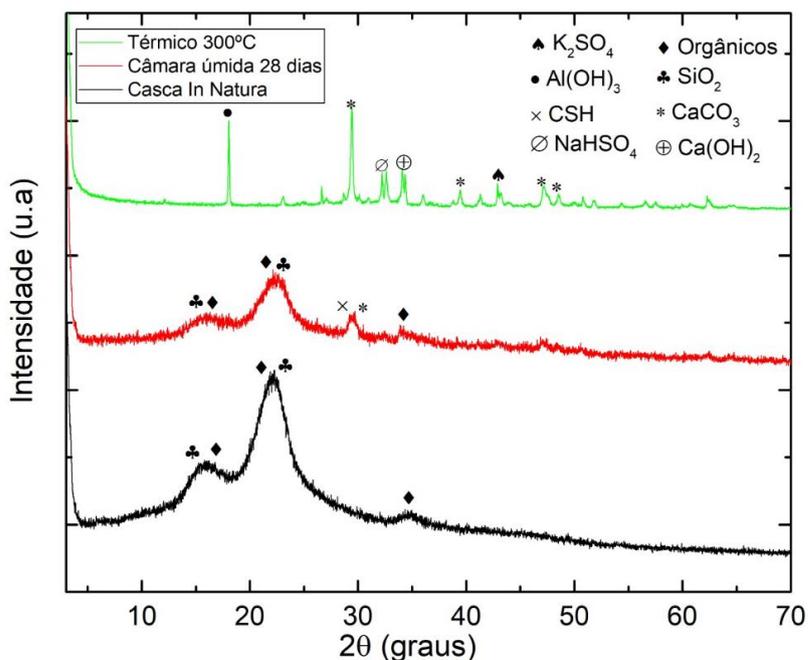


Figura 127 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 300°C (Elaboração própria)

Os picos identificados no difratograma da casca de arroz extraída do Compósito submetido a 300°C (Figura 127) são: quatro picos de carbonato de cálcio ($CaCO_3$ – ICDD #00-043-0697), um pico de bissulfato de sódio ($NaHSO_4$ – ICDD #00-025-0833), um pico de hidróxido de alumínio ($Al(OH)_3$ – ICDD #00-007-0324), um pico de sulfato de potássio (K_2SO_4 – ICDD #00-044-1414) e um pico de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$ – ICDD #01-076-0571).

Ao comparar os difratogramas da casca *in natura* e da casca extraída do Compósito que sofreu o ataque térmico (Figura 127), verifica-se que não há indicativo da existência de material celulósico ou de materiais orgânicos. Assim, pode-se concluir que, com a temperatura de 300°C, foi possível gerar uma degradação de 100% dos materiais orgânicos da fibra, mesmo estando protegida pela matriz cimentícia.

Comparando o difratograma da casca extraída do Compósito com 28 dias de cura em câmara úmida com o da casca que sofreu ataque térmico, observa-se a intensificação de picos caracterizados pela matriz cimentícia, além da maior cristalinidade do carbonato de cálcio e do silicato de cálcio hidratado.

A identificação das fases características do cimento Portland indica que houve a degradação completa da casca já aos 300°C, mesmo estando protegida pela matriz cimentícia. Tal fato ainda é corroborado pela Figura 123, em que é possível identificar a deterioração da casca pelo aspecto visual.

5.4.1.3 Compósito submetido a 650°C

Os difratogramas das cascas extraídas dos Compósitos submetidos a 650°C, 28 dias em câmara úmida e da casca *in natura* estão ilustrados na Figura 128.

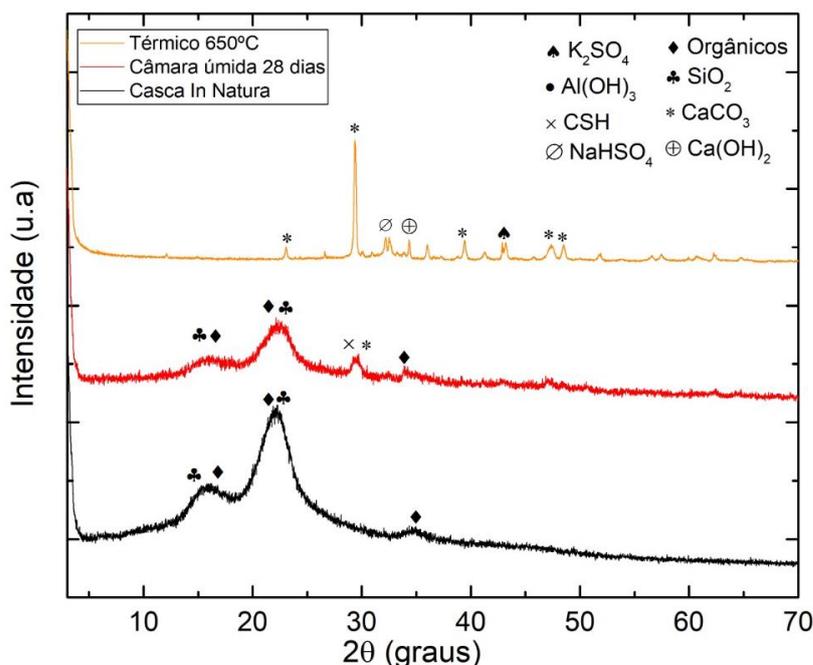


Figura 128 – Comparação do difratograma da casca de arroz *in natura* com a casca do Compósito aos 28 dias de cura em câmara úmida e com a casca do Compósito submetido a temperatura de 650°C
(Elaboração própria)

Os principais picos identificados no difratograma da casca extraída do Compósito submetido a 650°C (Figura 128) foram de carbonato de cálcio (CaCO_3 – ICDD #00-005-0586), bissulfato de sódio (NaHSO_4 – ICDD #00-025-0833), sulfato de potássio (K_2SO_4 – ICDD #00-044-1414) e um pico de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ – ICDD #01-076-0571).

Ao comparar o difratograma da casca extraída do Compósito submetido aos 650°C, observa-se que não há qualquer evidência de polímeros naturais lignocelulósicos (Figura 128).

5.4.2 Fluorescência de raios x

Neste item, estão apresentados os dados obtidos no ensaio de fluorescência de raios x para os compósitos submetidos a diferentes temperaturas. A composição química da casca extraída do Compósito submetido às temperaturas de 100°C, 300°C e 650°C, definida pelo ensaio de fluorescência de raios x, está apresentada na Tabela 93.

Tabela 93 – Composição química da casca de arroz extraída do Compósito submetido a 100°C, 300°C e 650°C

Composição Química	Peso		
	100°C	300°C	650°C
SiO_2	17,844 %	20,889 %	22,964 %
Al_2O_3	0,371 %	0,744 %	0,923 %
Fe_2O_3	1,476 %	2,002 %	2,256 %
CaO	30,403 %	38,758 %	43,886 %
MgO	2,457 %	3,346 %	3,885 %
SO_3	1,081 %	1,604 %	1,834 %
Na_2O	0,295 %	0,088 %	0,173 %
K_2O	0,891 %	0,444 %	0,532 %
P_2O_5	0,060 %	0,080 %	0,089 %
TiO_2	0,149 %	0,203 %	0,234 %
Cr_2O_3	0,010 %	0,007 %	0,008 %
Mn_2O_3	0,059 %	0,052 %	0,060 %
ZnO	0,014 %	0,019 %	0,020 %
SrO	0,152 %	0,142 %	0,168 %

Fonte: elaboração própria

Os óxidos que tiveram maior representatividade na temperatura de 100°C foram o dióxido de silício e o óxido de cálcio. Ao analisar conjuntamente os elementos químicos identificados no difratograma (Figura 126) e os óxidos identificados no

ensaio de fluorescência (Tabela 93), pode-se constatar que os resultados são convergentes no que tange a identificação da maioria dos compostos provenientes da matriz.

O percentual de dióxido de silício identificado após a exposição aos 100°C foi similar ao percentual observado na exposição por 365 dias em câmara úmida, em ambiente interno e em ambiente externo (Tabela 51). A mesma similaridade pode ser observada quando analisado o percentual de óxido de cálcio.

Na contramão dos ensaios de fluorescência das demais amostras que puderam ser realizadas com a casca extraída integralmente da matriz, o ensaio das amostras submetidas a 300°C e 650°C acabou tendo uma influência maior dos produtos cimentícios pois sua extração completa não foi possível. Como pode-se observar na Figura 123, a amostra utilizada para ensaio de fluorescência apresentava uma quantidade muito grande de material cimentício, uma vez que a extração da casca não foi viabilizada por conta de sua calcificação.

A elevada quantidade de dióxido de silício observada na Tabela 93, que era de, aproximadamente, 12% na casca *in natura*, e aqui foi identificada em quase 21%, é proveniente da queima da fibra, que, ao sofrer combustão, se torna, principalmente, dióxido de silício e dióxido de carbono e água.

O elevado teor de óxido de cálcio observado para temperatura de 300°C é proveniente da matriz cimentícia e foi identificada em maior quantidade quando comparada às outras fibras visto que a calcificação da casca não permitiu a separação mais eficiente da matriz, conforme pode-se visualizar na Figura 123. Assim como nas demais análises, a composição química verificada na fluorescência de raios x converge com os elementos químicos identificados na difração de raios x.

Como esperado, os óxidos identificados e apresentados após exposição aos 650°C que estão em maior quantidade foram o óxido de cálcio e o dióxido de silício. Em relação à comparação com o percentual do dióxido de silício identificado na temperatura de 300°C (Tabela 93), não é possível afirmar se houve uma diferença significativa, visto que a diferença de percentual foi de apenas 2,08%. Sobre o óxido de cálcio, novamente, o percentual identificado teve aumento significativo proveniente da matriz cimentícia. Isso foi ocasionado pela impossibilidade de separar as fibras integralmente, uma vez que foram calcificadas após a exposição na temperatura de 650°C (Figura 125).

Assim como nas análises anteriores, os compostos químicos identificados na análise de difração de raios x convergem com os óxidos identificados no ensaio de fluorescência de raios x, o que gera maior confiabilidade às análises realizadas nos Itens 5.4.1.1, 5.4.1.2, 5.4.1.3 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

5.4.3 Análise em microscopia eletrônica de varredura

Neste item, estão apresentadas as análises de microscopia eletrônica de varredura realizadas nas cascas extraídas dos compósitos que foram submetidos a diferentes ataques térmicos. Cada ataque térmico foi apresentado em um item específico.

5.4.3.1 Compósito submetido a 100°C

A condição da casca de arroz extraída do Compósito que permaneceu durante 24 horas em mufla a 100°C é apresentada na Figura 129b. A imagem ilustra a comparação da superfície externa da casca *in natura* (Figura 129a) e da superfície externa da casca extraída do Compósito (Figura 129b) em ampliação de 200 vezes.

Ao analisar a condição da casca que sofreu ataque térmico, é possível verificar pequenas fissuras, no entanto, com a ampliação de 200 vezes, há certa dificuldade de verificar a extensão delas, uma vez que as dimensões são pequenas. Mesmo que a casca tenha sofrido perda de água e tenha sofrido redução volumétrica devido ao ataque térmico, é possível verificar que sua superfície ainda apresenta partículas da matriz cimentícia.

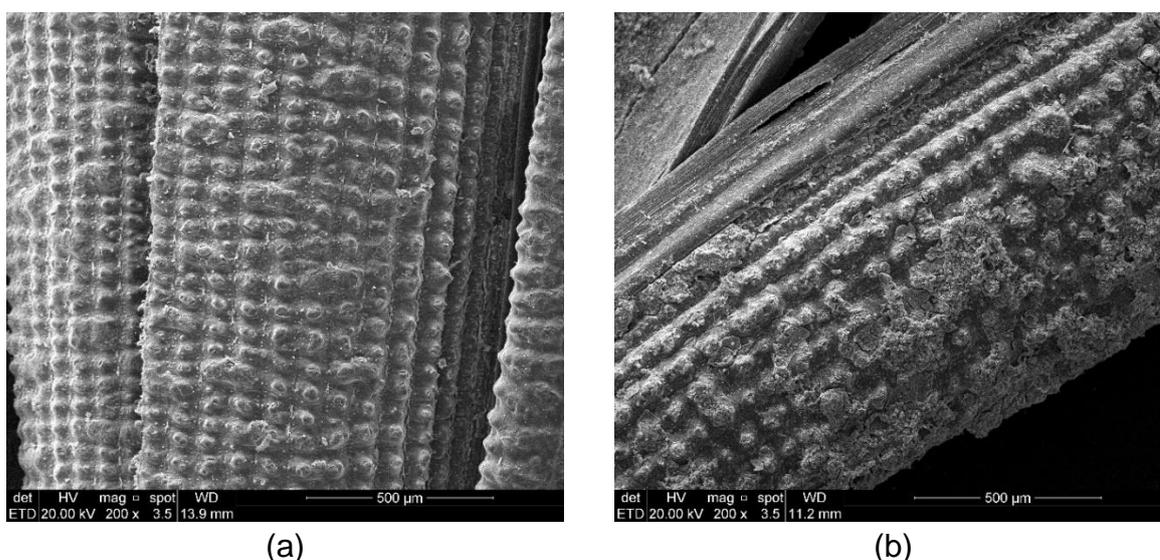


Figura 129 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

Após analisar a superfície externa da casca de arroz extraída do Compósito submetido à temperatura de 100°C por 24 horas, a superfície interna da casca também foi analisada (Figura 130). Na superfície interna, com ampliação de 200 vezes, foi possível identificar que as fissuras possuem dimensões maiores e são no sentido longitudinal da fibra. Também é possível constatar que partículas da matriz cimentícia estão ligadas à casca mesmo após todo processo de perda de água e encolhimento sofrido pelas fibras.

