

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EDUARDO CESAR PACHLA

**DESEMPENHO TÉRMICO-ACÚSTICO-MECÂNICO-DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REDUZIDA MASSA ESPECÍFICA
REFORÇADOS POR CASCA E PALHA DO ARROZ**

**Alegrete
2017**

EDUARDO CESAR PACHLA

**DESEMPENHO TÉRMICO-ACÚSTICO-MECÂNICO-DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REDUZIDA MASSA ESPECÍFICA
REFORÇADOS POR CASCA E PALHA DO ARROZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Wang Chong

Coorientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

**Alegrete
2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P451d Pachla, Eduardo Cesar

DESEMPENHO TÉRMICO-ACÚSTICO-MECÂNICO-DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REDUZIDA MASSA ESPECÍFICA
REFORÇADOS POR CASCA E PALHA DO ARROZ / Eduardo Cesar Pachla.
156 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2017.

"Orientação: Wang Chong".

1. Concreto celular. 2. Casca do arroz. 3. Palha do arroz.
4. Desempenho térmico. 5. Desempenho acústico. I. Título.

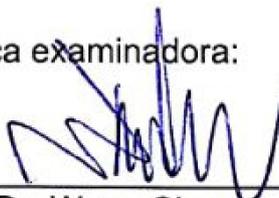
EDUARDO CESAR PACHLA

**DESEMPENHO TÉRMICO-ACÚSTICO-MECÂNICO-DURABILIDADE DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ CIMENTÍCIA COM REDUZIDA MASSA ESPECÍFICA
REFORÇADOS POR CASCA E PALHA DO ARROZ**

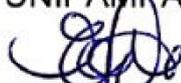
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Tecnologia dos Materiais

Dissertação defendida e aprovada em: 21 de dezembro de 2017

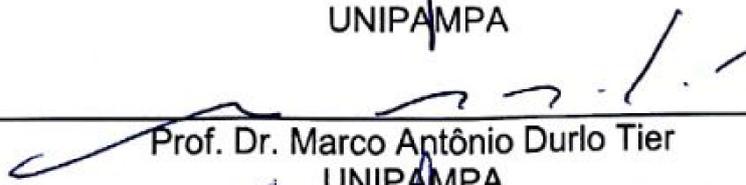
Banca examinadora:



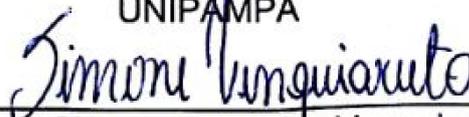
Prof. Dr. Wang Chong
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Ederli Marangon
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier
UNIPAMPA



Prof. Dr. Simone Dornelles Venquiaruto
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

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

Aos meus pais (Leomar Pachla e Tânia Pachla), aos meus irmãos (Edilson e Wellington) e aos meus avós, por todo amor, carinho e incentivo.

A minha namorada, Débora Bretas, pelo apoio e pela dedicação para a realização do trabalho.

Aos Professores, Dr. Wang Chong, e Dr. Ederli Marangon pela orientação e dedicação.

Ao amigo, Pedro Jucá, pela parceria na pesquisa desde o início dos estudos.

Aos amigos, Ângelo Magno e Diego Perez, pela disposição em ajudar sempre que necessário.

Aos amigos, Raphael Martins e Danieli Pozzebon, pela ajuda para conseguir os materiais.

Ao engenheiro Marcelo Oliveira e a técnica Raquel Machado, pelos auxílios prestados no laboratório de materiais de construção civil.

À empresa ECOPORE pela doação do aditivo utilizado na pesquisa.

À Cooperativa Agroindustrial de Alegrete LTDA pela doação da casca de arroz.

À CAPES pela concessão da bolsa e auxílio financeiro.

À Universidade Federal do Pampa pela concessão de toda estrutura necessária para realização da pesquisa.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência”.
Henry Ford

RESUMO

Visando desenvolver produtos com elevado desempenho térmico-acústico, foram produzidos compósitos introduzindo-se resíduos da indústria orizícola em uma matriz de concreto celular. O intuito do trabalho foi averiguar o efeito da adição desses subprodutos à matriz. No total, foram analisadas dez misturas, uma delas de concreto celular, contendo apenas casca do arroz, e as demais, sendo combinações da casca com a palha do arroz em três diferentes comprimentos e percentuais. Assim, o compósito com melhor desempenho foi estudado quanto à adição das fibras saturadas. Todos os compósitos foram avaliados quanto ao desempenho mecânico, acústico e térmico. A partir das análises de resistência mecânica, verificou-se que a adição de casca do arroz reduziu a resistência à compressão axial e aumentou a resistência à tração na flexão. Contudo, a substituição de parcelas de casca por palha do arroz manteve os resultados de resistência à compressão axial estatisticamente semelhantes até o volume de 10%, porém, a partir de 15% de adição de palha, os mesmos foram reduzidos. No que diz respeito à resistência à tração na flexão, a adição de palha do arroz foi positiva. Em relação ao desempenho acústico, a absorção acústica apresentou um acréscimo de aproximadamente 72% com a adição da casca do arroz, e de 83% com a adição de 15% de palha de 3 cm de comprimento. Os resultados de isolamento acústico não se mostraram estatisticamente diferentes, portanto, não foi possível determinar se as fibras vegetais trouxeram ganho na capacidade de isolamento sonora. No que concerne o desempenho térmico, constatou-se que há redução da condutividade em função do aumento do comprimento da palha do arroz. Por fim, as análises de durabilidade indicaram que os materiais possuem grandes quantidades de hidróxido de cálcio, que por sua vez, em contato com o dióxido de carbono, formam carbonato de cálcio, o que acarreta no surgimento de manchas brancas à superfície dos produtos e acelera o processo de despassivação de reforços metálicos. A concepção dos produtos se mostrou promissora ao obter desempenho térmico-acústico satisfatório, entretanto, é necessário realizar estudos mais minuciosos em relação à durabilidade, e, como alternativa para solucionar essa questão, sugere-se adicionar pozolanas para controlar a formação de hidróxido de cálcio.

Palavras-chave: Concreto celular. Casca do arroz. Palha do Arroz. Desempenho mecânico. Desempenho térmico. Desempenho acústico.

ABSTRACT

Aiming to develop products with high thermal-acoustic performance, composites were produced by introducing waste from the rice industry into a cellular concrete matrix. The purpose of this work was to investigate the effect of adding these byproducts to the matrix. In the total, ten mixtures were analyzed, one of them of cellular concrete, containing only rice husk, and the others, being combinations of the bark and the rice straw in three different lengths and percentages. Thus, the composite with the best performance was studied in the light of addition of saturated fibers. All composites were evaluated for mechanical, acoustic and thermal performance. From the mechanical strength analysis, it was verified that the addition of rice husk reduced the axial compressive strength and increased the tensile strength in the bending. As a result, the substitution of rind plots per rice straw maintained the statistically similar axial compression resistance results up to the 10% volume, but, from 15% straw addition, those results were reduced. Regarding the flexural tensile strength, the addition of rice straw was positive. Considering the acoustic performance, the acoustic absorption presented an increase of approximately 72% with the addition of the rice husk, and 83% with the addition of 15% of straw of 3 cm in length. The results of acoustic insulation were not statistically different; therefore, it was not possible to determine if the vegetal fibers brought positive results to the sound insulation capacity. In terms of thermal performance, it was verified that there is reduction of the conductivity due to the increase of the length of the rice straw. Finally, the durability analysis indicated that the materials have a large amount of the calcium hydroxide, which in turn, in contact with carbon dioxide, forms calcium carbonate, which causes white spots to appear on the surface of the products and accelerates the process of depassivation of metallic reinforcements. The design of the products has shown to be promising due to its satisfactory thermal-acoustic performance, however, it is necessary to carry out more detailed studies on durability and, as an alternative to solve this question, it is suggested to add pozolanas to control the formation of calcium hydroxide.

Keywords: Cellular concrete. Rice husk. Rice Straw. Mechanical performance. Thermal performance. Acoustic performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concreto leve com: a) agregados leves; b) ar incorporado; c) sem finos.	23
Figura 2 - Classificação do concreto celular.....	25
Figura 3 – (a) Composição de amostra cimentícia e (b) fibras de polpa de Kraft.....	30
Figura 4 - Transmissão, absorção e reflexão de ruídos	32
Figura 5 – Amostra no tubo de impedância.....	33
Figura 6 - Propagação da onda sonora.....	33
Figura 7 –Absorção acústica dos compósitos com resíduos de madeira	38
Figura 8 - Absorção acústica (α) para argamassas com pneu de 0,50 a 1,00 mm ...	39
Figura 9 – Absorção acústica (α) para argamassas com pneu de 0,25 a 0,50 mm ..	39
Figura 10 - Relação do índice de redução sonora com a frequência	41
Figura 11 – Perda de transmissão acústica do concreto normal e leve	41
Figura 12 - Perda por transmissão de argamassas com pneu de 0,50 a 1,00 mm ...	43
Figura 13 – Perda por transmissão de argamassas com pneu de 0,25 a 0,50 mm ..	43
Figura 14 – Condutividade térmica para argamassa com fibras vegetais	46
Figura 15 – Condutividade térmica em [W/(m.K)] para telhas de fibrocimento	47
Figura 16 – Teor de borracha no concreto leve x condutividade térmica	47
Figura 17 – Organograma simplificado em ordem cronológica dos estudos.....	49
Figura 18 – Casca do arroz “in natura”	50
Figura 19 – Moldes para corte da palha.....	51
Figura 20 – Palha do Arroz: (a) “in natura”; (b) 1 cm; (c) 2 cm; (d) 3 cm;.....	51
Figura 21 – Espuma pré-formada.....	52
Figura 22 – Metodologia adotada para nomenclatura dos traços.....	54
Figura 23 – Processo de saturação da CA e da PA.....	54
Figura 24 – Organograma para mistura dos materiais	55
Figura 25 – Determinação da (a) MEF e (b) MEE	56
Figura 26 – Preparação dos moldes (aplicação do desmoldante).....	56
Figura 27 – Amostras em cura à temperatura ambiente	57
Figura 28 – Retífica utilizada para regularização das superfícies das amostras	57
Figura 29 – Amostra na máquina para ensaio de resistência à compressão axial....	58
Figura 30 – Amostra pronta para análise de comportamento à compressão axial....	58
Figura 31 – Amostra em ensaio de flexão em três pontos	59
Figura 32 – Aspecto das amostras para ensaio de desempenho acústico	59
Figura 33 – Amostras de 29 mm de diâmetro e altura de 50 mm.....	60

Figura 34 - Esquema do ensaio de absorção acústica.....	60
Figura 35 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção acústica	61
Figura 36 - Esquema do ensaio de isolamento acústico	61
Figura 37 – Tubo de impedância pronto para ensaio de isolamento acústico.....	62
Figura 38 – Placa de 250 x 250 x 50 mm para ensaio de condutividade térmica	62
Figura 39 – Equipamento com gradiente linear de temperatura.....	63
Figura 40 – Organograma dos ciclos de molhagem e secagem	64
Figura 41 – Ciclos de molhagem e secagem – (a) molhagem 1º dia – (b) molhagem 2º dia – (c) molhagem 6º dia – (d) secagem.....	65
Figura 42 – Difrátômetro de raios X	66
Figura 43 – Massa específica no estado endurecido com desvio padrão	68
Figura 44 – Relação MEF x MEE	68
Figura 45 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura.....	70
Figura 46 – Resistência à tração na flexão em três pontos.....	71
Figura 47 – Absorção acústica do Concreto Celular e do Traço Referência	72
Figura 48 – Imagem ampliada do Traço Referência	73
Figura 49 – Absorção acústica em comparação com materiais da NBR 12.179.....	73
Figura 50 – Isolamento acústico com desvio padrão	74
Figura 51 – Isolamento acústico em comparação com materiais da NBR 12.179	75
Figura 52 – Condutividade térmica.....	76
Figura 53 – Gráfico de probabilidade normal para MEF.....	79
Figura 54 – Gráfico de probabilidade normal para MEE	80
Figura 55 – Massa específica no estado endurecido com desvio padrão	81
Figura 56 – Relação MEF x MEE	82
Figura 57 – Resistência à compressão em função da porcentagem de PA.....	84
Figura 58 – Resistência à compressão em função do comprimento da PA	84
Figura 59 – Superfície de Resposta: PP x Comprimento da palha x σ_c	86
Figura 60 – Análise da resistência à tração em função da porcentagem de PA	87
Figura 61 - Análise da resistência à tração em função do comprimento da PA	87
Figura 62 – Amostras prismáticas rompidas	89
Figura 63 – Absorção acústica dos compósitos com 5% de PA.....	90
Figura 64 – Absorção acústica dos compósitos com 10% de PA.....	91
Figura 65 – Absorção acústica dos compósitos com 15% de PA.....	91
Figura 66 – Amostras do ensaio de absorção acústica seccionadas ao meio	92

Figura 67 – Isolamento acústico dos compósitos com 5% de PA	93
Figura 68 – Isolamento acústico dos compósitos com 10% de PA	93
Figura 69 – Isolamento acústico dos compósitos com 15% de PA	94
Figura 70 – Análise da condutividade térmica em função da porcentagem de PA....	96
Figura 71 - Análise da condutividade térmica em função do comprimento da PA.....	96
Figura 72 – Superfície de resposta para condutividade térmica.....	97
Figura 73 – Relação MEF X MEE 28 dias de cura	100
Figura 74 – Relação MEF x MEE dos traços com CA e PA saturadas	101
Figura 75 – Massa específica no estado endurecido 28 dias de cura.....	102
Figura 76 – Massa específica no estado endurecido T15.3S.....	102
Figura 77 – Resistência à compressão axial	103
Figura 78 – Resistência à compressão axial dos T15.3S.....	104
Figura 79 – Tensão X Deformação das amostras aos 28 dias.....	106
Figura 80 – Tensão X Deformação das amostras aos 91 dias.....	106
Figura 81 – Tensão X Deformação das amostras sob Ciclos M/S	106
Figura 82 – Descolamento da superfície em contato com o extensômetro	107
Figura 83 – Módulo de Young do T15.3S.....	108
Figura 84 – Resistência à tração na flexão em três pontos.....	109
Figura 85 – Superfície de ruptura de uma amostra do T15.3S.....	110
Figura 86 – Resistência à tração na flexão dos T15.3S	111
Figura 87 – Condutividade térmica.....	112
Figura 88 - Condutividade térmica X idade e da metodologia de cura	113
Figura 89 – Difratoograma de Raios X dos compósitos T15.3S.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência à compressão do CCA	27
Tabela 2 – Composição química da casca do arroz.....	28
Tabela 3 – Propriedades físicas da argamassa com um ano de idade	29
Tabela 4 - Faixas de frequência perceptíveis para o ser humano.....	34
Tabela 5 – Coeficientes de absorção acústica de materiais da construção civil	37
Tabela 6 – Isolamento acústico de materiais de construção civil.....	40
Tabela 7 – Densidade aparente e condutividade térmica	44
Tabela 8 – Efeito da compactação na condutividade térmica do novo gesso	45
Tabela 9 – Valores de massa específica e condutividade térmica.....	45
Tabela 10 – Traços em massa combinado com volume	53
Tabela 11 – Massa específica no estado fresco	67
Tabela 12 – Massa específica no estado endurecido	67
Tabela 13 – Resistência à compressão axial	69
Tabela 14 – Resistência à tração na flexão em três pontos	71
Tabela 15 – Condutividade térmica dos materiais.....	76
Tabela 16 – Massa específica no estado fresco	79
Tabela 17 – Massa específica no estado endurecido	80
Tabela 18 – Resistência à compressão axial	83
Tabela 19 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey ...	85
Tabela 20 – Resistência à tração na flexão em três pontos.....	86
Tabela 21 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey ...	88
Tabela 22 – Coeficientes de correlação de Pearson.....	88
Tabela 23 – Condutividade térmica dos compósitos	94
Tabela 24 – Coeficiente de correlação de Pearson para condutividade térmica.....	95
Tabela 25 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey ...	97
Tabela 26 – Massa específica no estado fresco	99
Tabela 27 – Massa específica no estado endurecido	100
Tabela 28 – Resistência à compressão axial	103
Tabela 29 – Módulo de Young dos compósitos com CA e PA saturadas	108
Tabela 30 – Resistência à tração na flexão em três pontos	109
Tabela 31 – Condutividade térmica dos compósitos	112
Tabela 32 – Massas específicas no estado endurecido.....	125
Tabela 33 – Resistência à compressão axial	129

Tabela 34 – Resistência à tração na flexão em três pontos	131
Tabela 35 - Absorção acústica do Concreto Celular	133
Tabela 36 – Absorção acústica do Traço Referência	134
Tabela 37 – Absorção acústica do T5.1	135
Tabela 38 – Absorção acústica do T5.2	136
Tabela 39 – Absorção acústica do T5.3	137
Tabela 40 – Absorção acústica do T10.1	138
Tabela 41 – Absorção acústica do T10.2	139
Tabela 42 – Absorção acústica do T10.3	140
Tabela 43 – Absorção acústica do T15.1	141
Tabela 44 – Absorção acústica do T15.2	142
Tabela 45 – Absorção acústica do T15.3	143
Tabela 46 - Isolamento acústico do Concreto Celular	144
Tabela 47 – Isolamento acústico do Traço Referência	145
Tabela 48 – Isolamento acústico do T5.1	146
Tabela 49 - Isolamento acústico do T5.2	147
Tabela 50 - Isolamento acústico do T5.3	148
Tabela 51 - Isolamento acústico do T10.1	149
Tabela 52 - Isolamento acústico do T10.2	150
Tabela 53 - Isolamento acústico do T10.3	151
Tabela 54 - Isolamento acústico do T15.1	152
Tabela 55 - Isolamento acústico do T15.2	153
Tabela 56 - Isolamento acústico do T15.3	154
Tabela 57 – Condutividade térmica	155

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM - American Society for Testing and Materials;
- CA – Casca do Arroz;
- CAAL – Cooperativa Agroindustrial Alegrete LTDA;
- CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior;
- CCA – Concreto Celular Autoclavado;
- CCBT – Concreto Celular Curado à Baixa Temperatura;
- CEPED – Centro Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia;
- CP V ARI RS – Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfatos;
- CP's – Corpos de prova;
- C.V. – Coeficiente de Variação;
- D.P. – Desvio Padrão;
- ISO – International Organization for Standardization;
- MEE – Massa Específica no Estado Endurecido;
- MEF- Massa Específica no Estado Fresco;
- NBR – Norma Brasileira;
- PA – Palha do Arroz;
- PP – Porcentagem de Palha do Arroz;
- α – Coeficiente de Absorção Acústica;
- σ_c – Resistência à Compressão Axial;
- σ_t – Resistência à Tração na Flexão em Três Pontos;
- λ - Condutividade Térmica;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivos.....	21
1.1.1	Objetivo geral.....	21
1.1.2	Objetivos específicos.....	21
1.2	Estrutura do trabalho.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1	Concreto leve.....	23
2.2	Concreto celular.....	24
2.2.1	Classificação.....	25
2.2.2	Normatização técnica.....	26
2.3	Compósitos reforçados por fibras.....	27
2.3.1	Fibras vegetais.....	27
2.3.2	Casca e palha do arroz.....	28
2.3.3	Resistência mecânica e durabilidade de compósitos com fibras...29	
2.4	Desempenho acústico.....	31
2.4.1	Tubo de impedância.....	32
2.4.2	Pressão sonora.....	33
2.4.4	Grandezas acústicas.....	35
2.5	Desempenho Térmico.....	44
2.5.1	Condutividade térmica.....	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	49
3.1	Introdução.....	49
3.2	Materiais.....	50
3.2.1	Cimento Portland.....	50
3.2.2	Casca do arroz.....	50
3.2.3	Palha do arroz.....	51
3.2.4	Espuma.....	52
3.3	Métodos experimentais.....	52
3.3.1	Definição dos traços.....	52
3.3.2	Método de mistura.....	55
3.3.3	Massa específica.....	55
3.3.4	Moldagem dos corpos de prova.....	56
3.3.5	Ensaio de resistência à compressão axial.....	57

3.3.6	Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos	59
3.3.7	Preparação das amostras para análise do desempenho acústico..	59
3.3.8	Ensaio de absorção acústica.....	60
3.3.9	Ensaio de isolamento acústico	61
3.3.10	Ensaio de condutividade térmica.....	62
3.3.11	Ciclos de molhagem e secagem	63
3.3.12	Análise da composição.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	Análise comparativa entre o Concreto Celular e o Traço Referência....	67
4.1.1	Determinação das massas específicas	67
4.1.2	Resistência à compressão axial.....	69
4.1.3	Resistência à tração na flexão em 3 pontos.....	71
4.1.4	Absorção acústica.....	72
4.1.5	Isolamento acústico	74
4.1.6	Condutividade térmica	76
4.2	Análise da influência da palha do arroz	77
4.2.1	Determinação das massas específicas	78
4.2.2	Resistência à compressão axial.....	83
4.2.3	Resistência à tração na flexão em 3 pontos.....	86
4.2.4	Absorção acústica.....	90
4.2.5	Isolamento acústico	93
4.2.6	Condutividade térmica	94
4.3	Estudo da durabilidade do T15.3 com CA e PA saturados.....	98
4.3.1	Determinação das massas específicas	99
4.3.2	Resistência à compressão axial.....	103
4.3.3	Resistência à tração na flexão em 3 pontos.....	109
4.3.4	Condutividade térmica	112
4.3.5	Ensaio de difração de raios X.....	114
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
5.1	Conclusões.....	117
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	119
	REFERÊNCIAS.....	120
	APÊNDICES	125
	APÊNDICE A – Resultados da massa específica.....	125

APÊNDICE B - Resultados de resistência à compressão axial	129
APÊNDICE C - Resultados de resistência à tração na flexão	131
APÊNDICE D – Resultados de absorção acústica	133
APÊNDICE E – Resultados de isolamento acústico	144
APÊNDICE F – Resultados de condutividade térmica.....	155

1 INTRODUÇÃO

A tragédia da boate Kiss, ocorrida no ano de 2013, em Santa Maria – RS, causou a perda de 242 vidas devido a um incêndio, que teve como protagonista a espuma de isolamento acústico feita de poliuretano (segundo laudos do Instituto Geral de Perícias). O ocorrido trouxe à tona o problema do uso de alguns materiais sintéticos que são utilizados para melhorar o conforto ambiental. A combustão da espuma liberou gases tóxicos como monóxido de carbono, dióxido de carbono e gás cianídrico, culminando na morte por asfixia de pelo menos 234 das 242 vítimas da tragédia (G1, 2013).

Adicionalmente a isso, o desenvolvimento de novos materiais que possam cumprir a necessidade de isolar ambientes, tanto acusticamente quanto termicamente, passou de sinônimo de qualidade de algumas edificações para requisito exigido a todas as habitações com o lançamento da NBR 15.575/2013. A necessidade de melhorar o desempenho térmico acústico das edificações, em conjunto à tragédia da boate Kiss, solidifica a importância do desenvolvimento de materiais mais tecnológicos, sem o uso de adições sintéticas que possam liberar gases tóxicos, em caso de combustão ou contato com outros produtos químicos.

O uso de materiais compósitos é uma opção viável para o desenvolvimento de produtos que possam oferecer o conforto ambiental almejado, pois sua principal característica é a melhora nas propriedades finais em comparação às de seus constituintes (CHIKHI et al., 2011). A utilização de resíduos sólidos como componente de reforço para produção de compósitos é objeto de muitas pesquisas (JAUBERTHIE et al., 2003, CHIKHI et al., 2011, BENMANSOUR et al., 2014, KASHANI et al., 2017) e reduz o impacto ambiental - uma vez que proporciona destino adequado para diversos produtos – e ainda pode possibilitar a melhora do desempenho térmico-acústico-mecânico dos materiais.

É comprovado que o concreto leve apresenta excelentes resultados frente ao desempenho térmico-acústico, baixo custo e boa estabilidade ao congelamento e descongelamento, em grande parte devido sua elevada porosidade (RAMAMURTHY et al., 2009 e PACHLA, 2015). As boas propriedades dos concretos leves tendem a melhorar em caso de combinação com fibras de baixa densidade que podem ser colocadas a fim de aumentar a dimensão dos poros ou a quantidade de microporos não interligados.

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, sendo as regiões da campanha e fronteira oeste do estado as mais participativas neste cultivo segundo o IRGA (2017). Com baixo custo, pela alta quantidade ofertada no estado, a casca do arroz (CA) é um exemplo de resíduo agrícola com aproveitamento limitado e, atualmente, seu principal destino é a queima para produção de energia e secagem dos cereais (DELLA et al., 2005).

A utilização da casca do arroz pode ter fins mais sustentáveis com a incorporação em materiais cimentícios. É comprovado que o uso da CA natural em compósitos de matriz cimentícia aumenta a resistência a flexão e melhora o módulo de Young, e ainda, após a degradação da CA há ocorrência de reação pozolânica, devido a alta presença de sílica em sua composição, aumentando a resistência à compressão (JAUBERTHIE et al., 2003).

Os benefícios ambientais causados pela adição de fibras vegetais não são restritos a um destino ecologicamente correto, conjuntamente a isto, elas podem trazer a redução do consumo de energia, pois a incorporação de alguns tipos de fibras naturais ou sintéticas em compósitos de matriz cimentícia diminui a condutividade térmica do produto em consequência do aumento da porosidade e da diminuição da massa específica, o que gera redução no uso de equipamentos mecânicos para refrigeração das edificações (BENMANSOUR et al., 2014 e KASHANI et al., 2017).

O isolamento acústico de compósitos fibrosos com densidade semelhante aos não fibrosos também é muito satisfatório, isto é, é hábil em inibir a transferência de ruído de um recinto ao outro (PACHLA, 2015). A utilização de fibras combinada com materiais cimentícios também possibilita a melhor capacidade de absorção acústica (JAMES et al., 2012). Esta característica é responsável pela qualidade de audição dos ambientes, visto que possibilita uma grande atenuação na reverberação de ruídos internos (GERGES, 2000).

Em face destas considerações, este trabalho propõe a incorporação de CA combinada com diferentes porcentagens e comprimentos de palha do arroz (PA) em materiais cimentícios buscando conceber um destino sustentável a estes resíduos agrícolas e aperfeiçoar o desempenho térmico e acústico dos produtos cimentícios utilizados para fins de vedação na construção civil. Os materiais criados na pesquisa serão caracterizados quanto ao desempenho térmico-acústico-mecânico, e na sequência, o melhor compósito será testado quanto a durabilidade através de ciclos de molhagem e secagem.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver materiais compósitos com bom desempenho térmico, acústico e mecânico utilizando resíduos da indústria orizícola como componente de reforço em matriz cimentícia leve.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos abrangem os tópicos citados abaixo:

- Determinar as propriedades mecânicas dos compósitos através de ensaios de compressão axial e tração na flexão em três pontos;
- Determinar as propriedades térmicas e acústicas dos compósitos;
- Investigar a influência das variações em porcentagem e comprimento da palha nas propriedades térmicas, acústicas e mecânicas;
- Determinar o traço com melhor desempenho térmico-acústico entre os compósitos desenvolvidos;
- Determinar a durabilidade do melhor compósito através de ciclos de molhagem e secagem;

1.2 Estrutura do trabalho

- Seção 1:

Na Seção 1 está disposta a Introdução, a qual apresenta a importância da pesquisa, a justificativa do tema estudado e dispõe os objetivos gerais e específicos.

- Seção 2:

A Seção 2 é constituída pela revisão bibliográfica, na qual serão conceituados os materiais e os ensaios utilizados na pesquisa, além disto serão apresentados resultados obtidos em outros trabalhos que envolvem o tema desta pesquisa.

- Seção 3:

A seção “Materiais e Métodos” apresenta a metodologia adotada e descreve a parte experimental, abordando condições dos materiais utilizados e suas características, métodos de dosagem e mistura utilizados, além do procedimento técnico para condução dos ensaios realizados.

- Seção 4:

Na Seção 4 foram apresentados e analisados os resultados obtidos, colocando os valores encontrados em forma de tabelas e figuras, e discutindo os resultados através de analogias entre os próprios materiais estudados e as características de outros materiais apresentados na Seção 2.

- Seção 5:

Foram abordadas as considerações finais do trabalho, relatando resumidamente os resultados obtidos, buscando atingir os objetivos estipulados na seção 1.1.

- Seção 6:

Esta seção apresenta as referências utilizadas para embasamento teórico na realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos dos materiais e dos desempenhos a serem determinados. O segundo enfoque dos estudos apresentados aqui é determinar o estado da arte sobre as produções acadêmicas que foram realizadas em áreas semelhantes ou paralelas ao desenvolvido nesta pesquisa.

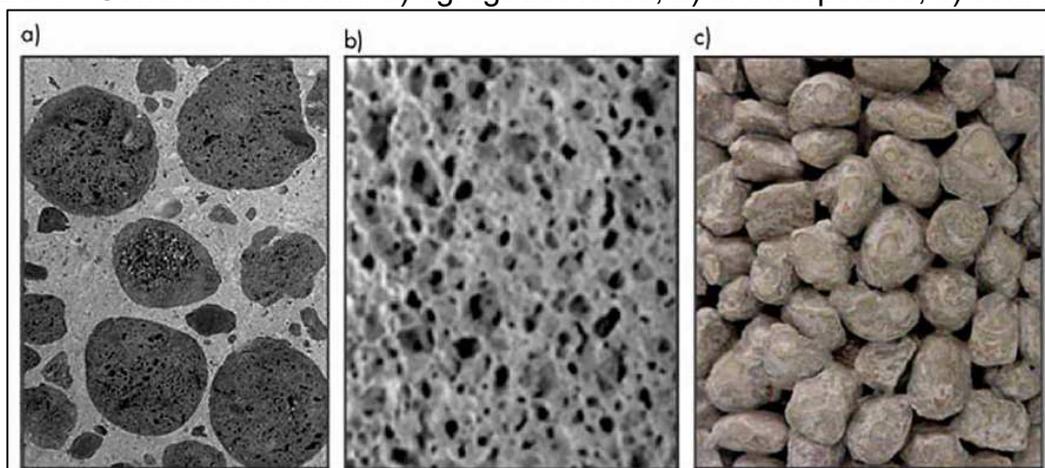
2.1 Concreto leve

Os concretos com reduzida densidade ou massa específica conhecidos como concretos leves, concretos celulares ou concretos aerados 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).

Cortelassi (2005) ressalta que os concretos leves em geral apresentam ótimo desempenho nas propriedades ao congelamento/descongelamento, isolamento térmico, isolamento acústico e de resistência ao fogo. Por outro lado, a grande presença de ar ocasiona redução no desempenho mecânico.

A obtenção do concreto leve pode ser proveniente da adição de agregados leves, adição de ar incorporado, de água em excesso ou pela ausência de finos. A Figura 1 apresenta os três tipos de concretos leves existentes (ROSSIGNOLO, 2009).

Figura 1 - Concreto leve com: a) agregados leves; b) ar incorporado; c) sem finos.



Fonte: Adaptado de ROSSIGNOLO (2009)

O concreto leve possui massa específica menor do que o convencional, conforme Legatski (1978) que estipula limites estipulados entre 320 kg/m^3 e 1920 kg/m^3 . A norma NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica como concreto leve quando a massa específica do concreto for inferior a 2000 Kg/m^3 .

2.2 Concreto celular

Mais popularmente conhecido no Brasil como concreto celular, o material de estrutura porosa e de baixa massa específica, também pode ser encontrado na literatura como sinônimo de concreto aerado. O termo concreto celular é proveniente da Europa, derivando de “Cellular Concrete” ou “Beton Cellulaire”. Enquanto o termo concreto aerado deriva de “Aerated Concrete”, como é chamado nos Estados Unidos (SILVA, 2015). Por sua vez, Teixeira Filho & Tezuca (1992) diferem o concreto celular do concreto aerado, tornando o concreto aerado um grupo específico de concreto celular. Ao lado do concreto aerado, o outro grupo de concreto celular é o “microporitas”, diferenciando entre si pela forma de concepção dos poros.

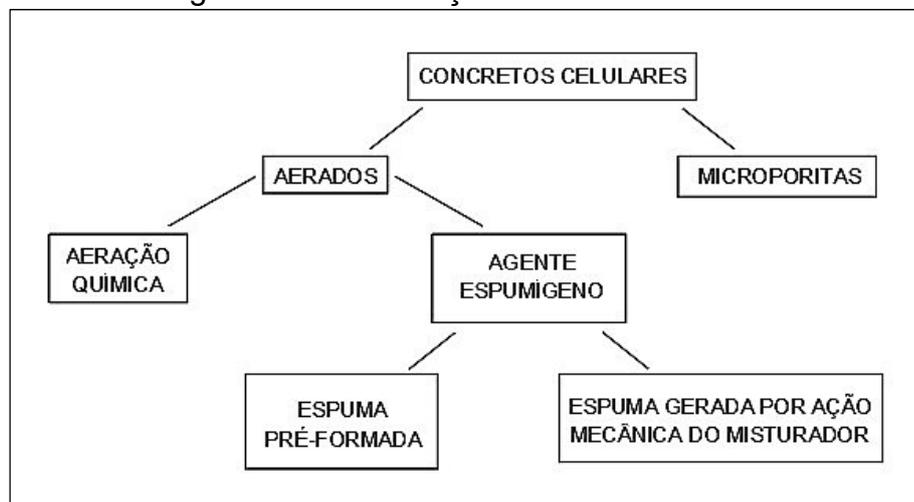
O concreto celular é caracterizado pela sua baixa massa específica e estrutura porosa obtida por meio da incorporação de gases em sua mistura (MELO, 2009). Durante o processo de fabricação o concreto passa por tratamentos físicos, mecânicos e químicos a fim de obter alta quantidade de poros esféricos, indeformáveis e não interligados, de dimensão milimétrica que permanecem incomunicáveis e indeformáveis após a cura (FERREIRA, 1986 apud MELO, 2009).

O termo concreto celular não apresenta um consenso bem definido para sua nomenclatura, principalmente no que diz respeito à presença ou não de agregados (FERREIRA, 1987). Kashani et al. (2017) por exemplo, utiliza o termo concreto celular para um material de baixa densidade formado a partir da mistura de cimento, água e espuma. Ainda, Canahua (2014) apresenta a seguinte definição: “*O concreto celular é um material de construção rápida, composto pela mistura de cimento Portland, água, agente espumante, ar comprimido e, muito frequentemente, fibras de polipropileno*” (CANAHUA, 2014) (tradução livre).

2.2.1 Classificação

O concreto celular pode ser classificado em dois grupos (Figura 2).

Figura 2 - Classificação do concreto celular



Fonte: Adaptado de TEIXEIRA FILHO & TEZUCA (1992).

A diferença entre grupo dos microporitas e o grupo dos aerados é a forma de obtenção dos poros, sendo que no microporitas não é utilizado nenhum tipo de agente espumígeno, e os poros são obtidos através da grande quantidade de água adicionada à argamassa (TEIXEIRA FILHO & TEZUCA, 1992).

Os concretos celulares aerados possuem duas divisões. Uma delas é o concreto com agente espumígeno, sendo ainda subdividido em espuma pré-formada e espuma gerada por ação mecânica do misturador. A outra divisão é formada pelos concretos que obtêm poros através de agentes químicos (MELO, 2009).

Nos concretos formados por agente espumígeno, a espuma pré-formada é gerada por equipamentos específicos, sendo grande parte compostos por compressores de ar e bombas hidráulicas, as quais trabalham em conjunto e formam a espuma através da mistura de um aditivo incorporador de ar e água. A espuma pode ser introduzida antes ou depois dos demais materiais no processo mistura. Já a espuma gerada por ação mecânica do misturador, consiste na adição do agente espumígeno já diluído em água e misturado juntamente com as demais matérias primas do concreto no interior do aparelho misturador (MELO, 2009).

O agente aerador químico pode ser resultado do uso de substâncias como pó de alumínio, pó de zinco, peróxido de hidrogênio ou cal clorada. Essas substâncias formam reações com outros componentes da argamassa ou da pasta de cimento gerando células de hidrogênio (MELO, 2009).

2.2.2 Normatização técnica

O concreto celular está em ascensão no que diz respeito ao seu emprego, o que trouxe a necessidade de uma maior regulamentação de sua produção e sua utilização. As normas brasileiras para controle de qualidade na produção e aplicação do concreto celular são relativamente novas, apenas duas anteriores à 2013 ainda estão em vigor.

- NBR 12.644/2014: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco (ABNT,2014);
- NBR 12.645/1992: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992);
- NBR 12.646/1992: Paredes de Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local (ABNT, 1992);
- NBR 13.438/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Requisitos (ABNT, 2013);
- NBR 13.440/2013: Blocos de concreto celular autoclavado - Métodos de Ensaio (ABNT, 2013);
- NBR 14.956/2013: Blocos de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural (ABNT, 2013).

Com exceção das normas para concreto celular moldado “in loco” as outras são específicas para o concreto celular curado em autoclave. O concreto celular autoclavado (CCA), que sofre o processo de cura em autoclave, apresenta uma resistência à compressão estimada em duas vezes ao mesmo concreto celular curado a baixa temperatura (CCBT) e a retração é estimada na metade do seu equivalente sem processo de cura em autoclave (FERREIRA, 1987).

Segundo Ferreira (1987), a explicação para a superioridade de desempenho do CCA é possível visto que uma mistura de cálcio e silício em proporções adequadas, quando submetida a uma temperatura variável entre 160°C e 190°C e a uma pressão de 6 kgf/cm² a 12 kgf/cm² de uma autoclave por aproximadamente cinco horas, resulta em uma reação que acaba por originar o monossilicato de cálcio, o qual é um aglomerante, enquanto na cura ao ar tem-se uma reação comum de hidratação.

Outra diferença significativa entre o CCA e o CCBT é que enquanto o CCA está com a estrutura final completamente estabilizada após o processo de autoclave, o CCBT sofre mudanças micro estruturais ao longo do tempo (SILVA, 2015).

Conforme a NBR 13.438 (ABNT, 2013) o CCA pode ser classificado quanto à resistência à compressão e a densidade de massa aparente seca em quatro classes. A Tabela 1 apresenta estas classes e seus respectivos valores de resistência e densidade.

Tabela 1 - Classes de resistência à compressão do CCA

Classe	Resistência à compressão		Densidade Aparente Seca
	Valor Médio MPa	Mínimo Menor Valor isolado MPa	Média kg/m ³
C12	1,20	1,00	< 450
C15	1,50	1,20	< 500
C25	2,50	2,00	<550
C45	4,50	3,60	<650

Fonte: Adaptado de NBR 13.438 (ABNT, 2013).

2.3 Compósitos reforçados por fibras

Materiais cimentícios geralmente têm comportamento frágil e para melhorar esta característica são adicionados materiais que possuem maior capacidade de plasticidade frente aos esforços solicitantes. A adição de fibras - sintéticas ou naturais, de barras ou cordoalhas de aço - serve para ajudar na resistência à tração e cargas dinâmicas, já que na compressão o concreto apresenta bom desempenho (MELO FILHO, 2005).

Em países em desenvolvimento fibras naturais têm sido muito utilizadas para produzir compósitos de matriz cimentícia de pouca espessura e com baixo custo. As principais vantagens de sua utilização são o baixo custo, o baixo consumo de energia e sua abundância, além disso são biodegradáveis (MELO FILHO, 2005).

2.3.1 Fibras vegetais

O emprego de fibras naturais na confecção de compósitos é feito há muito tempo, para se ter uma ideia, há menções do uso de palha na armação de tijolos de barro em Êxodo 5:6-7 (BENTUR e MINDESS, 2007). Atualmente a utilização de fibras vegetais é resultante de um pensamento mais sustentável no que diz respeito ao destino dos materiais, além de possibilitar a melhora de propriedades como resistência mecânica, condutividade térmica, absorção acústica e isolamento acústico.

No Brasil os primeiros estudos sobre a aplicação de fibras naturais em compósitos com matriz cimentícia surgiram na década de 80 no Centro Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia (CEPED), as fibras utilizadas inicialmente eram fibras de coco, sisal, bambu, piaçava e bagaço de cana-de-açúcar

(MELO FILHO, 2005). Desde então, diversos estudos e pesquisas na ciência e engenharia dos materiais têm sido realizados visando a substituição das fibras sintéticas pelas fibras naturais. O aumento na quantidade de estudos é causado pelas vantagens econômicas e ambientais (CARVALHO, 2005).

Conforme Carvalho (2005), as fibras naturais podem ser consideradas como polímeros naturais, onde sua composição basicamente consiste em celulose, poliose e lignina, além de açúcares livres, proteínas, extrativos e produtos inorgânicos em menores quantidades. Os componentes químicos são distribuídos entre as paredes primária, secundária e terciária.

2.3.2 Casca e palha do arroz

Jauberthie et al. (2000) estudaram a composição da casca do arroz (CA) “in natura” a fim de determinar a origem da sílica e de outros componentes obtidos na cinza da CA, desta forma, possibilitando um melhor entendimento da estrutura do material. Em análises feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), após a casca ser seccionada transversalmente e tratada com peróxido de hidrogênio a fim de eliminar as substâncias orgânicas, foi encontrada grande concentração de sílica na superfície externa da CA e pequenas concentrações na superfície interna e no interior. A Tabela 2 apresenta os valores encontrados:

Tabela 2 – 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)

A alta concentração de sílica na casca do arroz “in natura” indica a possibilidade de sua incorporação em concreto leve, já que a natureza fibrosa do material e seu efeito pozolânico podem contribuir para redução da massa específica, aumento da resistência mecânica e durabilidade do concreto (JAUBERTHIE et al., 2000).

A palha do arroz (PA) “in natura” também possui certa quantidade de sílica, o que abre a possibilidade de seguir a tendência de aumento na resistência mecânica estipulado por (JAUBERTHIE et al., 2000). Conforme Nguyen et al. (2015) a PA em seu estado natural possui 7,36% de sílica, além de 38,7% de carbono, 2,37% de potássio, 1,13% de cálcio e 0,53% de magnésio, além de água.

2.3.3 Resistência mecânica e durabilidade de compósitos com fibras

O maior problema no uso de fibras vegetais como componente de reforço em compósitos de matriz cimentícia é a perda de resistência a médio e longo prazo, a qual é geralmente atribuída aos danos causados na fibra pelo efeito do material de cimentação. A alta alcalinidade do cimento é responsável por danificar as fibras, e, portanto, reduzir a resistência do material. Assim diversos estudos reportaram a presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como agente para a degradação das fibras vegetais (GRAM, 1998; MOHR et al., 2005; TOLEDO FILHO, et al., 2005; ARADANUY et al., 2011).

Jauberthie et al. (2003) fizeram o estudo da influência da casca do arroz em argamassa leve sob diferentes condições. O procedimento adotado pelos pesquisadores foi manter todas as amostras durante sete dias sob temperatura de 20°C e umidade relativa (UR) de 100%. Após este período as amostras foram separadas em dois grupos. O primeiro grupo foi submetido à uma temperatura de 20°C e umidade relativa de 50% e o segundo grupo à temperatura de 20°C e UR de 95%. Os dois grupos ficaram nestas condições durante um ano. A Tabela 3 apresenta os resultados de resistência mecânica obtidos para cada caso.

Tabela 3 – 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

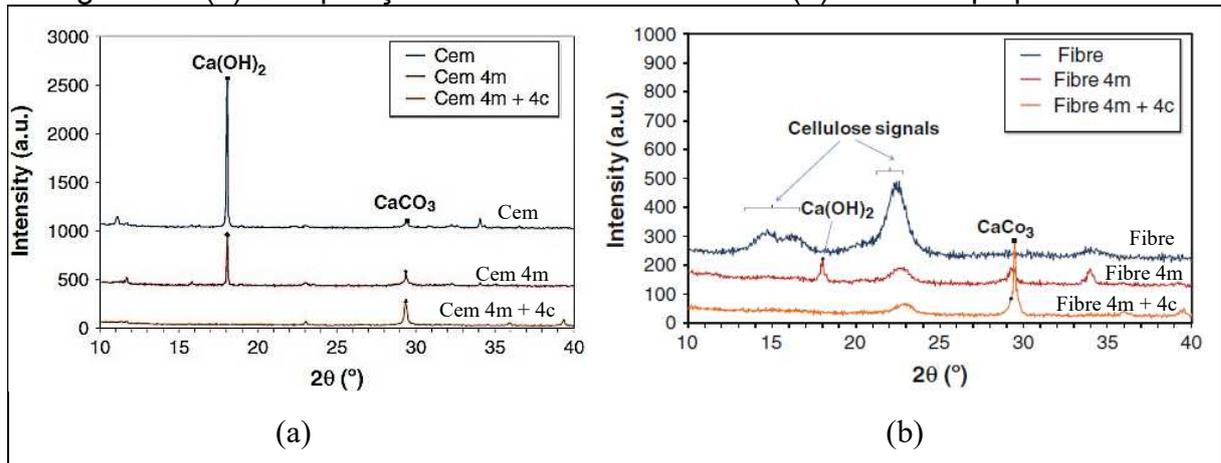
Fonte: Adaptado de JAUBERTHIE et al. (2003)

Segundo Jauberthie et al. (2003), as densidades de ambos os tipos de armazenamento estão compreendidas dentro do erro experimental. Quanto à resistência à tração na flexão em três pontos é notável o decréscimo do valor em função do aumento na umidade relativa. Fato divergente na resistência à compressão axial, onde os valores foram superiores nos compósitos que ficaram sob umidade relativa superior.

Estas relações da resistência mecânica com a umidade relativa sugerem que em alta conservação de umidade haja um aumento da atividade pozolânica, gerando aumento de resistência à compressão, no entanto, a alta UR também possibilita uma redução do grau de reforço das fibras, o que além de gerar menor resistência à tração na flexão também reduz a ductilidade dos compósitos (JAUBERTHIE et al., 2003).

O resultado encontrado por Jauberthie et al. (2003), corrobora com o estudo feito por Ardanuy et al. (2011), no qual foi determinada a intensidade de Ca(OH)_2 , CaCO_3 e sinais de celulose. A Figura 3 ilustra a presença destes componentes em material cimentício (Figura 3a) e nas fibras de polpa de kraft (Figura 3b) em diferentes idades e sob diferentes tratamentos.

Figura 3 – (a) Composição de amostra cimentícia e (b) fibras de polpa de Kraft



Fonte: Adaptado de ARDANUY et al. (2011)

A Figura 3a ilustra a composição de amostras de pasta de cimento submetidas a Difração de Raios X (DRX) sob três idades diferentes, sendo a primeira delas logo após a mistura com polpa de Kraft, a segunda delas após quatro meses de cura a temperatura ambiente e a terceira após quatro meses de cura e quatro ciclos de molhagem e secagem. Observa-se que na primeira idade o primeiro pico corresponde a hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e o segundo corresponde a carbonato de cálcio (CaCO_3). Após quatro meses o sinal de hidróxido de cálcio diminuiu, enquanto o sinal de carbonato de cálcio aumentou, e assim acentuou-se após quatro meses sob quatro ciclos de molhagem e secagem (ARDANUY et al., 2011).

O estudo da composição das fibras de polpa de Kraft ocorreu nos mesmos períodos que a pasta de cimento. Como pode ser observado na Figura 3b inicialmente as fibras apresentaram apenas sinais de celulose, e após quatro meses em contato com a pasta de cimento as fibras passaram a apresentar sinal de hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio, além da redução do sinal da celulose, possivelmente pela ação alcalina do cimento. A partir dos quatro ciclos de molhagem e secagem o hidróxido de cálcio desapareceu e o carbonato de cálcio teve um aumento significativo (ARDANUY et al., 2011).

A constatação feita por Jauberthie et al. (2000) e por Nguyen et al. (2015) de que a casca e a palha do arroz possuem presença de sílica em seu estado natural, juntamente com a comprovação de que o hidróxido de cálcio oriundo do cimento é encontrado nas fibras (Ardanuy et al., 2011), indicam que provavelmente há reação pozolânica, o que gera o aumento da resistência à compressão axial encontrado por Jauberthie et al. (2003).

A fim de obter uma visão ampla das resistências necessárias para os materiais com função de vedação, foram buscadas nas normas brasileiras, resistências mínimas requisitadas para diferentes materiais, visto que o concreto celular curado em baixa temperatura, material que possui propriedades mais semelhantes aos compósitos, não tem norma específica para caso de pré-moldado. Foram buscadas três normas que apresentam resistência mínima para diferentes tipos de materiais utilizados para fins de vedação:

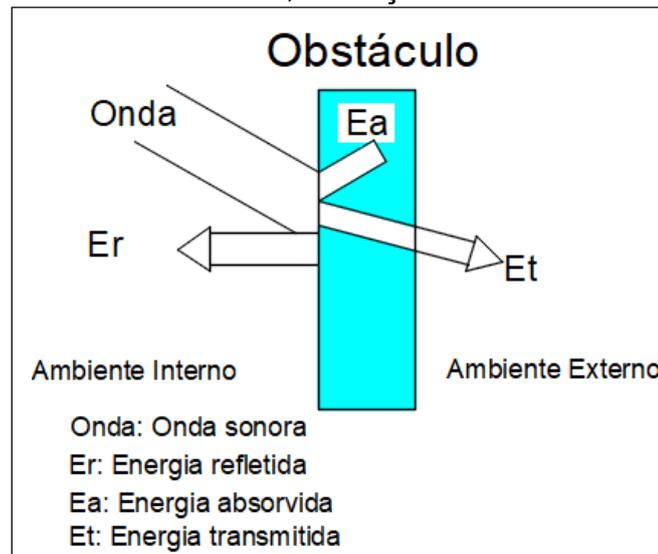
- NBR 15.270 (ABNT, 2005): determina resistência mínima de 1,50 MPa para blocos cerâmicos com furos usados na horizontal;
- NBR 13.438 (ABNT, 2013): determina as resistências do concreto celular autoclavado em função da densidade aparente seca, a Tabela 1 apresenta os valores mínimos e médios requeridos pela norma;
- NBR 6136 (ABNT, 2014) determina resistência mínima de 3,00 MPa para blocos de concreto simples sem função estrutural.

2.4 Desempenho acústico

O efeito do som no desempenho acústico das edificações pode ser explicado de maneira simplificada pela Figura 4, onde se tem uma onda sonora colidindo com um obstáculo, e sua divisão em três direções distintas. Cada uma destas direções que a energia toma a partir do contato com o material é um fator determinante para o desempenho acústico dos ambientes (SILVA 1971).

Conforme ilustrado na Figura 4 uma parcela da energia que incide no material reflete para o interior do ambiente, esta divisão da energia é representada na Figura 4 pelo “Er” (energia refletida). A energia absorvida (“Ea”) é transmitida através dos poros do material, e, por vibração longitudinal do mesmo, é transformada em energia calorífica ou mecânica. A energia que não é isolada nem absorvida no ambiente é representada pelo “Et”, essa sobra de energia acústica é transmitida para o ambiente adjacente (SILVA, 1971).

Figura 4 - Transmissão, absorção e reflexão de ruídos



Fonte: Adaptado de SILVA (1971)

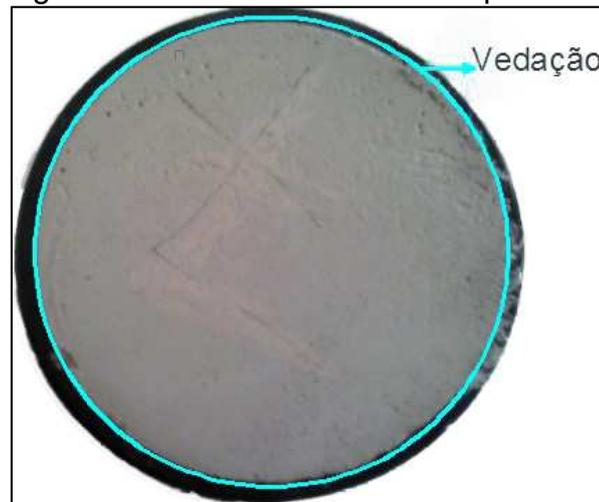
As propriedades acústicas dos materiais sólidos, como isolamento acústico, absorção sonora, impedância e coeficiente de reflexão podem ser determinadas em câmara reverberante, tubo de impedância ou em campo livre simulado (LIMA, 1999).

2.4.1 Tubo de impedância

Os métodos usados para determinar as características acústicas em tubo de impedância são relativamente simples e de fácil implementação. O princípio básico de funcionamento do tubo é baseado na superposição de duas ondas planas. A primeira onda emitida pela fonte sonora, percorre o tubo até se deparar com a superfície da amostra do material, posicionada em uma das extremidades, sendo então parcialmente refletida. A superposição das ondas planas incidente e refletida resulta em um padrão de onda estacionária, a partir do qual pode-se determinar a impedância acústica do material e seus coeficientes de reflexão e absorção sonora para incidência normal (LIMA, 1999).

Allard e Daigle (1994) alertam para que seja feito um encaixe excelente entre a amostra e o tubo de impedância, porém, ainda é necessário fazer uma vedação entre o tubo e as amostras para que a onda acústica colida com o material ensaiado sem que uma parcela passe através de alguma fresta entre o obstáculo e o tubo. Considerando que quaisquer defeitos nesta fase do procedimento alteram consideravelmente os picos de absorção medidos. A Figura 5 ilustra a amostra encaixada no tubo de impedância e o local onde deve ser feita a vedação.

Figura 5 – Amostra no tubo de impedância



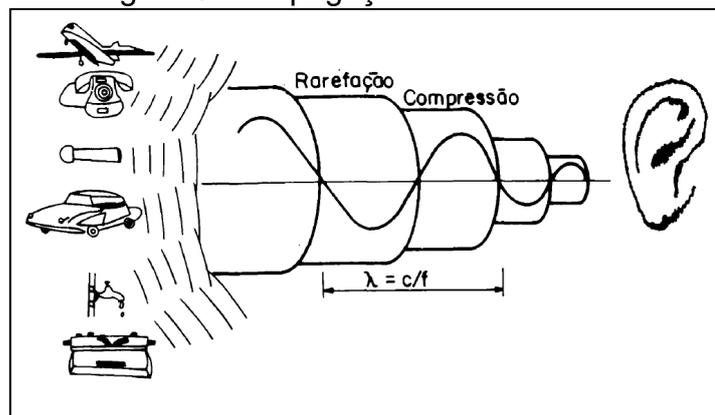
Fonte: Adaptado de ALLARD e DAIGLE (1994)

2.4.2 Pressão sonora

Para melhor clareza nas características acústica medidas é necessário entender a origem dos ruídos e como ele é dissipado em meios sólidos e fluídos. O conceito preliminar para estes estudos é o da pressão sonora, o qual é uma variação na pressão originada pelo movimento de partículas que propicia o ruído.

O ruído é causado por meio da velocidade das moléculas do meio ou pela variação da pressão, portanto o ruído é uma forma de energia que é transmitida através da colisão das moléculas do meio. Assim, o som pode ser representado por uma série de compressões e rarefações do meio em que se propaga, a partir de determinada fonte sonora (Figura 6) (GERGES, 2000).

Figura 6 - Propagação da onda sonora



Fonte: Adaptado de GERGES (2000).

Gerges (2000) afirma que a agitação das moléculas responsável pela transmissão do ruído em um meio não tem deslocamento permanente das mesmas, ou seja, não há transferência de matéria, apenas de energia (com exceção de alguns casos, como por exemplo, em locais próximos a grandes explosões). A taxa de

ocorrência da flutuação completa da pressão é conhecida como frequência, a qual pode ser dada em ciclos por segundo ou em Hertz (Hz), que é a designação dada internacionalmente. As percepções de som do ser humano variam de acordo com a faixa de frequência, conforme a Tabela 4, mesmo na faixa de frequência audível, o ouvido humano não é igualmente sensível.

Tabela 4 - Faixas de frequência perceptíveis para o ser humano

Vibrações	Frequência	Audição
Infrassons	Abaixo de 20 Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano
Baixas frequências	De 20 a 200 Hz	Sons graves
Médias frequências	De 200 a 2000 Hz	Sons médios
Altas frequências	De 2000 a 20000 Hz	Sons agudos
Ultrassons	Acima de 20000 Hz	Não perceptíveis ao ouvido humano

Fonte: Adaptado de CARVALHO, 2006

Segundo Carvalho (2006) é importante ter em mente a condição de que a audibilidade humana depende de dois fatores, sendo o primeiro a frequência ou flutuação completa de pressão, já descrita acima, e o segundo a amplitude de pressão acústica. O segundo fator se refere a magnitude da flutuação de pressão total em comparação com a pressão atmosférica estática (aproximadamente 1000 milibar em condições normais de temperatura e pressão). Conforme a Equação 1 tem-se:

$$P(t) = P_t(t) - P(a) \quad (1)$$

Sendo:

$P_{(t)}$: amplitude de pressão acústica;

$P_{t(t)}$: magnitude da flutuação de pressão total;

$P_{(a)}$: pressão atmosférica estática.

Para a produção de um ruído desconfortável basta uma variação de pressão na ordem de 10^{-1} milibar. Na faixa de audição humana mais sensível, de 1000 Hz a 4000 Hz, uma alteração de pressão de 2×10^{-7} milibar pode ser detectada (GERGES, 2000).

2.4.3 Onda plana ou onda de propagação unidimensional

A onda plana é o tipo mais simples de onda propagada através de meios fluídos. A principal característica destas ondas é que a pressão acústica e o deslocamento da partícula têm a mesma amplitude em todos os pontos de qualquer plano perpendicular à direção de propagação, ou seja, é unidimensional. Qualquer tipo de onda divergente num meio homogêneo assume característica de onda plana quando se propaga a grande distância da fonte (GERGES, 2000).

2.4.4 Grandezas acústicas

O ouvido humano responde a uma larga faixa de intensidade acústica que pode variar desde a audição até o limiar da dor. Como exemplo, pode-se colocar que a uma frequência de 1000 Hz a intensidade acústica capaz de causar a sensação de dor é 10^{14} vezes a intensidade acústica capaz de causar simplesmente a sensação de audição. Como pode-se notar é difícil expressar números de ordem de grandeza tão diferentes em uma mesma escala linear, portanto, usa-se a escala logarítmica. Se for usado $\log 10$ para essa divisão, a razão entre as intensidades citadas acima será $\log 10^{14}$, ou seja, 14 divisões de escala, para o fator de divisão $\log 10$ dá-se o nome de Bel. Como Bel é um valor de divisão de escala muito grande pode-se usar o decibel (dB), o qual é um décimo do Bel. Portanto, o exemplo anteriormente citado seria dividido em 14 Bel ou 140 decibéis. A Equação 2 apresenta o nível de intensidade acústica (NI) (GERGES, 2000):

$$NI = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Sendo:

NI: nível de intensidade acústica em decibéis;

I: intensidade acústica em Watts/m²;

I_0 : intensidade de referência (10^{-12} Watts/m², valor correspondente a intensidade de um tom de 1000 Hz que é levemente audível pelo ouvido humano).

Outra definição para nível sonoro em decibéis é feita através de uma escala absoluta relacionada a pressão. A Equação 3 representa o nível sonoro (MAIA, 2003):

$$NPS = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (3)$$

Sendo:

NPS: nível de pressão sonora em decibéis;

P: amplitude das flutuações de pressão sonora em μ Pa;

P_0 : o valor de referência da pressão sonora.

Além do Nível de Intensidade Acústica (NI) e do Nível de Pressão Sonora (NPS) existe o Nível de Potência Sonora (NWS), o qual é definido na Equação 4:

$$NWS = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{10^{-12}} \right)^2 \quad (4)$$

Sendo:

NWS: nível de potência sonora;

W: potência sonora em Watts;

10^{-12} : potência sonora de referência em watts análoga a intensidade I_0 da Equação 2.

2.4.5 Absorção acústica

Segundo Flach (2012) a absorção acústica é a capacidade de um material diminuir a reflexão das ondas sonoras, atenuando ou eliminando o nível de reverberação, o que possibilita melhorar a qualidade da audição.

A qualidade na audição dentro de um ambiente é determinada pela capacidade de absorção sonora, que depende dos materiais que estão dentro do recinto. Essa capacidade deve-se às perdas de energia sonora na superfície e na espessura do material. A capacidade de um material absorver som varia conforme sua densidade, módulo de elasticidade e outras propriedades físicas (GERGES, 2000).

A onda sonora entra nos materiais fibrosos pelos seus interstícios, o que faz com que as fibras vibrem e causa a dissipação da energia pelo atrito entre elas (GERGES, 2000). Os materiais absorventes são constituídos por uma parte sólida, responsável pela forma do material, e uma parte fluída, que pode ser o ar presente no interior da estrutura. Os modelos matemáticos utilizados para descrever a propagação de ondas sonoras em materiais absorventes são escolhidos pela classificação de seu módulo de elasticidade e não quanto ao módulo volumétrico do mesmo (LIMA, 1999).

As principais propriedades dos materiais utilizados para os modelos matemáticos são:

- Porosidade;
- Resistividade ao fluxo de ar;
- Tortuosidade;
- Módulo de elasticidade;
- Densidade da estrutura do material.

As três primeiras se referem às interações que o ar, no interior do material, está sendo submetido. Essas interações são difíceis de serem determinadas em escala microscópica, devido à complexidade geométrica dos poros. Por isso o material é avaliado em escala macroscópica em volume suficientemente grande para que possa ser considerado homogêneo (ALLARD, et al. 1989 apud LIMA 1999).

No Brasil a NBR 12.179 (ABNT, 1992) apresenta valores de absorção para alguns materiais de uso comum na construção civil. A Tabela 5 apresenta os coeficientes de absorção acústica de alguns desses materiais. Estes coeficientes variam entre valores de 0 a 1 sendo que o valor do coeficiente de absorção é diretamente proporcional ao ruído absorvido pelo material.

Tabela 5 – Coeficientes de absorção acústica de materiais da construção civil

Material	Frequências (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Reboco áspero, cal	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Reboco liso	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06
Teto pesado suspenso (de gesso)	0,02	-	0,03	-	0,05	-
Superfície de concreto	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07

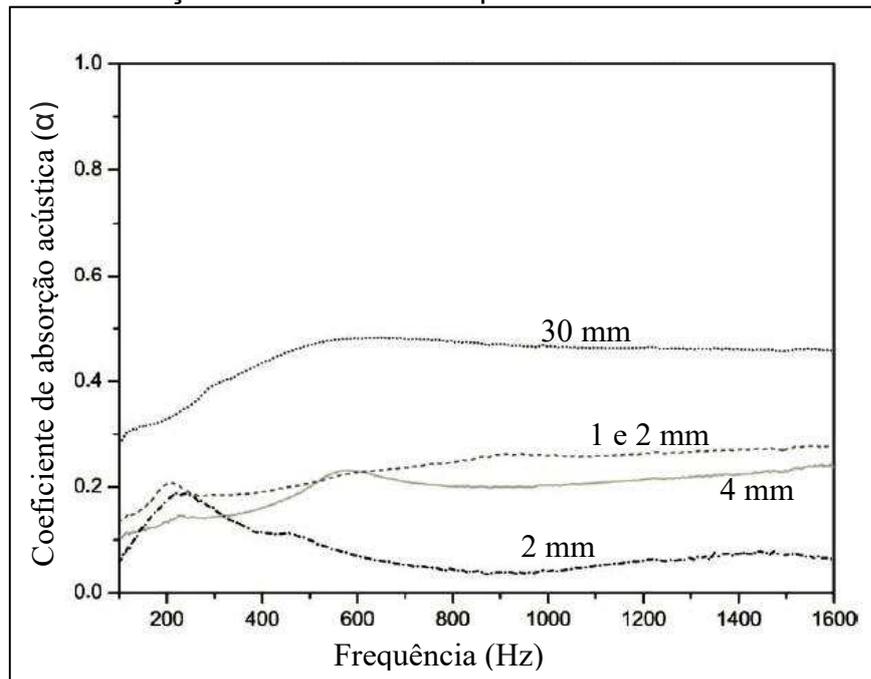
Fonte: Adaptado NBR 12.179 (ABNT, 1992)

Alguns estudos para desenvolver materiais mais tecnológicos com funcionalidade de vedação nas edificações, visam aprimorar a absorção acústica dos produtos. Embora em grande parte dos ambientes residenciais – como salas, dormitórios, cozinhas - não seja observado grandes problemas na absorção de ruídos aéreos, devido a presença de móveis como sofás, poltronas, camas, cadeiras estofadas, que são ótimos absorventes acústicos, recintos sem essa característica sofrem reverberação de som constantemente, caso observado em banheiros, salões de festa, igrejas, teatros, etc. Quanto aos ruídos de impacto, existe grande problema em edificações multifamiliares, e para esta situação, principalmente a compartimentação horizontal necessita de grande evolução na capacidade de absorver som.

Atualmente o enfoque dos estudos está acondicionado em combinar em um único material, elementos porosos de baixa densidade e elementos pesados com trechos sem vazios. Para obter esse padrão tem sido muito utilizado a combinação de concreto, argamassa, pasta de cimento ou cerâmica com fibras. Em vista disto, Pisello et al. (2016) criaram compósitos de matriz cimentícia com resíduos de madeira com dimensões de 30 mm e moídos para dimensão de 1 mm, 2 mm, 4 mm, e Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) criaram compósitos de argamassa convencional e migalhas de pneus.

Um exemplo de compósitos desenvolvidos para esse fim são as misturas de cimento, água e madeira feitas por Pisello et al. (2016). Os compósitos foram produzidos com cimento e madeira triturada em 1 e 2 mm misturados, 2 mm, 4 mm e 30 mm. A Figura 7 ilustra o desempenho dos compósitos quanto ao potencial de absorção acústico.

Figura 7 – Absorção acústica dos compósitos com resíduos de madeira



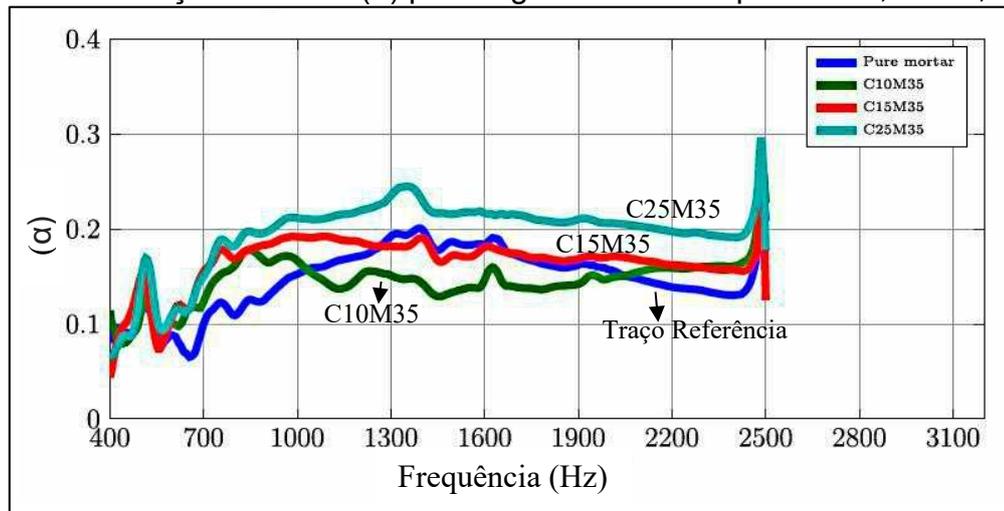
Fonte: Adaptado de PISELLO et al. (2016).

Como pode ser visto os compósitos com 4 mm e com 1 e 2 mm estão associadas a um desempenho semelhante, possuindo um valor médio de cerca de 0,20. Já os compósitos com 2 mm sem mistura obtiveram um comportamento muito fraco, ficando com valores geralmente inferiores a 0,10. Por fim a amostra com adição de madeira de 30 mm obteve uma capacidade de absorver ruído bastante superior, ficando associada a valores entre 0,40 e 0,50.