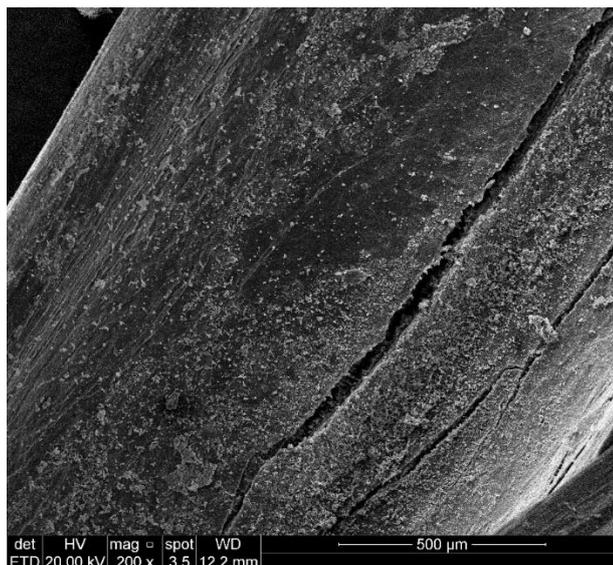


Figura 130 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

A ampliação de 200 vezes não possibilita a análise mais detalhada da interação fibra matriz, uma vez que é possível observar apenas as partículas maiores da matriz que permaneceram aderidas às fibras. Assim, ao analisar as fibras com ampliação de 2000 vezes (Figura 131), é possível verificar que há boa homogeneidade na distribuição dos materiais cimentícios na casca de arroz.

Ao verificar a condição dos materiais cimentícios, é possível constatar que houve um descolamento parcial da matriz e da casca, provavelmente causado pelo encolhimento gerado durante o ataque térmico. Os detalhes que indicam esse descolamento e fissuração das partículas cimentícias aderidas à fibra são indicados em vermelho na Figura 131.

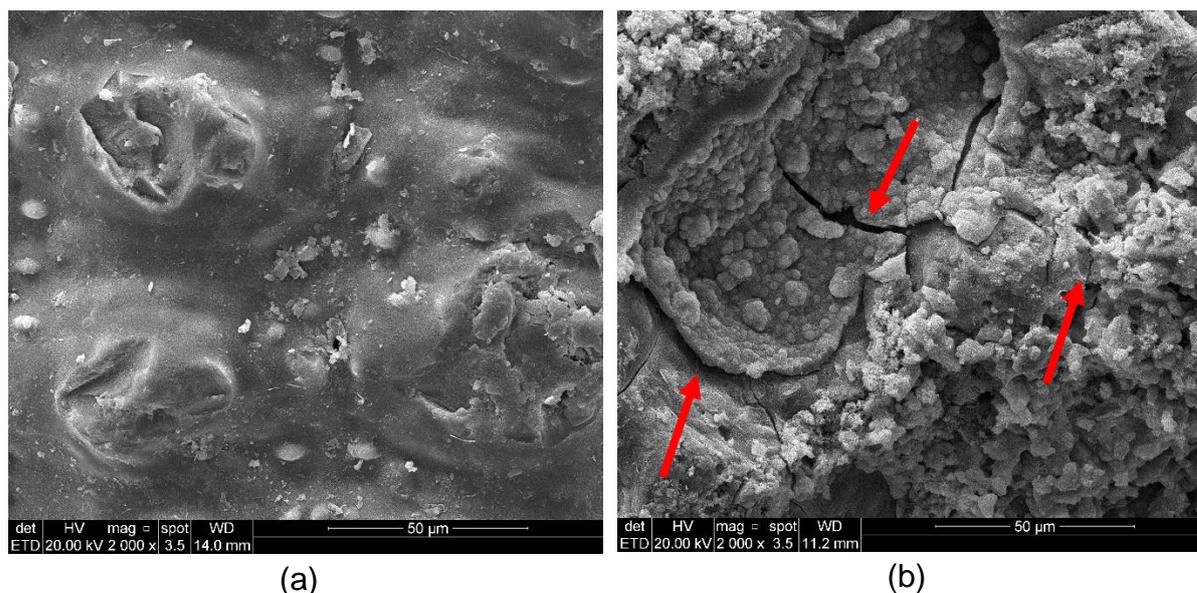


Figura 131 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

A distribuição homogênea das partículas da matriz cimentícia observada na superfície externa da casca de arroz (Figura 131) também foi constatada na superfície interna (Figura 132). Possivelmente, o fato da superfície interna ser mais regular, não possuindo relevos sobressalentes (Figura 131a), evitou que houvesse descolamento da matriz e da fibra, uma vez que, analisando a Figura 132, não é possível visualizar nenhuma fissura ou deslocamento das partículas cimentícias.

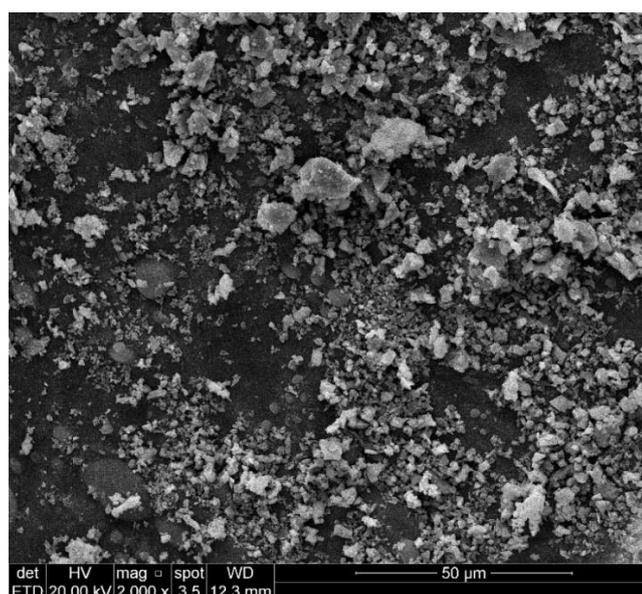


Figura 132 – Casca retirada do Compósito ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Para obter imagens mais detalhadas das interações das fibras com as partículas cimentícias, foram geradas imagens com ampliação de 5000 vezes da casca de arroz. Na Figura 133b, é possível identificar as agulhas de etringita em vermelho e, possivelmente, a formação de C-S-H pode ser proposta ao verificar os locais em que são visíveis formas de aparência esponjosa (destacado em azul).

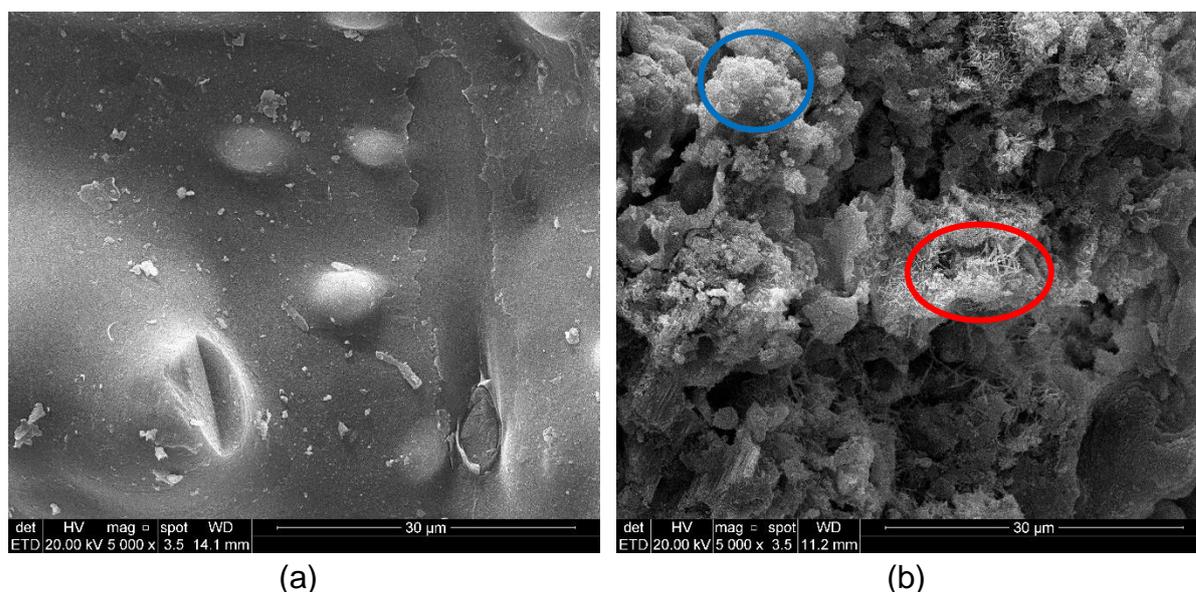


Figura 133 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 100°C (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

Mesmo tendo constatado pequenas fissuras na casca nas ampliações de 200 vezes e de 2000 vezes, os resultados mecânicos indicaram que a resistência à tração na flexão não sofreu perdas quando comparada à obtida pelos compósitos que não passaram por tratamento térmico (5.4.5).

Analisando as imagens que ilustram essas fissuras (Figura 130 e Figura 131b), é possível supor que as fissuras observadas na superfície externa da casca não geraram o descolamento completo da matriz, portanto, não geraram perda de resistência significativa. Além disso, a fissura maior que foi observada e que, provavelmente, afeta a integridade de toda a espessura da casca (Figura 130) é orientada no sentido longitudinal da fibra, desta maneira, indicando que não influenciará de maneira significativa na resistência.

De acordo com os fatos destacados, os indicativos são de que a resistência à tração não é afetada pelo encolhimento da fibra gerado na temperatura de 100°C

durante 24 horas. Mesmo assim, optou-se por gerar uma imagem com ampliação de 5000 vezes buscando visualizar um trecho da casca em que havia partículas cimentícias e fissuras simultaneamente (Figura 134).

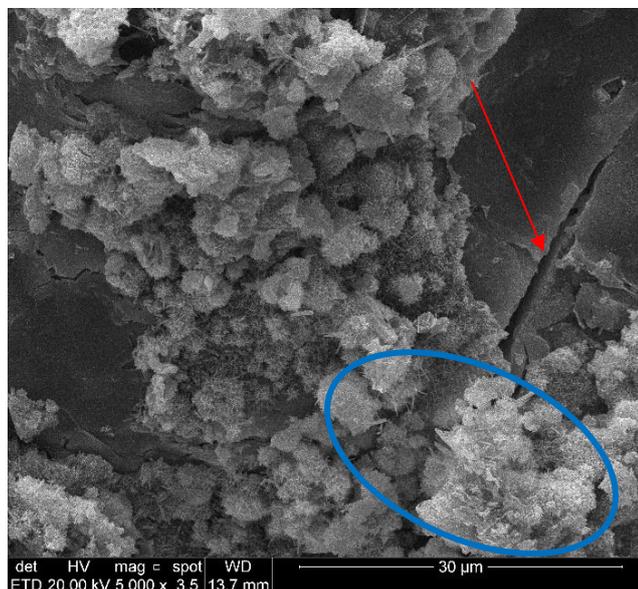


Figura 134 – Casca retirada do Compósito ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

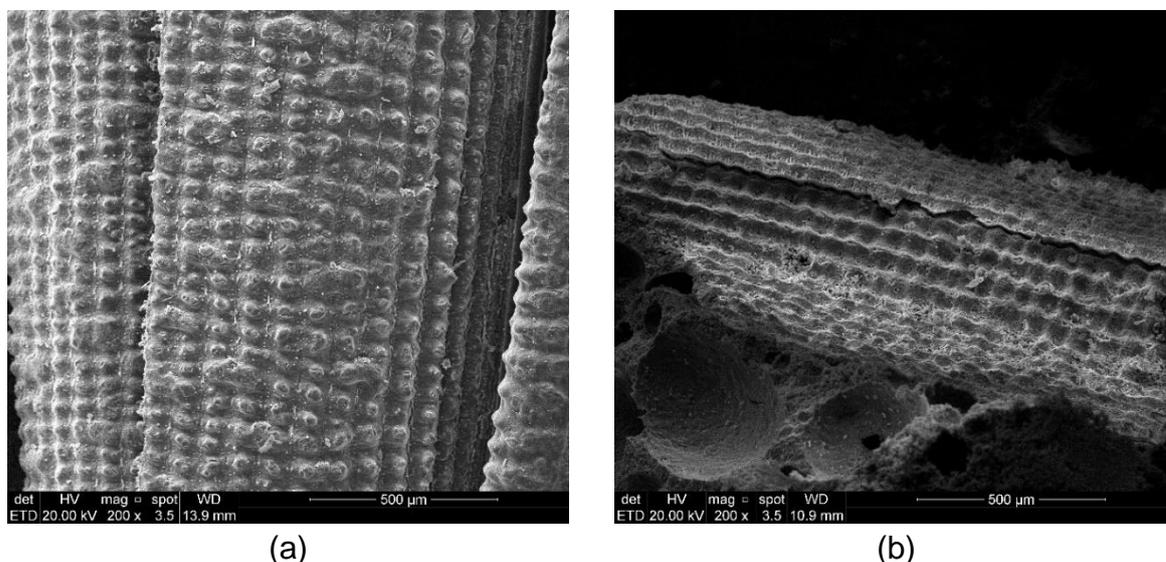
Ao analisar a Figura 134, é possível constatar que as fissuras possuem materiais cimentícios (agulhas de etringita e formação de C-S-H podem ser visualizadas) que controlam sua espessura e podem reduzir a influência da redução de resistência gerada pela origem e propagação da fissura. Fazendo uma analogia, seria como se, ao rasgar a fibra, ela fosse colada novamente pela matriz mantendo uma boa capacidade resistente.

5.4.3.2 Compósito submetido a 300°C

Conforme destacado na Figura 123, os compósitos que foram submetidos à temperatura de 300°C durante 60 minutos com aquecimento de 1°C por minuto foram calcificadas. Diante disso, a extração completa dela da matriz para geração das imagens em microscopia eletrônica ficou inviável e, portanto, as imagens geradas apresentam junto das cascas grandes partículas cimentícias.

A comparação da casca retirada do Compósito com a casca *in natura* em ampliação de 200 vezes é ilustrada na Figura 135. Como é possível observar, mesmo

com os compósitos orgânicos deteriorados, o aspecto físico da superfície externa não mudou significativamente.



(a) *Casca in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C
(b) – ampliação de 200 vezes
(Elaboração própria)

A partir das observações quanto às dimensões dos poros e da casca de arroz dentro do Compósito (Figura 135b e Figura 136), pode-se entender melhor o motivo da menor perda de resistência à compressão axial dos Compósitos quando comparada à perda das amostras do Traço Referência. Visualmente, observa-se que a casca apresenta dimensões muito pequenas e menores que o conjunto de poros que a cercam dentro da matriz. Isso, junto do fato de que a casca, mesmo em sua total integridade, não colabora com a resistência à compressão, indica que sua degradação e seu encolhimento não alteram significativamente a resistência obtida em macroescala, que foi apresentada e discutida nos itens 5.3.5, 5.3.6 e 5.3.7.