Na pesquisa realizada por Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) migalhas de pneus foram adicionadas à argamassa a fim de melhorar suas propriedades de absorção acústica. Para produção dos compósitos foram utilizadas substituições de cimento Portland por borracha, em porcentagens de 10%, 15% e 25% de migalhas de pneus, denominados respectivamente de C10, C15 e C25. Para cada porcentagem de migalha foram colocadas duas faixas de comprimento das migalhas. A primeira possuía dimensão variável entre 0,50 e 1,00 mm, denominada de M35. O segundo comprimento utilizado foi da faixa de 0,25 à 0,50 mm, sendo este denominado de M60. Portanto foram estudados no total seis compósitos (C10M35, C15M35, C25M35, C10M60, C15M60, C25M60) e um traço referência sem adição de borracha.

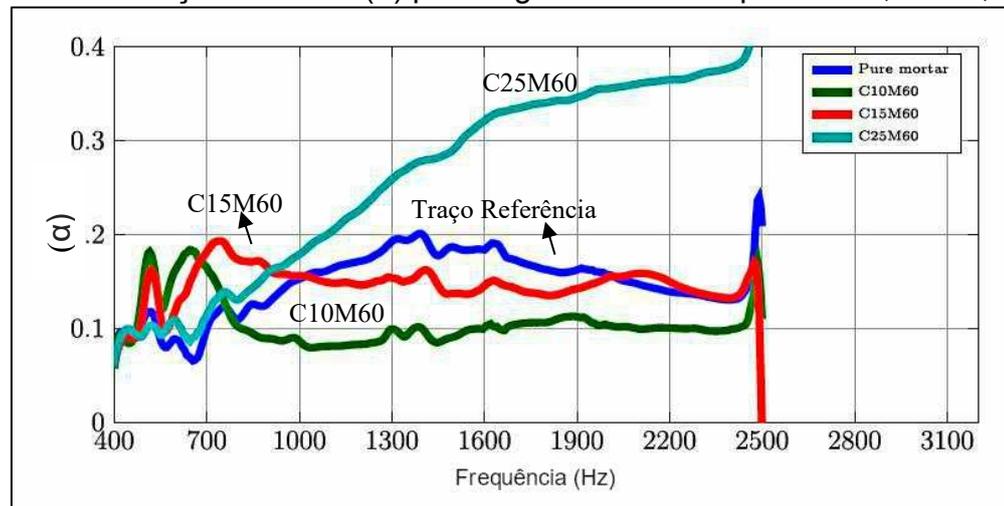
Como pode ser observado na Figura 8 e na Figura 9 os materiais com maior porcentagem de migalhas obtiveram maior capacidade de absorção sonora.

Figura 8 - Absorção acústica (α) para argamassas com pneu de 0,50 a 1,00 mm



Fonte: Adaptado de CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI e SERPA, 2017

Figura 9 – Absorção acústica (α) para argamassas com pneu de 0,25 a 0,50 mm



Fonte: Adaptado de CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI e SERPA, 2017

A principal atribuição dada por Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) para a maior capacidade de absorção dos materiais foi a porosidade. Além das argamassas C25M35 e C25M60 possuírem maior quantidade de migalhas de pneus (25%) e maior porosidade, elas apresentaram poros mais abertos, fato indicado através de microtomografia de raios X. O trabalho concluiu que a adição de migalhas de pneus é benéfica para a absorção acústica, visto que aumenta a porosidade e aumenta a dimensão dos poros (CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI e SERPA, 2017).

2.4.6 Isolamento acústico

O isolamento acústico caracteriza-se pela capacidade que determinados materiais tem em formar um obstáculo, impossibilitando que a onda sonora atravesse de um ambiente ao outro. Os materiais pesados como concreto e chumbo possuem boas características em relação ao isolamento (CARVALHO, 2006).

Méndez et al. (1994) salienta que o fator mais importante na capacidade de isolamento acústico de um material é a porosidade, a qual é inversamente proporcional a capacidade de isolamento do material. Outras características que podem influenciar o transpasse do som de um ambiente a outro é o nível sonoro no local de emissão, distribuição espectral do ruído, índice de redução sonora da parede divisória, superfície da parede divisória, absorção total do local receptor e a natureza das paredes adjacentes, devido às transmissões que ocorrem pelos flancos.

Em concordância com Méndez et al. (1994) e Carvalho (2006), a Lei de Berger ou “Lei fundamental do isolamento acústico” determina que um bom isolamento ocorre quando é utilizado como material isolante um elemento, cuja resistividade acústica seja a mais diferente possível daquilo que se quer isolar. De acordo com a Lei, compreende-se que para isolar o som que se propaga no ar, devem ser utilizados materiais sólidos, resistentes e pesados, diferente do que ocorre, quando se deseja isolar o som que se propaga nos sólidos, quando o mais recomendado é utilizar materiais leves e porosos (NEUBAUER, 2009).

A NBR 12.179 (ABNT,1992) regulamenta o tratamento acústico em recintos fechados. A norma apresenta a definição teórica de alguns termos utilizados para a acústica, bem como traz alguns valores não restritivos para diversos materiais utilizados na construção civil (Tabela 6).

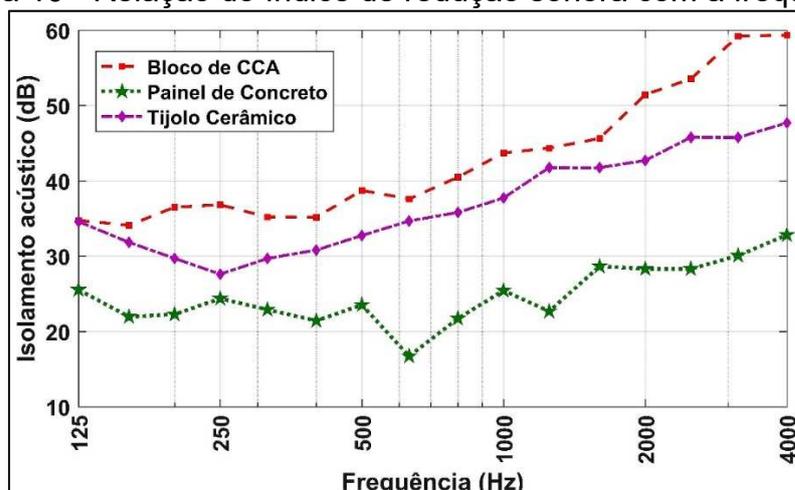
Tabela 6 – Isolamento acústico de materiais de construção civil

Material	Frequência (500Hz)
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 10cm)	45,00 dB
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 20cm)	50,00 dB
Alvenaria de tijolo furado (espessura de 25cm)	53,00 dB
Chapas ocas de gesso (espessura de 10cm)	10,00 dB
Concreto - Lajes entre pavimentos	18,00 dB

Fonte: Adaptado NBR 12.179 (ABNT, 1992, p.5)

Em relação a produção científica na área de desempenho acústico, o isolamento acústico dos materiais é tratado como sinônimo de perda de transmissão sonora, sendo ambos em dB. Diversos autores buscam desenvolver materiais com maior capacidade de isolamento, enquanto outros vêm catalogando materiais já utilizados quanto ao seu desempenho. Garcia (2004) determinou os índices de redução sonora de alguns materiais em uma faixa de frequência de 125 Hz a 4.000 Hz. A Figura 10 ilustra um gráfico comparativo entre os materiais.

Figura 10 - Relação do índice de redução sonora com a frequência

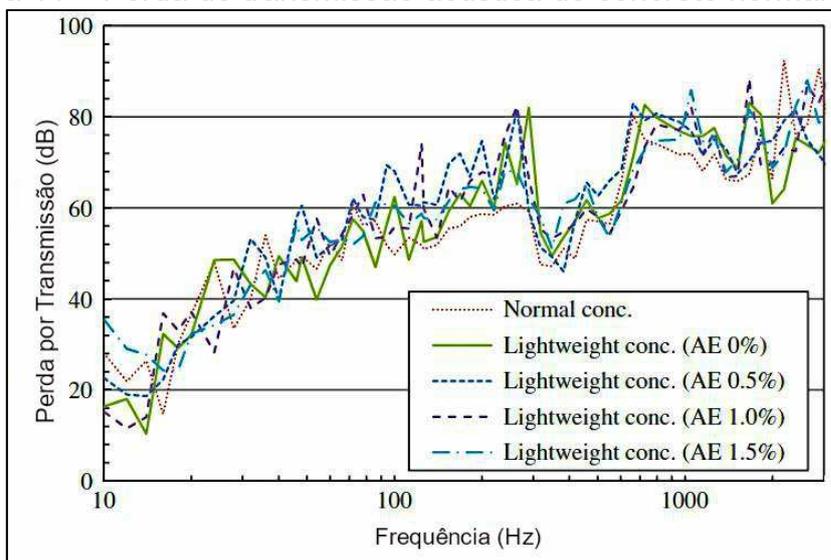


Fonte: Adaptado de GARCIA, 2004

Conforme a Figura 10 pode-se perceber que a densidade não é o único fator considerado para o desempenho de isolamento sonora. É evidente que o CCA (concreto celular autoclavado) possui a menor densidade dentre os materiais apresentados no gráfico, e mesmo assim apresenta a maior capacidade de isolamento.

H. K. Kim e Jeon (2011) também concluíram que a densidade do material também não foi fator preponderante para redução do isolamento acústico. A Figura 11 apresenta os materiais estudados por H. K. Kim e Jeon (2011). Conforme a legenda que consta no gráfico, por tradução direta, os materiais são o concreto normal (*Normal conc.*) e o concreto leve (*Lightweight conc.*). O agente espumígeno (AE) foi utilizado em substituição ao cimento em peso em quatro porcentagens: 0% (somente agregado leve), 0,5%, 1,0% e 1,5%.

Figura 11 – Perda de transmissão acústica do concreto normal e leve



Fonte: Adaptado de H. K. KIM e JEON, 2011

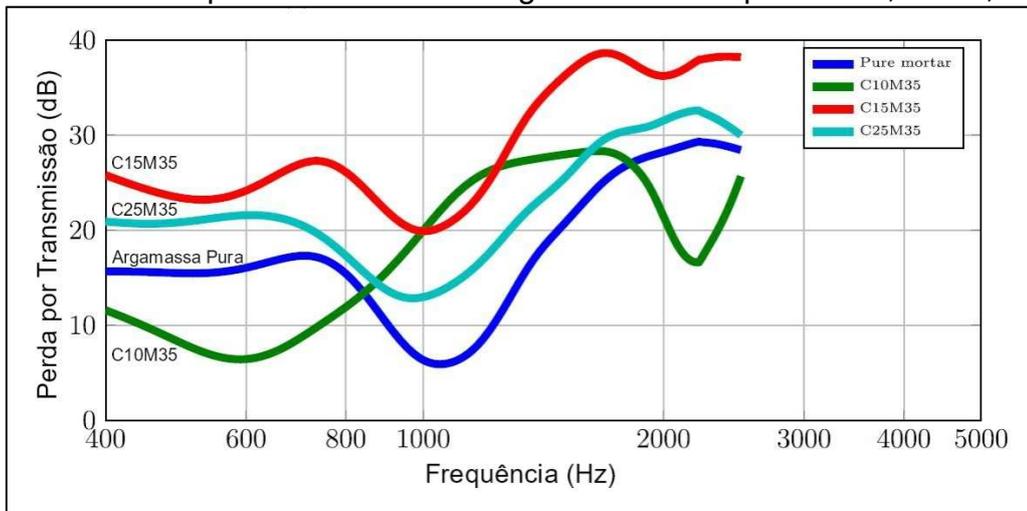
H. K. Kim e Jeon (2011) afirmam que a perda de transmissão acústica dos concretos leve em relação ao concreto normal foi praticamente constante, fato que pode ser observado na Figura 11. Este padrão seguiu o observado por Garcia (2004), onde a densidade e a porosidade não foram fatores tão influentes no isolamento acústico, divergindo da Lei de Berger.

Conforme descrito na seção 2.4.5 (Absorção Acústica), Allard et al., 1989 apud Lima 1999 também definiu que os fatores mais preponderantes para o desempenho acústico, além da densidade e da porosidade, são a resistividade ao fluxo de ar, a tortuosidade e o módulo de elasticidade. Fator este que justifica os resultados semelhantes obtidos entre o concreto normal (*Normal conc.*) e os concretos leves em geral (*Lightweight conc.*).

Para uma proposta com a utilização de resíduos, compósitos de argamassa com migalhas de pneus foram produzidos a fim de definir as propriedades de isolamento acústico em comparação à argamassa convencional. Para produção dos compósitos foram utilizadas substituições de cimento Portland por borracha, em massa, em porcentagens de 10%, 15% e 25% de migalhas de pneus, denominados respectivamente de C10, C15 e C25. Para cada porcentagem de migalhas foram colocadas duas faixas de comprimento. A primeira delas possuía dimensão variável entre 0,50 e 1,00 mm, a qual foi denominada de M35. O segundo comprimento utilizado foi da faixa de 0,25 à 0,50 mm, sendo este denominado de M60. Portanto foram estudados no total seis compósitos (C10M35, C15M35, C25M35, C10M60, C15M60, C25M60) e um traço referência sem adição de borracha (CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI E SERPA, 2017).

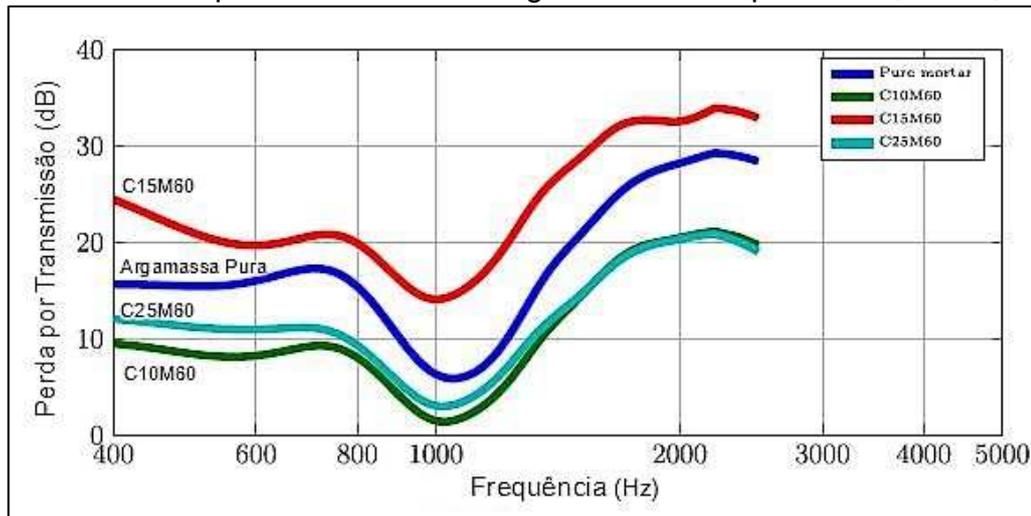
Os valores encontrados para perda por transmissão para os compósitos com migalhas de pneus e para o traço de argamassa pura foram muito próximos, onde novamente os traços mais leves (todos com adição de borracha) não apresentaram menor capacidade de isolamento de som, tendo estes inclusive na porcentagem de 15% de substituição para as duas faixas de comprimento o melhor desempenho (Figura 12 e Figura 13).

Figura 12 - Perda por transmissão de argamassas com pneu de 0,50 a 1,00 mm



Fonte: Adaptado de CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI e SERPA, 2017

Figura 13 – Perda por transmissão de argamassas com pneu de 0,25 a 0,50 mm



Fonte: Adaptado de CORREDOR-BEDOYA, ZOPPI e SERPA, 2017

Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) concluíram que a adição de migalha de pneu tem influência positiva na argamassa para a porcentagem de 15% de substituição de cimento em massa. Ainda é indicada a tendência de que as migalhas de maior comprimento aumentaram a perda por transmissão, já que na faixa de comprimento de 0,50 mm à 1,00 mm a substituição de 15% e 25% tiveram suas curvas totalmente superiores à argamassa pura, e a porcentagem de 10% ainda teve melhor resultado em uma pequena faixa de frequência. Nos compósitos com migalhas menores apenas a porcentagem de 15% obteve desempenho superior.

2.5 Desempenho Térmico

A condutividade térmica é uma propriedade intrínseca do material. O embasamento teórico da condutividade térmica foi baseado na norma brasileira de desempenho térmico NBR 15.220 (ABNT, 2005) e em alguns estudos que se assemelham ao trabalho realizado (estado da arte). Foram apresentadas pesquisas publicadas em periódicos visando comparar os resultados obtidos e delimitar quais foram os fatores determinantes para os valores encontrados na pesquisa.

2.5.1 Condutividade térmica

A NBR 15.220 (ABNT, 2005) define a condutividade térmica como uma propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, onde tem-se um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. A condutividade térmica é expressa em $\text{W}/(\text{m.K})$ e o símbolo utilizado para identificação é a letra grega lambda (λ).

A Tabela 7 apresenta valores de condutividade térmica de alguns materiais comumente empregados na construção civil. Os dados foram retirados da NBR 15.220 (ABNT, 2005) e são de caráter não restritivo. Cada material apresenta seu valor de densidade aparente e condutividade térmica correlacionados.

Tabela 7 – Densidade aparente e condutividade térmica

Material	ρ kg/m^3	λ $\text{W}/(\text{m.K})$
Argamassa comum	1800-2100	1,15
Argamassa celular	600-1000	0,40
Tijolos e telhas de barro	1400-1800	0,65
Concreto normal	2200-2400	1,75
Concreto com argila expandida: dosagem de cimento $> 300 \text{ kg/m}^3$, densidade dos inertes $> 350 \text{ kg/m}^3$	1000-1200	0,46
Concreto com argila expandida: dosagem de cimento $< 250 \text{ kg/m}^3$, densidade dos inertes $< 350 \text{ kg/m}^3$	< 600	0,20
Concreto celular autoclavado	400-500	0,17
Placa de gesso; gesso cartonado	750-1000	0,35
Palha (capim Santa Fé)	200	0,12

Fonte: Adaptado NBR 15.220 (ABNT, 2005, p.12)

A viabilização de novos materiais que visam contribuir para a indústria da construção civil vem aumentando em pesquisas a nível nacional e internacional. Correia (2009) determinou a condutividade do novo gesso (material desenvolvido pelo autor). A condutividade térmica foi determinada pelo método do fio quente e é apresentada na Tabela 8 em função da pressão de compactação empregada.

Tabela 8 – Efeito da compactação na condutividade térmica do novo gesso

Pressão de Compactação (MPa)	Densidade g/cm ³	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)	Condutividade Térmica (W/m.K)
0,50	1,55 ±0,05	10 ±1,0	30 ±3,0	0,64 ±0,02
1,00	1,68 ±0,02	11 ± 1,0	33 ±2,0	0,67 ±0,02
3,00	1,85 ±0,02	13 ±1,0	40 ±3,0	0,92 ±0,01
5,00	1,90 ±0,01	15 ±1,0	50 ±3,0	0,98 ±0,01
8,00	1,94 ±0,01	25 ±1,0	80 ±3,0	1,02 ±0,01

Fonte: Adaptado de CORREIA, 2009

Os cinco tipos de novo gesso estudados por Correia (2009) apresentaram condutividade térmica diretamente proporcional à pressão de compactação e à densidade dos materiais. Comprovando que quanto mais denso e menos poroso for o material mais elevada será sua condutividade térmica.

Sacht, Rossignolo e Santos (2010) determinaram a condutividade térmica de concretos leves com argila expandida, onde foram feitas relações com a massa específica. A determinação dos valores de condutividade foi realizada pelo método do fio quente paralelo. A Tabela 9 apresenta os dados obtidos:

Tabela 9 – Valores de massa específica e condutividade térmica.

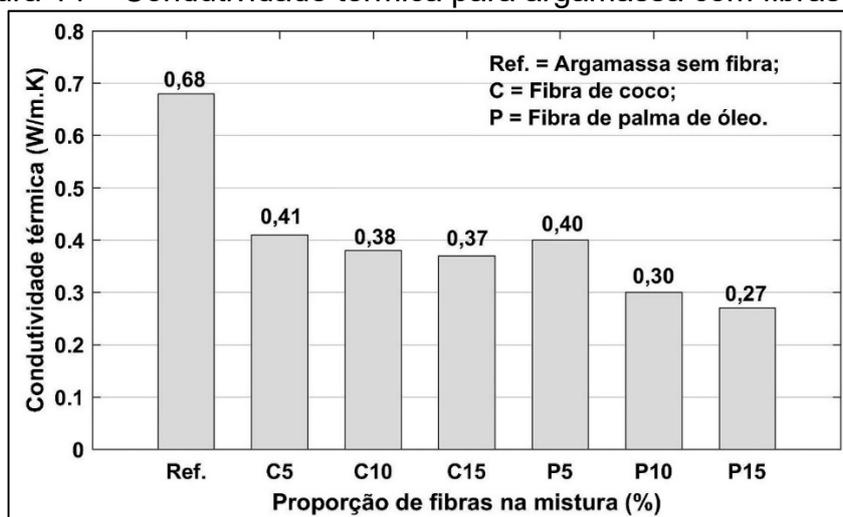
Traço	Massa Específica Seca aos 28 dias (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Desvio Padrão Condutividade Térmica
(1)	2364,00	1,80	0,02
(2)	2014,00	1,39	0,11
(3)	1781,00	1,06	0,03
(4)	1589,00	0,94	0,10
(5)	1216,00	0,54	0,23

Fonte: Adaptado de SACHT, ROSSIGNOLO & SANTOS, 2010

Para o concreto leve com argila expandida a massa específica seca (densidade) foi o fator preponderante para o desempenho térmico. A proporcionalidade entre a condutividade térmica e a densidade foi a mesma da encontrada por Correia (2009) para o novo gesso, mostrando aí uma tendência.

O estudo da condutividade térmica com compósitos utilizando fibras vegetais feito por Lertwattanakul e Suntijitto (2015) é apresentado na Figura 14. As fibras foram substituindo o cimento em peso em diferentes porcentagens, sendo elas de 5%, 10% e 15%, a primeira foi a fibra de coco (C) e a segunda foi a fibra de palma de óleo (P), ambas as fibras possuíam comprimento distribuído entre 5 mm e 10 mm.

Figura 14 – Condutividade térmica para argamassa com fibras vegetais



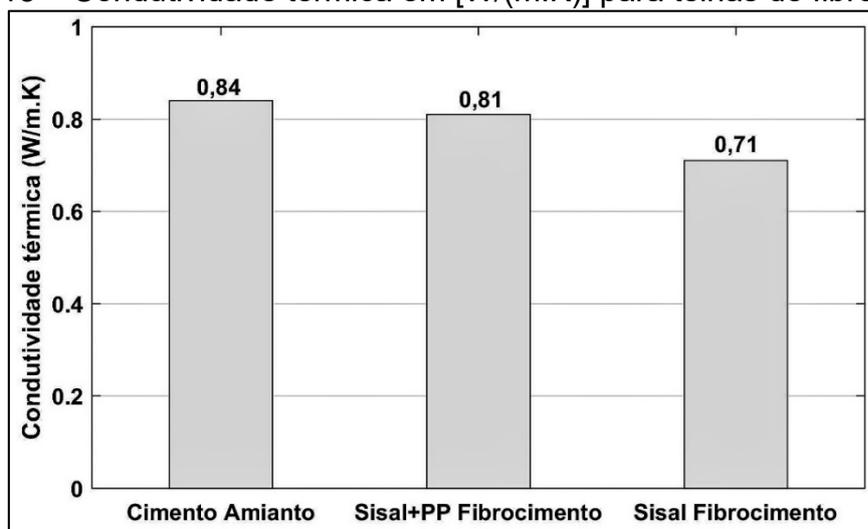
Fonte: Adaptado de LERTWATTANARUK e SUNTIJITTO, 2015

A medida que as proporções de fibras aumentaram o coeficiente de condutividade térmica foi diminuindo. Essa perspectiva se mostrou correta para os dois tipos de fibras. O aumento do volume de fibras na proporção da mistura tende a aumentar o volume de poros, gerando menor densidade aparente e maior porosidade. Esses fatores geram a redução da condutividade (LERTWATTANARUK e SUNTIJITTO, 2015).

Como determinado por Correia (2009), Sacht, Rossignolo e Santos (2010), Lertwattanakuk e Suntijitto (2015), a massa específica é um fator com grande influência na condutividade térmica dos materiais. Sendo assim buscou-se pesquisas que equalizaram a massa específica e determinaram a influência direta das fibras no desempenho térmico dos materiais.

Em 2011, uma pesquisa sobre a performance térmica de telhas de fibrocimento reforçadas por sisal, foi realizada afim de melhorar as propriedades térmicas de coberturas. A determinação da condutividade térmica foi feita pelo método do fio quente paralelo e foram encontrados bons resultados. Em temperatura ambiente (25°C) as telhas de cimento reforçadas com polpa de celulose de sisal apresentaram propriedades superiores às telhas reforçadas com polpa de sisal associada a fibras de polipropileno. A pesquisa também realizou comparações com a telha cimento amianto, a qual obteve o pior resultado. A Figura 15 ilustra respectivamente: a condutividade térmica da telha cimento amianto, da telha fibrocimento reforçada com sisal e polipropileno e da telha fibrocimento reforçada com sisal Tonoli et al. (2011).

Figura 15 – Condutividade térmica em [W/(m.K)] para telhas de fibrocimento

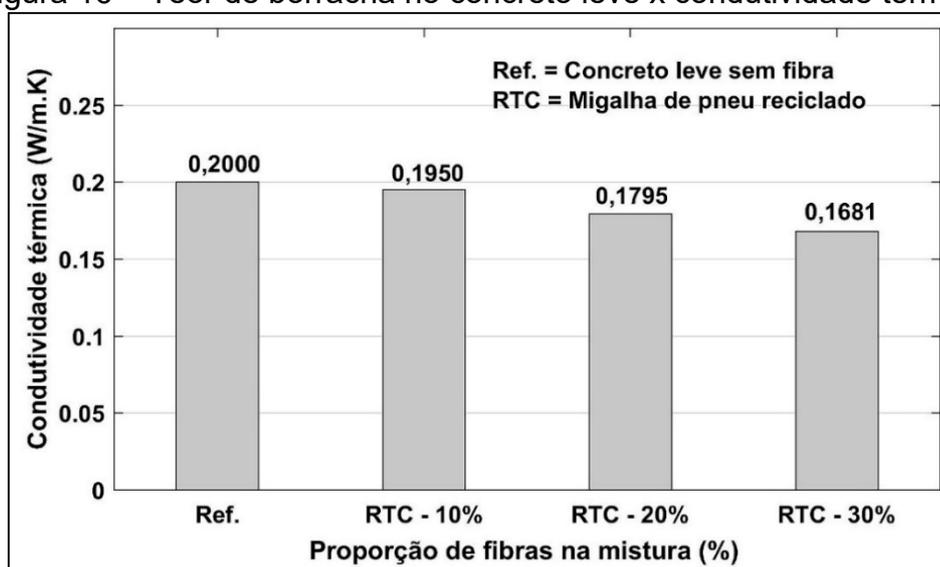


Fonte: Adaptado de TONOLI et al. 2011

Conforme analisado por Tonoli et. al. (2011) a presença das fibras de sisal no fibrocimento causa perturbação na microestrutura do material, assim atrapalhando a saída do ar do material, gerando uma maior porosidade, principalmente em volta das fibras, o que reduz consideravelmente a condutividade térmica.

Kashani et al. (2017) utilizaram concreto leve com adição de migalhas de pneus reciclado, ou em inglês “Recycled Tyre Crumb” (RTC). A densidade das amostras foi de $615 \pm 10 \text{ kg/m}^3$, a fim de reduzir ao máximo o efeito nos resultados. Os autores salientam que a distribuição das fibras foi homogênea, o que reduziu a diferença das propriedades térmicas em função da direção. Os valores de condutividade térmica dos compósitos constam na Figura 16.

Figura 16 – Teor de borracha no concreto leve x condutividade térmica



Fonte: Adaptado de KASHANI et al., 2017.

Na medida em que houve o aumento da adição de borracha no traço referência a condutividade térmica foi sendo reduzida. A explicação dada para a melhora no desempenho térmico foi que a porosidade dos compósitos de concreto leve nas seções que cercam as migalhas de pneus aumenta, ou seja, os poros obtidos nos compósitos com RTC são maiores que os poros obtidos no concreto sem adição da borracha, mesmo tendo porosidade total igual entre todas as amostras, os compósitos com poros maiores obtiveram melhor desempenho térmico (KASHANI et al., 2017).

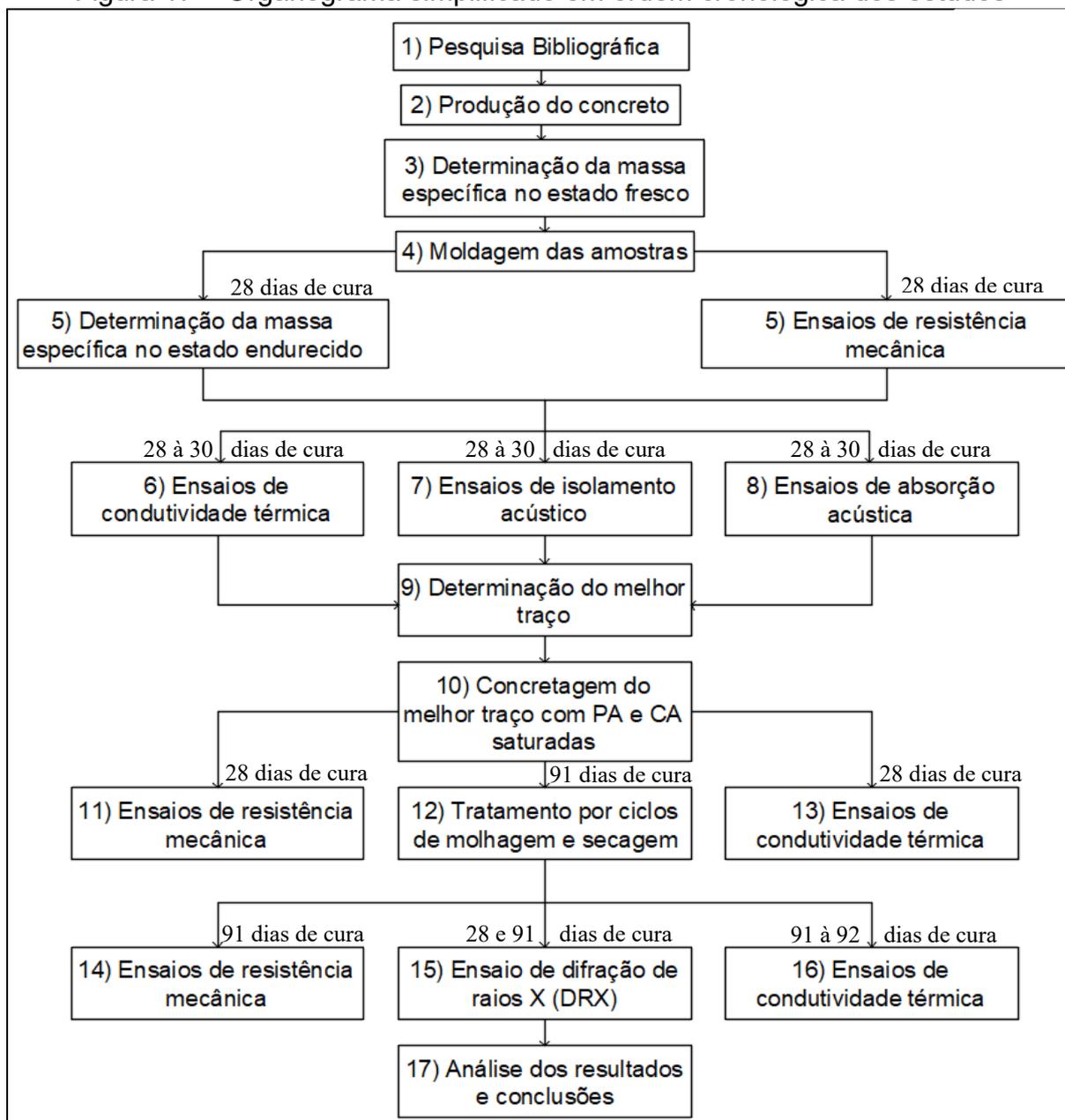
Tendo em vista que a condutividade térmica é reduzida em função do aumento da porosidade e da redução da massa específica do material (CORREIA, 2009; KASHANI et al., 2017; LERTWATTANARUK e SUNTIJITTO, 2015; SACHT, ROSSIGNOLO e SANTOS, 2010 e TONOLI et. al., 2011) pode-se deduzir que compósitos cimentícios com adição de casca do arroz terão uma condutividade térmica menor em comparação ao mesmo material sem as fibras, uma vez que Ahmad et al. (2015) verificaram que a densidade do material diminui de maneira inversamente proporcional ao aumento do volume de casca do arroz adicionada. Além de compósitos com matriz cimentícia foi determinada a mesma relação de densidade e volume de casca do arroz adicionada em materiais cerâmicos (JANBUALA e WASANAPIARNPONG, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Nesta seção serão apresentadas as características dos materiais utilizados na pesquisa e os procedimentos adotados para realização dos ensaios. A Figura 17 ilustra um organograma simplificado da cronologia dos procedimentos experimentais realizados.

Figura 17 – Organograma simplificado em ordem cronológica dos estudos



Fonte: Elaboração própria

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento Portland

Para potencializar o uso dos compósitos com produção “in situ” e “in loco” o cimento Portland deve apresentar alta resistência inicial, assim possibilitando a desmoldagem de maneira mais rápida em qualquer um dos casos. Então foi definida a utilização de cimento Portland CPV-ARI, mas devido a falta de disponibilidade deste material, na cidade de Alegrete – RS, foi utilizado o CPV-ARI-RS, o qual possui características de resistência à sulfatos.

As especificações técnicas do lote do cimento não foram fornecidas pelo fabricante. No entanto, de maneira geral o CPV ARI apresenta entre 95% e 100% de clínquer e sulfatos de cálcio e no máximo 5% de material carbonático (NBR 5733, ABNT 1991). Os cimentos de Alta Resistência Inicial Resistente à Sulfatos (ARI-RS) possuem a adição de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio durante a moagem do clínquer. As adições permitidas em CPV ARI são escória granulada de alto-forno, material pozolânico e/ou material carbonático (NBR 5737, ABNT 1992).