Além da comparação da escala entre os poros e as fibras e a indicação de que a casca não contribui com a resistência inicial à compressão dos Compósitos, o fato de que existe uma possível formação de C-S-H e outros componentes cimentícios em sua superfície, formados pelas reações químicas com o silício identificado nas superfícies da casca natural indicam que, mesmo com o passar do tempo, o Compósito com a fibra vegetal tende a manter o desempenho de resistência à compressão, ou, até mesmo, a melhorá-lo, uma vez que, com o avanço das reações químicas, há calcificação e formação de produtos que geram incremento de resistência ao material.

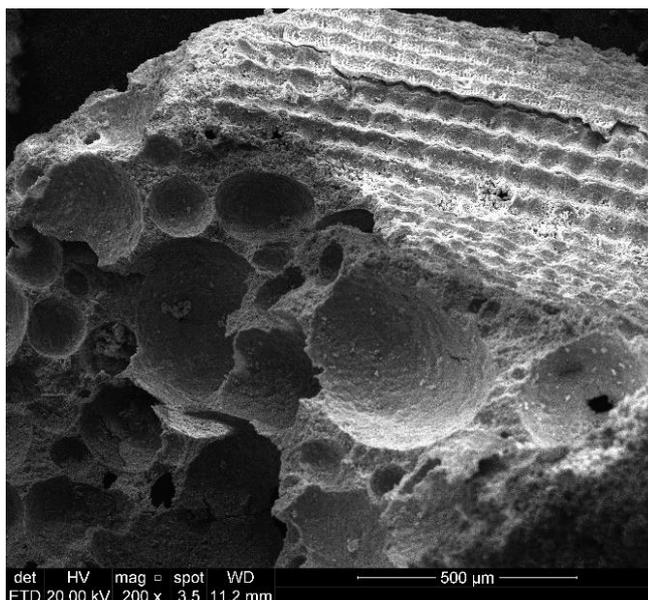


Figura 136 – Casca retirada do Compósito ampliação de 200 vezes (Elaboração própria)

A comprovação da calcificação e degradação dos materiais orgânicos na temperatura de 300°C pode ser verificada na ampliação de 2000 vezes da superfície da casca (Figura 137).

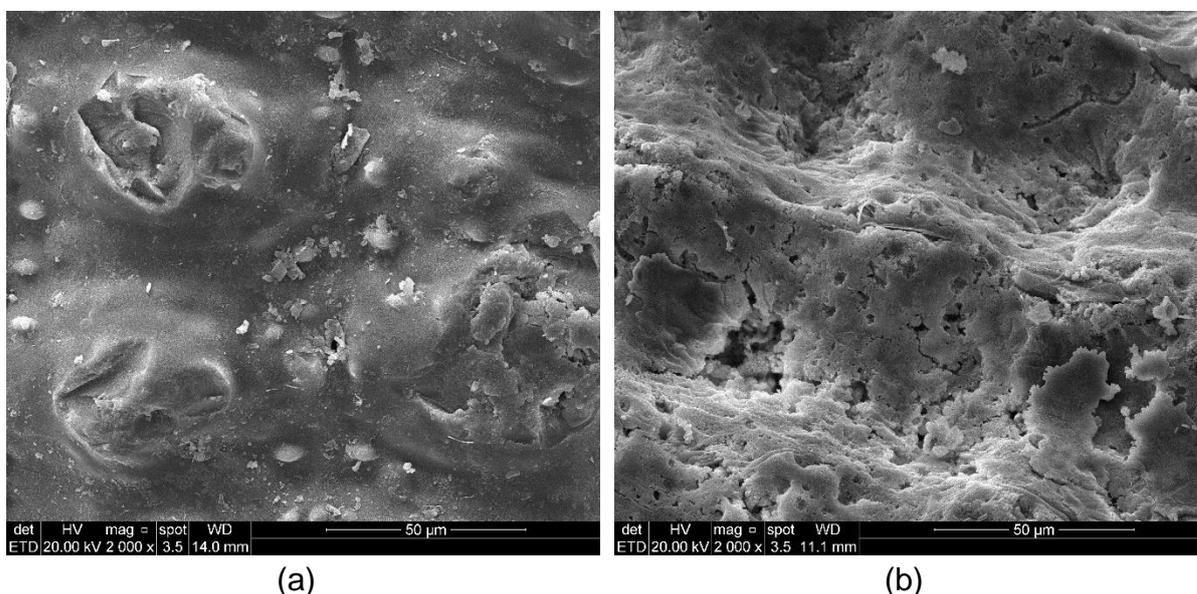
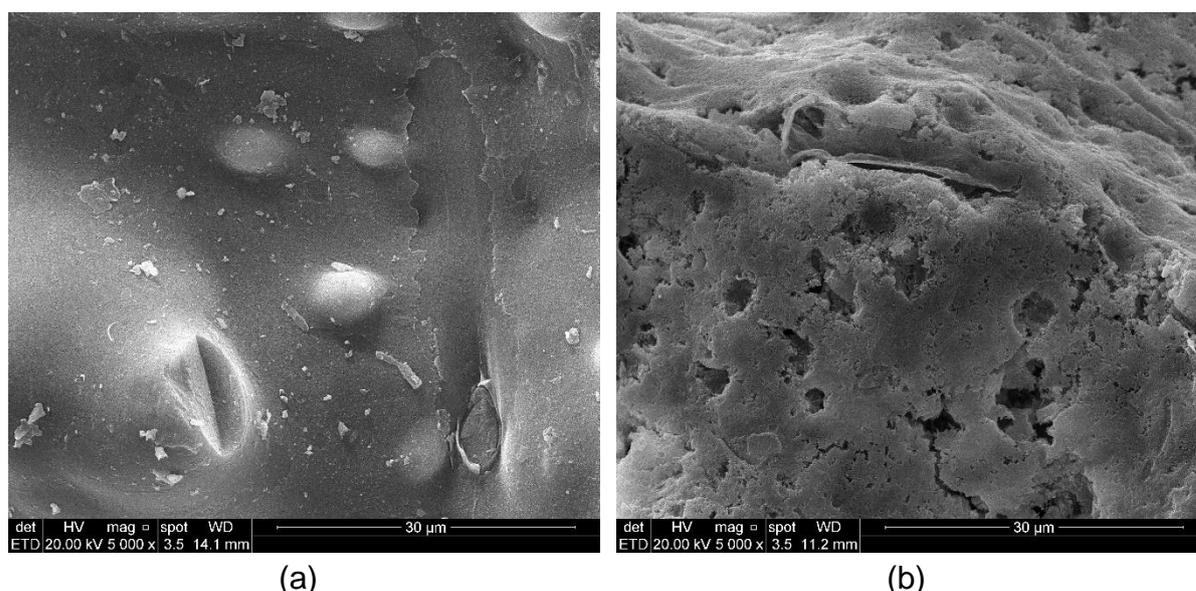


Figura 137 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Na Figura 138, está apresentada a casca com ampliação de 5000 vezes. Na imagem, é possível observar que a superfície é bastante lisa, mas que esse aspecto é referente a apenas uma camada muito fina.

Mesmo submetida a tão elevada temperatura, a integridade física da fibra e o formato similar ao da fibra natural (comparação pode ser realizada na Figura 135 e na Figura 136) indicam que ela ainda deve apresentar alguma capacidade mecânica. No caso da resistência à compressão, essa capacidade pode se dar por meio das reações químicas e, para a resistência à tração na flexão, a capacidade fornecida pela celulose e demais polímeros naturais pode ter sido substituída, mesmo que não integralmente, pelas reações químicas e formação de compostos que geram certa resistência.



(a) (b)
 Figura 138 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 300°C (b) – ampliação de 5000 vezes (Elaboração própria)

5.4.3.3 Compósito submetido a 650°C

A casca extraída dos compósitos que foram submetidos a 650°C por 60 minutos com rampa de aquecimento de 1°C por minuto está ilustrada nas ampliações de 90 vezes, 200 vezes, 2000 vezes, 5000 vezes e 10000 vezes. O maior número de ampliações foi realizado pela dificuldade de analisar os resultados encontrados para essas fibras.

A primeira imagem analisada ilustra o estado da casca após sua calcificação, assim como constatado na Figura 125, pode-se verificar, na Figura 139, que houve enrijecimento da fibra, uma vez que prevalecem pontos quebradiços (destacados em vermelho) sobre as fissuras, as quais eram recorrentes nas cascas analisadas nos outros ensaios de durabilidade.

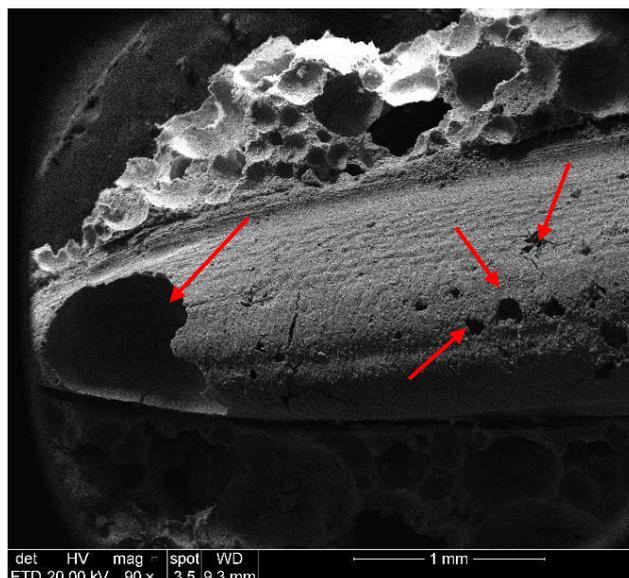
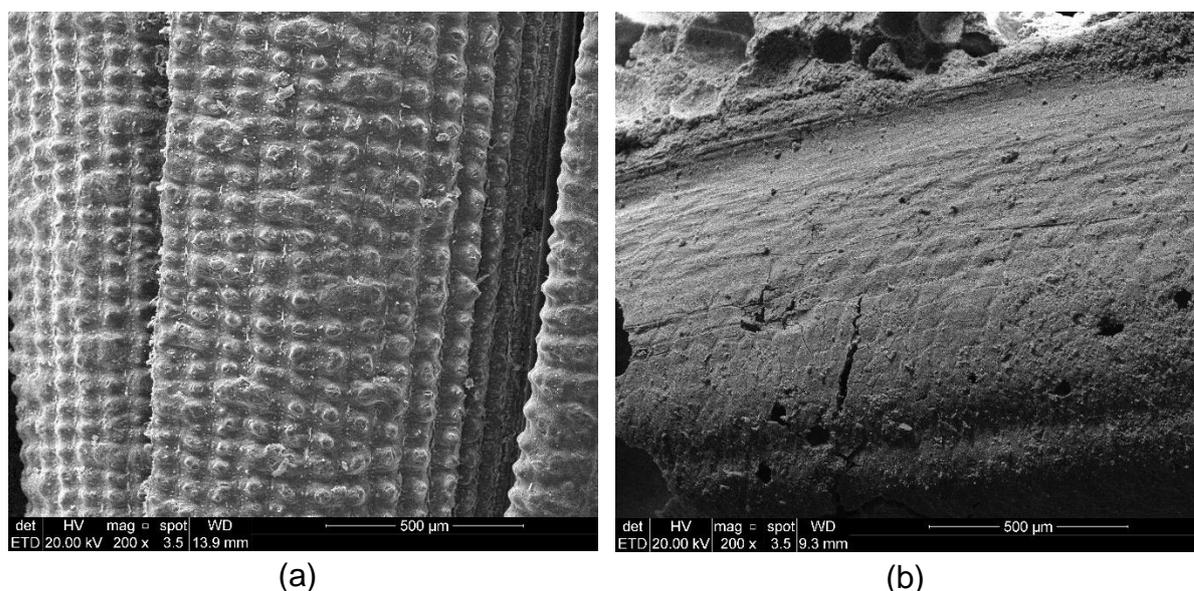


Figura 139 – Casca retirada do Compósito ampliação de 90 vezes
(Elaboração própria)

Ao analisar a imagem da casca extraída do Compósito que foi submetido a 650°C com ampliação de 200 vezes (Figura 140b) e comparar o estado da superfície com a casca *in natura* (Figura 140a), pode-se constatar que toda a estrutura irregular gerada pelos compostos orgânicos foi degradada, restando apenas uma superfície lisa e nitidamente quebradiça, como destacado na Figura 139.



(a)

(b)

Figura 140 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C
(b) – ampliação de 200 vezes
(Elaboração própria)

As imagens com ampliação de 2000 vezes (Figura 141) não possibilitaram uma constatação além da realizada nas ampliações de 200 vezes, que indica que a estrutura residual da fibra é bastante quebradiça e rígida, vide o aspecto das fissuras e dos buracos que podem ser observados. Mais uma vez, é possível verificar que a estrutura residual (Figura 141b) da casca em nada tem a ver com a estrutura original (Figura 141a).

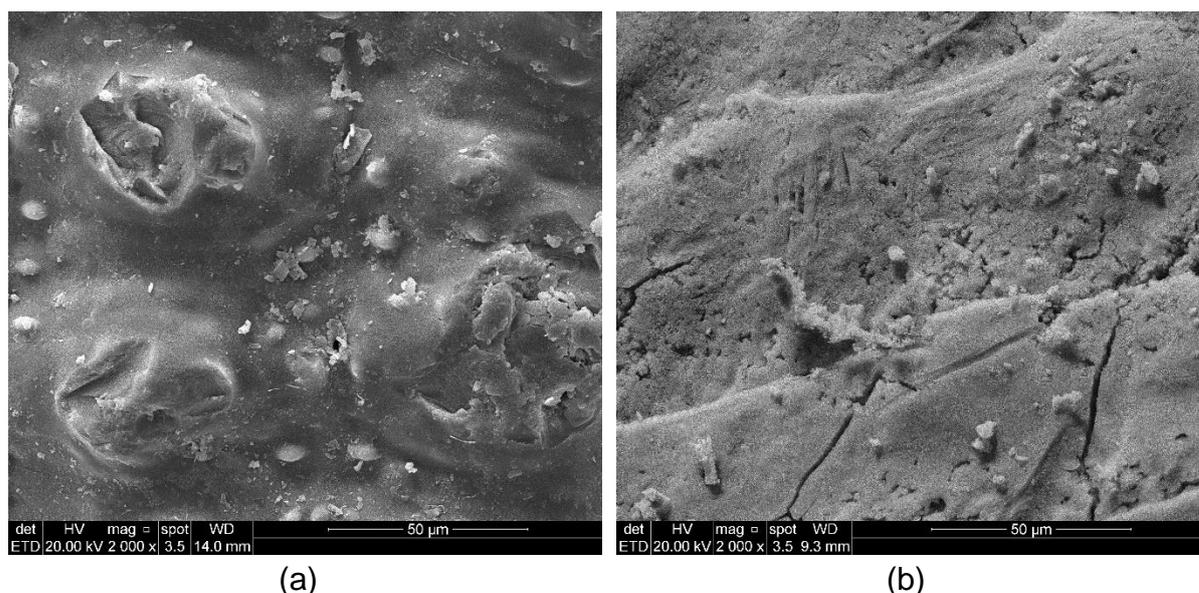
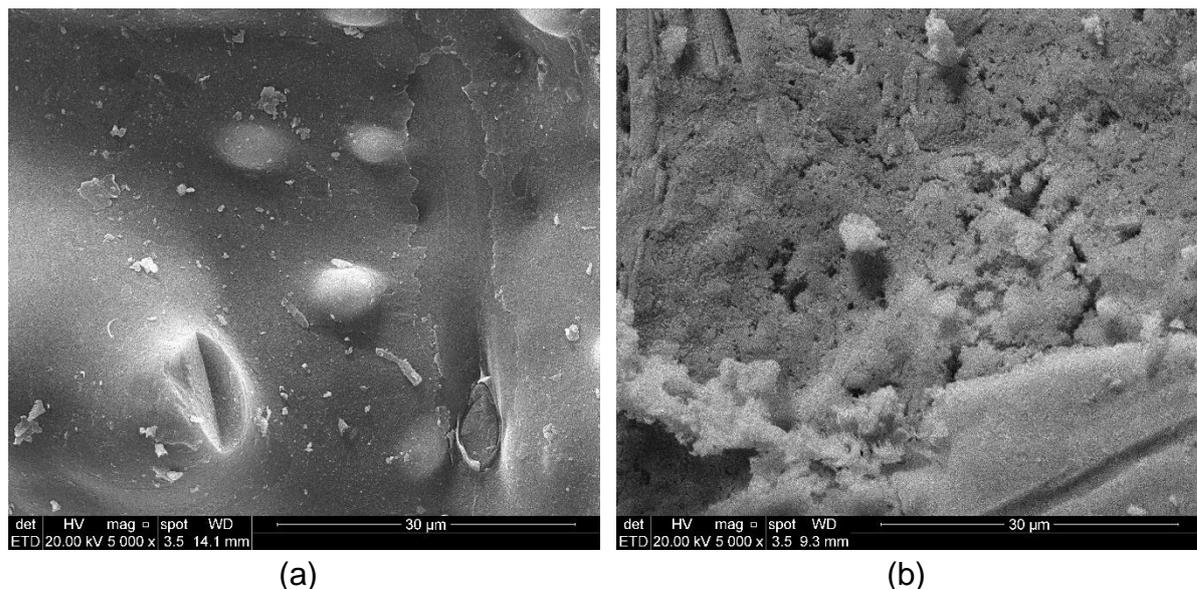


Figura 141 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C (b) – ampliação de 2000 vezes (Elaboração própria)

Com o intuito de aprofundar as análises realizadas, foram geradas imagens com ampliação de 5000 vezes (Figura 142). O aspecto observado na Figura 142b é similar ao observado na ampliação de 2000 vezes (Figura 141b). No entanto, é possível observar um pouco melhor algumas formas que existem na superfície, sendo a maioria delas com formato lamelar.



(a) (b)
 Figura 142 – Casca *in natura* (a) e casca retirada do Compósito sob estufa a 650°C
 (b) – ampliação de 5000 vezes
 (Elaboração própria)

Para detalhar mais a fundo as formas que foram observadas na imagem com ampliação de 5000 vezes, foi gerada uma imagem com ampliação de 10000 vezes (Figura 143). Com essa ampliação, pode-se notar que algumas formas têm aspecto de raízes (destacado em vermelho) sendo, portanto, indicativo de que algumas irregularidades constadas na casca submetida a 650°C são oriundas da calcificação de suas nervuras.

Mesmo assim, conforme destacado em azul na Figura 143, algumas agulhas, provavelmente de etringita, também podem estar entrelaçadas à estrutura fibrosa que foi calcificada. O conjunto de estruturas identificadas e analisadas por meio das imagens microscópicas, mais uma vez, justificam o motivo dos materiais cimentícios com casca (Compósitos) obterem melhores resultados mecânicos após ataque térmico quando comparados aos materiais cimentícios sem casca (Traço Referência).

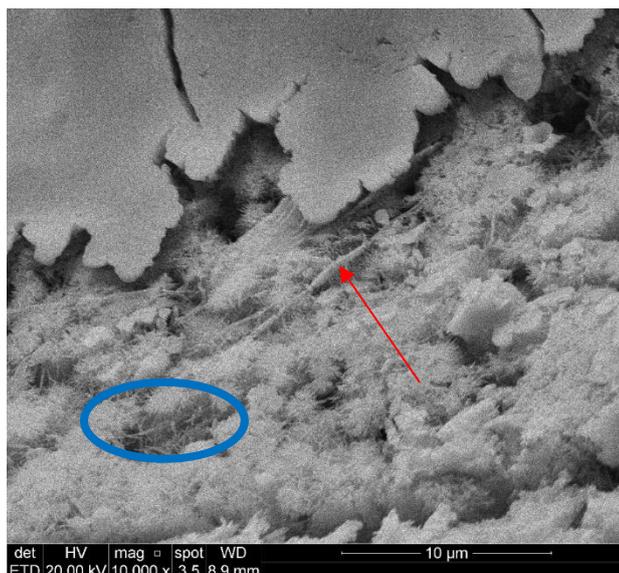


Figura 143 – Casca retirada do Compósito ampliação de 10000 vezes (Elaboração própria)

A integridade estrutural da casca, mesmo após calcificada (Figura 141 e Figura 143), também justifica sua contribuição no processo de controle de fissuras em macroescala. Como foi apresentado na Figura 124, as amostras do Traço Referência ficaram excessivamente fissuradas após a retirada do forno mufla, enquanto as amostras do Compósito permaneceram com uma boa integridade estrutural em macroescala.

5.4.4 Espectroscopia por energia dispersiva

Neste capítulo, estão apresentadas as análises químicas das cascas extraídas dos compósitos submetidos aos ataques térmicos. Todos os dados apresentados neste capítulo foram obtidos por meio de espectroscopia por energia dispersiva.

5.4.4.1 Compósito submetido a 100°C

A superfície da casca de arroz, extraída dos compósitos que foram submetidos à temperatura de 100°C, passou por análise de espectroscopia na região da superfície externa ilustrada na Figura 144.

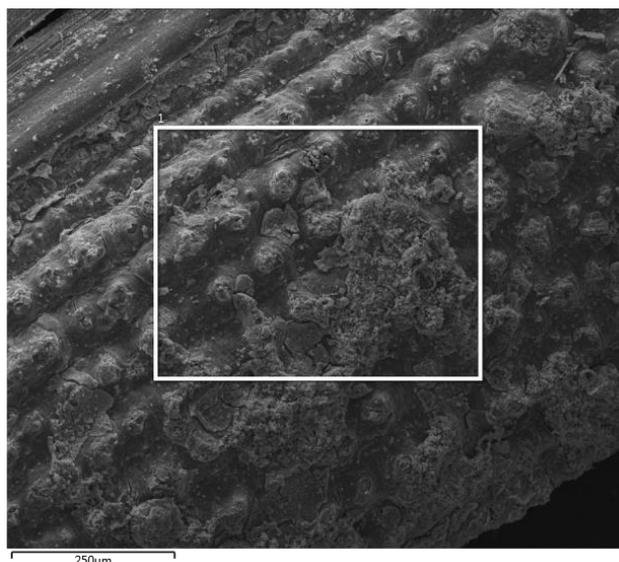


Figura 144 – Microanálise da superfície externa casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 100°C (Elaboração própria)

Os espectros identificados na área destacada na Figura 144 estão apresentados e quantificados na Tabela 94. Como a área de leitura foi ampla, não foram aferidos outros pontos.

Tabela 94 – Composição química da superfície externa da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 100°C

Espectro	1
C	9,20%
O	49,35%
Na	2,50%
Si	18,71%
K	5,75%
Ca	14,49%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Ao comparar os elementos químicos identificados por EDS (Tabela 94) com os óxidos identificados no ensaio de fluorescência de raios x (Tabela 93), verifica-se uma boa proximidade dos resultados, sendo o silício um dos elementos mais relevantes e o cálcio na sequência.

5.4.4.2 Compósito submetido a 300°C

A Figura 145 ilustra o estado da casca extraída do Compósito que foi submetido à temperatura de 300°C. A área destacada em branco demarca a parte da superfície em que foram lidos os espectros apresentados na Tabela 95.

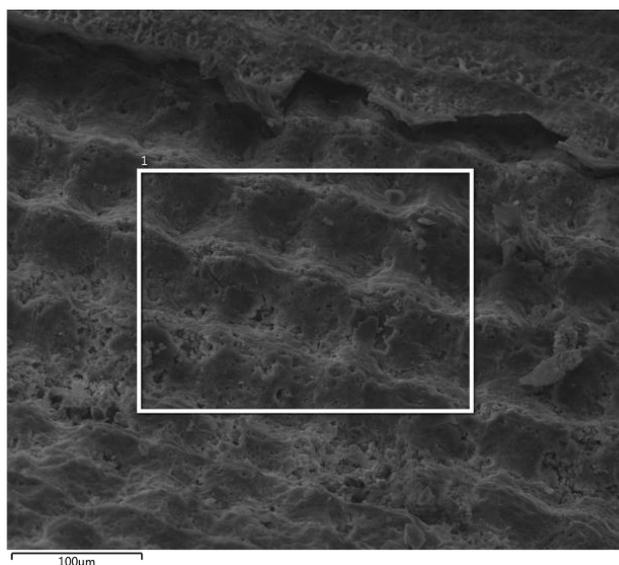


Figura 145 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 300°C (Elaboração própria)

A leitura realizada na área demarcada na Figura 145 está apresentada na Tabela 95. Novamente, optou-se por realizar a leitura em uma área maior ao invés de diversos pontos, visto que a queima do material pode não ter sido homogênea, pois as fibras estavam protegidas dentro da matriz cimentícia.

Tabela 95 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 300°C

Espectro	1
C	8,93%
O	56,13%
Mg	0,97%
Al	1,25%
Si	7,52%
K	1,07%
Ca	22,97%
Fe	1,15%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Como é possível verificar, na Tabela 95, a quantidade de carbono e oxigênio não teve uma variação tão significativa quando comparada com a quantidade aferida na Tabela 94 (casca do Compósito que permaneceu em temperatura de 100°C). Em contrapartida, observa-se uma redução significativa na quantidade de silício e de potássio, e a não identificação de sódio. O cálcio foi o elemento químico que obteve aumento na quantidade aferida (assim como identificado no ensaio de fluorescência de raios x - *Tabela 93*), enquanto o magnésio, o alumínio e o ferro foram identificados pela primeira vez, mas em pequenas quantidades.

5.4.4.3 Compósito submetido a 650°C

A fibra calcificada extraída do Compósito que foi submetido à temperatura de 650°C está apresentada na Figura 146. Como é possível observar, a casca de arroz apresenta um aspecto totalmente diferente das demais condições analisadas e sua microestrutura está bastante afetada pelo tratamento térmico. A área destacada delimita a parte da amostra em que foi realizada a leitura dos espectros.

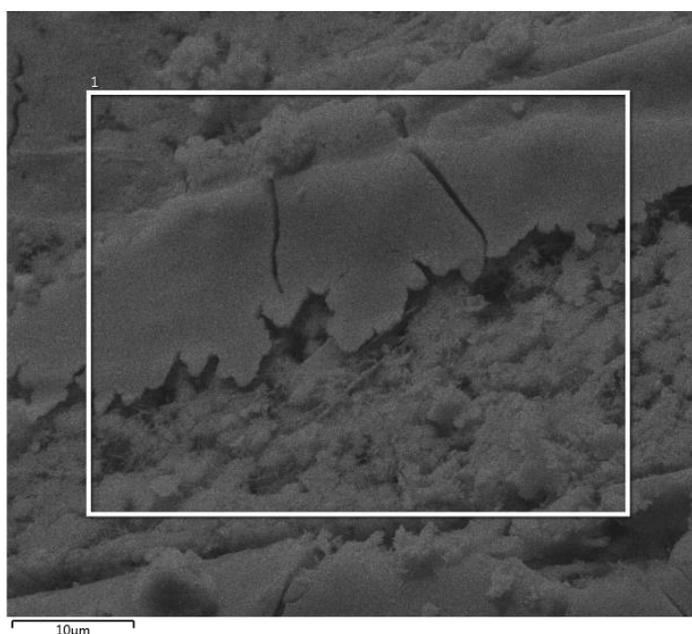


Figura 146 – Microanálise da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 650°C
(Elaboração própria)

Os espectros aferidos na região ilustrada na Figura 146 estão apresentados na Tabela 96.

Tabela 96 – Composição química da superfície da casca de arroz extraída de Compósito submetido à temperatura de 650°C

Espectro	1
C	6,03%
O	52,12%
Si	12,69%
K	1,40%
Ca	27,76%
Total	100,00%

Fonte: elaboração própria

Ao analisar os valores aferidos (Tabela 96) é possível observar que os três elementos apresentados na casca *in natura* (Tabela 15) ainda são possíveis identificar. Em relação ao carbono e ao silício, observou-se uma redução significativa, já em relação ao oxigênio, não é possível constatar qualquer mudança relevante em termos de quantidade.

A redução significativa do silício pode ser causada pelas reações químicas que ocorrem entre ela e a matriz cimentícia. Como pode ser observado, houve identificação de cálcio em quantidade significativa na leitura, isso indica que, naquela interfase, definitivamente, houve reações entre os elementos químicos da casca e da matriz. A redução significativa na quantidade de carbono é ocasionada pela combustão da fibra, que, provavelmente, gerou outros elementos químicos e se converteu parcialmente em gases.