3.2.2 Casca do arroz

A casca do arroz (CA) foi utilizada “in natura” conforme ilustrado na Figura 18, ela foi armazenada em ambiente seco e fechado, não havendo nenhum tipo de tratamento físico ou químico. A casca foi obtida através de doação feita pela Cooperativa Agroindustrial de Alegrete LTDA (CAAL).

Figura 18 – Casca do arroz “in natura”



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Palha do arroz

A palha da planta *Oryza Sativa* (planta que produz o arroz) foi armazenada nas mesmas condições da casca do arroz, e não houve tratamento químico ou físico. Seu emprego nos compósitos se deu através de substituição em volume pela casca do arroz em três diferentes comprimentos: 1 cm, 2 cm e 3 cm, e em três porcentagens: 5%, 10% e 15%. A Figura 20a ilustra a palha no estado “in natura”.

Foram feitos três moldes de Polietileno Tereftalato (PET) para realizar o recorte da palha nos comprimentos desejados. A Figura 19 ilustra como foi realizado o processo de redimensionamento da palha.

Figura 19 – Moldes para corte da palha



Fonte: Elaboração própria

A Figura 20 ilustra a palha já nas dimensões apropriadas prontas para uso nas concretagens. Elas apresentam em sequência as dimensões de 1 cm, 2 cm e 3 cm.

Figura 20 – Palha do Arroz: (a) “in natura”; (b) 1 cm; (c) 2 cm; (d) 3 cm;



Fonte: Elaboração própria

3.2.4 Espuma

O aditivo utilizado na pesquisa foi o incorporador de ar e plastificante ECOAIR – MIX, material este de origem químico-artificial. Para gerar a espuma foi dissolvido 1 (um) quilograma de aditivo para cada 40 (quarenta) litros de água. O procedimento de mistura inicial consiste basicamente em pesar 40 kg de água e então adicionar 1 kg de aditivo, sem agitar os recipientes. Esta proporção água/aditivo gera aproximadamente 550 litros de espuma com uma densidade aproximada de 75 g/l.

A produção da espuma foi feita com o equipamento incorporador de ar ECOFOAMER-100W-10BP, o qual é constituído por uma bomba hidráulica de recalque e um compressor de ar. Enquanto um é responsável pela sucção da mistura da água com o aditivo o outro libera ar sobre pressão para gerar a espuma. A espuma é ilustrada na Figura 21.

Figura 21 – Espuma pré-formada



Fonte: Elaboração própria

3.3 Métodos experimentais

3.3.1 Definição dos traços

A dosagem do concreto celular com espuma pré-formada foi realizada com dois objetivos:

- Obter massa específica no estado endurecido na ordem de 700 Kg/m³;
- Obter resistência à compressão que assegurasse segurança para uso em alvenarias de vedação.

Os traços foram baseados nos parâmetros de Pachla (2015). O procedimento de mistura teve alteração na ordem de adição dos materiais na betoneira.

O concreto celular utilizado como base para a pesquisa e formação dos compósitos é resultante apenas da mistura de uma pasta de cimento Portland com

água e espuma pré-formada. Para a avaliação dos efeitos da casca e da palha do arroz no material, sua adição foi realizada em proporções de modo a não haver grande variabilidade na densidade dos materiais. Desta forma, foram feitas comparações de desempenho acústico, mecânico e térmico para observar a viabilidade da adição da casca e palha no concreto celular.

Conforme a seção 4.1 observa-se que a adição da casca do arroz pode potencializar algumas melhorias no desempenho geral do concreto celular e principalmente reduzir custos de produção, uma vez que ela é um resíduo agrícola abundante e de fácil obtenção nas regiões oeste e sul do Rio Grande do Sul.

Comprovado que os compósitos de concreto celular com casca do arroz obtiveram valores satisfatórios (Item 4.1), a CA foi substituída por diferentes porcentagens e comprimentos de palha do arroz para verificar a influência desta no produto final.

A Tabela 10 apresenta o traço do Concreto Celular, o Traço Referência (concreto celular com casca do arroz) e nove variações do mesmo em função da substituição da CA por três porcentagens (5%, 10% e 15%) e três comprimentos (1 cm, 2 cm e 3 cm) de palha da planta *Oryza Sativa* (PA).

Tabela 10 – Traços em massa combinado com volume

TRAÇO	Cimento (kg)	Casca (l)	Palha (l)	Água na Mistura (l)	Espuma (l)	Água na Espuma (l)	Fator a/cim
Concreto Celular	1	-	-	0,4	2,8	0,1	0,5
Traço Referência	1	0,3500	-	0,4	2,8	0,1	0,5
T5.1 - 5% - 1 cm	1	0,3325	0,0175	0,4	2,8	0,1	0,5
T5.2 - 5% - 2 cm	1	0,3325	0,0175	0,4	2,8	0,1	0,5
T5.3 - 5% - 3 cm	1	0,3325	0,0175	0,4	2,8	0,1	0,5
T10.1 - 10% - 1 cm	1	0,3150	0,0350	0,4	2,8	0,1	0,5
T10.2 - 10% - 2 cm	1	0,3150	0,0350	0,4	2,8	0,1	0,5
T10.3 - 10% - 3 cm	1	0,3150	0,0350	0,4	2,8	0,1	0,5
T15.1 - 15% - 1 cm	1	0,2975	0,0525	0,4	2,8	0,1	0,5
T15.2 - 15% - 2 cm	1	0,2975	0,0525	0,4	2,8	0,1	0,5
T15.3 - 15% - 3 cm	1	0,2975	0,0525	0,4	2,8	0,1	0,5

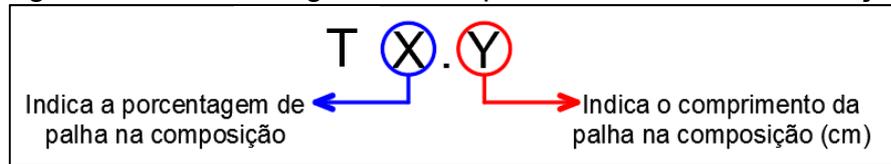
Fonte: Elaboração própria

O compósito formado exclusivamente por concreto celular e casca do arroz foi denominado como Traço Referência (TR), pois o mesmo serve primeiramente como parâmetro de referência em relação ao Concreto Celular convencional (CC), e em seguida para as outras nove variações de sua composição.

Os traços com a introdução de PA foram denominados em função da porcentagem e do comprimento da palha. O Traço 5.1 (T5.1), por exemplo, tem 5%

de substituição de casca do arroz por palha de comprimento de 1 cm. A Figura 22 apresenta a nomenclatura dos traços.

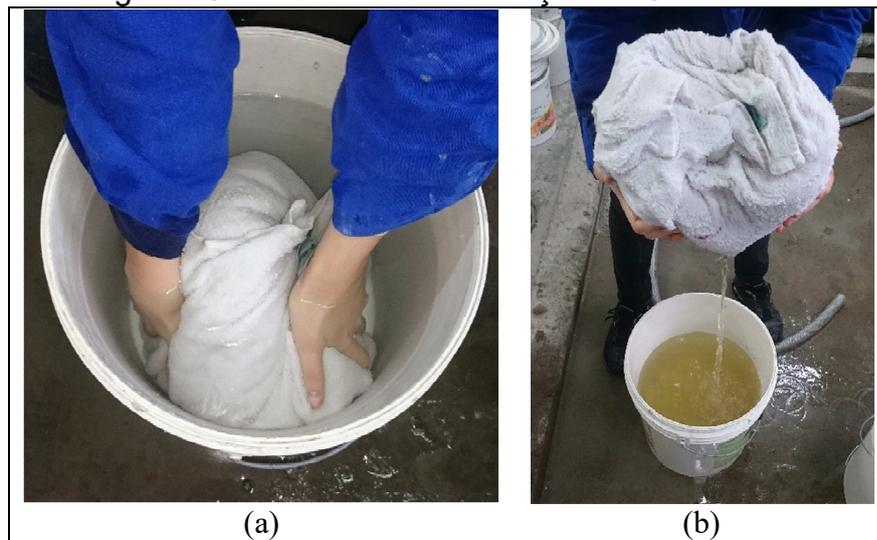
Figura 22 – Metodologia adotada para nomenclatura dos traços



Fonte: Elaboração própria

Realizadas todas as comparações e análises nos desempenhos obtidos aos 28 dias, o material com melhores propriedades gerais foi utilizado para estudos de durabilidade e testes com a mudança da forma que a CA e a PA foram utilizadas. Nesse caso, a casca e a palha foram adicionadas saturadas à espuma a fim de testar se este procedimento era benéfico ou não ao desempenho do material. A Figura 23 ilustra o procedimento utilizado para saturação da casca e da palha do arroz.

Figura 23 – Processo de saturação da CA e da PA



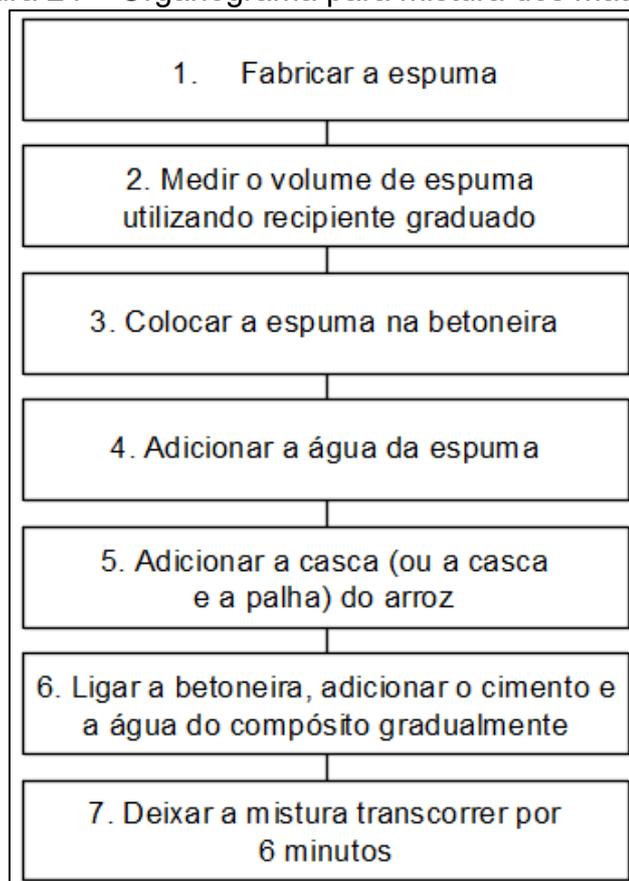
Fonte: Elaboração própria

Na imagem Figura 23a observa-se que a CA e a PA foram colocadas em uma toalha de algodão e ficaram submersas dentro de um recipiente com água. Durante 5 minutos as fibras vegetais permaneceram submersas e em seguida foram retiradas da água (Figura 23b). Ao retirar os materiais da água notou-se que houve aumento do volume e de peso das fibras, mesmo deixando o material perder o excesso de água, conforme ilustrado na Figura 23b.

3.3.2 Método de mistura

O processo de mistura foi realizado conforme a metodologia apresentada no organograma ilustrado na Figura 24. A palha e a casca do arroz foram adicionadas simultaneamente à mistura e posteriormente o cimento foi adicionado separadamente de maneira gradual. A adição da casca e da palha do arroz à mistura antes do cimento acarreta uma melhor homogeneização das fibras com a espuma.

Figura 24 – Organograma para mistura dos materiais



Fonte: Elaboração própria

3.3.3 Massa específica

A determinação da massa específica no estado fresco foi realizada logo após a finalização da mistura e a massa específica no estado endurecido foi avaliada aos 28 dias de cura.

O procedimento utilizado para determinação da massa específica no estado fresco (MEF) foi baseado na NBR 12.644 (ABNT, 2014).

Na determinação da massa específica no estado endurecido (MEE) foi utilizado um paquímetro para medir a altura exata das amostras e uma balança para determinação da massa. Para o cálculo das massas específicas foi utilizada a Equação 5:

$$d = m/V \quad (5)$$

Sendo:

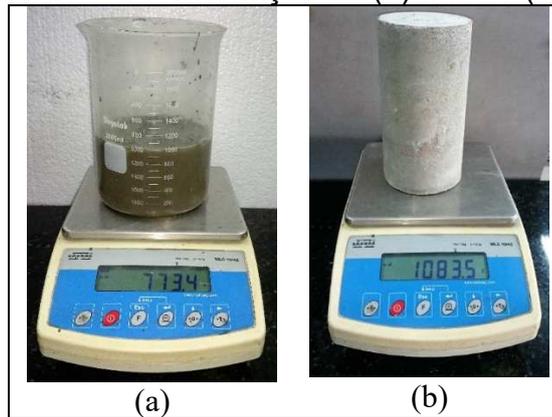
d = Densidade do material em g/cm^3 ;

m = Massa do material em gramas;

V = Volume do material em cm^3 .

A Figura 25 mostra a determinação da massa do concreto no estado fresco e no estado endurecido respectivamente.

Figura 25 – Determinação da (a) MEF e (b) MEE



Fonte: Elaboração própria

3.3.4 Moldagem dos corpos de prova

Foram produzidos quatro tipos de amostras, sendo elas variáveis em função dos ensaios. Para evitar que a aderência do concreto com as fôrmas causasse defeitos no material, utilizou-se desmoldante nas fôrmas. A Figura 26 ilustra a preparação dos moldes para ensaios de compressão axial.

Figura 26 – Preparação dos moldes (aplicação do desmoldante)



Fonte: Elaboração própria

No total foram produzidas quatro amostras prismáticas de dimensões $250 \times 250 \times 50 \text{ mm}^3$ para realização dos ensaios de condutividade térmica, isolamento e absorção acústica, oito amostras cilíndricas com diâmetro de 100 mm e altura de

200 mm para ensaios de compressão axial, seis amostras prismáticas de dimensões de 160 x 40 x 40 mm³ para ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos e três amostras cilíndricas de diâmetro de 29 mm e altura de 50 mm para ensaios de absorção e isolamento acústico. A Figura 27 ilustra as amostras em cura ambiente logo após a moldagem. As desmoldagens foram realizadas 24 horas após a moldagem para todos os traços.

Figura 27 – Amostras em cura à temperatura ambiente



Fonte: Elaboração própria

3.3.5 Ensaio de resistência à compressão axial

Para realização dos ensaios de compressão axial os corpos de prova primeiramente tiveram a superfície nivelada a fim de proporcionar uma distribuição uniforme de tensões. Para isto foi utilizada uma serra circular (Figura 28).

Figura 28 – Retífica utilizada para regularização das superfícies das amostras



Fonte: Elaboração própria

Com as duas superfícies niveladas as amostras foram levadas a uma estufa com temperatura de 65°C por 24 horas antes da pesagem e do ensaio de compressão. Como a serra funciona com a presença de água, o que implica no aumento da massa

específica, o procedimento de secagem se fez necessário para equalizar a água presente nas superfícies das amostras, visto que ao serem submetidas ao procedimento de corte elas poderiam obter quantidades diferente de água. O procedimento foi realizado aos 27 dias de cura à temperatura ambiente, seguindo então a seguinte cronologia: retificação das superfícies, secagem em estufa, pesagem e ensaio de resistência à compressão axial aos 28 dias de cura. A Figura 29 ilustra o corpo de prova na máquina de ensaio universal da marca EMIC.

Figura 29 – Amostra em ensaio de resistência à compressão axial

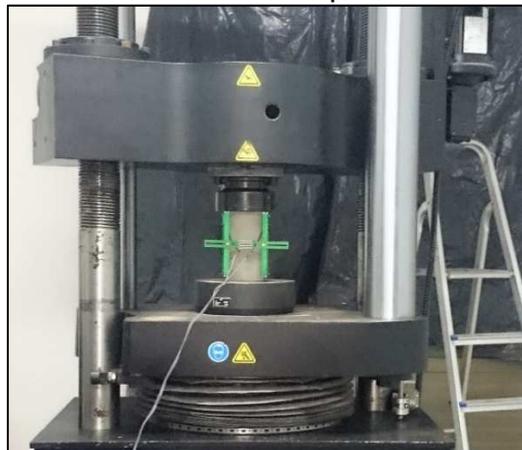


Fonte: Elaboração própria

Para a realização dos ensaios de compressão dos primeiros traços estudados não havia a disponibilidade de instrumentação para medir a deformação dos materiais. No entanto, após a definição do melhor compósito e as concretagens do mesmo com a adição da CA e PA saturadas, a máquina de ensaio universal da marca INSTRON foi instalada no Laboratório de Materiais de Construção Civil Campus Alegrete, possibilitando a obtenção da curva “Tensão x Deformação”.

Então os compósitos produzidos com CA e PA saturadas foram ensaiados na máquina INSTRON (Figura 30). A velocidade dos ensaios foi de 0,50 mm/min.

Figura 30 – Amostra em análise de comportamento à compressão axial

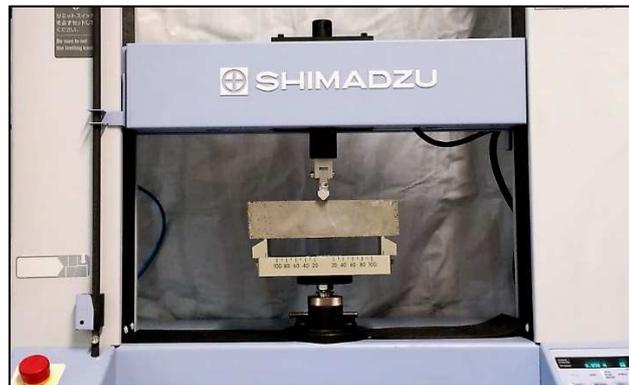


Fonte: Elaboração própria

3.3.6 Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos

O ensaio de flexão foi baseado na NBR 12.142 (ABNT, 2010) e a máquina utilizada para o ensaio foi a SHIMADZU AGS-X 5 KN. A velocidade do ensaio de tração na flexão foi de 0,50 mm/min. A Figura 31 mostra a configuração do ensaio. Foram ensaiadas três amostras de cada traço aos 28 dias de cura.

Figura 31 – Amostra em ensaio de flexão em três pontos



Fonte: Elaboração própria

3.3.7 Preparação das amostras para análise do desempenho acústico

Foram utilizadas três amostras de cada traço para cada faixa de frequência. As amostras com 100 mm de diâmetro por 50 mm de altura (utilizadas nos ensaios da frequência de 50 Hz a 1600 Hz) foram obtidas de duas formas: o primeiro método foi serrar corpos de prova de 200 mm de altura por 100 mm de diâmetro utilizando uma serra elétrica e o segundo foi extrair das amostras prismáticas de 250 x 250 x 50 mm³ utilizando um serra copo. Observando as duas opções foi constatado que as amostras cortadas sofriam um lixamento, podendo assim causar resultados incorretos. Conforme a Figura 32 é possível visualizar a diferença entre a amostra cortada do corpo de prova cilíndrico (Figura 32a) e a amostra extraída dos corpos de prova prismáticos (Figura 32b).

Figura 32 – Aspecto das amostras para ensaio de desempenho acústico



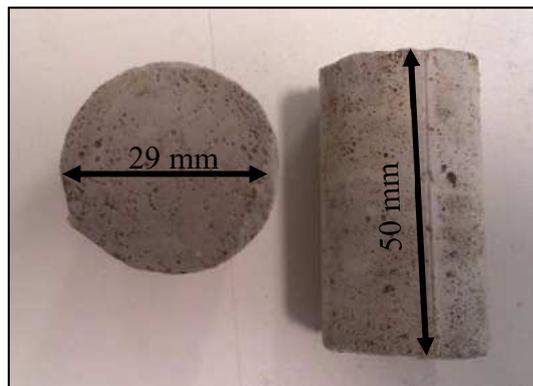
(a) Amostra cortada

(b) Amostra extraída

Fonte: Elaboração própria

As amostras pequenas de 29 mm de diâmetro por 50 mm de altura foram produzidas durante a moldagem através de fôrmas específicas, pois não foi encontrado serra copo com diâmetro de 29 mm e profundidade de 50 mm. A Figura 33 ilustra as amostras para leitura da faixa de frequência de 500 Hz a 6300 Hz. Todas as amostras passaram por secagem em estufa durante 24 horas antes da realização dos ensaios de absorção e isolamento acústico, em temperatura de 65°C. Todos os ensaios de desempenho acústico foram realizados no período de 28 à 30 dias de cura. A realização dos ensaios durante três dias se deu pela demanda de tempo para as medições nas diferentes faixas de frequências e configurações do equipamento.

Figura 33 – Amostras de 29 mm de diâmetro e altura de 50 mm

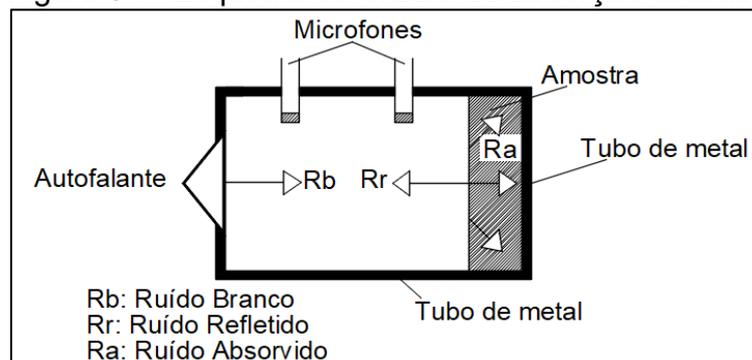


Fonte: Elaboração própria

3.3.8 Ensaio de absorção acústica

Para realização do ensaio de absorção acústica foi utilizado um tubo de impedância. O software (AWA6290M) gera um ruído branco, caracterizado por conter todas as faixas de frequência, e o mesmo é amplificado e emitido por um autofalante dentro do tubo. Na sequência, o ruído é medido por dois microfones e então colide com a amostra. O espectro refletido pelo material também é lido pelos microfones e a partir desta leitura o software calcula o coeficiente de absorção acústica do material. A Figura 34 ilustra um esquema do ensaio de absorção acústica.

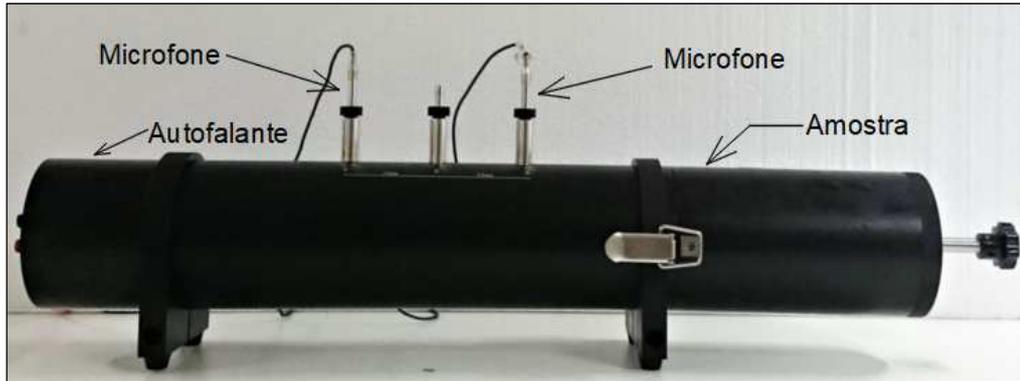
Figura 34 - Esquema do ensaio de absorção acústica



Fonte: Elaboração própria

A Figura 35 ilustra o equipamento pronto para o ensaio de absorção acústica de uma amostra circular com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. A amostra foi encaixada no tubo de impedância e os espaços entre o tubo e a amostra foram vedados com silicone, conforme indicado por Allard e Daigle (1994).

Figura 35 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção acústica

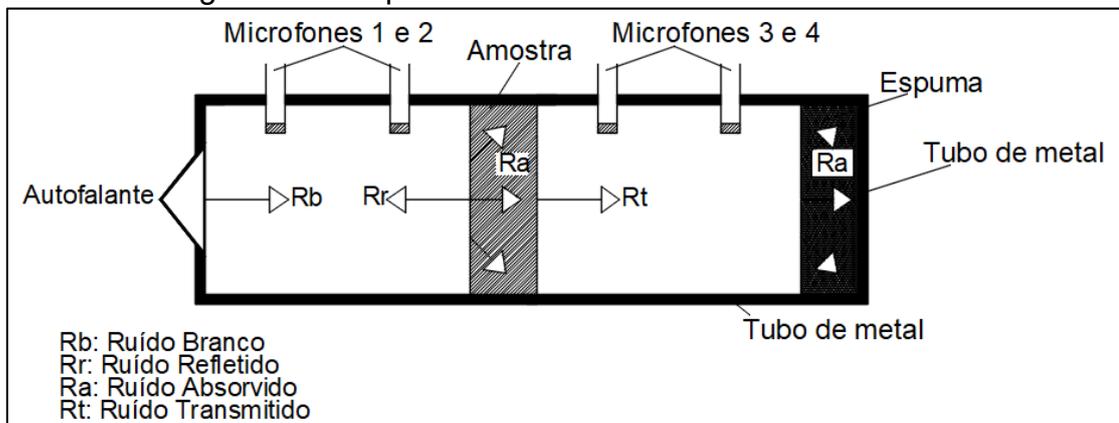


Fonte: Elaboração própria

3.3.9 Ensaio de isolamento acústico

A principal diferença do ensaio de isolamento é a forma como a leitura é feita pelos microfones. A onda passa por dois deles (Microfones 1 e 2), que fazem a leitura inicial, então ela colide com a amostra e o ruído que passa pelo obstáculo é lido pelos dois últimos microfones (Microfones 3 e 4). No final do tubo, como mostrado na Figura 36 e Figura 37, são colocadas espumas para absorver os ruídos residuais, evitando desta forma que os microfones 3 e 4 façam uma nova leitura do som refletido. Neste ensaio a vedação também é feita com silicone e caso ocorra alguma falha neste procedimento o ruído passará diretamente sem colidir com a amostra, gerando valores de isolamento próximos a zero.

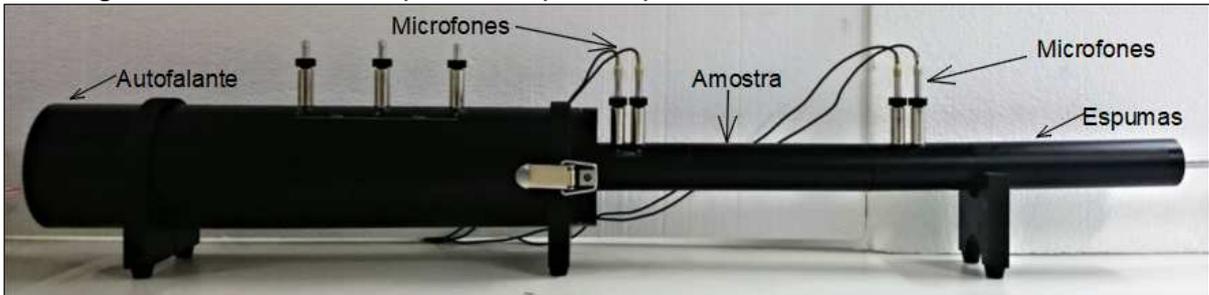
Figura 36 - Esquema do ensaio de isolamento acústico



Fonte: Elaboração própria

A Figura 37 ilustra o equipamento montado para realização dos ensaios de isolamento acústico de alta frequência.

Figura 37 – Tubo de impedância pronto para ensaio de isolamento acústico



Fonte: Elaboração própria

3.3.10 Ensaio de condutividade térmica

Antes das amostras serem colocadas no equipamento elas passaram por secagem durante 24 horas, em uma estufa, com temperatura de 65° C a fim de equalizar a presença de água nas superfícies, uma vez que elas foram redimensionadas utilizando a mesma metodologia apresentada na seção 3.3.5. A Figura 38 ilustra uma placa de 250 x 250 x 50 mm³ para realização do ensaio. Os ensaios dos primeiros compósitos foram realizados entre 28 e 30 dias de cura à temperatura ambiente, após a determinação do melhor compósito foi possível realizar todas as medições da mistura com CA e PA saturadas aos 28 dias de cura, e posteriormente aos 91 e 92 dias de cura à temperatura ambiente e sob ciclos de molhagem e secagem.

Figura 38 – Placa de 250 x 250 x 50 m³ para ensaio de condutividade térmica



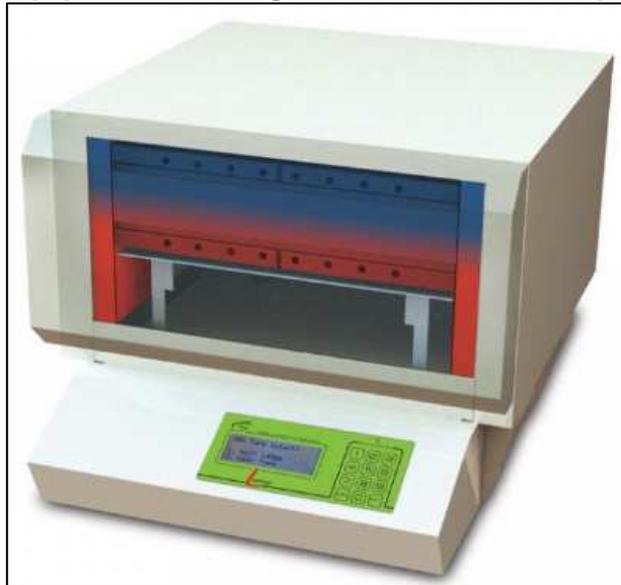
Fonte: Elaboração própria

O equipamento utilizado foi da LaserComp, modelo FOX 304. A faixa de temperatura que o equipamento consegue determinar a condutividade térmica está estabelecida entre -20°C e 75°C. A precisão da temperatura é de $\pm 0,01^\circ\text{C}$ e a condutividade térmica absoluta tem precisão de $\pm 2\%$.

A amostra é colocada entre duas placas e um gradiente de temperatura de 10°C à 35°C é programado. Efetuando as configurações do ensaio o equipamento determina automaticamente a espessura das placas e inicia o procedimento de leitura através de quatro codificadores ópticos, sendo um em cada canto dos pratos.

O gradiente linear de temperatura pode ser observado na Figura 39, onde a configuração do equipamento durante o ensaio é ilustrada.

Figura 39 – Equipamento com gradiente linear de temperatura



Fonte: TA INSTRUMENTS, 2017.

O instrumento utiliza a técnica de estado estacionário para a condutividade térmica, sendo que a medição do fluxo de calor é projetada especificamente para materiais isolantes, como definido pelas normas ASTM C518/2015 e ISO 8301/1991.

A amostra foi posicionada entre dois pratos (Figura 39) com uma diferença de temperatura definida em 25°C (ΔT) através da amostra. A espessura da amostra (L) foi ajustada automaticamente. O fluxo térmico (Q/A) médio, sendo “ Q ” o calor de cada prato e “ A ” a área de contato da amostra com cada prato, foi utilizado para calcular a condutividade térmica (λ) de acordo com a Lei de Fourier (Equação 6):

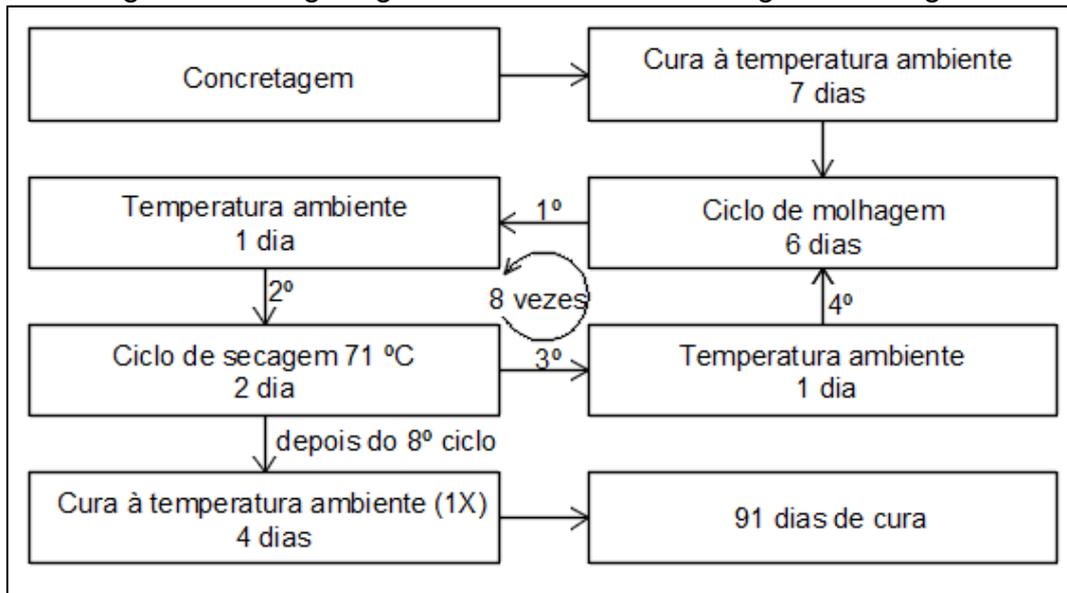
$$\lambda = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{\Delta T} \text{ [W/m.K]} \quad (6)$$

3.3.11 Ciclos de molhagem e secagem

Após a determinação das características de todos os compósitos aos 28 dias, foi escolhido o T15.3 para testes de durabilidade e influência da deterioração da casca e da palha no desempenho mecânico e térmico. O traço foi escolhido por apresentar resultados com maior potencial de isolamento térmico.

Com o intuito de deteriorar a palha e casca foram realizados oito ciclos de molhagem e secagem durante 91 dias, os ciclos de molhagem foram decorridos de um período de 6 dias e os de secagem de 2 dias. O primeiro ciclo de molhagem foi realizado após 7 dias de cura à temperatura ambiente dos materiais. A Figura 40 apresenta um organograma sobre os procedimentos adotados.