5.4.5 Análise das resistências à tração na flexão dos prismas

A fim de analisar a influência de altas temperaturas nos compósitos, foram ensaiados três prismas para cada temperatura estudada. Os resultados médios bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada teste estão apresentados na Tabela 97.

Tabela 97 – Resistências à compressão axial dos prismas após tratamento térmico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média	D.P.	C.V.	Condição	Média	D.P.	C.V.
	(MPa)	(MPa)	(%)		(MPa)	(MPa)	(%)
28 dias	1,52	0,04	3%	28 dias	0,88	0,04	4%
100°C	0,87	0,10	12%	100°C	0,92	0,05	5%
300°C	0,53	0,04	8%	300°C	0,58	0,05	9%
650°C	0,24	0,01	5%	650°C	0,30	0,02	7%

Fonte: elaboração própria

Para facilitar as análises da variação dos resultados, foi plotado um gráfico de colunas com barras de erro (desvio padrão) utilizando os dados da Tabela 97. O gráfico está ilustrado na Figura 147.

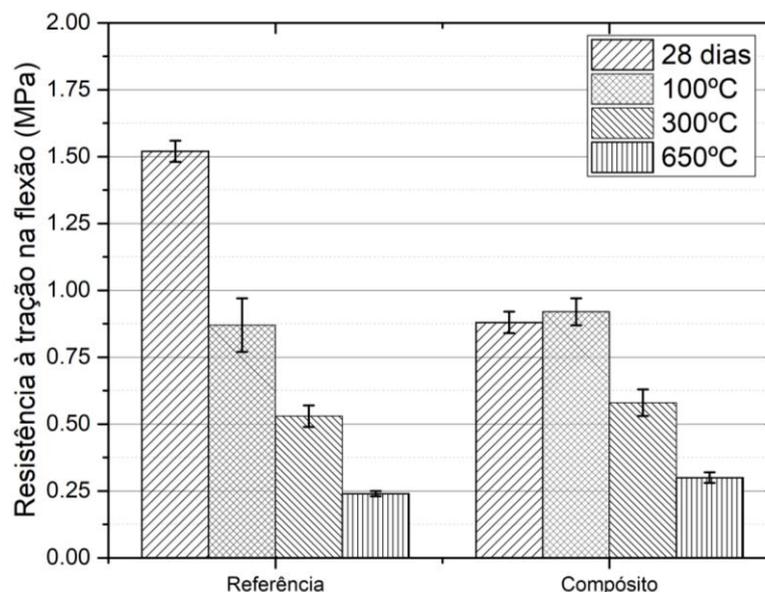


Figura 147 – Comparação das resistências à tração na flexão dos prismas após diferentes ataques térmicos (Elaboração própria)

Conforme pode ser observado na Figura 147, as resistências à tração na flexão do Traço Referência foram reduzidas de maneira significativa já a partir dos 100°C, pois as barras de erro ficaram distantes entre si. Para o Compósito, observa-se que, para 100°C, não há redução da resistência, mas, visualmente, é possível identificar que, mesmo com o valor médio das amostras que foram submetidas a 100°C sendo levemente superior ao valor obtido para as amostras que ficaram apenas em câmara úmida, as barras de erro ocupam as mesmas faixas de variação, indicando que, possivelmente, os resultados são semelhantes estatisticamente.

Para as temperaturas de 300°C e 650°C, é possível identificar uma queda de resistência bastante significativa para ambos os traços. Para melhor detalhar o estudo das perdas de resistência, foram calculadas as perdas em uma comparação de cada tratamento térmico (100°C, 300°C e 650°C) com as amostras que permaneceram apenas em câmara úmida. A Tabela 98 apresenta os percentuais encontrados.

Tabela 98 – Perdas de resistência à tração na flexão dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
100°C	-42%	+5%
300°C	-65%	-34%
650°C	-84%	-66%

Fonte: elaboração própria

A partir dos percentuais verificados, pode-se comprovar que o Compósito, mesmo com fibras vegetais com elevada deterioração (mais de 80% para a temperatura de 100°C), tiveram redução de resistência significativamente menor. Para maior confiabilidade das análises que indicam o melhor desempenho do Compósito em relação ao Traço Referência, foi realizada a análise das variâncias utilizando o método de Tukey com 95% de confiança. A verificação da existência de diferença estatisticamente significativa está apresentada na Tabela 99.

Tabela 99 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – 100°C	Sim	28 dias – 100°C	Não
28 dias – 300°C	Sim	28 dias – 300°C	Sim
28 dias – 650°C	Sim	28 dias – 650°C	Sim
100°C – 300°C	Sim	100°C – 300°C	Sim
100°C – 650°C	Sim	100°C – 650°C	Sim
300°C – 650°C	Sim	300°C – 650°C	Sim

Fonte: elaboração própria

Como pode-se verificar na Tabela 99, a única comparação que não gerou variação de resistência média significativa foi das amostras do Compósito que permaneceram por 28 dias em câmara úmida com as amostras que foram submetidas a 100°C por 24 horas. As demais variações identificadas foram estatisticamente significativas e, portanto, pode-se considerar válidos os percentuais obtidos na Tabela 98 para fins de comparação.

Dessa forma, verifica-se que, ante uma redução de 42% para o Traço Referência na temperatura de 100°C, o Compósito não apresentou variação no desempenho. Na temperatura de 300°C, enquanto o Traço Referência obteve redução de 65%, o Compósito obteve uma perda de apenas 34%. Na temperatura de 650°C,

o desempenho do Compósito, novamente, foi superior, obtendo uma perda de 66% ante uma perda de 84% para o Traço Referência.

5.4.6 Análise das resistências à compressão axial dos prismas

Após a realização dos ensaios de tração na flexão, cada metade dos prismas foi utilizada para verificar a resistência à compressão axial. Portanto, para cada temperatura, foram analisados seis resultados, dos quais se aferiu a resistência média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (Tabela 100).

Tabela 100 – Resistências à tração na flexão dos prismas após tratamento térmico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	2,37	0,08	3%	28 dias	1,78	0,07	4%
100°C	1,78	0,05	3%	100°C	1,72	0,08	4%
300°C	1,30	0,02	1%	300°C	1,27	0,03	2%
650°C	0,85	0,05	6%	650°C	0,85	0,05	6%

Fonte: elaboração própria

Com o intuito de facilitar as análises, os resultados apresentados na Tabela 100 foram ilustrados graficamente na Figura 148.

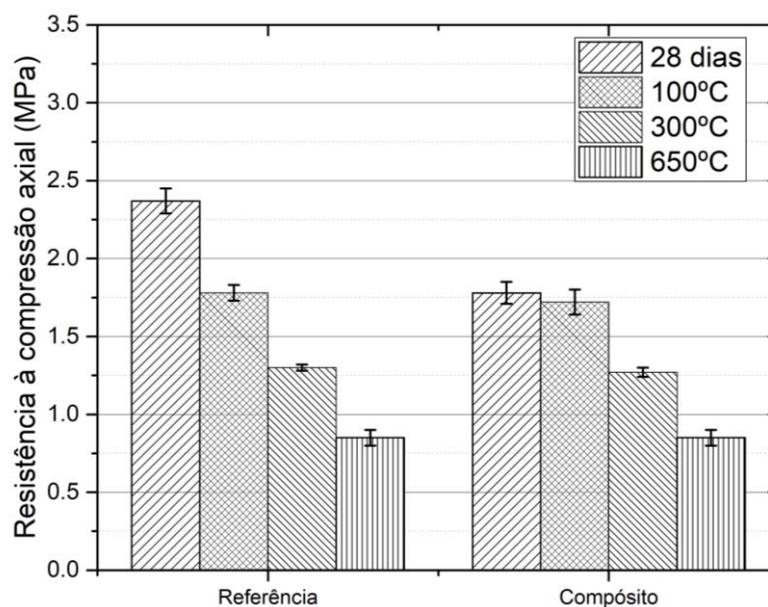


Figura 148 – Comparação das resistências à compressão axial dos prismas após diferentes ataques térmicos (Elaboração própria)

Conforme pode-se verificar na Figura 148, assim como nas resistências à tração a flexão, os resultados do Compósito também apresentaram desempenho superior se comparados ao Traço Referência. Ademais, as faixas de erro indicam que, a partir dos 100°C, o Traço Referência teve redução significativa na resistência, enquanto o Compósito apresentou resultado médio similar.

Para melhor comparar os desempenhos mecânicos dos traços, foram calculadas as perdas de resistência das amostras submetidas às diferentes temperaturas com as amostras que permaneceram apenas em câmara úmida. A Tabela 101 apresenta os percentuais calculados.

Tabela 101 – Perdas de resistência à compressão axial dos prismas em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
100°C	-25%	-3%
300°C	-45%	-29%
650°C	-64%	-52%

Fonte: elaboração própria

Conforme pode-se verificar na Tabela 101, as amostras submetidas a 100°C tiveram uma perda de resistência maior para o Traço Referência, o mesmo pode ser observado para as temperaturas de 300°C e 650°C.

Com o intuito de apurar se os resultados médios obtidos apresentavam diferença estatisticamente significativa, foi realizada análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com 95% de confiança. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 102.

Tabela 102 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – 100°C	Sim	28 dias – 100°C	Não
28 dias – 300°C	Sim	28 dias – 300°C	Sim
28 dias – 650°C	Sim	28 dias – 650°C	Sim
100°C – 300°C	Sim	100°C – 300°C	Sim
100°C – 650°C	Sim	100°C – 650°C	Sim
300°C – 650°C	Sim	300°C – 650°C	Sim

Fonte: elaboração própria

Assim como nos resultados obtidos nas análises de resistência à tração na flexão, pode-se observar, na Tabela 102, que houve variação significativa para todas as comparações realizadas no Traço Referência, enquanto para o Compósito não há diferença significativa nos resultados apenas para o ataque térmico com temperatura de 100°C. Desta forma, pode-se concluir que o Compósito obteve desempenho mecânico à compressão axial superior frente a ataques térmicos quando comparados ao Traço Referência.

5.4.7 Análise das resistências à compressão axial dos cubos

A Tabela 103 apresenta as resistências à compressão axial dos cubos para cada temperatura e com 28 dias de cura em câmara úmida.

Tabela 103 – Resistências à compressão axial dos cubos após tratamento térmico

Traço Referência				Compósito			
Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)	Condição	Média (MPa)	D.P. (MPa)	C.V. (%)
28 dias	3,00	0,26	9%	28 dias	1,86	0,05	3%
100°C	2,80	0,10	4%	100°C	1,73	0,12	7%
300°C	1,37	0,06	4%	300°C	1,50	0,10	7%
650°C	1,19	0,07	6%	650°C	1,40	0,10	7%

Fonte: elaboração própria

Todas as resistências apresentadas na Tabela 103 estão ilustradas graficamente na Figura 149, na qual também estão dispostas as barras de erro e a resistência mínima exigida por norma (NBR 13438, ABNT 2013).

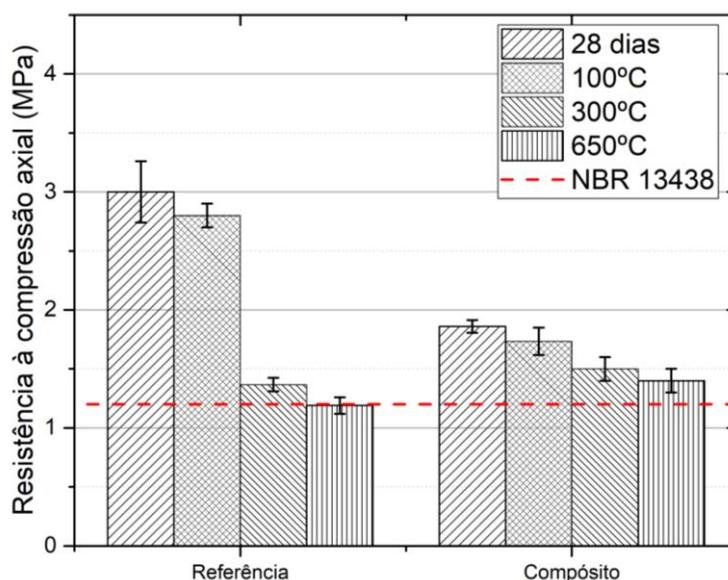


Figura 149 – Comparação das resistências à compressão axial dos cubos após diferentes ataques térmicos (Elaboração própria)

Como pode-se observar na Figura 149, a resistência do Traço Referência era, aproximadamente, 61% superior à resistência do Compósito após o período de 28 dias de cura em câmara úmida. Após a exposição das amostras à temperatura de 100°C por 24 horas, nota-se que não houve grande redução na resistência média de nenhum dos traços, inclusive com as barras de erro ocupando a mesma faixa de variação, o que indica que o processo de secagem em forno não altera a resistência de maneira significativa, desde que respeitada a temperatura de 100°C.

Quando analisadas as amostras que foram submetidas a 300°C e 650°C, observa-se que a resistência do Traço Referência chegou a reduzir 60% no pior caso (650°C comparado a 28 dias de cura em câmara úmida). Para o Compósito, a redução foi menor, chegando a apenas 25% no pior caso, o que indica que, de fato, a casca contribuiu para a resistência do material mesmo após a degradação da parte orgânica e do polímero forte (celulose).

Tabela 104 – Perdas de resistência à compressão axial dos cubos em relação à resistência aos 28 dias de cura

Condição	Referência	Compósito
100°C	-7%	-7%
300°C	-54%	-19%
650°C	-60%	-25%

Fonte: elaboração própria

Para determinar se as médias tiveram diferença estatisticamente significativa, foi realizada análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com nível de confiança de 95%. A Tabela 105 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 105 – Análise de diferença significativa das médias com diferentes tratamentos térmicos

Referência		Compósito	
Tratamento	Diferença Significativa?	Tratamento	Diferença Significativa?
28 dias – 100°C	Não	28 dias – 100°C	Não
28 dias – 300°C	Sim	28 dias – 300°C	Sim
28 dias – 650°C	Sim	28 dias – 650°C	Sim
100°C – 300°C	Sim	100°C – 300°C	Não
100°C – 650°C	Sim	100°C – 650°C	Sim
300°C – 650°C	Não	300°C – 650°C	Não

Fonte: elaboração própria

Conforme pode-se observar na Tabela 105, o processo de secagem das amostras em temperatura de 100°C durante 24 horas não gera variação de resistência estatisticamente significativa se comparadas a amostras que permaneceram apenas em câmara úmida por 28 dias.