Figura 40 – Organograma dos ciclos de molhagem e secagem

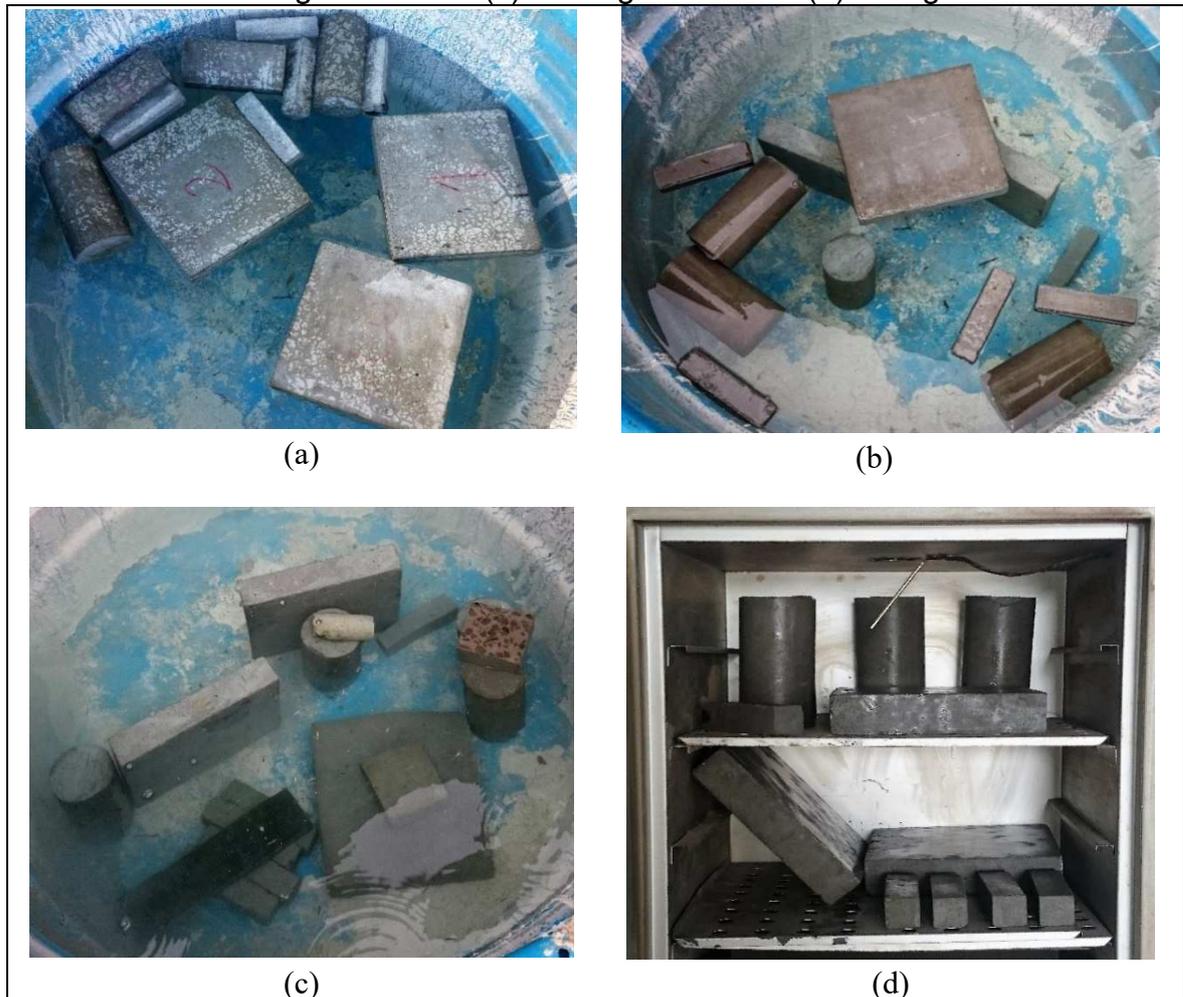


Fonte: Elaboração própria.

Cada ciclo de molhagem e de secagem foi repetido por oito vezes. Finalizado cada ciclo de molhagem e de secagem as amostras foram deixadas por um dia à temperatura ambiente para que não sofressem choque térmico e não fissurassem.

Como a densidade de todas as amostras está compreendida por volta de 700 kg/m³, o que é menor que a densidade da água (1000 kg/m³), elas flutuavam nos primeiros dias dos ciclos de molhagem. Durante os dois primeiros dias, as amostras foram deixadas flutuando (Figura 41a) a fim de verificar se após a saturação elas afundavam. No entanto, uma parcela delas afundava e a outra continuava flutuando (Figura 41b). Verificado isto, foram colocados pesos nas amostras que não afundavam para que elas permanecessem no fundo do reservatório (Figura 41c). Após o fim dos ciclos de molhagem e a adaptação da amostra a temperatura e umidade ambiente durante 24 horas elas foram levadas à estufa em temperatura de 71°C (Figura 41d), conforme indicado pela NBR 13.554 (ABNT, 2012).

Figura 41 – Ciclos de molhagem e secagem – (a) molhagem 1º dia – (b) molhagem 2º dia – (c) molhagem 6º dia – (d) secagem



Fonte: Elaboração própria.

Após a realização da cura das amostras sob ciclos de molhagem e secagem (Ciclos M/S) os materiais foram submetidos a ensaios de compressão axial, tração na flexão em três pontos, condutividade térmica e difração de raios X. Não foram feitas análises do desempenho acústico em função dos resultados encontrados para as amostras com 28 dias de cura sob temperatura ambiente, conforme itens 4.1.4, 4.1.5, 4.2.4 e 4.2.5.

Todas as amostras que tiveram cura de 91 dias sob ciclos de molhagem e secagem foram comparadas com suas equivalentes aos 28 e aos 91 dias de cura à temperatura ambiente.

3.3.12 Análise da composição

Os ensaios de difração de raio x (DRX) foram realizados com o intuito de verificar os elementos presentes nos compósitos aos 28 e aos 91 dias de cura, sob cura à temperatura ambiente e sob ciclos de molhagem e secagem.

A identificação dos componentes presentes no cimento do compósito com melhor desempenho possibilita justificar os resultados obtidos, principalmente no que tange à resistência à compressão axial.

Para a realização do ensaio foi utilizado um Difratorômetro $\theta 2\theta$ da marca Rigaku modelo Ultima IV com geometria Bragg Brentano. A Figura 42 ilustra o equipamento utilizado:

Figura 42 – Difratorômetro de raios X



Fonte: STOCHERO, 2015.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise comparativa entre o Concreto Celular e o Traço Referência

A primeira análise realizada na pesquisa visa compreender os efeitos no desempenho térmico, mecânico e acústico causados pela adição da casca do arroz no concreto celular.

Foram determinados os seguintes parâmetros dos materiais estudados: massa específica no estado fresco, massa específica no estado endurecido, resistência mecânica à compressão axial e à tração na flexão em três pontos, absorção acústica, isolamento acústico e condutividade térmica.

4.1.1 Determinação das massas específicas

As massas específicas no estado fresco (MEF) do Concreto Celular e do Traço Referência foram determinadas através da utilização de agente espumígeno, cimento, equipamentos e condições de temperatura e umidade do ar semelhantes. Em caso de alteração do aditivo espumígeno, do cimento ou dos componentes de reforço, há alteração da massa específica, o que influencia significativamente nas propriedades mecânicas, térmicas e acústicas.

A Tabela 11 apresenta a massa específica no estado fresco do Concreto Celular e do Traço Referência (concreto celular com adição de casca do arroz). É possível perceber que a casca do arroz reduziu a densidade do concreto celular.

Tabela 11 – Massa específica no estado fresco

Traço	Massa específica (kg/m ³)
Concreto Celular	820,40
Traço Referência	786,00

Fonte: Elaboração própria

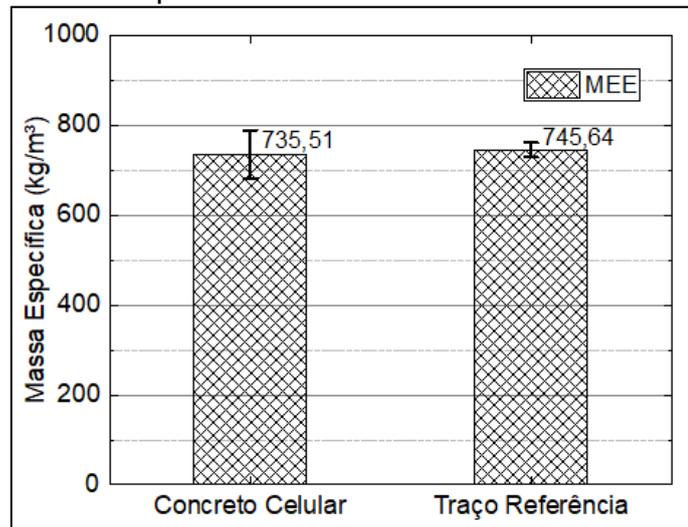
A Tabela 12 apresenta os resultados médios para a massa específica no estado endurecido. Esses dados são ilustrados de forma gráfica na Figura 43.

Tabela 12 – Massa específica no estado endurecido

Traço	Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	Desvio Padrão (kg/m ³)	Variância	C.V. (%)
Concreto Celular	735,51	53,23	2,83E+03	7,24
Traço Referência	745,64	16,02	2,57E+02	2,15

Fonte: Elaboração própria

Figura 43 – Massa específica no estado endurecido com desvio padrão

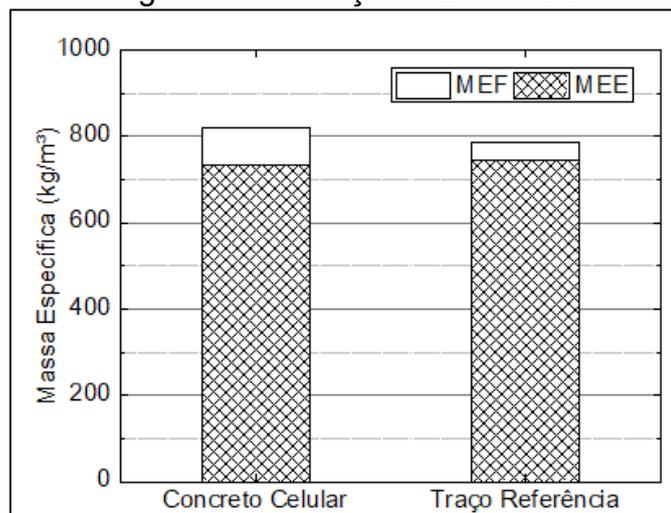


Fonte: Elaboração própria

Quanto a massa específica no estado endurecido (MEE), os valores encontram-se dentro da mesma faixa de erro. Observando-se a Tabela 12 e a Figura 43 é possível notar que o desvio padrão do Concreto Celular foi maior e englobou todos os valores em torno da média do Traço Referência. Os dados amostrais utilizados para o cálculo dos valores que constam na Tabela 12 estão no Apêndice A, Tabela 32.

A comparação entre as massas específicas, MEF e MEE, é apresentada na Figura 44.

Figura 44 – Relação MEF x MEE



Fonte: Elaboração própria

É possível visualizar que ocorreu redução da massa específica em função do endurecimento dos materiais, no entanto essa redução não foi diretamente proporcional. O Concreto Celular, mesmo com maior MEF, teve menor MEE aos 28 dias de cura. A diferença na relação entre as massas específicas após 28 dias de cura

pode ter sido causada pela retenção de água na matéria orgânica da CA, aumentando a MEE do material, uma vez que a água possui massa específica superior à ambos os traços.

Como as amostras passaram por uma estufa a uma temperatura de 65°C, durante 24 horas, apenas para equalizar a quantidade de água presente na superfície, o valor da temperatura possivelmente não foi suficiente para extrair a água da estrutura interna do compósito com CA.

Obtendo valores de massa específica no estado endurecido significativamente semelhantes, o estudo das demais propriedades foi realizado a fim de verificar a influência da casca do arroz no material, lembrando que a retenção de água pela mesma poderá ser um fator significativo nos resultados.

Vale salientar, que mesmo com a possibilidade de a água retida pela CA causar influência nos resultados, a temperatura para secagem das amostras não foi aumentada, pois em testes realizados foi verificado que as amostras tendiam a fissurar a partir dos 70°C, o que seria prejudicial à resistência mecânica.

4.1.2 Resistência à compressão axial

Os valores de resistência à compressão axial foram aferidos aos 28 dias de cura a fim de analisar a influência da CA e verificar se os materiais atingiam o mínimo recomendado por algumas normas brasileiras. A Tabela 13 apresenta os valores médios obtidos através de ensaios de três amostras, os valores individuais estão no Apêndice B - Tabela 33.

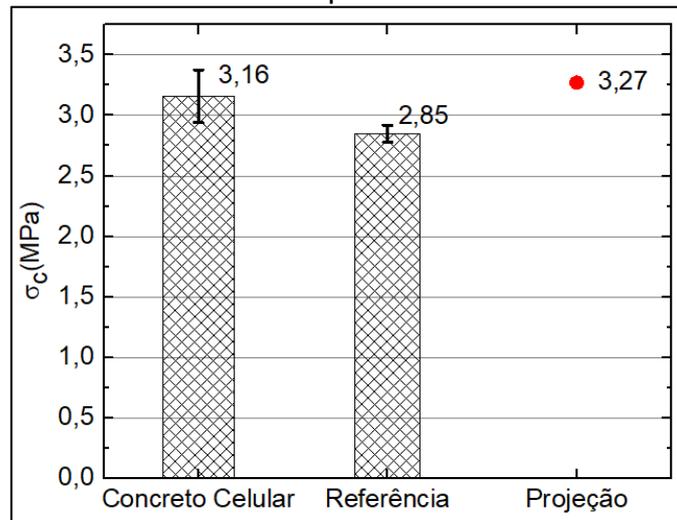
Tabela 13 – Resistência à compressão axial

Traço	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
Concreto Celular	3,16	0,22	4,74E-02	6,90
Traço Referência	2,85	0,07	4,90E-03	2,46

Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que a adição da CA reduziu a resistência do material, fator atribuído ao maior volume e dimensão dos poros que a CA cria e a pouca ou nenhuma resistência que a fibra vegetal possui às solicitações de compressão axial. Mesmo com análise estatística simples, realizada pela visualização das barras de erro obtidas através do desvio padrão, nota-se que os valores são significativamente diferentes (Figura 45).

Figura 45 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura



Fonte: Elaboração própria

A projeção de resistência à compressão axial para o Traço Referência, destacada na Figura 45 através de um ponto, foi baseada em uma pesquisa realizada por Jauberthie et al. em 2003, onde a casca do arroz proporcionou o aumento da resistência à compressão axial do composto de matriz cimentícia submetida a um ano de cura em câmara úmida. Foi verificado um acréscimo de aproximadamente 15,5% devido a liberação da sílica presente na CA e a reação pozolânica causada pela mesma. Ao ser considerada essa possibilidade têm-se a expectativa de que o Traço Referência tenha um acréscimo de 0,42 MPa, chegando assim à 3,27 MPa, ficando, portanto, com um valor superior ao do Concreto Celular sem adição de CA.

Em relação à exigência normativa para materiais de vedação da NBR 15.270 (ABNT, 2005) e da NBR 13.438 (ABNT, 2013) os valores de resistência à compressão axial do Concreto Celular e do Traço Referência atingiram aos valores mínimos exigidos, de 1,50 MPa e 1,20 MPa respectivamente. Quanto à resistência requerida pela NBR 6136 (ABNT, 2014) o valor mínimo de 3,00 MPa foi atingido apenas pelo Concreto Celular e pelo valor estipulado como projeção para o composto com casca do arroz.

4.1.3 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

A Tabela 14 apresenta os valores médios de resistência à tração na flexão obtidos através da média de três amostras para cada traço, os valores individuais constam no Apêndice C - Tabela 34.

Tabela 14 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura

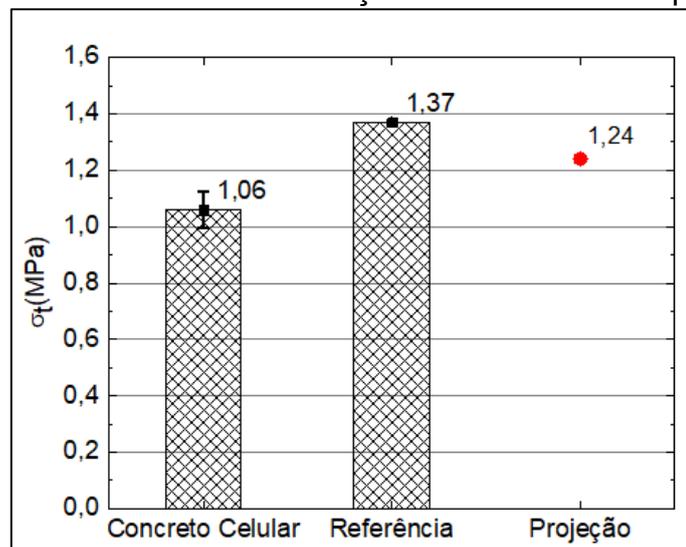
Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
Concreto Celular	1,06	0,0631	3,98E-03	5,96
Traço Referência	1,37	0,0087	7,52E-05	0,63

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que a resistência à tração na flexão aumentou com a adição da CA. O acréscimo foi da ordem de 29%, no entanto, conforme indicado em várias outras pesquisas (GRAM, 1998; MOHR et al. 2005; TOLEDO FILHO et al., 2005 e JAUBERTHIE et al., 2003), à médio ou longo prazo, pode ocorrer redução da resistência. Esse fator está atribuído aos danos que a cimentação causa nas fibras vegetais, fazendo com que as mesmas percam a capacidade de reforço. Com base nos dados apresentados por Jauberthie et al. (2003) a redução da resistência à tração é de aproximadamente 9,00%.

Utilizando a projeção de Jauberthie et al. (2003) para o resultado de resistência à tração na flexão do compósito com casca do arroz verifica-se que o material tende a perder aproximadamente 0,13 MPa. A Figura 46 ilustra, através de um gráfico de barras, os resultados obtidos de maneira experimental e em um ponto o valor projetado para o Traço Referência após a degradação da CA.

Figura 46 – Resistência à tração na flexão em três pontos



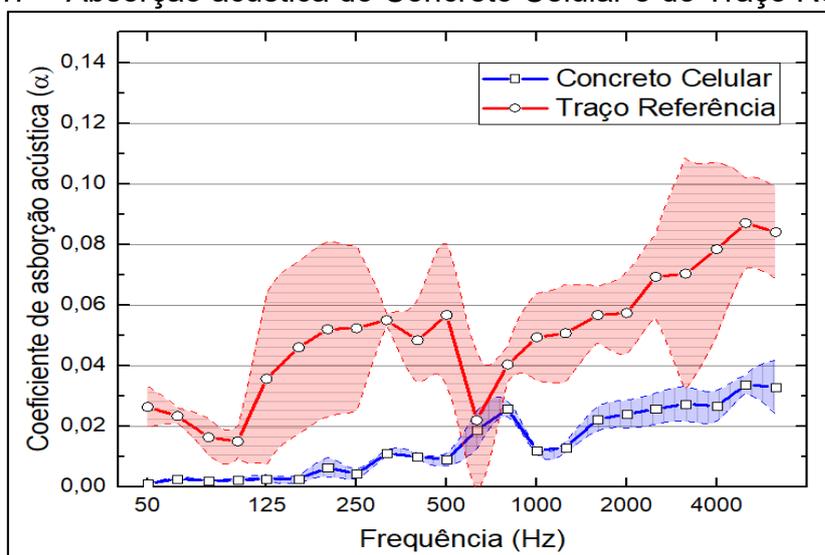
Fonte: Elaboração própria

Observa-se que, conforme a projeção adotada, mesmo após a degradação da fibra vegetal o Traço Referência possui uma resistência à tração na flexão superior ao Concreto Celular.

4.1.4 Absorção acústica

Os ensaios de absorção acústica foram realizados na faixa de frequência de 50 Hz à 6300 Hz. No total foi realizada automaticamente pelo equipamento a leitura de 22 pontos e, para cada ponto, foram ensaiadas três amostras, realizando o tratamento estatístico a partir da média obtida. A Figura 47 ilustra o gráfico traçado com todas as médias e com duas linhas em cada lado da curva delimitando o desvio padrão estabelecido. Os valores utilizados para traçar o gráfico constam nas Tabelas 35 e 36 do Apêndice D.

Figura 47 – Absorção acústica do Concreto Celular e do Traço Referência

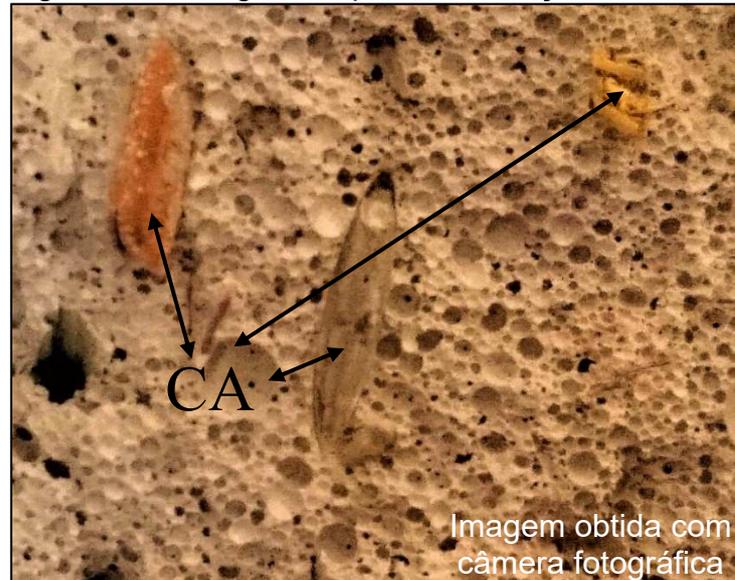


Fonte: Elaboração própria

Nota-se que o Traço Referência obteve absorção acústica superior ao Concreto Celular ao longo da faixa de frequência, mesmo com grandes variações nos resultados.

Conforme Pisello et al. (2016) e Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) o aumento da dimensão dos poros melhora o desempenho de absorção acústica do produto. O Traço Referência pode ser condicionado à essa característica, pois a casca do arroz gerou poros maiores que a espuma incorporadora de ar. Na Figura 48 é possível visualizar uma imagem ampliada da estrutura do Traço Referência. Na imagem verificam-se as diferenças entre os poros obtidos pela CA (destacados) e pela espuma pré-formada (demais poros). Além da diferença do tamanho dos poros pode-se afirmar que a casca do arroz aumentou a tortuosidade do material.

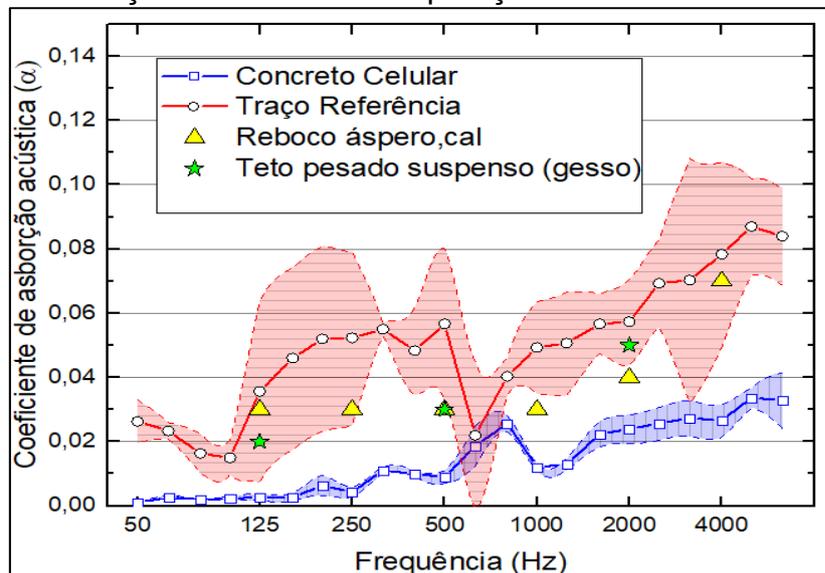
Figura 48 – Imagem ampliada do Traço Referência



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 49 é ilustrado um gráfico para comparação entre os materiais estudados na pesquisa, o reboco áspero e o teto pesado de gesso, ambos constam na Tabela 5 da seção 2.4.3. Os materiais foram escolhidos por se assemelharem nas possíveis aplicações do Concreto Celular e do Traço Referência.

Figura 49 – Absorção acústica em comparação com materiais da NBR 12.179



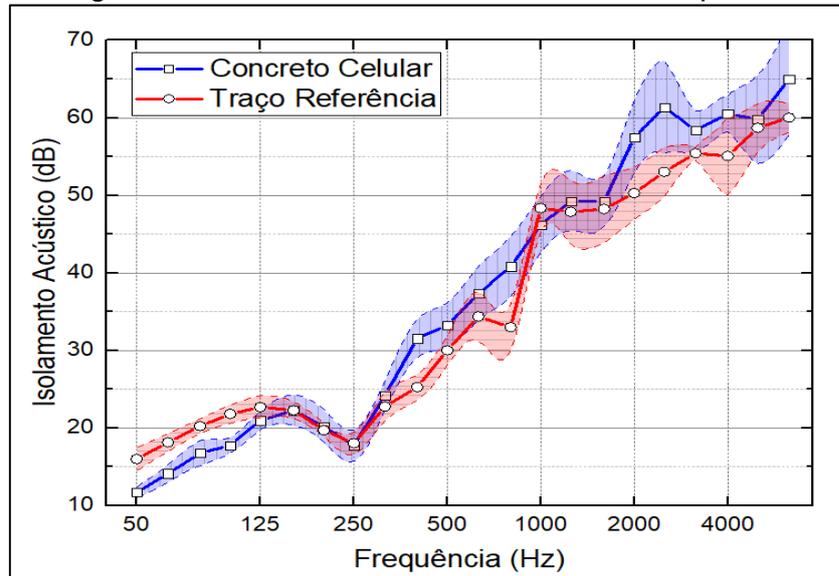
Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que os dois materiais tiveram os coeficientes de absorção compreendidos entre as duas curvas traçadas experimentalmente na pesquisa, ambos foram superiores em todas as frequências em relação ao Concreto Celular e inferiores ao Traço Referência.

4.1.5 Isolamento acústico

O isolamento acústico dos materiais foi obtido através da média de três amostras, os valores individuais e os tratamentos estatísticos constam no Apêndice E. A Figura 50 ilustra os dados obtidos com as linhas delimitadoras do desvio padrão.

Figura 50 – Isolamento acústico com desvio padrão



Fonte: Elaboração própria

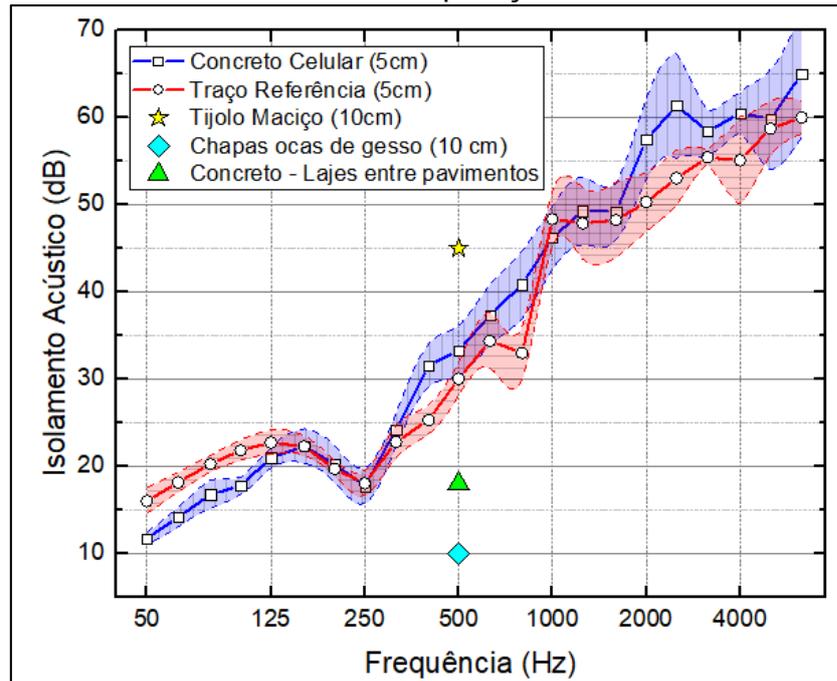
Observa-se que para o isolamento acústico o desvio padrão foi reduzido, e os coeficientes de variação ficaram praticamente todos abaixo de 10% (os valores exatos constam no Apêndice E).

Assim como apresentado por Garcia (2004) o volume e a dimensão dos poros não diminuiram a capacidade de isolar som do material. Embora para Garcia (2004) o concreto celular autoclavado tenha obtido melhor desempenho em relação aos materiais menos porosos, o compósito com casca do arroz não seguiu essa premissa e ficou com as margens de erro, em sua maioria, sobrepostas às do Concreto Celular. Essa semelhança de resultados entre materiais parecidos, com variação no volume e quantidade de poros também ocorreu com H. K. Kim e Jeon (2011), os quais obtiveram valores bem próximos entre os concretos com adição de agente espumígeno e concreto convencional.

Na comparação de concretos com e sem fibras, Corredor-Bedoya, Zoppi e Serpa (2017) relataram que não houve alteração do isolamento acústico, em função da adição de migalhas de pneus de diversos tamanhos e porcentagens. Os dados obtidos pelos autores foram aleatórios em torno da argamassa pura utilizada como referência, fato também observado nas análises experimentais do Traço Referência e do Concreto Celular ilustrados na Figura 50.

A comparação entre os materiais listados na NBR 12.179 (ABNT, 1992) e os materiais estudados na pesquisa é feita na Figura 51, os dados colocados no gráfico constam na Tabela 6 (seção 2.4.4), sendo os escolhidos para análise a alvenaria de tijolo maciço de 10 cm (menor espessura apresentada na norma), pois as amostras caracterizadas na pesquisa possuíam 5 cm, a chapa oca de gesso também com espessura de 10 cm, e o concreto de laje entre pavimentos.

Figura 51 – Isolamento acústico em comparação com materiais da NBR 12.179



Fonte: Elaboração própria

Os resultados comparados na Figura 51, com exceção do concreto entre lajes, seguiram a Lei de Berger (seção 2.4.6), sendo o espectro um ruído aéreo, o material mais denso obteve a melhor capacidade de isolamento acústico. Na sequência as chapas ocas de gesso obtiveram resultados inferiores ao Concreto Celular e ao Traço Referência. Embora o concreto entre lajes possua densidade superior aos materiais estudados na pesquisa, sua capacidade de isolamento acústico foi inferior. Esse fator pode ser explicado pela tortuosidade, resistividade ao fluxo de ar e o módulo de elasticidade dos concretos leves, conforme mencionado por H. K. Kim e Jeon (2011) e Allard, et al. (1989) apud Lima (1999).

4.1.6 Condutividade térmica

Os valores de condutividade térmica do Concreto Celular e do Traço Referência são apresentados na Tabela 15. Os dados foram obtidos através da média de três amostras, e os valores individuais constam no Apêndice F. Para os valores de condutividade térmica foi utilizado uma precisão de quatro casas decimais, uma vez que os valores sofreram alteração apenas após a segunda casa decimal.

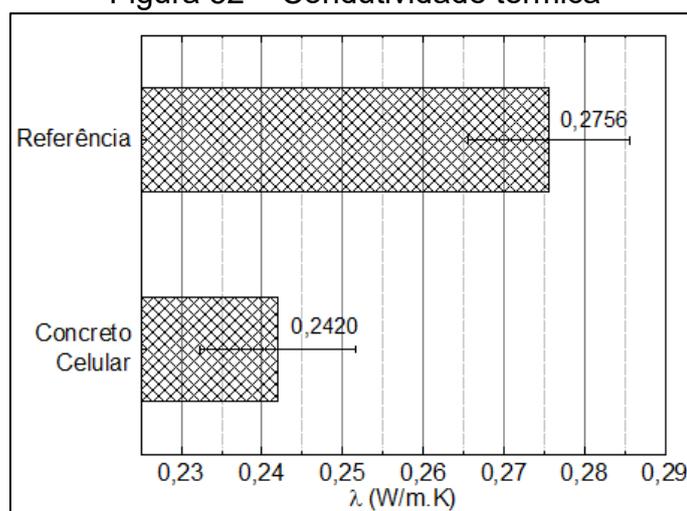
Tabela 15 – Condutividade térmica dos materiais

Traço	Condutividade Térmica (W/m.K)	Desvio Padrão (W/m.K)	Variância	C.V. (%)
Concreto Celular	0,2420	0,0097	9,35E-05	4,00
Traço Referência	0,2756	0,0100	1,73E-04	4,77

Fonte: Elaboração própria

Conforme ilustrado pela Figura 52, através de um gráfico de barras com as faixas de erro obtidas através do desvio padrão, a condutividade térmica do Traço Referência foi maior que do Concreto Celular.

Figura 52 – Condutividade térmica



Fonte: Elaboração própria

Verifica-se que os valores não apresentam sobreposição das faixas de erro, indicando uma diferença significativa. Segundo Correia (2009), Sacht, Rossignolo e Santos (2010), Lertwattanaruk e Suntijitto (2015) a condutividade é proporcional à massa específica. Seguindo essa premissa, a proporcionalidade entre massa específica e condutividade térmica para o Concreto Celular e para o Traço Referência foi comprovada.

Pelas análises realizadas por Tonoli et al. (2011) e Kashani et al. (2017), materiais com mesma densidade podem obter valores de condutividade divergentes em função da porosidade, em ambos os estudos a quantidade de fibras adicionada foi

um fator predominante para a redução da condutividade térmica, observando aí uma relação inversamente proporcional. As pesquisas de Ahmad et al. (2015) e Janbuala e Wasanapiarnpong (2015), que fizeram uso de casca do arroz em materiais cimentícios, indicaram o aumento da porosidade com a adição da casca na matriz cimentícia, o que na teoria deveria reduzir a condutividade térmica.

Nos ensaios experimentais do Concreto Celular e do Traço Referência não foi observada essa relação apontada por outros autores. A adição da casca não melhorou o desempenho térmico, e isso pode ter sido ocasionado pela presença de outro condicionante no compósito. Como os ensaios de condutividade térmica foram realizados aos 28, 29 e 30 dias de cura do concreto, e a casca do arroz possui matéria orgânica capaz de reter água, os vazios formados pelos poros originados pela CA estavam preenchidos por água. Essa análise gera a perspectiva de que com idades maiores os materiais com casca do arroz percam a água absorvida pela fibra vegetal, principalmente após sua degradação, e reduzam a condutividade térmica em função disto.