Para o Traço Referência, foi observada variação significativa das resistências apenas entre as temperaturas de 300°C e 650°C com a temperatura de 100°C e cura em câmara úmida. Entre as variações de 300°C e 650°C, também não foi observada diferença significativa nas resistências.

Em relação ao Compósito, verificou-se que não há variação estatisticamente significativa na comparação das resistências de 28 dias de cura sem ataque térmico com 100°C, entre 100°C e 300°C e entre 300°C e 650°C, indicando que as variações são observadas apenas quando a faixa de temperatura utilizada muda de maneira mais significativa.

6. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Em função da grande quantidade de resultados e análises apresentadas neste trabalho, as contribuições científicas foram expostas de maneira simplificada neste capítulo. Cada item apresentado aqui é referente a uma contribuição inédita para a literatura e é embasado nos fatos técnicos analisados anteriormente.

6.1 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA RESIDUAL

A primeira contribuição relevante para a literatura foi a identificação do melhor processo para degradação das fibras vegetais dentro da matriz cimentícia. Sabendo que os materiais utilizados na construção civil apresentam como requisito mínimo um desempenho mecânico que atenda ao estado limite último imposto pelas normas técnicas, foram testados alguns tipos de ataques para verificar sua eficiência na degradação das fibras e determinar as resistências mecânicas ao final da vida útil do Compósito desenvolvido.

Para defender a melhor metodologia apresentada, foram plotados três gráficos com as resistências mais baixas atingidas para cada tratamento utilizado para degradar as fibras vegetais. A Figura 150 apresenta as resistências à tração na flexão em três pontos obtidas nas amostras prismáticas de 4 x 4 x 16 cm. As resistências residuais foram plotadas em linhas pontilhadas, sendo que cada linha representa um meio de exposição das amostras. Já as resistências obtidas por meio de envelhecimento natural, sem interferências químicas ou físicas, foram plotadas em pontos, elas foram aferidas aos 180 e 365 dias de cura em ambiente interno e em ambiente externo.

A Figura 151 apresenta as resistências à compressão axial obtidas nas amostras prismáticas de 4 x 4 x 16 cm e os resultados foram plotados utilizando a mesma metodologia adotada na Figura 150 e explicitada acima. Por fim, as resistências à compressão axial obtidas nas amostras cúbicas de 7 x 7 x 7 cm estão ilustradas na Figura 152.

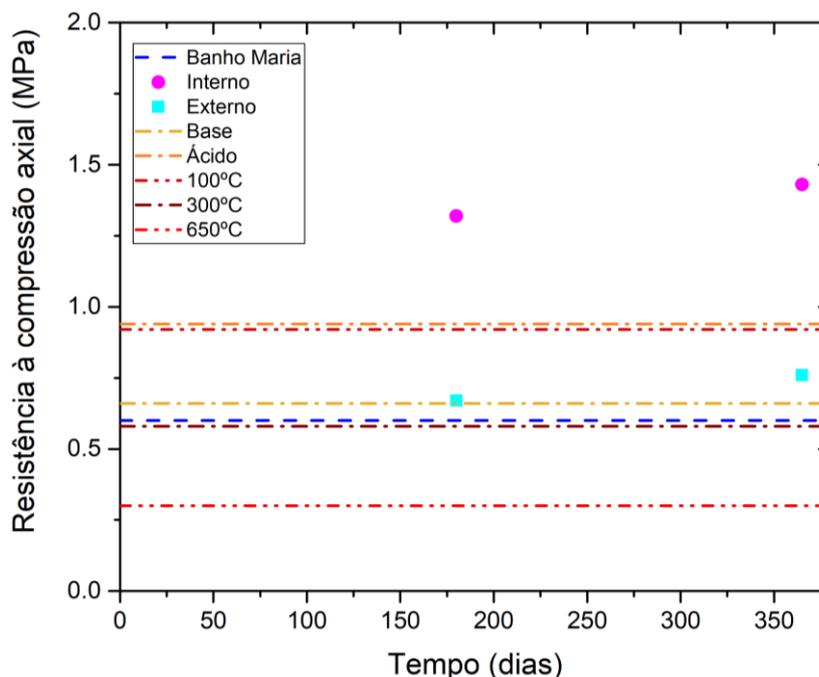


Figura 150 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à tração na flexão no Compósito utilizando amostras prismáticas (Elaboração própria)

Analisando a Figura 150, é possível verificar que a menor resistência à tração na flexão foi obtida nas amostras que foram submetidas ao ataque térmico com 650°C por 60 minutos. Essa é uma metodologia que, a partir dos resultados de difração de raios x, comprovou ser eficiente na degradação integral da matéria orgânica das fibras. No entanto, conforme discutido no item 5.4, surgiram outros compostos químicos oriundos da calcificação da casca de arroz que não remetem a uma situação de degradação próxima da realidade.

Sendo assim, o uso do ataque térmico com temperatura de 650°C é a metodologia indicada para definição de resistência à tração na flexão residual em casos específicos nos quais os materiais estarão submetidos a altas temperaturas, como em ambientes industriais. No entanto, para verificar apenas a interferência da degradação da fibra sob condições normais a temperatura de 300°C, é mais indicada, uma vez que, conforme discutido no item 5.4.4.2, essa temperatura já é suficiente para degradar a matéria orgânica da fibra. Além disso, a temperatura de 650°C acaba interferindo de maneira muito mais intensa na matriz cimentícia, por este motivo, a resistência residual obtida com essa temperatura foi inferior às demais.

A metodologia indicada para definir a degradação das fibras vegetais que estarão expostas em ambientes com temperatura convencional é a exposição das amostras em banho-maria com temperatura de 60°C por 56 dias. Esse tratamento mostrou-se eficiente na degradação das fibras (item 5.1) e gerou uma resistência residual muito similar ao ataque térmico com temperatura de 300°C, mesmo sem gerar combustão da matéria orgânica. Além disso, a resistência obtida em apenas 56 dias em banho-maria é inferior a obtida em 365 dias em ambiente interno e ambiente externo, o que otimiza prazos para verificação de resistência futura.

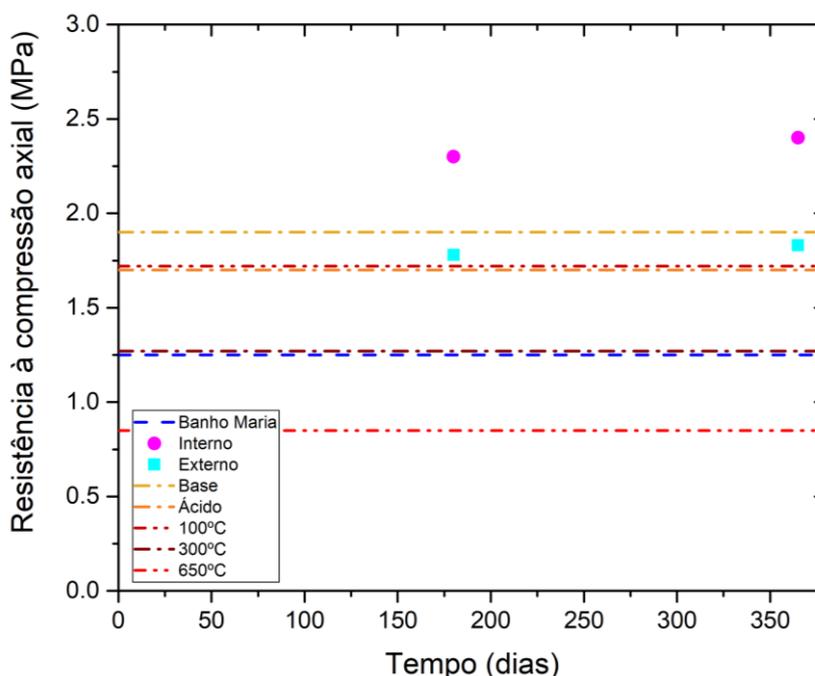


Figura 151 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à compressão axial no Compósito utilizando amostras prismáticas (Elaboração própria)

As metodologias para definir a resistência residual à compressão axial dos prismas e dos cubos serão discutidas em conjunto. A primeira análise relevante é que os valores obtidos são similares em todos os tratamentos independentemente da amostra utilizada (prismas – Figura 151 e cubos – Figura 152), isso confere maior confiabilidade para ambos os resultados.

O único tratamento que apresentou uma diferença significativa na obtenção da resistência residual foi o tratamento térmico com temperatura de 650°C, no qual a amostra prismática obteve resistência inferior à amostra cúbica. Essa variação é facilmente justificada pelo fato de que a amostra prismática possui uma seção transversal muito menor, desta maneira, o calor danifica a parte interna de sua

estrutura integralmente em menos tempo, já a amostra cúbica apresenta maiores seções e, portanto, maior capacidade de resistir à propagação do calor.

Quanto ao tratamento, assim como verificado na resistência à tração na flexão, o ataque térmico com 650°C por 60 minutos mostrou-se eficiente, no entanto, condiz com condições muito específicas e com problemas de deterioração da matriz cimentícia. Desta forma, o melhor método indicado para degradar as fibras vegetais integralmente e atingir a resistência à compressão axial residual de maneira acelerada é o envelhecimento acelerado em banho-maria. Ao observar a Figura 151 e a Figura 152 pode-se comprovar que, em um prazo de 56 dias de exposição em banho-maria, a redução da resistência é superior tanto aos ambientes internos, externos e câmara úmida durante um período de 365 dias.

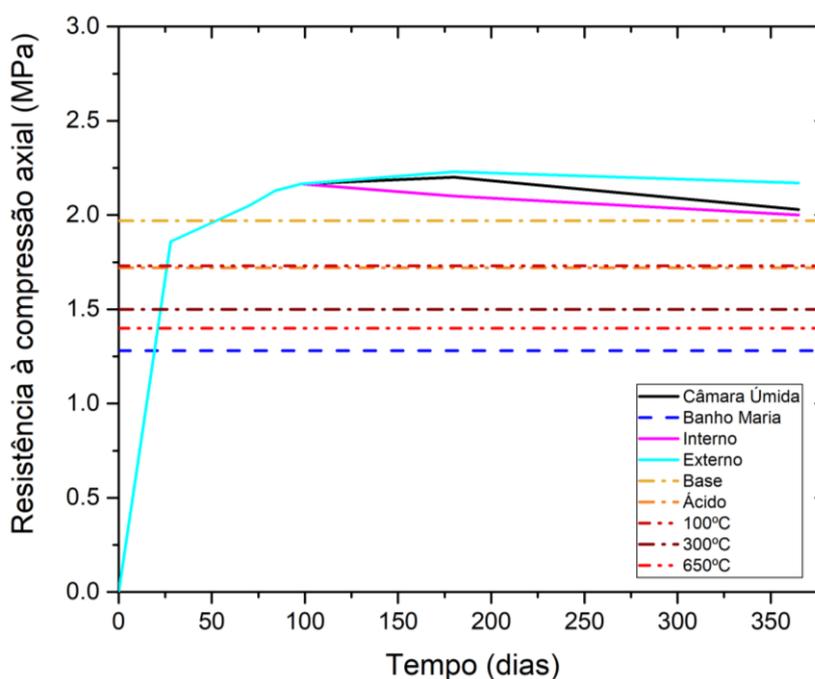


Figura 152 – Comparação da eficiência dos ensaios de durabilidade no desempenho à compressão axial no Compósito utilizando amostras cúbicas (Elaboração própria)

As metodologias de degradação a partir de compostos químicos utilizados como base (hidróxido de sódio) e ácido (ácido sulfúrico) não se mostraram eficiente para degradação da fibra vegetal e aferição da resistência residual.

No caso do hidróxido de sódio, ainda houve identificação de material orgânico mesmo após os 56 dias de ensaio. A resistência ficou próxima da obtida nas amostras que permaneceram por 365 dias em câmara úmida, ambiente interno e ambiente externo. Desta forma, com esse tratamento, a simulação de comportamento é eficiente para estimar a resistência no período de apenas um ano.

Já o tratamento com ácido sulfúrico mostrou-se eficiente na degradação integral da fibra vegetal, no entanto, a solução acaba sendo muito destrutiva para a matriz cimentícia. Conforme discutido no item 5.4, as amostras que ficaram por 56 dias em solução ácida sequer puderam ter a resistência mecânica aferida. Já as amostras que permaneceram por 42 dias em solução ácida obtiveram resistências à tração na flexão e à compressão similares às amostras que permaneceram em estufa com temperatura em 100°C.

6.2 COMPROVAÇÃO DE DURABILIDADE DA CASCA DE ARROZ EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A segunda, e mais importante, contribuição desta pesquisa é a comprovação de que a casca de arroz em seu estado natural apresenta-se como uma fibra adequada para ser utilizada em materiais cimentícios em seu estado natural e sem qualquer tipo de pré-tratamento. Diversas pesquisas apontam a melhora no desempenho mecânico, térmico e acústico (GLÉ; GOURDON; ARNAUD, 2011; PACHLA *et al.*, 2021; SIVARAJA *et al.*, 2010). No entanto, ainda não existem pesquisas que tenham realizado análises de durabilidade com profundidade e de médio e longo prazos.

Com os tratamentos aferidos, foram realizados estudos com período de 365 dias para envelhecimento natural e foram adotadas diversas metodologias para verificação de resistência residual, o que é equivalente a análises de longo prazo.

Com os resultados obtidos e apresentados no Capítulo 5, comprovou-se que, após a degradação integral da matéria orgânica da casca, ela obtém compensação de resistência à compressão axial a partir de reações químicas entre o silício identificado nas suas superfícies e o cimento Portland.

Além das reações identificadas na possível formação do C-S-H, sugere-se, também, a formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), composto químico que foi identificado em todos os difratogramas apresentados na pesquisa. O carbonato de cálcio pode ser formado pela degradação da matéria orgânica da casca, que é composta por hidrogênio, carbono e oxigênio. Ao sofrer a degradação, os polímeros naturais tendem a formar dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), que podem gerar a formação de ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido carbônico, ao reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), forma o carbonato de cálcio. Essas reações químicas podem gerar incremento de resistência mecânica e seriam prejudiciais ao material apenas se ele tivesse aço em sua composição, devido à redução de pH que a matriz sofre.

Essas reações foram capazes de manter a resistência mínima das amostras cúbicas (que possuem normatização no Brasil) dentro dos limites definidos, tanto para valores médios e mínimos.

Em relação ao desempenho mecânico obtido na resistência à tração na flexão, não é possível confirmar que há viabilização de seu uso em longo prazo. Essa condição se dá pelo fato de que não existem normatizações técnicas que definem requisitos mínimos para esse tipo de desempenho. Mesmo assim, é possível afirmar que o desempenho obtido é superior ao do concreto celular convencional.

6.3 METODOLOGIA PARA ESCOLHA DE FIBRAS VEGETAIS

A terceira contribuição deste trabalho é quanto à escolha da fibra vegetal a ser incorporada em materiais cimentícios. Atualmente, a maioria dos estudos é baseada na escolha da fibra apenas em função da disponibilidade regional. Desta forma, as pesquisas levam em consideração, principalmente, este fator e sua resistência mecânica para melhorar a ductilidade e a resistência à tração do concreto, o que gera produtos com pouca usabilidade em médio e longo prazo.

Após a comprovação de que existe a melhoria no desempenho mecânico (SISMAN; GEZER; KOCAMAN, 2011; AWWAD *et al.*, 2012; PACHLA *et al.*, 2021), tem-se verificado que os produtos desenvolvidos não apresentam durabilidade adequada para garantir desempenho de longo prazo (VO; NAVARD, 2016). Então, após o desperdício de matéria-prima, mão de obra e investimento, são sugeridos tratamentos que não são viáveis em larga e escala, seja por conta dos processos complexos seja por conta do alto investimento necessário.

O que esta pesquisa apresenta de novidade quanto à escolha de fibras é a sugestão de uma análise da composição química preliminar aos estudos da união com materiais cimentícios. O fato de a casca de arroz ter, nas suas superfícies externas e internas, percentuais relevantes de silício (mais de 40% na superfície externa) e, em sua massa total, possuir na faixa de 10 a 12% de sílica auxiliou muito na sua durabilidade, conforme discutido ao longo do Capítulo 5. Desta forma, a tendência é de que outras fibras que apresentam sílica ou pozolanas em sua composição também sejam duráveis sem necessidade de pré-tratamentos, visto que, mesmo havendo perda de sua capacidade resistente com a degradação da celulose, existe uma compensação pelas reações químicas que possivelmente formam o C-S-H.

Além da composição química, os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que a combinação e as matrizes cimentícias leves, como o concreto celular, apresentam boa compatibilização com fibras vegetais. Isso ocorre pois há uma facilidade de homogeneização da mistura, uma vez que as densidades apresentam boa compatibilização. Sendo assim, a indicação de que matrizes leves possuem melhor potencial para incorporação de fibras vegetais é adequada uma vez que há relatos de que um dos problemas de compósitos com fibras vegetais é a homogeneização, pela alta densidade da matriz de concreto e argamassa convencional (KUNDU *et al.*, 2012).

Por fim, a última sugestão é a visão de adicionar fibras vegetais para reduzir a retração por secagem dos materiais cimentícios. Geralmente, as adições são realizadas para melhorar o desempenho mecânico à tração (AWWAD *et al.*, 2012; MOTTA; JOHN; AGOPYAN, 2010; PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017), no entanto, esse desempenho é onde há a maior perda conforme a degradação da celulose é aumentada. Portanto, ao utilizar fibras curtas em substituição às fibras sintéticas, como o polipropileno, para reduzir a retração de materiais que serão usados para resistir a esforços de compressão axial, haverá eficiência e, conforme há o avanço da degradação, não serão identificadas perdas de desempenho superiores às que também são geradas em materiais sem adição de fibras (conforme comprovado nas análises realizadas no Capítulo 5).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, estão apresentadas as conclusões da pesquisa visando explicitar o cumprimento dos objetivos propostos no Capítulo 1. Na sequência, foram elencadas algumas sugestões para trabalhos futuros que são focadas no seguimento desta pesquisa e desenvolvimento de produtos sustentáveis para produção em larga escala.

7.1 CONCLUSÕES

O surgimento da pesquisa foi, inicialmente, a partir da tragédia da boate Kiss e da publicação da NBR 15575 (ABNT, 2021). A falta de materiais seguros e de baixo custo para o uso de isolamento acústico geraram uma das maiores tragédias da história do Brasil, já a publicação da norma de desempenho, que entrou em vigor em 2013, mostrou a lacuna que existe em relação a materiais de qualidade e que sejam acessíveis à população no geral.

Após o início da pesquisa, identificou-se uma busca mundial pela reutilização de resíduos agroindustriais na produção de concreto. A destinação adequada desses resíduos possui caráter sustentável e de redução de custo, além de gerar produtos com desempenhos interessantes em quesitos como isolamento térmico, isolamento acústico, absorção acústica, resistência mecânica e ductilidade. No entanto, foi identificada uma lacuna em relação a análises de durabilidade que possibilitem o uso desses resíduos e garantam uma vida útil adequada aos produtos desenvolvidos.

A partir da idealização de desenvolver produtos de vedação com viés sustentável e alto desempenho termoacústico, a pesquisa aprofundou o estudo de compósitos de matriz cimentícia leve com reforço de fibras vegetais, mais especificamente, de casca de arroz visando analisar o quesito durabilidade. Após todas as análises experimentais e teóricas serem concluídas, é possível afirmar que os objetivos específicos e o objetivo geral foram atingidos. A seguir, estão expostas as conclusões simplificadas para cada objetivo proposto no Capítulo 1.

- Após o estudo de reprodução e adaptação de um traço desenvolvido por Pachla (2017), foi criado um Compósito com menor massa específica e resistência que, no final da vida útil, atendeu aos requisitos impostos pela NBR 14.438 (ABNT, 2013b);
- Ao longo dos estudos de dosagem, foram estabelecidas diversas características do material que possibilitam a reprodução em outras

pesquisas. Para isso, foram parametrizados e descritos ensaios no estado fresco, como índice de consistência, fluidez pelo cone de Marsh e massa específica no estado fresco. Também foram apresentadas e explicadas características no estado endurecido, como massa específica, resistência à tração na flexão e resistência à compressão em diferentes amostras;

- A influência da degradação da casca de arroz na durabilidade dos Compósitos foi amplamente estudada, tanto em macro quanto em microescala. Para isso, foram analisadas imagens microestruturais, os resultados mecânicos, as composições químicas e as reações químicas que potencializaram o desempenho das fibras no decorrer dos tratamentos utilizados;
- Após realizar tratamentos químicos, térmicos e análises em diferentes períodos e exposições ambientais, as influências de cada um foi analisada. A identificação de que o banho-maria, como forma para acelerar a degradação da casca de arroz, é o mais eficiente para prever desempenho mecânico de longo prazo foi comprovada e apresenta-se como relevante contribuição para a literatura;
- Após a realização de todos os estudos e de todas as análises, pode-se afirmar que o uso de casca de arroz em matriz cimentícia leve não prejudica o desempenho mecânico em curto, médio e longo prazo. Verificou-se que, pela composição química da casca *in natura*, a perda de desempenho mecânico devido à degradação dos polímeros naturais é mitigada em função de reações químicas com a matriz cimentícia;
- Por fim, em todos os tratamentos realizados, foi identificado que a resistência residual atende ao valor mínimo de 1,00 MPa exigido pela NBR 14.438 (ABNT, 2013b). Essa condição indica a possibilidade de uso do material para fabricação de blocos de vedação.

7.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Em face da comprovação de que a casca de arroz *in natura* apresenta capacidade de formar compósitos de matriz cimentícia duráveis e com vida útil que atenda a normatização técnica nacional, as sugestões para pesquisas futuras são:

- Identificar em qual fase do beneficiamento do arroz ocorre o surgimento de silício nas superfícies da casca visando facilitar a escolha de outros tipos de fibras vegetais para incorporar em materiais cimentícios;
- Reproduzir o Compósito desenvolvido em formato de painéis para vedação utilizando sistemas de steel ou wood frame e analisar o desempenho do material utilizando escala real;
- Reproduzir o Compósito desenvolvido em formato de blocos de vedação para construção de alvenarias em escala real e verificar o desempenho obtido;
- Analisar a capacidade de controle de retração por secagem do concreto celular ao incorporar casca de arroz e compará-la com os resultados obtidos sem adição desta fibra e com a adição de fibras sintéticas como o polipropileno.

REFERÊNCIAS

- ABDUL KHALIL, H. P. S.; BHAT, A. H.; IREANA YUSRA, A. F. **Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review**. *Carbohydrate Polymers*, [S. l.], v. 87, n. 2, p. 963–979, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.078>
- ABNT. **NBR 12644: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT. **NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. **NBR 12646: Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local**. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. **NBR 13279 - Argamassa para assentamento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 13438: Blocos de concreto celular autoclavado — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 13440: Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 14956-1: Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 1: Procedimento com argamassa colante industrializada**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 14956-2: Blocos de concreto celular autoclavado — Execução de alvenaria sem função estrutural Parte 2: Procedimento com argamassa convencional**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT. **NBR 15575-1: Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2021.

ACI_R03, A. C. I.-. **Guide for structural lightweight aggregate concrete** *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*. [S. l.: s. n.]. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(79\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0262-5075(79)90004-6).

ALENGARAM, U. J.; MAHMUD, H.; JUMAAT, M. Z. **Comparison of mechanical and bond properties of oil palm kernel shell concrete with normal weight concrete**. *International Journal of Physical Sciences*, [S. l.], v. 5, n. 8, p. 1231–1239, 2010.

ALENGARAM, U. J.; MUHIT, B. A. Al; JUMAAT, M. Z. Bin. **Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete - A review**. *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 38, p. 161–172, 2013 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.026>

ALENGARAM, U. J.; MUHIT, B. A. A.; JUMAAT, M. Z. B. **Utilization of oil palm kernel shell as lightweight aggregate in concrete - A review**. *Construction and Building Materials*, Department of Civil Engineering, v. 38, p. 161–172, 2013b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.026>

ALI, M.; LI, X.; CHOUW, N. **Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete**. *Materials and Design*, [S. l.], v. 44, p. 596–605, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.038>

AMICK, J. A. **Purification of Rice Hulls as a Source of Solar Grade Silicon for Solar Cells**. *Journal of the Electrochemical Society*, [S. l.], v. 129, n. 4, p. 864–866, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1149/1.2123989>

AMRAN, Y. H. M.; FARZADNIA, N.; ALI, A. A. A. **Properties and applications of foamed concrete; A review**. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 990–1005, 2015 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>

AMRAN, Y. H. M.; FARZADNIA, N.; ALI, A. A. A. **Properties and applications of foamed concrete ; a review**. *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 101, p. 990–1005, 2015 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>

ARDANUY, M. *et al.* **Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers**. *Cellulose*, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 281–289, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. **Cellulosic fiber**

- reinforced cement-based composites: A review of recent research.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 79, p. 115–128, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- ASTM. Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam** ASTM Special Technical Publication, United States: [s. n.], 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/C0796>
- AWWAD, E. *et al.* **Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 35, n. 2012, p. 710–717, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.119>
- BATRA, S. K. **Chapter 8. Other long vegetable fibers**, in: **M. Lewin, Handbook.** third ed. ed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2007. *E-book*.
- BBC NEWS. **How the tragedy unfolded at Grenfell Tower.** [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/uk-england-london-40272168>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- BEDERINA, M. *et al.* **Drying shrinkage studies of wood sand concrete - Effect of different wood treatments.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 36, p. 1066–1075, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.010>
- BÍBLIA, A. T. **Sagrada Bíblia Católica: Antigo e Novo Testamentos.** São Paulo: [s. n.], 2008. *E-book*.
- BRITISH CEMENT ASSOCIATION, B. **Foamed Concrete composition and properties.** [S. l.: s. n.].
- CARVALHO, C. S. M. **Tratamentos Térmicos e Químicos para a Valorização da Casca de Arroz** Engenharia de Materiais Júri. 2015. - Técnico Lisboa, [s. l.], 2015.
- CERETTA, T. **Perícia confirma que espuma da Kiss liberou cianeto durante incêndio.** [s. l.], 2013. Disponível em: <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2013/03/pericia-confirma-que-espuma-da-kiss-liberou-cianeto-durante-incendio.html>. Acesso em: 17 jun. 2020.
- CHABRIAC, P. A. *et al.* **Agricultural by-products for building insulation: Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 112, p. 158–167, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.162>
- CHANDRA, S. (Satish); BERNTSSON, L. **Lightweight aggregate concrete : science, technology, and applications.** [S. l.: s. n.]. *E-book*.
- CHEN, B.; LIU, J. **Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-**

- strength lightweight concrete having good workability.** Cement and Concrete Research, [S. l.], v. 35, n. 5, p. 913–917, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.035>
- CHICA, L.; ALZATE, A. **Cellular concrete review: New trends for application in construction.** Construction and Building Materials, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia, v. 200, p. 637–647, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima Porto Alegre: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Porto Alegre. Temperatura da água Porto Alegre - Climate-Data.org.** [s. l.], 2020. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/porto-alegre-3845/?fbclid=IwAR30Qxe6nle_qchKaLAYYBg2ySqd_26dLNms9XyRILRtIldC4B6jklb bdpE. Acesso em: 2 fev. 2020.
- CORTELASSI, E. M. **Avaliação do Comportamento de Concretos Celulares Espumosos de Alto Desempenho.** 2005. - Universidade Estadual Estadual de Londrina, [s. l.], 2005.
- DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais : Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica.** Cerâmica Industrial, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.
- FALLIANO, D. *et al.* **Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density.** Construction and Building Materials, [S. l.], v. 198, p. 479–493, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.197>
- FERNÁNDEZ CARRASCO, L. *et al.* **Nonwoven flax fiber mats and white portland cement composites for building envelopes.** ICBBM 2015: 1st International Conference on Bio-based Building Materials: Clermont-Ferrand, France: 21st-24th June 2015, [S. l.], p. 46–51, 2015.
- FERREIRA, O. A. R. **Concretos Celulares Espumosos.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1987.
- FILHO, J. de A. M. **Durabilidade Química E Térmica E Comportamento Mecânico De Compósitos De Alto Desempenho Reforçados Com Fibras De Sisal.** 2012. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2012.
- GHAVAMI, K. **Bamboo as reinforcement in structural concrete elements.** Cement and Concrete Composites, [S. l.], v. 27, n. 6, p. 637–649, 2005. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>

GLÉ, P.; GOURDON, E.; ARNAUD, L. **Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity**. *Applied Acoustics*, [S. l.], v. 72, n. 5, p. 249–259, 2011. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.11.003>

HAIGLER, C. H. *et al.* **Molecular modeling and imaging of initial stages of cellulose fibril assembly: Evidence for a disordered intermediate stage**. *PLoS ONE*, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 1–10, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093981>

HOLIK, H. **Handbook of Paper and Board**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em:

<https://doi.org/10.1002/3527608257>

INLOCO. **Mapa Brasileiro da COVID-19**. [s. l.], 2020. Disponível em:

<https://mapabrasileirodacovid.inloco.com.br/pt/>. Acesso em: 19 jun. 2020.