4.2 Análise da influência da palha do arroz

Conforme os resultados apresentados na seção 4.1 foi verificado que há tendência de melhora em algumas propriedades, como a resistência à tração na flexão e a absorção acústica. Já para a resistência à compressão axial e condutividade térmica a adição da casca não foi benéfica a curto prazo. No entanto, conforme referenciado em outras pesquisas que utilizaram adição de CA (JAUBERTHIE et al., 2003) e de outras fibras vegetais (LERTWATTANARUK e SUNTIJITTO, 2015; TONOLI et. al., 2011) existe a perspectiva de aprimoramento dessas conforme ocorrer a degradação da casca. O isolamento acústico foi o único desempenho estudado que não obteve diferença significativa com a adição da casca do arroz, e não existe perspectiva de alteração nessa condição.

Após a análise comparativa dos resultados de desempenho entre o Concreto Celular e o Traço Referência foi verificada a possibilidade de aprimorar o desempenho térmico acústico aumentando a dimensão dos poros.

A palha do arroz (PA) tende a aumentar a dimensão dos poros, em função dos comprimentos utilizados, e assim criar pontos onde há maior resistividade ao fluxo de ar, melhorando a condutividade térmica e a absorção acústica. Além da possibilidade de melhora desses desempenhos, a palha possibilita um aumento na resistência à tração na flexão, já que seu comprimento aumenta a ancoragem entre fibra e matriz.

Nesta seção os estudos terão a finalidade de verificar a influência da massa específica no estado endurecido, do volume de PA e do comprimento da PA no desempenho térmico, mecânico e acústico. Após todas as análises será determinado o melhor compósito para estudos de durabilidade na seção 4.3.

4.2.1 Determinação das massas específicas

As massas específicas no estado fresco foram aferidas como determinado na seção 4.1.1, sendo uma aferição para cada traço com o material retirado do misturador antes do processo de moldagem. Pequenas alterações entre as massas específicas dos traços ocorrem por fatores que não podem ser controlados, como umidade relativa do ar e temperatura ambiente no momento da concretagem.

Além das variações que não podem ser controladas existe a influência da potência do misturador, do tipo do aditivo incorporador de ar, do recipiente utilizado para medição do volume, das instalações elétricas do local e do equipamento responsável pela fabricação da espuma, as quais foram consideradas com influência nula nos compósitos, pois foram sempre utilizados os mesmos equipamentos e recipientes.

A determinação de algumas influências que poderiam acarretar alterações da massa específica no estado fresco (MEF) e posteriormente na massa específica no estado endurecido (MEE) foram colocadas apenas na análise comparativa entre os dez compósitos estudados na pesquisa, pois as concretagens do Concreto Celular e do Traço Referência ocorreram no mesmo dia, com as mesmas condições que poderiam gerar modificações.

A Tabela 16 apresenta os valores da MEF aferidos logo após o término da mistura. É possível observar que o coeficiente de variação de todas as medições foi muito pequeno, o que possivelmente acarretará em uma menor influência nos desempenhos térmico, mecânico e acústico.

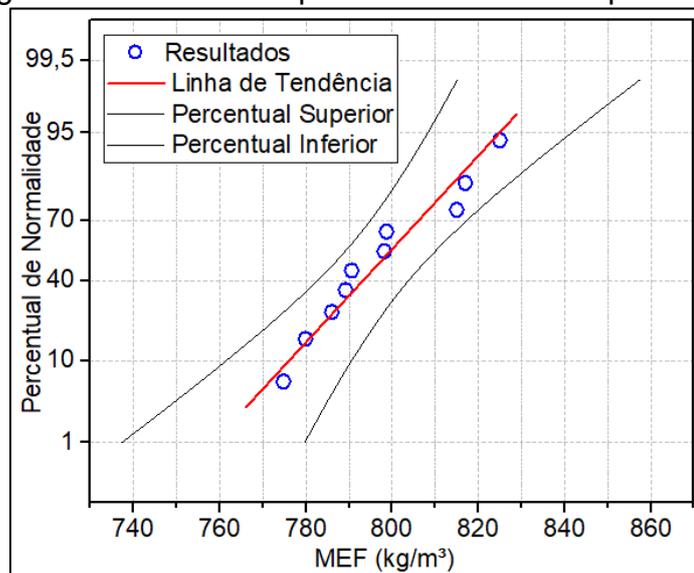
Tabela 16 – Massa específica no estado fresco

Traço	Massa específica (kg/m ³)
Traço Referência	786,00
T5.1	825,00
T5.2	790,60
T5.3	817,00
T10.1	789,20
T10.2	798,20
T10.3	774,80
T15.1	779,90
T15.2	798,70
T15.3	815,00
C.V. geral (%)	2,10

Fonte: Elaboração própria

Além do cálculo do coeficiente de variação dos dados apresentados na Tabela 16, foi verificado com 95% de confiança que os dados possuem a distribuição normal, ou seja, a MEF não apresenta diferenças significativas em relação à média, conforme ilustrado pela Figura 53.

Figura 53 – Gráfico de probabilidade normal para MEF



Fonte: Elaboração própria

Observando a Figura 53 é possível perceber uma aleatoriedade dos dados obtidos em torno da média - há seis valores acima da linha de tendência e quatro valores abaixo. Através dessa análise, pode-se afirmar que além das variações serem pequenas elas foram aleatórias, possivelmente ocasionadas por conta de variáveis que não podem ser controladas.

Os resultados da massa específica no estado endurecido constam na Tabela 17. Os valores são as médias aferidas através de três amostras aos 28 dias de cura. Os valores individuais constam nos Apêndice A.

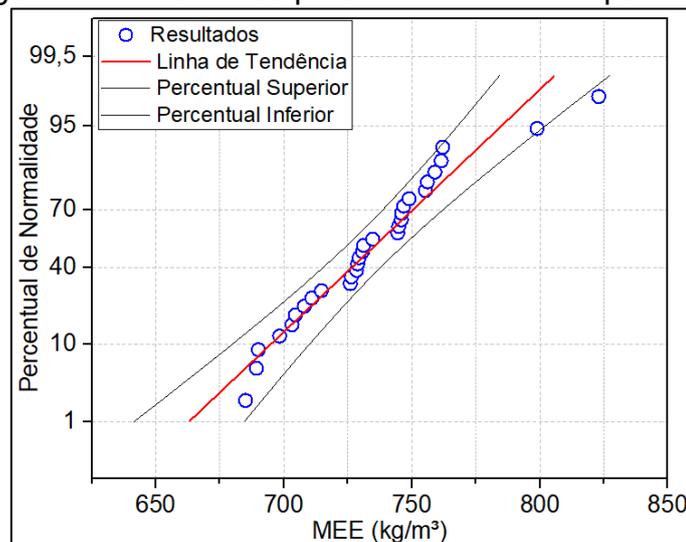
Tabela 17 – Massa específica no estado endurecido

Traço	Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	Desvio Padrão (kg/m ³)	Variância	C.V. (%)
Traço Referência	745,64	16,02	2,57E+02	2,15
Traço 5.1	777,64	58,97	3,48E+03	7,58
Traço 5.2	744,06	12,50	1,56E+02	1,68
Traço 5.3	706,19	18,50	3,42E+02	2,62
Traço 10.1	755,97	8,04	6,47E+01	1,06
Traço 10.2	699,38	14,86	2,21E+02	2,12
Traço 10.3	744,86	10,29	1,06E+02	1,38
Traço 15.1	727,44	22,26	4,95E+02	3,06
Traço 15.2	709,59	20,39	4,16E+02	2,87
Traço 15.3	733,58	10,72	1,15E+02	1,46
C.V. geral (%)	3,32			

Fonte: Elaboração própria

Para o tratamento dos dados da MEE primeiramente foi realizado o teste de normalidade e calculado o coeficiente de variação (C.V.) geral das médias dos dez compósitos. Como pode ser observado na Tabela 17 o valor do coeficiente de variação é de 3,32%, indicando que a variação entre as massas específicas médias é muito pequena. No teste de normalidade foi verificada a distribuição normal ou gaussiana com 95% de confiança (Figura 54).

Figura 54 – Gráfico de probabilidade normal para MEE



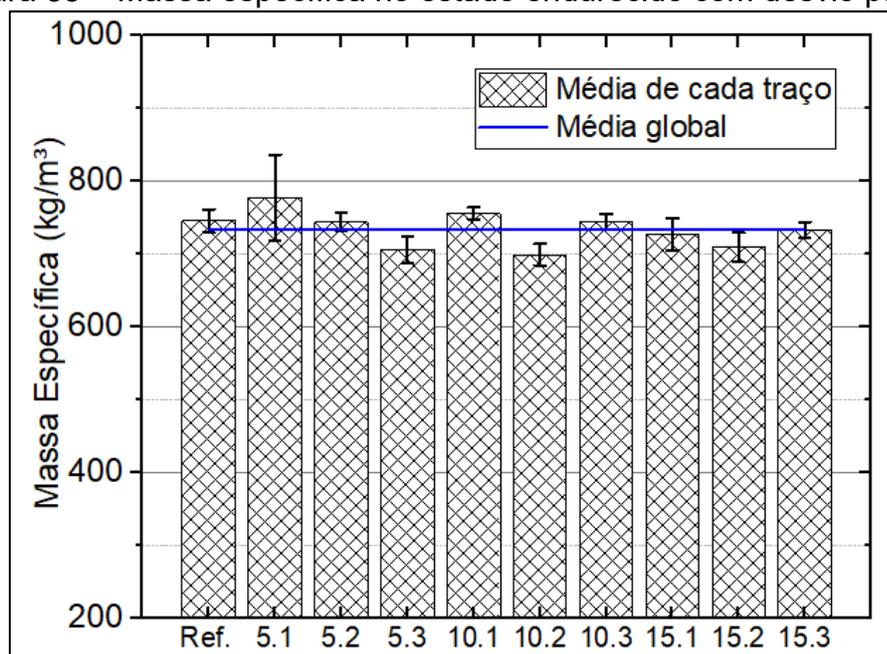
Fonte: Elaboração própria

Na Figura 54 constata-se que apenas um resultado ficou fora das faixas estipuladas como limite para a normalidade. Os demais resultados ficaram em torno

da média, e assim como na MEF foram aleatórios. Para este teste foram utilizadas trinta amostras, sendo três para cada compósito.

Os dados apresentados pela Tabela 17 foram ilustrados através do gráfico na Figura 55, onde cada compósito apresenta a barra de erro obtida através do desvio padrão. Além das médias obtidas para cada compósito foi feita uma média global de todas as amostras a fim de verificar se a faixa de erro dos compósitos compreendia a média geral das massas específicas no estado endurecido.

Figura 55 – Massa específica no estado endurecido com desvio padrão

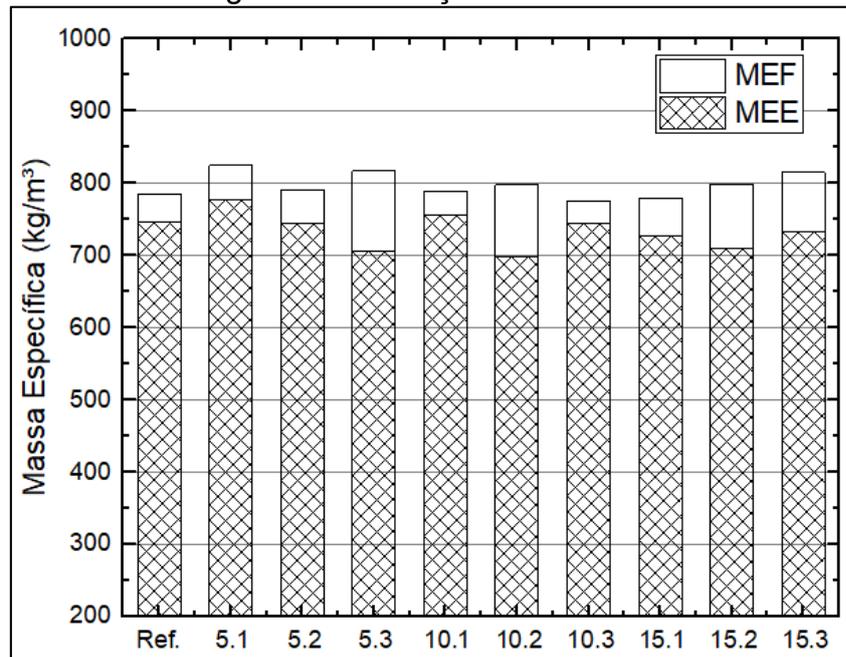


Fonte: Elaboração própria

Analisando a Figura 55 é possível verificar que cinco dos dez compósitos não apresentaram suas faixas de erro compreendendo o resultado médio (T5.3, T10.1, T10.2, T10.3 e T15.2). Desta forma é difícil afirmar que todas as faixas de desvio dos compósitos são semelhantes e não irão afetar o desempenho térmico, acústico e mecânico. Para realizar a análise da relação entre os resultados e as massas específicas será determinado o coeficiente de correlação. Através do coeficiente de correlação fica possível ter uma perspectiva exata da influência da massa específica em cada desempenho, e desta forma determinar a real influência da palha do arroz.

A Figura 56 ilustra a relação entre a massa específica no estado fresco e a massa específica no estado endurecido. Como pode ser visto, em todos os compósitos houve redução de densidade nos primeiros 28 dias de cura.

Figura 56 – Relação MEF x MEE



Fonte: Elaboração própria

Analisando o gráfico ilustrado na Figura 56 é difícil verificar qualquer correlação entre as duas massas específicas. Diante disso foi determinado o coeficiente de correlação de Pearson em 0,02193. Além do baixo coeficiente de correlação obteve-se o valor de P de 0,9502, muito acima do nível de significância de 0,05 adotado. Diante destes valores é possível concluir que a correlação é nula.

A massa específica, teoricamente, deveria ter uma redução linear para todos os compósitos, uma vez que a quantidade de fibra vegetal (CA e PA) e de espuma adicionados ao cimento são iguais. A justificativa para a aleatoriedade na redução das massas específicas pode ser causada pela diferente quantidade de água na estrutura interna dos compósitos aos 28 dias de cura. Essa variável é dependente de quanto as fibras absorveram de água durante o processo de mistura, do formato e estado de degradação delas, da quantidade de água que elas perderam durante o tempo de cura e do processo de secagem das amostras no forno.

4.2.2 Resistência à compressão axial

A Tabela 18 apresenta as médias de resistência à compressão axial obtidas através dos dados de três amostras para cada traço. Os valores individuais das resistências constam no Apêndice B.

Tabela 18 – Resistência à compressão axial aos 28 dias de cura

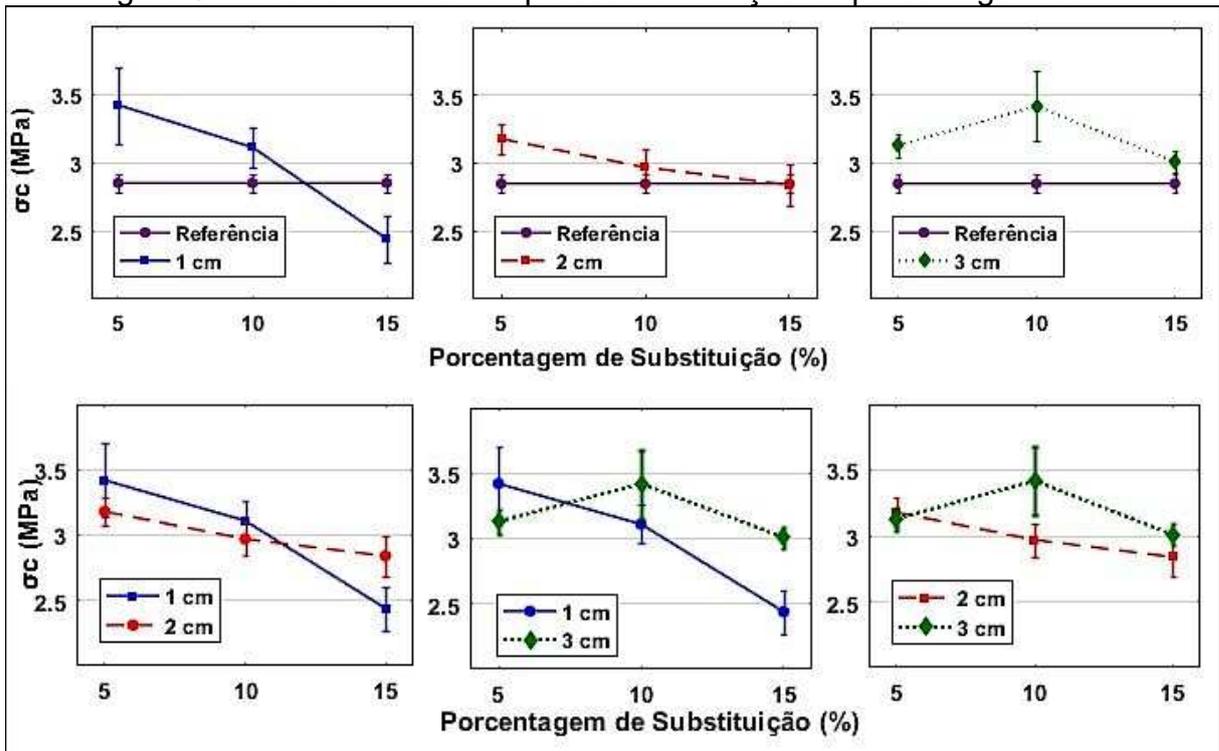
Traço	Resistência à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
Traço Referência	2,85	0,07	4,90E-03	2,46
Traço 5.1	3,42	0,28	7,80E-02	8,16
Traço 5.2	3,18	0,11	1,27E-02	3,54
Traço 5.3	3,13	0,09	7,60E-03	2,79
Traço 10.1	3,11	0,15	2,14E-02	4,71
Traço 10.2	2,97	0,13	1,61E-02	4,28
Traço 10.3	3,42	0,26	6,72E-02	7,57
Traço 15.1	2,44	0,17	2,76E-02	6,80
Traço 15.2	2,84	0,15	2,20E-02	5,22
Traço 15.3	3,01	0,08	6,30E-03	2,64

Fonte: Elaboração própria

A primeira análise realizada para a resistência à compressão axial foi determinar se houve correlação dos resultados com a massa específica no estado endurecido. Assim, utilizando o método de Pearson foi determinado um coeficiente de correlação de 0,4994 (indica que há correlação moderada entre as variáveis). O valor de P encontrado foi de 0,00496, indicando que há significância ao nível de 0,05. Desta maneira fica implícito nos resultados a influência da massa específica

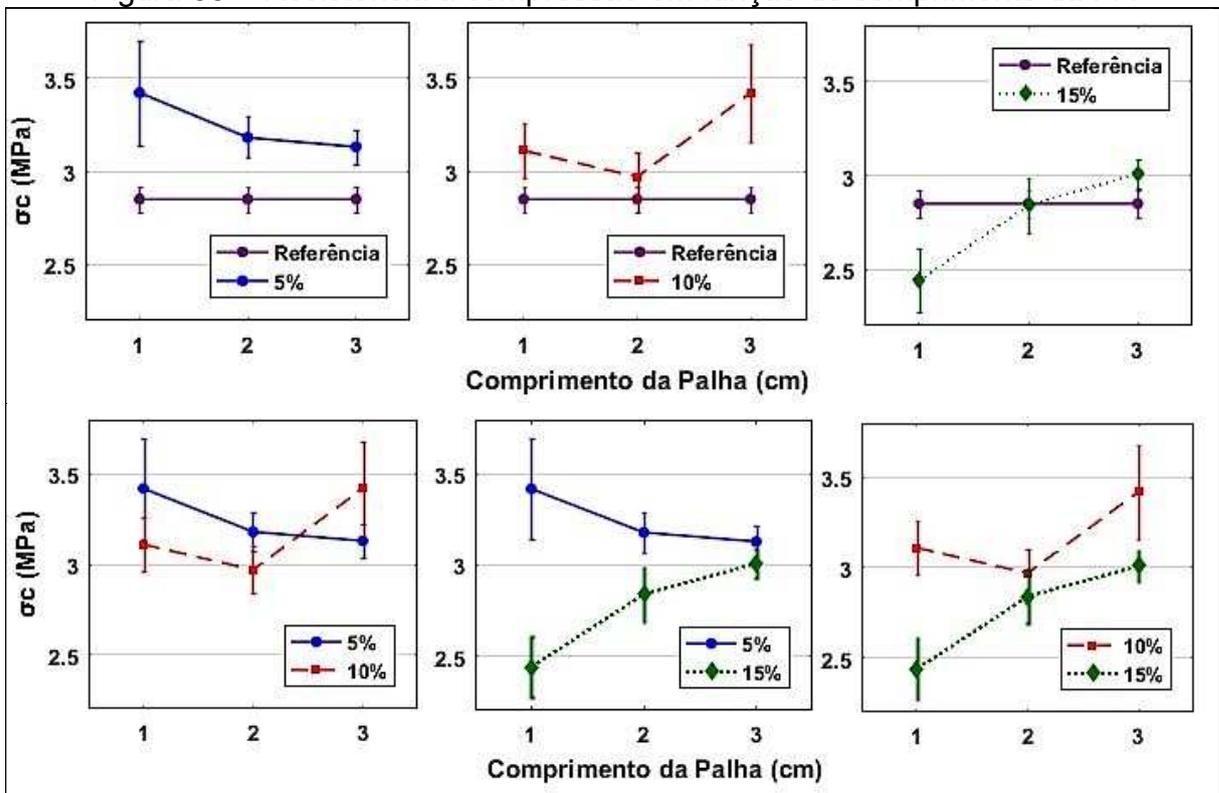
Determinada a influência da MEE na resistência à compressão axial foram feitos gráficos, ilustrados pela Figura 57 e pela Figura 58, para determinar as primeiras relações da resistência à compressão com a substituição de casca pela palha do arroz.

Figura 57 – Resistência à compressão em função da porcentagem de PA



Fonte: Elaboração própria

Figura 58 – Resistência à compressão em função do comprimento da PA



Fonte: Elaboração própria

Como observado nos gráficos apresentados pela Figura 57 e pela Figura 58 os resultados de resistência à compressão estão muito próximos e em muitos há sobreposição das faixas de erro. Além disso, não há linearidade em função da porcentagem de palha substituída nem do comprimento da PA, fator que pode ser causado pelo volume das fibras vegetais, que em todos os traços é igual.

Para determinar se a palha teve influência significativa nos resultados de compressão foi feita análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com nível de confiança de 95%. A Tabela 19 apresenta quais fatores apresentaram resultado médio com diferença significativa.

Tabela 19 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey

Comprimentos (cm)	Diferença significativa?	Porcentagens (%)	Diferença significativa?
1 e 2	Não	5 e 10	Não
1 e 3	Não	5 e 15	Sim
2 e 3	Não	10 e 15	Sim

Fonte: Elaboração própria

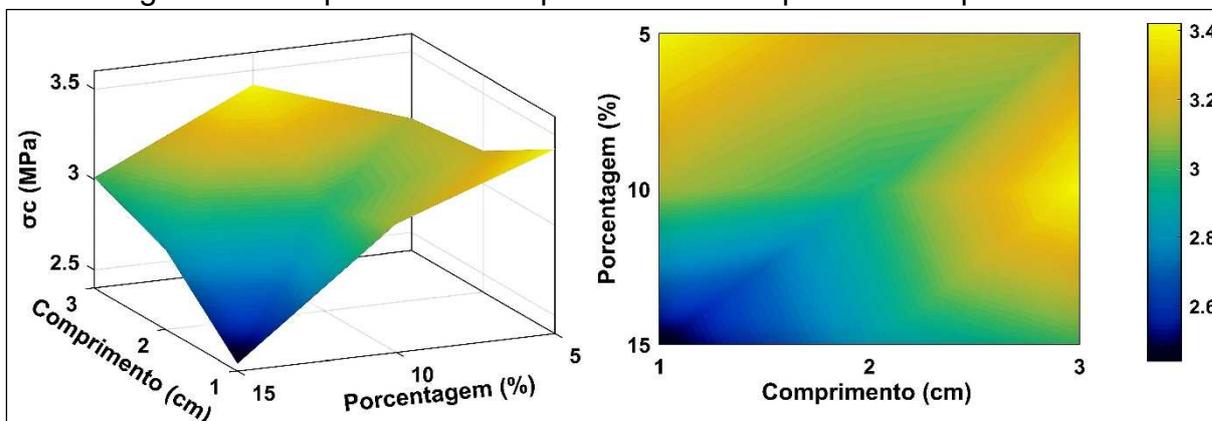
Observando as relações onde houve diferença significativa (5%-15% e 10%-15%), deve-se verificar a Figura 58. Observando a Figura 58 nota-se que a resistência diminuiu em função do aumento de adição de palha do arroz. É conveniente mencionar que também foi realizada a análise das variâncias com a interação dos fatores, onde foi verificado que houve significância apenas nos casos em que havia a porcentagem de 15% interagindo com os comprimentos. Por conseguinte, a interação dos fatores (comprimento e porcentagem de palha) não é preponderante para a resistência à compressão axial.

Verificado que apenas a porcentagem de palha influencia na resistência à compressão axial foi determinado o coeficiente de correlação entre porcentagem de PA e resistência dos compósitos. O valor encontrado foi de -0,6194 com valor de P de 0,0057, corroborando com a tendência já indicada na Figura 58. Conclui-se, portanto, que a redução da resistência à compressão ocorre em função do aumento da porcentagem de palha.

A Figura 59 ilustra uma superfície de resposta indicando a relação entre a porcentagem e o comprimento de palha e a resistência à compressão axial. Através da superfície de resposta também é possível verificar que não houve correlação entre o comprimento da PA e a resistência à compressão, uma vez que para substituições de 15% de casca por palha a resistência aumenta conforme há aumento do

comprimento da palha, e com 5% de substituição de CA a resistência diminui em função do aumento do comprimento.

Figura 59 – Superfície de Resposta: PP x Comprimento da palha x σ_c



Fonte: Elaboração própria

4.2.3 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração na flexão são apresentados na Tabela 20. Os valores foram obtidos através da média de três amostras. Os dados individuais constam no Apêndice C.

Tabela 20 – Resistência à tração na flexão em três pontos aos 28 dias de cura

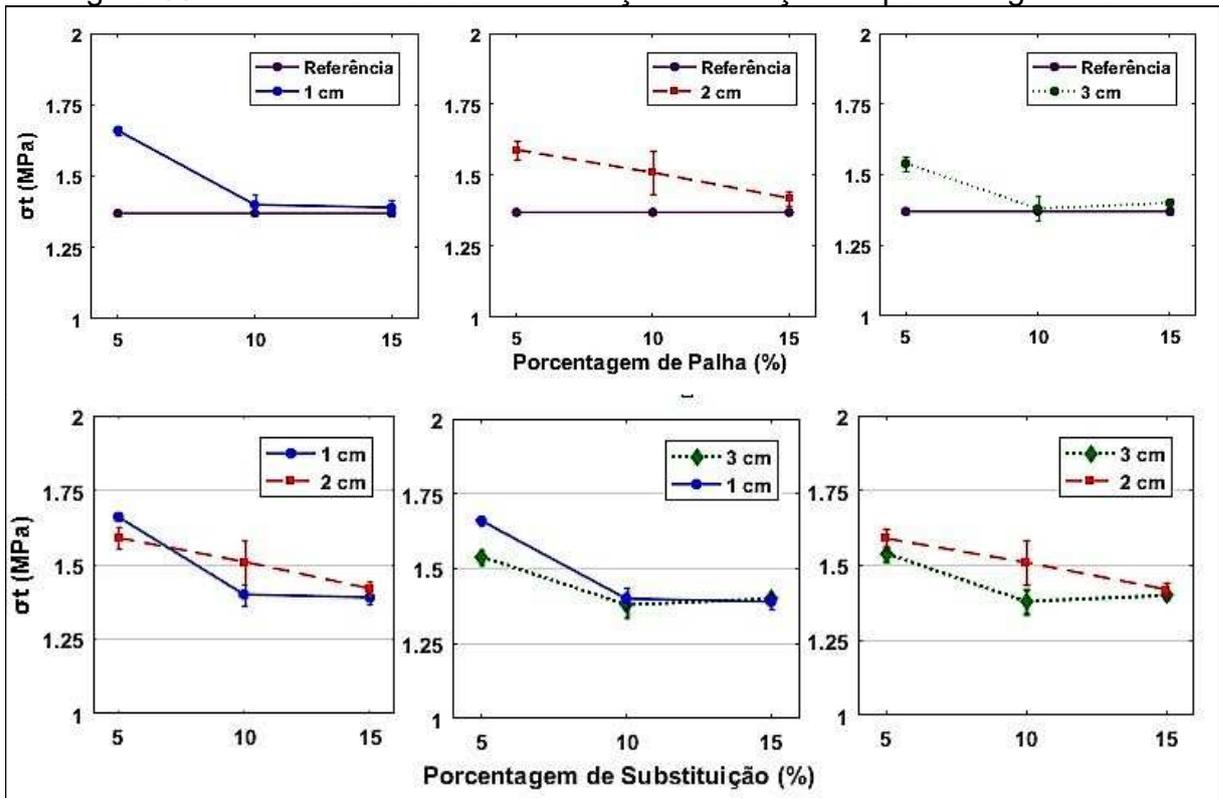
Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
Traço Referência	1,37	0,01	7,52E-05	0,63
Traço 5.1	1,66	0,01	1,72E-04	0,79
Traço 5.2	1,59	0,03	1,22E-03	2,20
Traço 5.3	1,54	0,02	6,46E-04	1,65
Traço 10.1	1,40	0,04	1,26E-03	2,54
Traço 10.2	1,51	0,07	5,59E-03	4,96
Traço 10.3	1,38	0,03	1,16E-03	2,47
Traço 15.1	1,39	0,02	5,71E-04	1,72
Traço 15.2	1,42	0,02	6,07E-04	1,73
Traço 15.3	1,40	0,01	1,24E-04	0,79

Fonte: Elaboração própria

Assim como na análise dos resultados de resistência à compressão, a primeira análise foi determinar a existência de correlação com a massa específica no estado endurecido. Determinado o valor do coeficiente de correlação de Pearson em 0,3115 e o valor de P de 0,1137 não ficou estabelecido qualquer correlação ao nível de 0,05 entre a massa específica e a resistência à tração na flexão.

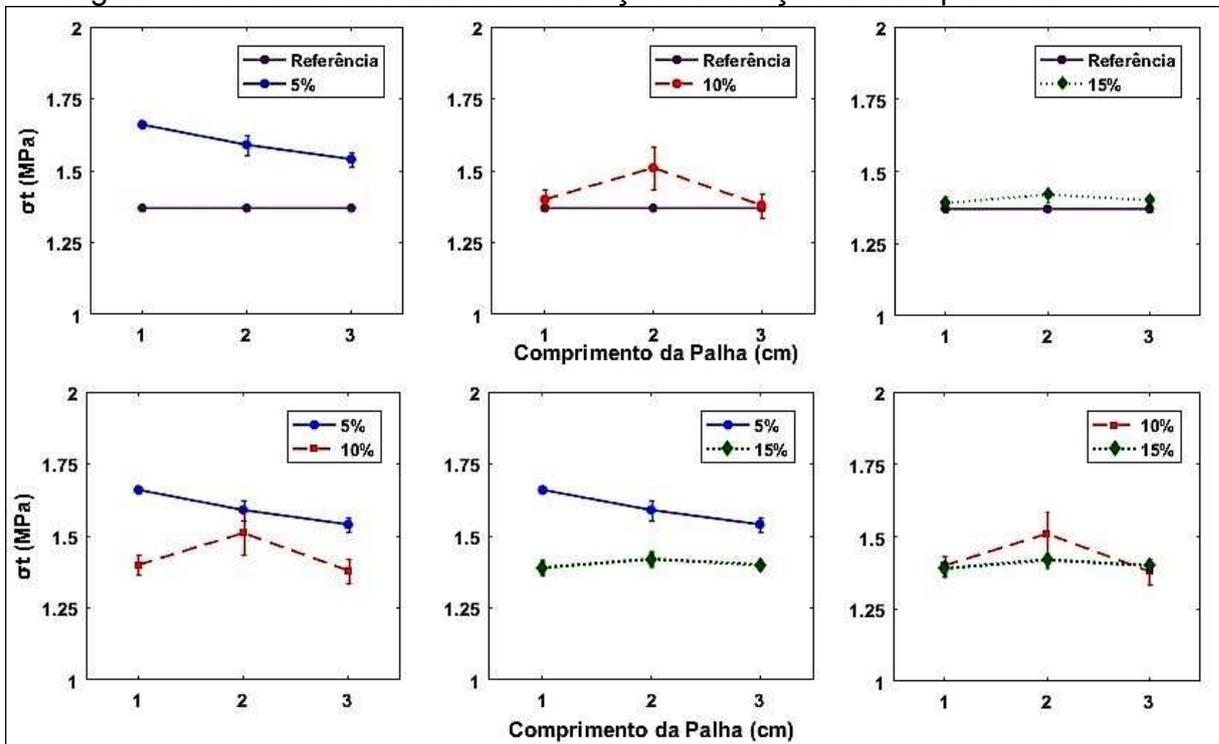
Para determinar se houve influência da adição da palha na resistência à tração na flexão foram traçados os gráficos ilustrados pela Figura 60 e pela Figura 61 a fim de indicar alguma relação preliminar.

Figura 60 – Análise da resistência à tração em função da porcentagem de PA



Fonte: Elaboração própria

Figura 61 - Análise da resistência à tração em função do comprimento da PA



Fonte: Elaboração própria

Para determinar se houve diferença significativa entre as médias dos compósitos com PA foi feita análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com confiança de 95%. A Tabela 21 apresenta quais fatores tiveram resultado médio com diferença significativa.