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Safra 2020/2021 chega ao fim com produtividade recorde no RS** - IRGA. [S. l.], p. 2021–2023, 2021. Disponível em: <https://irga.rs.gov.br/safra-2020-2021-chega-ao-fim-com-produtividade-recorde-no-rs>

IRGA - INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Área e produção de arroz**.

Estado do Rio Grande do Sul: [s. n.], 2019. Disponível em: <https://irga-admin.rs.gov.br/upload/arquivos/201909/19141756-producao-rs-x-br.pdf>.

JANSEN, M. D. e R. **Monitor aponta que média de isolamento social no Brasil é de 43,4%**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/ultimas-noticias/agencia-estado/2020/05/15/monitor-aponta-que-media-de-isolamento-social-no-pais-e-de-434-ideal-seria-70.htm>. Acesso em: 19 jun. 2020.

JAUBERTHIE, R. *et al.* **Origin of the pozzolanic effect of rice husks**. *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 14, n. 8, p. 419–423, 2000. Disponível em:

[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00045-3)

JAUBERTHIE, R. *et al.* **Properties of cement - Rice husk mixture**. *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 17, n. 4, p. 239–243, 2003. Disponível em:

[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00005-9)

JAYAMANI, E. *et al.* **Investigation of fiber surface treatment on mechanical, acoustical and thermal properties of betelnut fiber polyester composites**.

Procedia Engineering, [S. l.], v. 97, p. 545–554, 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.282>

- JONES, M. R.; MCCARTHY, A. **Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications.** *In:* 2005, Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction. [S. l.: s. n.] p. 61–88.
- JOORABCHIAN, S. M. **Durability of concrete exposed to sulfuric acid attack.** 2010. - Azad University of Tehran Central, [s. l.], 2010.
- JORGE, F. C.; PEREIRA, C.; FERREIRA, J. M. F. **Wood-cement composites: A review.** Holz als Roh - und Werkstoff, [S. l.], v. 62, n. 5, p. 370–377, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>
- KASHANI, A. *et al.* **A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete.** Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 149, p. 925–935, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.154>
- KEARSLEY, E. P. **The use of foamcrete for affordable development in third world countries.** Concrete in the Service of Mankind, [S. l.], v. 3, p. 232, 2006.
- KEARSLEY, E. P.; VISAGIE, M. **Micro-properties of Foamed Concrete. Specialist Techniques and Materials for Construction.** Thomas Telford, [S. l.], p. 173–184, 1999.
- KHAZMA, M. *et al.* **Influence of sucrose addition on the performance of a lignocellulosic composite with a cementitious matrix.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, [S. l.], v. 39, n. 12, p. 1901–1908, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.09.014>
- KINNANE, O. *et al.* **Acoustic absorption of hemp-lime construction.** Construction and Building Materials, [S. l.], v. 122, p. 674–682, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.106>
- KLEMM, D. *et al.* **General Considerations on Structure and Reactivity of Cellulose.** *In:* Comprehensive Cellulose Chemistry. [S. l.: s. n.]. v. 1p. 105–137. *E-book.* Disponível em: <https://doi.org/10.1002/3527601929>
- KOH, H. B.; LEE, Y. L.; YEOH, D. **Compressive strength and shrinkage of foamed concrete containing pulverized fly ash.** [S. l.], 2006.
- KUHAD, R. C.; SINGH, A. **Lignocellulose biotechnology: future prospects.** Critical Reviews in Biotechnology, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 151–172, 1993.
- KUNDU, S. P. *et al.* **Chemically modified jute fibre reinforced non-pressure (NP) concrete pipes with improved mechanical properties.** Construction and Building Materials, [S. l.], v. 37, p. 841–850, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.082>

- LABOREL-PRÉNERON, A.; MAGNIONT, C.; AUBERT, J. E. **Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials.** *Waste and Biomass Valorization*, [S. l.], v. 9, n. 7, p. 1095–1112, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>
- LAHOUIOUI, M. *et al.* **Investigation of Fiber Surface Treatment Effect on Thermal, Mechanical and Acoustical Properties of Date Palm Fiber-Reinforced Cementitious Composites.** *Waste and Biomass Valorization*, [S. l.], n. 0123456789, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00745-3>
- MARCOS-MESON, V. *et al.* **Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 200, p. 490–501, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.051>
- MELO, G. F. de. **Concreto Celular Polimérico: Influência da adição de resíduo de poliéster insaturado termofixo.** 2009. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2009.
- MELO FILHO, J. de A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios, reforçados com fibras longas de sisal.** 2005. [s. l.], 2005.
- MERTA, I.; TSCHEGG, E. K. **Fracture energy of natural fibre reinforced concrete.** *Construction and Building Materials*, [S. l.], v. 40, p. 991–997, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.060>
- MILLER, D.; MOSLEMI, A. **Wood-cement composites : effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength.** *Wood and fiber science*, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 472–482, 1991.
- MISHRA, S. *et al.* **A review on pineapple leaf fibers, sisal fibers and their biocomposites.** *Macromolecular Materials and Engineering*, [S. l.], v. 289, n. 11, p. 955–974, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/mame.200400132>
- MOHD ZAMZANI, N.; OTHUMAN MYDIN, A.; ABDUL GHANI, A. N. **Experimental investigation on engineering properties of lightweight foamed concrete (LFC) with coconut fiber addition.** *MATEC Web of Conferences*. School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, Penang, 11800, Malaysia: [s. n.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825005005>
- MOTTA, L. A. C.; JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Thermo-mechanical treatment to improve properties of sisal fibres for composites.** *Materials Science Forum*, [S. l.], v. 636–637, p. 253–259, 2010. Disponível em:

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.636-637.253>

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K. **Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology.**

Cement & Concrete Composites, [S. l.], v. 28, p. 752–760, 2006 a.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K. **Influence of filler type on the properties of foam concrete.**

Cement & Concrete Composites, [S. l.], v. 28, p. 475–480, 2006

b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001>

NAMBIAR, E. K. K.; RAMAMURTHY, K.; ASCE, M. **Fresh State Characteristics of Foam Concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 111–117, 2008.

NANDI, S. *et al.* **Cellular Concrete & its facets of application in Civil**

Engineering. International Journal of Engineering Research, [S. l.], v. ISSN, n. 1, p.

37–43, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i1/009>

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. **Structure and properties of aerated**

concrete: A review. Cement and Concrete Composites, Bldg. Technol. Constr.

Mgmt. Div., Dept. Civ. Eng., Indian Inst. T., Chennai, India, v. 22, n. 5, p. 321–329,

2000 a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)

NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. **Structure and properties of aerated**

concrete : a review. Cement & Concrete Composites, [S. l.], v. 22, p. 321–329, 2000

b.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. **Cementitious building materials reinforced**

with vegetable fibres: A review. Construction and Building Materials, [S. l.], v. 25,

n. 2, p. 575–581, 2011. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>

PACHLA, E. C. **Desempenho Térmico-Acústico-Mecânico-Durabilidade de**

Compósitos de Matriz Cimentícia com Reduzida Massa Específica Reforçados

por Casca e Palha do Arroz. 2017. - Universidade Federal do Pampa, [s. l.], 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

PACHLA, E. C. *et al.* **Sustainable application of rice husk and rice straw in**

cellular concrete composites. Construction and Building Materials, [S. l.], v. 283, p.

122770, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>

PAKRAVAN, H. R.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. **Hybrid short fiber reinforcement**

system in concrete: A review. Construction and Building Materials, [S. l.], v. 142, p.

280–294, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.059>

PANESAR, D. K. **Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents**. Construction and Building Materials, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 35 St. George St., Toronto, ON M5S 1A4, Canada, v. 44, p. 575–584, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>

PANYAKAEW, S.; FOTIOS, S. **New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse**. Energy and Buildings, [S. l.], v. 43, n. 7, p. 1732–1739, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>

PIMENTEL, L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais**. 2004. - Universidade Estadual de Campinas, [s. l.], 2004.

RAJ, A.; SATHYAN, D.; MINI, K. M. **Physical and functional characteristics of foam concrete: A review**. Construction and Building Materials, [S. l.], v. 221, p.

787–799, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>

RAMAMURTHY, K.; KUNHANANDAN NAMBIAR, E. K.; INDU SIVA RANJANI, G. **A classification of studies on properties of foam concrete**. Cement and Concrete Composites, Building Technology and Construction Management Division, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036, India, v. 31, n. 6, p. 388–396, 2009. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>

RAMAMURTHY, K.; NARAYANAN, N. **Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete**. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, [S. l.], v. 33, n. 228, p. 243–250, 2000. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/bf02479334>

RAMOS, L.; MAXIMINO, M.; CARVALHO, G. **Métodos analíticos aplicados à caracterização química da celulose**. [S. l.: s. n.]. E-book.

RASHID, B. *et al.* **Physicochemical and thermal properties of lignocellulosic fiber from sugar palm fibers: effect of treatment**. Cellulose, [S. l.], v. 23, n. 5, p. 2905–2916, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1005-z>

REYES, J.; PERALTA-ZAMORA, P.; DURÁN, N. **Hidrólise enzimática de casca de arroz utilizando-se celulasas. Efeito de tratamentos químicos e fotoquímicos**.

Quimica Nova, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 140–143, 1998. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/s0100-40421998000200006>

- ROMILDO D., T. F. D. *et al.* **Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability.** *Cement and Concrete Composites*, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 185–196, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)
- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microesíruturo e oplicções.** 2007. - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, Ciudad Universitaria, 2007. Disponível em: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1717/ramirezamora.pdf?sequence=1>
- ROWELL, R. M.; STOUT, H. P. **Chapter 7. Jute and kenaf**, in: M. Lewin (Ed.). Third ed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, 2007. *E-book*.
- SEDAN, D. *et al.* **Effect of calcium rich and alkaline solutions on the chemical behaviour of hemp fibres.** *Journal of Materials Science*, [S. l.], v. 42, n. 22, p. 9336–9342, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1903-4>
- SILVA, C. A. de O. **Estudo de Dosagem e Avaliação de Concreto Celular com Fins Estruturais.** 2015. - Universidade Federal de Alagoas, [s. l.], 2015.
- SISMAN, C. B.; GEZER, E.; KOCAMAN, I. **Effects of organic waste (rice husk) on the concrete properties for farm buildings.** *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 40–48, 2011.
- SIVARAJA, M. *et al.* **Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties.** *Bulletin of Materials Science*, [S. l.], v. 33, n. 6, p. 719–729, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0149-6>
- SIXTA, H.; POTTHAST, A.; KROTSCHKEK, A. W. **Chapter 4. Chemical pulping processes. In Part 1. Chemical pulping**, in: H. Sixta. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH, 2006. *E-book*.
- SIXTA, H. *et al.* **Evaluation of new organosolv dissolving pulps. Part I: Preparation, analytical characterization an viscose processability.** *Cellulose*, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 73–83, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/B:CELL.0000014767.47330.90>
- SRIPAIBOONKIJ, P. *et al.* **Respiratory and skin health among glass microfiber production workers: A cross-sectional study.** *Environmental Health: A Global Access Science Source*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1–10, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-8-36>
- TEIXEIRA FILHO, F. J.; TEZUCA, Y. **BT81- Teixeira Filho.pdf.** São Paulo: EPUSP,

1992.

TEIXEIRA, J. N. *et al.* **Lignocellulosic Materials for Fiber Cement Production.**

Waste and Biomass Valorization, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 2193–2200, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0536-y>

TIKALSKY, P. J.; POSPISIL, J.; MACDONALD, W. **A method for assessment of the freeze – thaw resistance of preformed foam cellular concrete.** Cement and Concrete Research, [S. l.], v. 34, p. 889–893, 2004. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.005>

TOOGE, R. **Agronegócio cresce 3,8% e representa 21% do PIB brasileiro em 2019, diz CNA.** [s. l.], 2020. Disponível em:

<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2020/03/09/agronegocio-cresce-38percent-e-representa-21percent-do-pib-brasileiro-em-2019-diz-cna.ghtml>. Acesso em: 17 jun. 2020.

VALORE JR., R. C. V. **Cellular concretes Part 1 composition and methods of preparation.** [S. l.: s. n.].

VALORE JR., R. C. V. **Cellular concretes Part 2 physical properties.** [S. l.: s. n.].

VASCONCELOS, Y. **O que foi o Coliseu de Roma ? Arena foi palco de diversas formas de entretenimento - na concepção romana da palavra.** [s. l.], 2020.

Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/o-que-foi-o-coliseu-de-roma/>. Acesso em: 27 maio. 2020.

VO, L. T. T.; NAVARD, P. **Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review.** Construction and Building Materials, [S. l.], v. 121, p. 161–176, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.125>

ZAINUDDIN, S. Y. Z. *et al.* **Potential of using multiscale kenaf fibers as reinforcing filler in cassava starch-kenaf biocomposites.** Carbohydrate Polymers, [S. l.], v. 92, n. 2, p. 2299–2305, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.106>

ZAMORA, J. J. R. **Comportamiento de muros de concreto celular con diferentes cuantías de acero de refuerzo.** Universidad Nacional Autónoma de México, [S. l.], p. 132, 2007. Disponível em:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1717/ramirezamora.pdf?sequence=1>