Tabela 21 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey

Comprimentos (cm)	Diferença significativa?	Porcentagens (%)	Diferença significativa?
1 e 2	Sim	5 e 10	Não
1 e 3	Não	5 e 15	Sim
2 e 3	Sim	10 e 15	Sim

Fonte: Elaboração própria

Os resultados de significância indicam que a maioria das médias obtidas para resistência à tração apresentaram diferenças significativas. Sendo assim, é necessário calcular um coeficiente de correlação entre porcentagem de PA e resistência à tração na flexão e outro entre comprimento de PA e resistência à tração na flexão. A Tabela 22 apresenta os coeficientes de correlação calculados.

Tabela 22 – Coeficientes de correlação de Pearson

Tração X Comprimento de PA		Tração X Porcentagem de PA	
Coeficiente de Correlação	-0,02813	Coeficiente de Correlação	-0,35159
Valor de P	0,88921	Valor de P	0,07211

Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Tabela 22 que os valores de P em ambas correlações são maiores que a significância adotada de 0,05, e, portanto, indicam que não há correlação entre o comprimento e a porcentagem de palha com a resistência à tração na flexão.

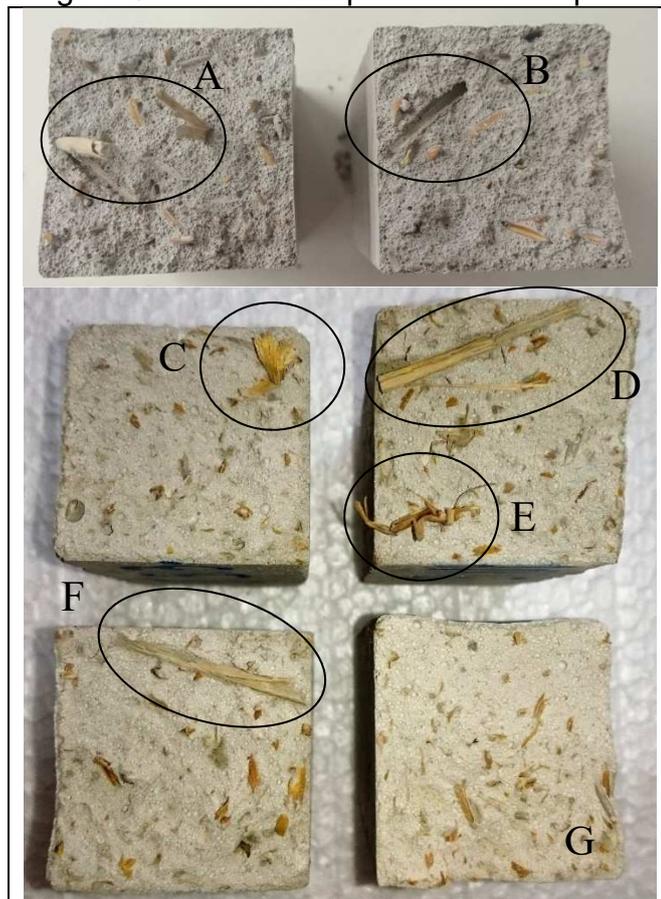
Como observado na Figura 60 e na Figura 61 os resultados no geral são aleatórios, tanto em função do comprimento como da porcentagem. Esse fator é reforçado pelos coeficientes de correlação de Pearson determinados na Tabela 22.

Mesmo não sendo possível determinar alguma tendência entre as características da palha do arroz e a resistência à tração, é possível observar na Figura 60 e na Figura 61 que todos os compósitos tiveram desempenho superior ao Traço Referência ou estão compreendidos na mesma faixa de erro, e, mesmo para esses casos, a média foi superior. A Figura 62 ilustra as amostras rompidas e com estas imagens é possível compreender o motivo dos compósitos com PA obterem maior resistência à tração na flexão. Como se observa da Figura 62A até a Figura 62F a PA está presente nas superfícies de ruptura e atua como componente de reforço.

A Figura 62G é a superfície de ruptura de uma amostra do Traço Referência, onde se observa apenas a presença de casca do arroz.

Na Figura 62A e na Figura 62B, observam-se duas fibras que foram arrancadas. Na Figura 62C e na Figura 62E observam-se duas fibras que sofreram ruptura, enquanto Figura 62D e Figura 62F as fibras estavam no sentido da linha de ruptura e não atuaram a favor da resistência. Devido à pequena dimensão da casca do arroz (Figura 62G) é mais difícil notar as fibras rompidas ou arrancadas.

Figura 62 – Amostras prismáticas rompidas



Fonte: Elaboração própria

Embora não tenha sido possível determinar correlação entre o comprimento e a porcentagem da PA com a resistência à tração foi verificado que todos os compósitos com palha do arroz obtiveram desempenho superior. O fator preponderante para não encontrar relação entre as características principais da palha e a resistência à tração possivelmente foi a diferença entre diâmetro e estado de degradação da PA. Outra situação que pode ter influenciado foi a distribuição da palha, como pode ser observado na Figura 62F em algumas amostras a superfície de ruptura não tinha presença de PA em direção longitudinal. Portanto, para verificar com maior confiabilidade se há influência do comprimento e da porcentagem da PA na

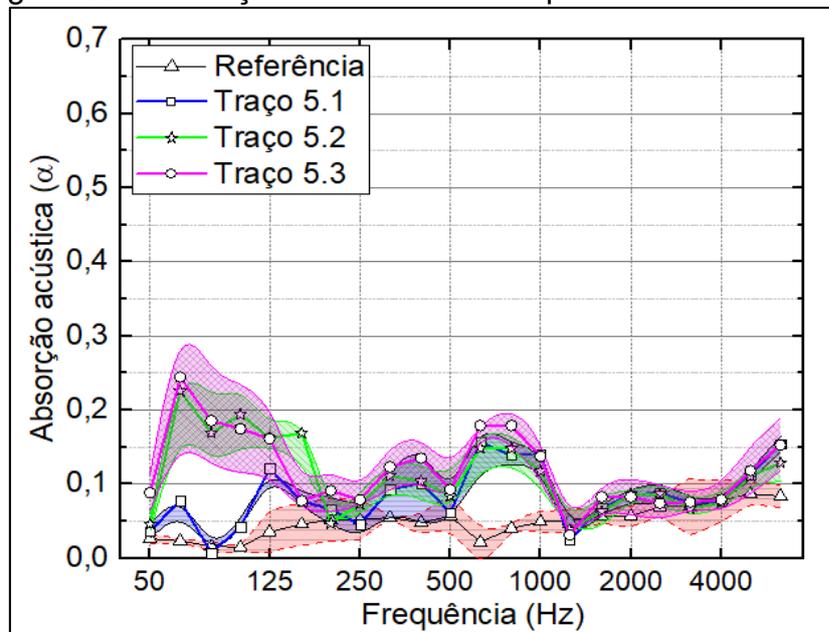
resistência à tração, é necessário utilizar amostras com maiores dimensões, pois acarretará em maior quantidade de PA na seção de ruptura das amostras.

4.2.4 Absorção acústica

A primeira caracterização quanto ao desempenho acústico dos compósitos se deu através de ensaios de absorção acústica. Assim como na análise comparativa entre o Traço Referência e o Concreto Celular (seção 4.1.4) a faixa de frequência aferida foi de 50 Hz à 6.300 Hz, com leitura de 22 pontos, e médias foram obtidas através de três amostras. Os valores individuais dos ensaios estão no Apêndice D.

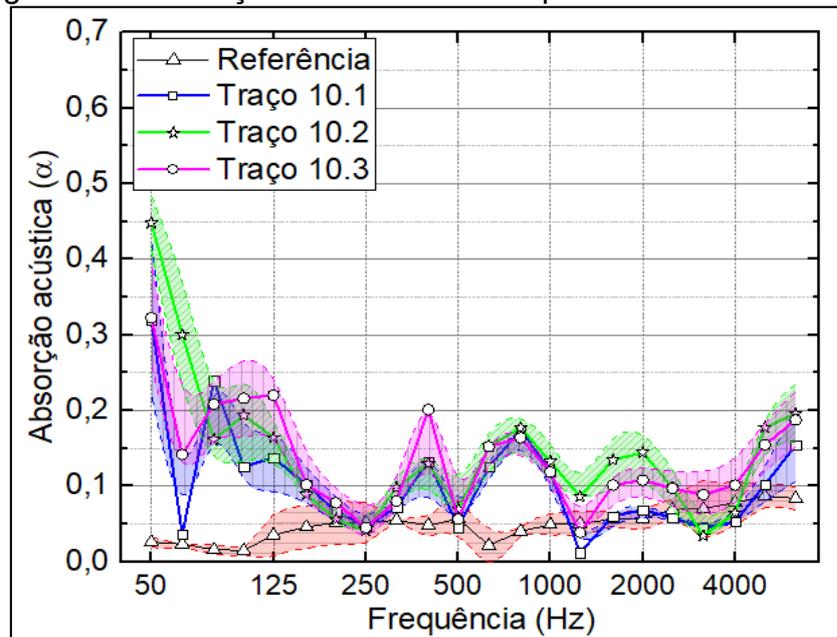
As Figura 63, 64 e 65 ilustram as curvas de absorção acústica dos materiais com a porcentagem fixada e os comprimentos variáveis, sempre em comparação com o Traço Referência.

Figura 63 – Absorção acústica dos compósitos com 5% de PA



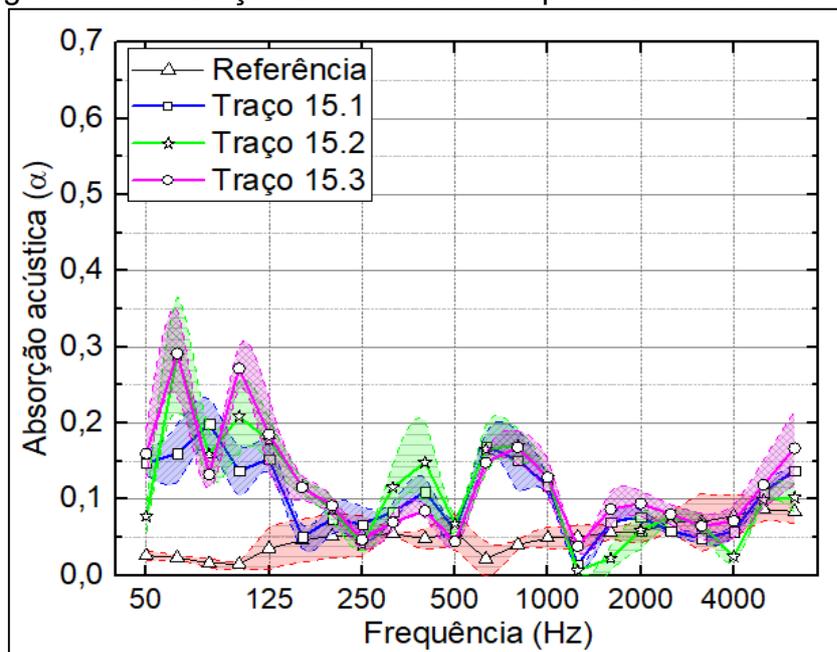
Fonte: Elaboração própria

Figura 64 – Absorção acústica dos compósitos com 10% de PA



Fonte: Elaboração própria

Figura 65 – Absorção acústica dos compósitos com 15% de PA



Fonte: Elaboração própria

Com resultados semelhantes para todos os comprimentos em cada porcentagem de palha do arroz, a análise pode ser realizada de maneira generalizada. Ficou observado que na primeira faixa de frequência (50 Hz à 1250 Hz) - onde foram utilizadas amostras com dimensões maiores (seção 3.3.7) - os compósitos com palha do arroz obtiveram maior capacidade de absorver som, enquanto nas amostras menores não houve diferença significativa.

Com o auxílio das faixas de erro é possível verificar que, em nenhuma das porcentagens de palha, o comprimento trouxe acréscimo significativo de desempenho, isto é, as curvas ficaram em geral dentro das margens de erro. A diferença observada na absorção acústica se deu apenas em relação ao Traço Referência, sendo que todos os materiais com palha do arroz obtiveram melhor capacidade de absorver som.

Conforme observado na faixa de frequência maior (1.250 Hz a 6.300 Hz), não houve diferença de absorção acústica nem entre os compósitos com palha e nem com o Traço Referência, isso ocorreu devido a dimensão da menor amostra, onde fica difícil haver homogeneidade na distribuição da PA em relação ao corpo de prova. Para comprovar isso, foram seccionadas ao meio uma amostra de cada traço, selecionadas ao acaso. A Figura 66 ilustra as amostras cortadas ao meio.

Figura 66 – Amostras do ensaio de absorção acústica seccionadas ao meio



Fonte: Elaboração própria

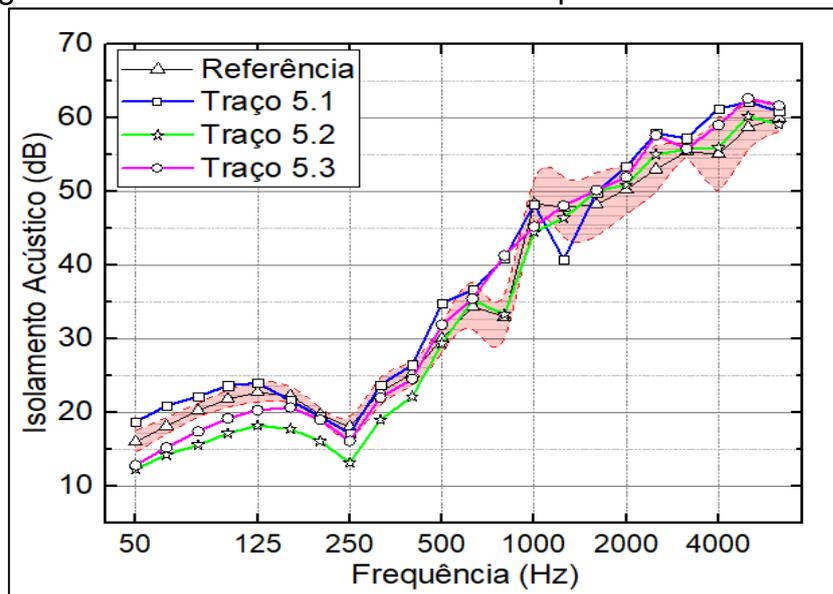
Como pode ser observado todas as amostras possuem quantidade significativa de casca na seção transversal, no entanto em nenhuma amostra foi encontrado palha do arroz de qualquer dimensão (1 cm, 2 cm ou 3 cm). A falta de palha nos corpos de prova pode ser atribuída a pequena dimensão do molde utilizado e a pequena porcentagem de palha adicionada em cada traço.

4.2.5 Isolamento acústico

Os resultados de isolamento acústico foram aferidos a partir da média de três amostras e os dados gerais constam no Apêndice E. As Figura 67, 68 e 69 ilustram os resultados através de curvas traçadas a partir de 22 pontos de leitura.

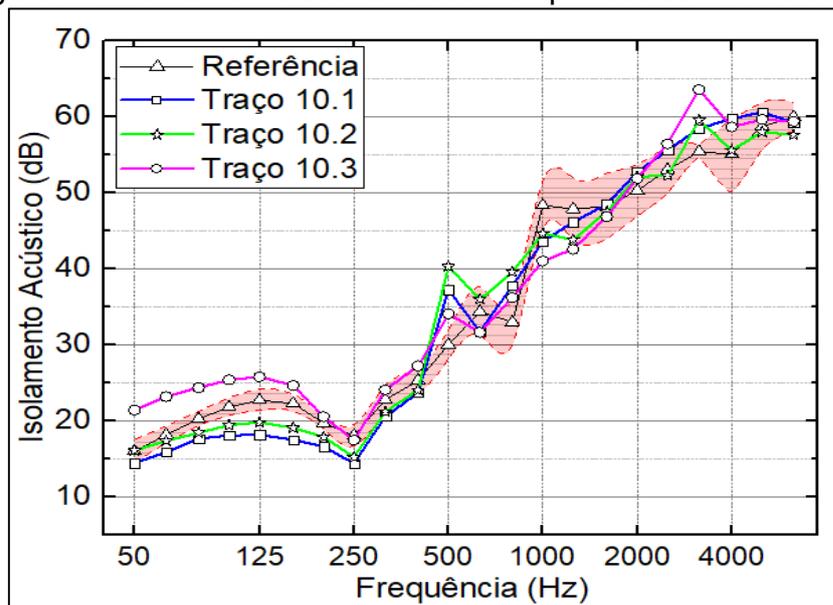
Nos três gráficos foram plotadas apenas as curvas de desvio padrão para o Traço Referência, visto que as curvas estão todas muito próximas e não há diferença de desempenho entre os compósitos com palha em função de comprimento ou porcentagem.

Figura 67 – Isolamento acústico dos compósitos com 5% de PA



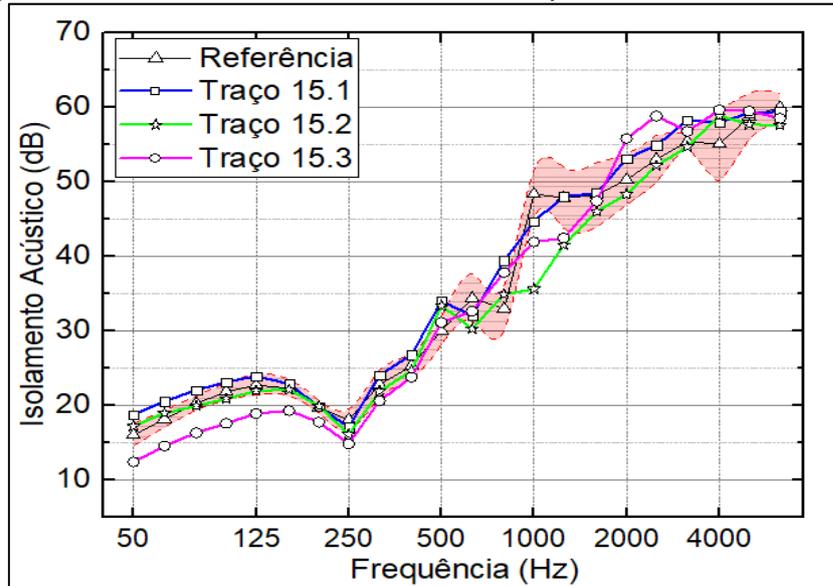
Fonte: Elaboração própria

Figura 68 – Isolamento acústico dos compósitos com 10% de PA



Fonte: Elaboração própria

Figura 69 – Isolamento acústico dos compósitos com 15% de PA



Fonte: Elaboração própria

Mesmo com coeficiente de variação no geral abaixo de 10%, a faixa de erro do Traço Referência sobrepõe as curvas dos demais compósitos em praticamente todos os pontos. Mesmo com o aumento da porosidade a capacidade de isolamento dos compósitos não foi prejudicada, e manteve-se dentro dos mesmos limites do Concreto Celular e do Traço Referência, ou seja, não há variação dos resultados em função da adição da palha do arroz, o que pode ser motivado pela dimensão das amostras, como já explicitado na análise da absorção acústica (seção 4.2.4).

4.2.6 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos compósitos foi determinada através da média de três amostras (todos os dados constam no Apêndice F). A Tabela 23 apresenta os valores médios de cada compósito com o respectivo tratamento estatístico.

Tabela 23 – Condutividade térmica dos compósitos

Traço	Condutividade Térmica (W/m.K)	Desvio Padrão (W/m.K)	Variância	C.V. (%)
Traço Referência	0,2756	0,0131	1,73E-04	4,77
Traço 5.1	0,3009	0,0168	2,82E-04	5,58
Traço 5.2	0,2591	0,0200	3,48E-04	7,20
Traço 5.3	0,2247	0,0169	2,87E-04	7,53
Traço 10.1	0,2574	0,0234	5,46E-04	9,08
Traço 10.2	0,2606	0,0100	2,00E-04	5,43
Traço 10.3	0,2390	0,0082	6,68E-05	3,42
Traço 15.1	0,2563	0,0190	3,60E-04	7,40
Traço 15.2	0,2549	0,0228	5,22E-04	8,96
Traço 15.3	0,2133	0,0186	3,47E-04	8,73

Fonte: Elaboração própria

Os dados de condutividade térmica foram correlacionados à massa específica no estado endurecido, ao comprimento da PA e à porcentagem da PA. Todas as correlações foram feitas com as amostras individuais dos compósitos com a presença de palha, ou seja, 27 amostras. As massas específicas utilizadas para o cálculo foram obtidas através das amostras utilizadas para medição da condutividade térmica, ao contrário dos valores encontrados nas demais análises, onde a MEE foi obtida através das amostras cilíndricas.

A Tabela 24 apresenta os coeficientes de correlação dos três fatores principais com a condutividade térmica.

Tabela 24 – Coeficiente de correlação de Pearson para condutividade térmica

Fatores	Valor de P	Coeficiente de Pearson
MEE X Condutividade Térmica	0,0054	0,5200
Porcentagem de PA X Condutividade Térmica	0,1354	-0,2948
Comprimento de PA X Condutividade Térmica	$1,169 \times 10^{-4}$	-0,6737

Fonte: Elaboração própria

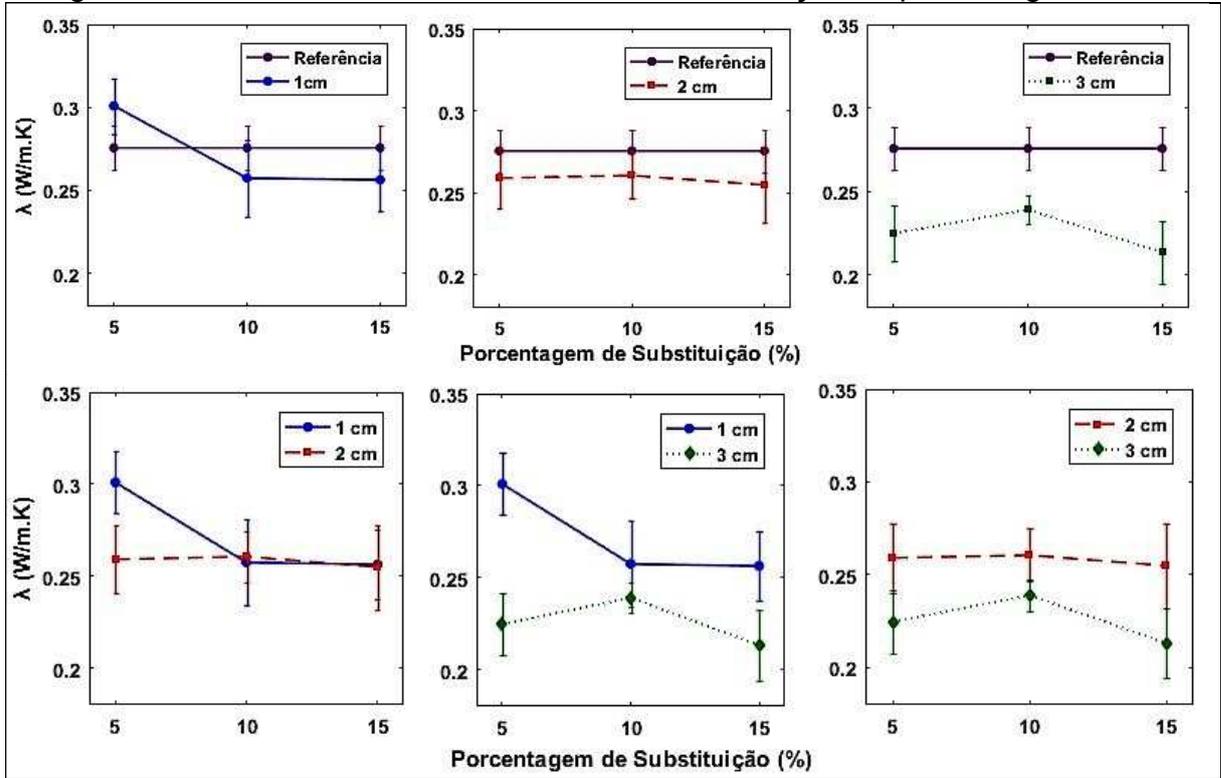
Observa-se que ao nível de 0,05 o comprimento de PA teve correlação com a condutividade térmica - sendo inversamente proporcional e de moderada a forte - e a massa específica no estado endurecido obteve correlação de moderada a forte, sendo essa diretamente proporcional em relação à condutividade. A porcentagem de palha foi o fator com menor influência na condutividade térmica, visto a significância de 0,05 adotada.

A correlação entre a massa específica no estado endurecido e a condutividade térmica apresentada na Tabela 24, caracterizada por sua proporcionalidade, pode ser consequência da água presente na estrutura interna do compósito, principalmente nas fibras da CA e da PA. Visto que dentro do mesmo traço obteve-se pequenas variações de massa específica e de condutividade térmica, o coeficiente de correlação de Pearson acompanhou a tendência de que quanto mais leve for o material, menor a condutividade térmica.

As Figuras 70 e 71 relacionam a condutividade térmica em função da porcentagem e do comprimento da PA respectivamente. Com exceção do T5.1, todos os compósitos com PA obtiveram melhor desempenho térmico que o Traço Referência. Além disso, na Figura 70 nota-se a correlação entre o comprimento de palha e a condutividade térmica indicada na Tabela 24, onde há uma certa linearidade na redução da condutividade das curvas em função do aumento do comprimento de

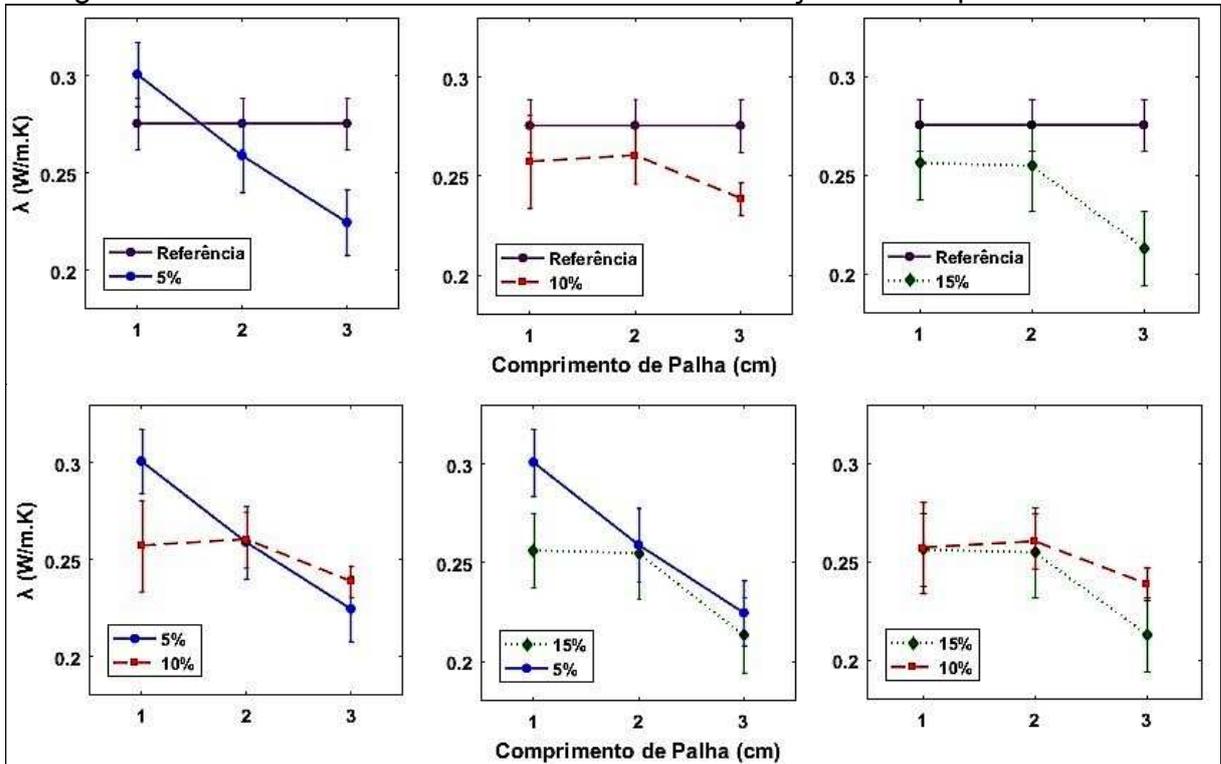
PA. Já na Figura 71 a maioria dos valores se sobrepõem, indicando a baixa correlação entre esse fator e os resultados encontrados.

Figura 70 – Análise da condutividade térmica em função da porcentagem de PA



Fonte: Elaboração própria

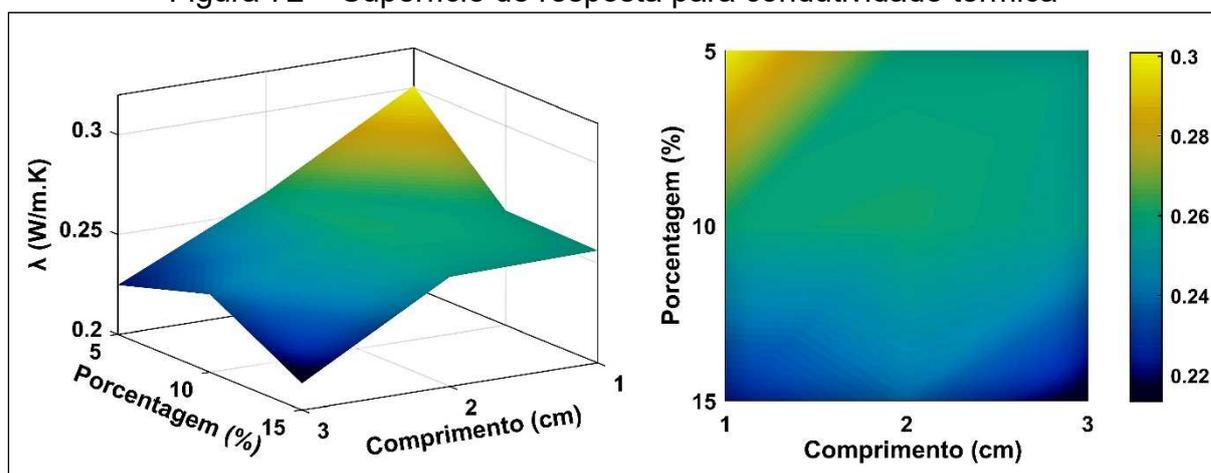
Figura 71 - Análise da condutividade térmica em função do comprimento da PA



Fonte: Elaboração própria

Uma vez que para os resultados de condutividade térmica a palha do arroz teve grande significância, foi feita uma superfície de resposta para melhor entender as tendências de condutividade térmica em função das duas características estudadas da palha. A superfície de resposta é ilustrada na Figura 72.

Figura 72 – Superfície de resposta para condutividade térmica



Fonte: Elaboração própria

A superfície de resposta indica queda da condutividade principalmente com o aumento do comprimento. Já com o aumento da porcentagem é mais difícil de estabelecer a mesma relação. Essas duas características seguem o coeficiente de correlação calculado e apresentado na Tabela 24.

Com todas as correlações devidamente explicitadas, foi determinado se a diferença dos valores era realmente significativa pela análise das variâncias (ANOVA) pelo método de Tukey com confiança de 95%. A Tabela 25 apresenta os resultados do teste de significância.

Tabela 25 – Análise de diferença significativa das médias pelo método de Tukey

Comprimentos (cm)	Diferença significativa?	Porcentagens (%)	Diferença significativa?
1 e 2	Não	5 e 10	Não
1 e 3	Sim	5 e 15	Não
2 e 3	Sim	10 e 15	Não

Fonte: Elaboração própria

Como observado na Tabela 25 as diferentes porcentagens de palha não alteraram significativamente os resultados de condutividade térmica. Esse fator ocorreu, possivelmente, porque nos casos em que houve menor quantidade de PA, a CA foi responsável por constituir o mesmo volume de vazios, uma vez que a quantidade total de fibra vegetal (CA + PA) foi a mesma para todos os compósitos. No entanto, é difícil afirmar que em caso de adições de maiores quantidades de PA não exista diferença significativa nos resultados de condutividade térmica. Sabe-se que

para fazer essa verificação é necessário testar amplitudes maiores que os 10% utilizados nesta pesquisa.

Já na análise em função do comprimento da palha, observa-se que a partir da incorporação de PA com 3 cm, a condutividade térmica começa a ter resultados significativamente diferentes, os quais - conforme as análises de correlação, dos gráficos de curvas e da superfície de resposta - são melhorados em função do aumento do comprimento da PA.

4.3 Estudo da durabilidade do T15.3 com CA e PA saturados

Para os estudos de durabilidade o compósito com melhor desempenho foi determinado através dos resultados obtidos na condutividade térmica. Essa escolha deu-se a partir das análises realizadas na seção 4.2, onde foi determinado que não houve diferença de desempenho acústico entre os compósitos com palha do arroz.

Quanto a resistência à tração, foi determinado que não houve correlação com os comprimentos e com as porcentagens de palha, além disso, conforme referenciado por Gram (1998), Jauberthie et al. (2003), Mohr et al. (2005) e Toledo Filho, et al. (2005) a fibra vegetal tende a perder a capacidade resistente e, portanto, as melhoras na resistência obtidas com adição da PA tendem a reduzir em função da idade do compósito.

Em relação a resistência à compressão axial foi determinado na seção 4.1.2 que o Traço Referência atingiu os requisitos mínimos da NBR 15.270 (ABNT, 2005) e da NBR 13.438 (ABNT, 2013), e com exceção dos Traços 15.1 e 15.2 todos os demais com adição de PA obtiveram resistência à compressão axial superior ao Traço Referência.

Após a definição do T15.3 como melhor compósito, optou-se por saturar a CA e a PA antes da adição das mesmas à espuma. Essa metodologia serviu para verificar qual o melhor procedimento a adotar, e testar as variações na resistência mecânica e no desempenho térmico em relação ao T15.3 com CA e PA "in natura". As comparações entre estes dois traços se deram aos 28 dias de cura, e os ensaios para verificar a durabilidade ocorreram aos 91 dias de cura.

Para acelerar a deterioração da CA e da PA algumas amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem (seção 3.3.12), e os resultados obtidos foram comparados ao mesmo material com tempo de cura equivalente à temperatura ambiente.

As resistências à compressão axial e à tração na flexão e a condutividade térmica, assemelharam-se aos estudos de (JAUBERTHIE, 2003). Salienta-se que não foram realizados novos ensaios de desempenho acústico para as amostras do T15.3 com CA e PA saturados (T15.3S), visto que não foi observado diferença significativa em nenhum compósito com palha estudado nas seções 4.2.4 e 4.2.5.

Os estudos de durabilidade foram encerrados com ensaios de difração de raios X (DRX). A DRX foi feita a fim de verificar se havia diferença nas composições dos materiais após os ciclos de molhagem e secagem e dos materiais curados à temperatura ambiente aos 28 e aos 91 dias de cura.

4.3.1 Determinação das massas específicas

Como o T15.3, já caracterizado na seção 4.2, teve seus parâmetros utilizados como referência para a sequência da pesquisa, todos os resultados referidos em relação a esse compósito serão os mesmos já apresentados anteriormente.

O T15.3S (S - Saturado), adaptado nesta etapa da pesquisa, teve concretagem única a fim de evitar qualquer influência aleatória citada na seção 4.2.1, uma vez que seus estudos se deram em duas idades diferentes e com cura em diferentes condições. Por esse motivo as massas específicas no estado fresco para o T15.3S com 28 dias de cura, para o T15.3S com 91 dias de cura e para o T15.3S com 91 dias de cura sob ciclos de molhagem e secagem são iguais. A Tabela 26 apresenta as MEF:

Tabela 26 – Massa específica no estado fresco

Traço	Massa específica (kg/m ³)
T15.3 – 28 dias	815,00
T15.3S – 28 dias	773,40
T15.3S - 91 dias	773,40
T15.3S - 91 dias - Ciclos M/S	773,40

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado a massa específica do T15.3S reduziu significativamente em relação ao T15.3. Isso ocorreu, pois com a saturação da palha e da casca houve incremento elevado de água na mistura, o que elevou a MEF para 910 kg/m³. Devido ao aumento da densidade optou-se por adicionar mais espuma à mistura. Foi então adicionada espuma suficiente para o material ficar com densidade o mais próximo possível do T15.3.

A determinação da massa específica no estado endurecido ocorreu sempre antes da realização dos ensaios de compressão axial, assim como para o T15.3.

Desta forma, mesmo que o material com CA e PA saturadas tenha sido moldado a partir da mesma mistura, os valores tiveram variação em função do tempo e da condição de cura. A Tabela 27 apresenta os valores médios de MEE, os dados individuais estão no Apêndice A.

Tabela 27 – Massa específica no estado endurecido

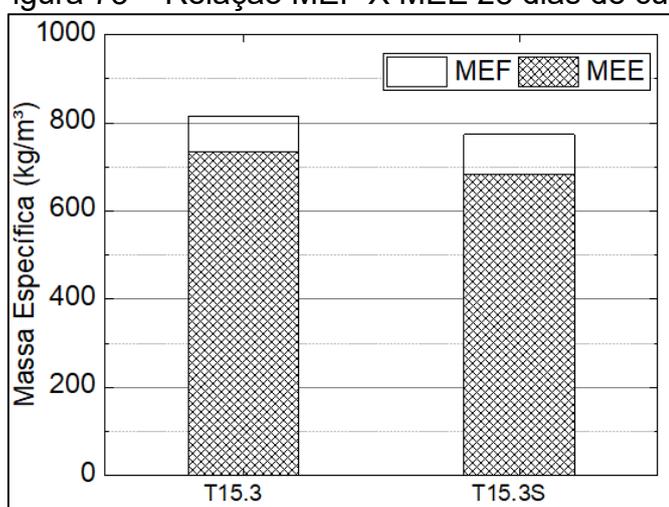
Traço	Massa específica no estado endurecido (kg/m ³)	Desvio Padrão (kg/m ³)	Variância	C.V. (%)
T15.3	733,58	10,7200	1,15E+02	1,46
T15.3S	684,34	5,4955	3,02E+01	0,80
T15.3S- 91 dias	672,81	16,2640	2,65E+02	2,42
T15.3S - 91 dias - Ciclos M/S	697,49	20,9640	4,39E+02	3,01

Fonte: Elaboração própria

As comparações dos materiais se darão primeiramente entre o T15.3 e o T15.3S com tempo de cura de 28 dias. Após as primeiras análises serão comparados os T15.3S sob tempo e procedimento de cura diferentes.

A Figura 73 ilustra a comparação entre as MEF e as MEE entre o T15.3 e o T15.3S.

Figura 73 – Relação MEF X MEE 28 dias de cura

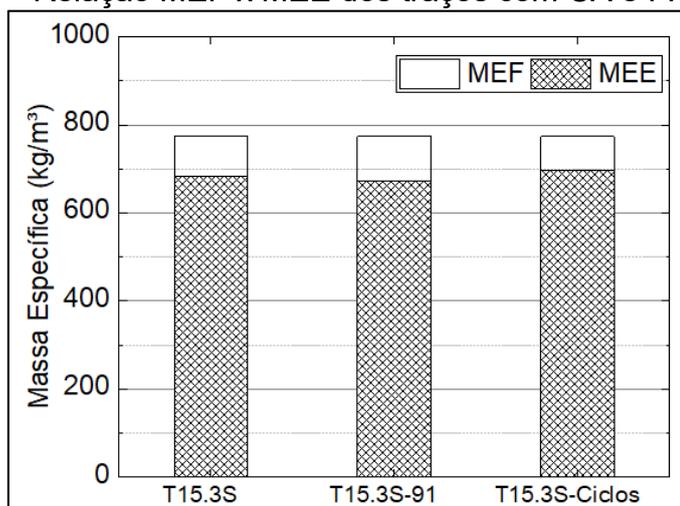


Fonte: Elaboração própria

Embora a redução tenha sido relativamente linear, observa-se que o T15.3S perdeu maior valor de densidade. Este resultado já era esperado uma vez que a quantidade de água adicionada no T15.3S foi maior. Mesmo assim é difícil afirmar que a estrutura interna do compósito com CA e PA saturadas não manteve água aprisionada, principalmente nos pontos onde havia fibra vegetal.

A Figura 74 ilustra a comparação das densidades do T15.3S nas duas idades e nos dois procedimentos de cura.

Figura 74 – Relação MEF x MEE dos traços com CA e PA saturadas

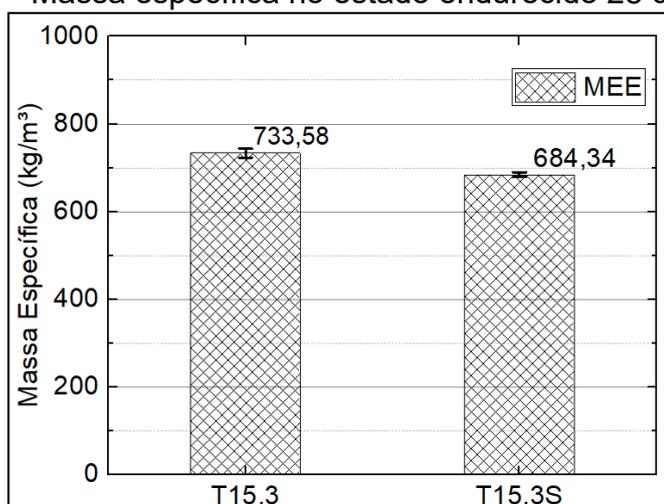


Fonte: Elaboração própria

Observa-se que as MEF são as mesmas para todos materiais, no entanto, a redução para a MEE variou. Primeiramente, dos 28 dias de cura para os 91 dias de cura à temperatura ambiente houve redução da MEE, o que comprova que o material vai perdendo a água da estrutura interna com o passar do tempo, e que os 65°C não são suficientes para secagem total das amostras. Em relação as amostras com tratamento de ciclos de molhagem secagem, observa-se que a MEE aumentou, ficando maior até mesmo que a obtida aos 28 dias de cura. Este resultado indica que o material absorveu mais água durante os ciclos de molhagem, do que perdeu durante os ciclos de secagem, ou seja, os compósitos têm maior facilidade em absorver do que em perder água.

As comparações das MEE foram feitas primeiramente entre o T15.3 e o T15.3S com cura de 28 dias à temperatura ambiente. A Figura 75 ilustra através de um gráfico de barras os valores obtidos, e conforme observado verifica-se que não há sobreposição das barras de erro e as MEE são significativamente diferentes.

Figura 75 – Massa específica no estado endurecido 28 dias de cura

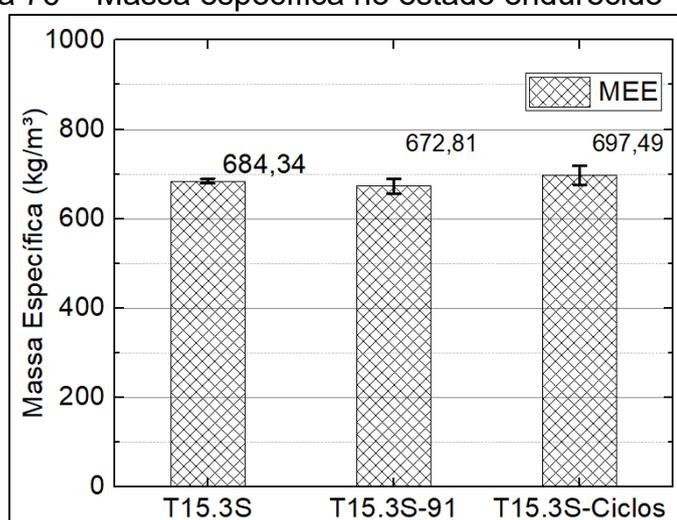


Fonte: Elaboração própria

Com os resultados ilustrados anteriormente, pode-se esperar uma certa influência da MEE principalmente na condutividade térmica dos materiais, uma vez que conforme já concluído na seção 4.2.6 há uma correlação de proporcionalidade entre MEE e condutividade.

A Figura 76 ilustra os valores de massa específica no estado endurecido com as barras de erro obtidas para os traços com casca e palha saturadas.

Figura 76 – Massa específica no estado endurecido T15.3S



Fonte: Elaboração própria

Embora a MEE média das amostras que passaram por tratamento de ciclos de molhagem e secagem seja superior à das amostras com cura à temperatura ambiente aos 28 e aos 91 dias de cura, sua faixa de erro compreende parte dos resultados para as amostras do T15.3S sob cura à temperatura ambiente.

4.3.2 Resistência à compressão axial

Os resultados médios obtidos nos ensaios de compressão axial constam na Tabela 28. Os valores de resistência foram obtidos através da média de três amostras. Salienta-se que o T15.3 já foi caracterizado na seção 4.2.2 quanto à resistência à compressão axial, e está presente nesta etapa da pesquisa para comparação com o material de igual quantidade de fibras vegetais e cimento, com alteração apenas na forma como as fibras foram adicionadas à mistura (todas as fibras utilizadas foram saturadas, originando assim o T15.3S).

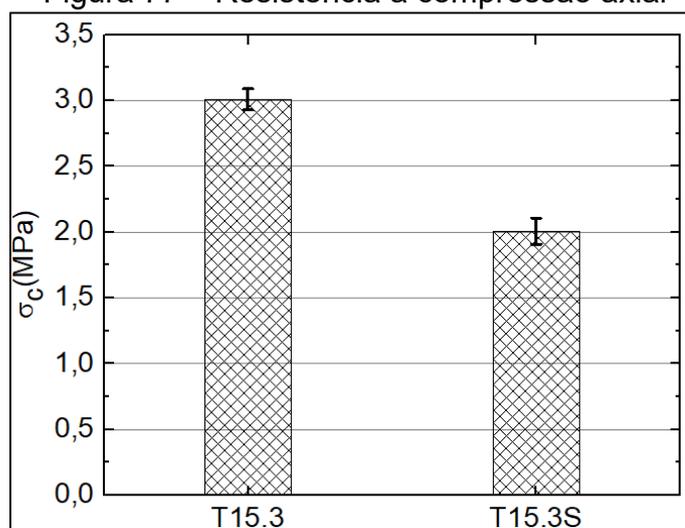
Tabela 28 – Resistência à compressão axial

Traço	Resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
T15.3 – 28 dias	3,01	0,0794	6,30E-03	2,64
T15.3S – 28 dias	2,01	0,0987	9,73E-03	4,92
T15.3S - 91 dias	2,22	0,2113	4,46E-02	9,50
T15.3S- 91 dias - Ciclos M/S	2,52	0,0681	4,63E-03	2,70

Fonte: Elaboração própria

Todos os dados que constam na Tabela 28 foram ilustrados através de gráficos nas figuras subsequentes para melhor entendimento e análise dos resultados. Começando pela comparação entre o T15.3 e o traço que teve CA e PA adicionadas de maneira saturada (T15.3S), a Figura 77 mostra através de gráfico de colunas com barras de erro os resultados.

Figura 77 – Resistência à compressão axial



Fonte: Elaboração própria

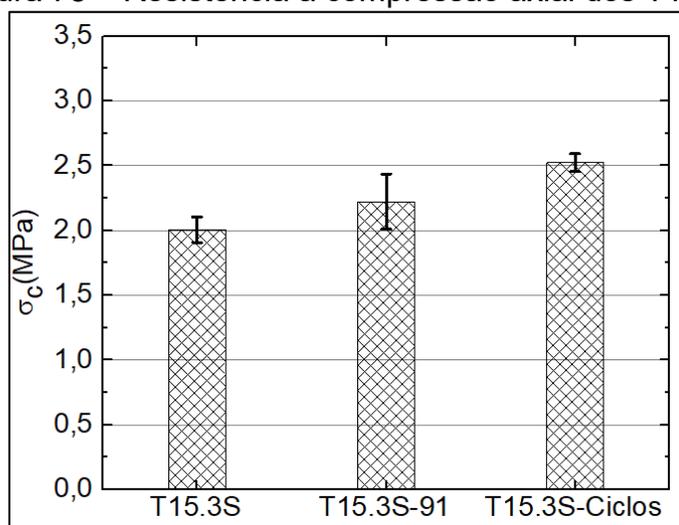
Como pode ser observado o T15.3S teve uma redução muito significativa na resistência à compressão axial. As barras de erro estão distantes o suficiente para afirmar que a diferença das médias é estatisticamente significativa. Contempla-se que a resistência reduziu muito no material em que foi adotada a nova metodologia de

produção. A redução de resistência obtida é em parte influenciada pela massa específica no estado endurecido, conforme a seção 4.2.2 já foi definido um coeficiente de correlação moderado, e conforme indicado na seção 4.3.1 a MEE do T15.3S teve um valor bem abaixo do T15.3.

A redução da resistência à compressão axial após a modificação do estado das fibras adicionadas pode ser atribuída à saturação da casca e da palha. Isso se dá pela tendência de formação de poros maiores, pois as fibras aumentam significativamente de volume quando saturadas, e conforme já mencionado na seção 4.3.1 a redução da MEE também foi consequência da adição de maior quantidade de água na mistura. Portanto a soma destes fatores implica na menor resistência à compressão axial.

A Figura 78 ilustra os resultados de resistência à compressão axial dos compósitos com CA e PA saturados em comparação com duas idades de cura diferentes à temperatura ambiente (28 e 91 dias) e uma idade (91 dias) de cura sob ciclos de molhagem e secagem.

Figura 78 – Resistência à compressão axial dos T15.3S



Fonte: Elaboração própria

Na análise comparativa do T15.3S sob diferentes idades e procedimentos de cura observa-se que houve um aumento na resistência à compressão axial dos 28 para os 91 dias. Nas amostras que foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem (T15.3S-Ciclos) a resistência também aumentou, tanto em relação às suas equivalentes em idade, mas com cura à temperatura ambiente, como em relação aos equivalentes com idade de 28 dias. O aumento na resistência após a aceleração da degradação da casca e da palha do arroz está coerente com os resultados obtidos por Jauberthie et al. (2003), e indica que a médio ou longo prazo, dependendo das

condições climáticas à que o material está submetido, a casca aumenta a resistência à compressão axial do concreto.

A partir dos valores que constam na Tabela 28 verifica-se que a resistência das amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem foi 13,50% superior das amostras com cura em condições normais de temperatura e umidade relativa. O valor fica muito próximo dos 15,50% de aumento encontrados por Jauberthie et al. (2003).

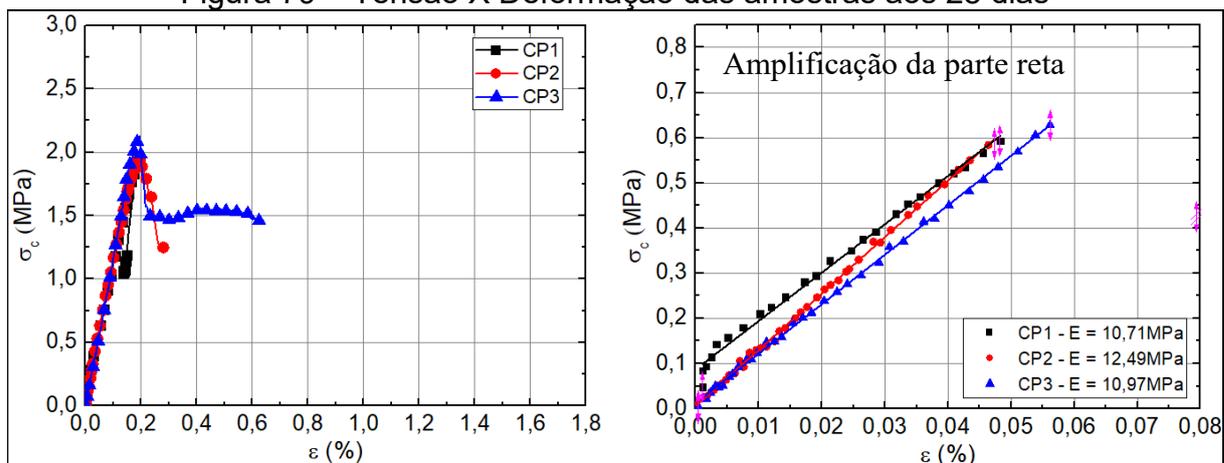
A confirmação de que o concreto com casca do arroz obtém um acréscimo de resistência à compressão axial em função da degradação da fibra, oferece um maior grau de confiança à projeção estipulada na seção 4.1.2, onde foi comparado o Traço Referência (concreto celular com casca do arroz) e o Concreto Celular. Mesmo com uma redução do aumento de resistência (de 15,50% para 13,50%) o traço com casca segue com uma projeção de obter resistência maior que o Concreto Celular sem casca.

Além disto, colocando a projeção de 13,50% de aumento da resistência à compressão axial nos compósitos com a combinação de casca e palha do arroz (Tabela 18), com exceção do T15.1, todos os demais materiais atingem valores superior aos 3,00 MPa requisitado pela NBR 6136 (ABNT, 2014).

Após a aferição de todos os traços estudados nas seções 4.1.2 e 4.2.2 foi observado que os compósitos sofriam uma deformação muito elevada até romperem definitivamente, como essa deformação não é característica de materiais frágeis como o concreto e as cerâmicas, optou-se por fazer nas amostras do T15.3S as curvas de “Tensão X Deformação”, e a partir da mesma determinar a deformação total dos materiais e também o módulo de elasticidade.

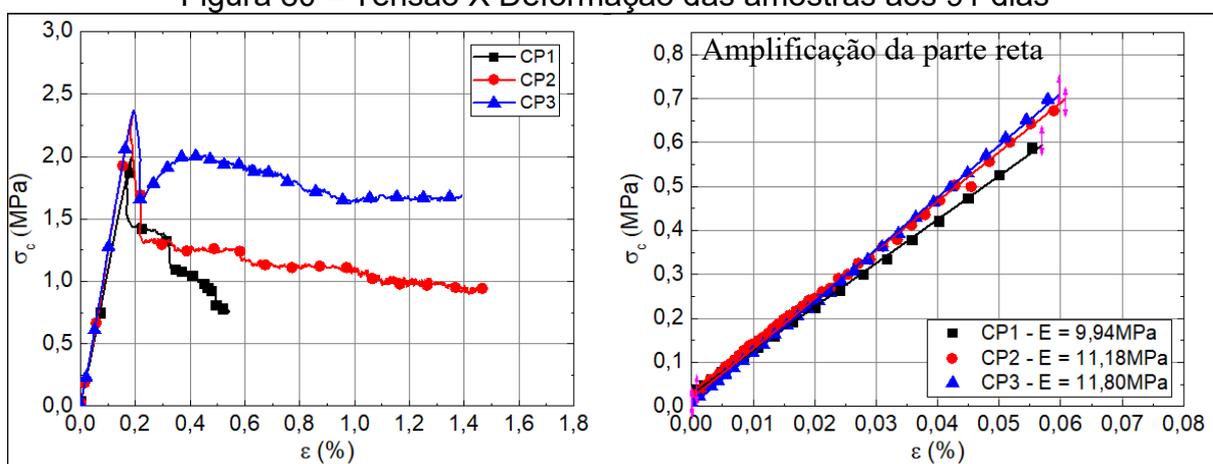
As Figuras 79, 80 e 81 ilustram, respectivamente, os dados das amostras do T15.3S, aos 28 dias e aos 91 dias de cura em condições de temperatura e umidade relativa ambiente e aos 91 dias de cura sob oito ciclos de molhagem e secagem. As figuras ilustram a curva “Tensão X Deformação” com a tensão residual e a curva “Tensão X Deformação” com o valor limitado a 30% da tensão máxima resistida pelo material, onde, a partir de linhas de tendência, foi obtido o módulo de elasticidade ou módulo de Young.

Figura 79 – Tensão X Deformação das amostras aos 28 dias



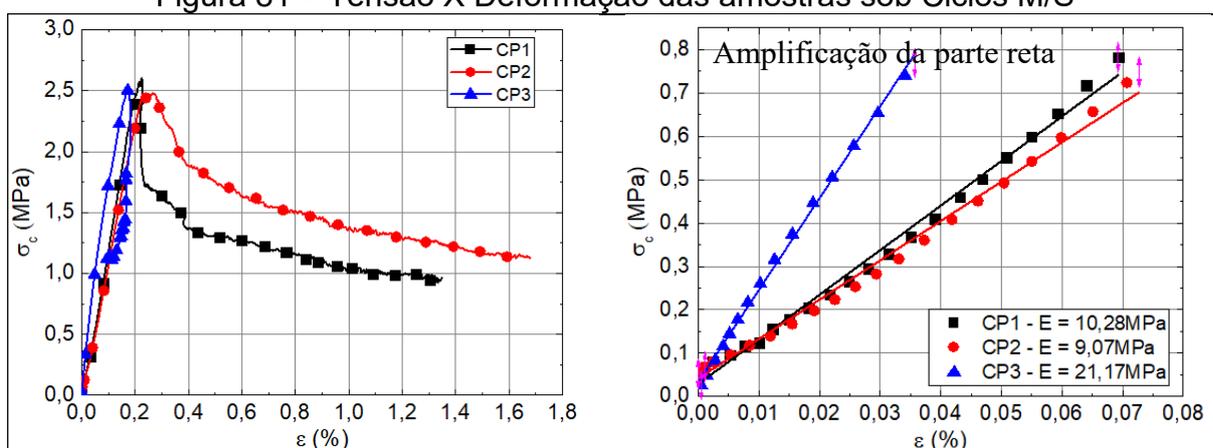
Fonte: Elaboração própria

Figura 80 – Tensão X Deformação das amostras aos 91 dias



Fonte: Elaboração própria

Figura 81 – Tensão X Deformação das amostras sob Ciclos M/S

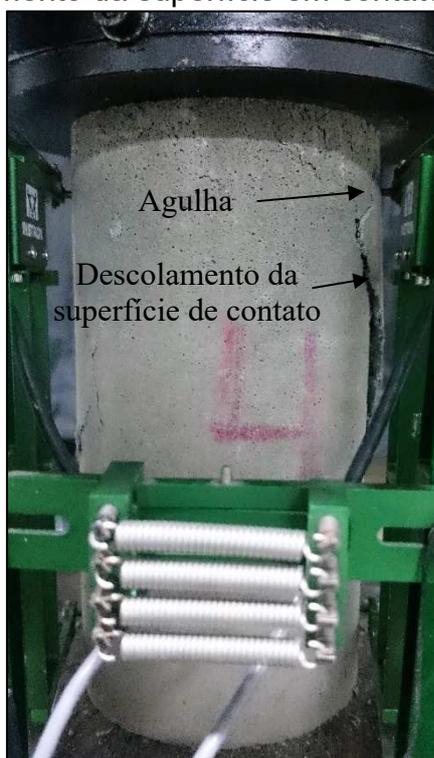


Fonte: Elaboração própria

Através das curvas de “Tensão X Deformação” concluiu-se que os compósitos apresentam uma elevada tensão residual e sofrem uma deformação muito elevada. É notável que alguns CP’s obtiveram menor tensão residual e menor deformação, caso dos CP’s 1 e 2 na Figura 79, do CP 1 na Figura 80 e do CP 3 na Figura 81, esses

valores fora do esperado e do observado visualmente foram causados pela fissuração que, nestes casos, foi concentrada no aparato medidor, fazendo com que houvesse deslocamento excessivo e a linearidade da deformação fosse interrompida nesse instante. A Figura 82 ilustra o problema ocorrido na medição de alguns corpos de prova durante os ensaios de resistência à compressão axial.

Figura 82 – Descolamento da superfície em contato com o extensômetro



Fonte: Elaboração própria

A “camada” de concreto que foi descolada do corpo de prova estava em contato com o extensômetro responsável pela medição da deformação ocorrida. Essa parte do CP acabou sofrendo uma deformação abrupta e interferindo na leitura de algumas amostras. Por conseguinte, foi verificado que alguns corpos de prova não possuíam na curva “Tensão X Deformação” uma resistência residual constante e uma grande deformação.

Comprovado que foi por problemas experimentais práticos que alguns resultados não obtiveram elevada resistência residual e grande deformação, pode-se afirmar que os compósitos não apresentam comportamento frágil como do concreto convencional, seja pela alta presença de poros do concreto celular, que vão rompendo e sofrendo inúmeras deformações milimétricas com o aumento do carregamento, ou pela adição das fibras vegetais, que podem ter contribuído para obtenção dessas características.

Os valores do módulo de Young apresentados nos gráficos de “Tensão X Deformação” foram tratados estatisticamente e suas médias constam na Tabela 29, as médias foram obtidas a partir dos resultados dos três corpos de prova (CP’s), com exceção das amostras submetidas aos ciclos de molhagem e secagem, onde o CP 3 (Figura 81) obteve um desvio muito elevado e, portanto, foi descartado.

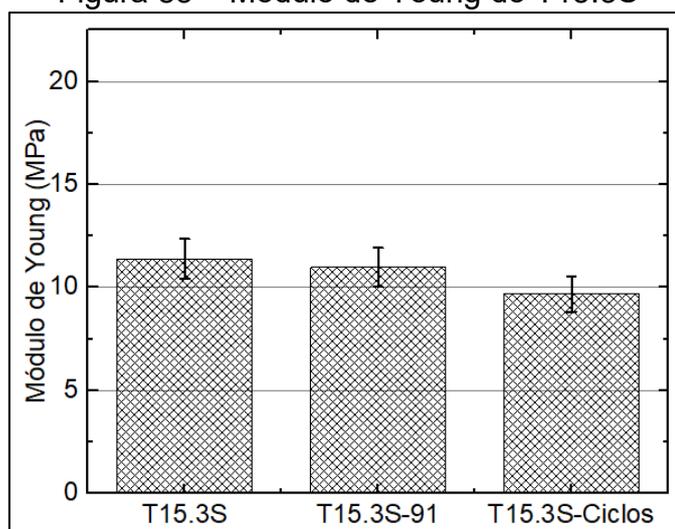
Tabela 29 – Módulo de Young dos compósitos com CA e PA saturadas

Traço	Módulo de Young (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Variância	C.V. (%)
T15.3S	11,39	0,96	9,24E-01	8,44
T15.3S-91 dias	10,97	0,95	8,97E-01	8,63
T15.3S-Ciclos M/S	9,68	0,86	7,32E-01	8,84

Fonte: Elaboração própria

Para melhor visualização e entendimento dos resultados obtidos os valores foram ilustrados na forma de gráfico na Figura 83.

Figura 83 – Módulo de Young do T15.3S



Fonte: Elaboração própria

Ao contrário do encontrado por Jauberthie et al. (2003), os valores obtidos para o módulo de Young ficaram todos compreendidos na mesma faixa de erro, e não sofreram alterações em função do avanço da degradação das fibras vegetais. Essa divergência pode ter ocorrido porque a matriz utilizada nesta pesquisa foi o concreto celular, o qual já tem como característica a alta porosidade e a elevada deformação quando submetido a carregamento elevado.

4.3.3 Resistência à tração na flexão em 3 pontos

Foram ensaiadas três amostras em cada idade para comparação com o T15.3 e posteriormente com as diferentes idades e condições de cura do T15.3S. A Tabela 30 apresenta os resultados encontrados.

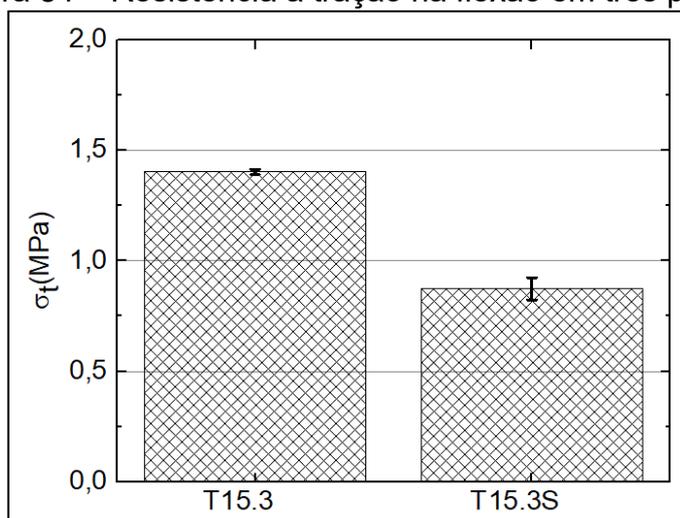
Tabela 30 – Resistência à tração na flexão em três pontos

Traço	Resistência à tração na flexão (MPa)	Desvio Padrão (kg/m ³)	Variância	C.V. (%)
T15.3	1,40	0,0111	1,24E-04	0,79
T15.3S	0,87	0,0503	2,53E-03	5,75
T15.3S-91 dias	1,13	0,0700	4,90E-03	6,19
T15.3S-Ciclos M/S	0,54	0,0285	8,13E-04	5,24

Fonte: Elaboração própria

A primeira comparação feita está ilustrada na Figura 84. Os materiais analisados são o T15.3 e o T15.3S (com CA e PA saturadas).

Figura 84 – Resistência à tração na flexão em três pontos



Fonte: Elaboração própria

Como pode-se perceber a resistência à tração na flexão em três pontos caiu drasticamente com a utilização de casca e palha do arroz saturadas. Como já dito anteriormente, quando há a saturação das fibras vegetais elas têm um aumento de volume por conta da incorporação da água em sua estrutura interna. É plausível que aos 28 dias de cura, com a redução da MEE, parte dessa água tenha sido extraída das fibras e elas tenham perdido volume.

A redução de volume das fibras vegetais causa diminuição entre o contato fibra-matriz. Com uma redução significativa do contato entre fibra-matriz a solitação da fibra por parte do carregamento não ocorre, tornando o compósito com características semelhantes ao de um concreto celular convencional.

A teoria para a redução da resistência à tração foi baseada na análise visual das amostras rompidas aos 28 dias. Foi observado um certo volume de vazios entre a palha do arroz e a matriz, o que gerou a possibilidade da redução da resistência à tração na flexão em três pontos ser ocasionada pela falta da ancoragem. Além disso, foi observado que as fibras dos traços com palha e casca saturadas não apresentaram rompimento como nos demais traços estudados na seção 4.2 (ilustrado na Figura 62). A Figura 85 ilustra uma imagem com ampliação e foco na interação fibra-matriz. Observa-se que há um grande “espaço” entre a palha do arroz e a matriz do compósito.

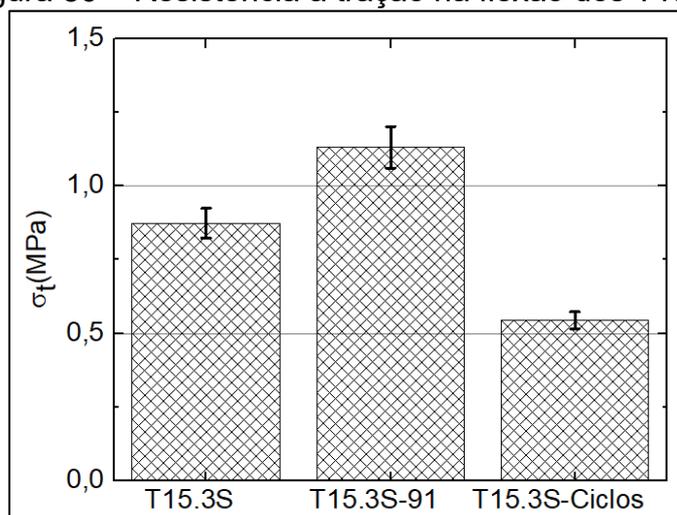
Figura 85 – Superfície de ruptura de uma amostra do T15.3S



Fonte: Elaboração própria

A próxima análise realizada foi a comparação entre as amostras do T15.3S com idades e tratamentos de cura diferentes. É apresentado na Figura 86 as resistências à tração na flexão obtidas com maior tempo de cura e após os ciclos de molhagem e secagem.

Figura 86 – Resistência à tração na flexão dos T15.3S



Fonte: Elaboração própria

Assim como na resistência à compressão axial, devido ao processo de cura do concreto à temperatura ambiente, houve um acréscimo de resistência à tração na flexão nas amostras aos 91 dias. No entanto, para as amostras que passaram por ciclos de molhagem e secagem, houve uma redução muito grande na capacidade resistente do material, ficando com valor final inferior a 50% das equivalentes com 91 dias de cura à temperatura ambiente.

Ao contrário da redução da resistência à tração na flexão estipulada em aproximadamente 9,00% por Jaubertie et al. (2003), onde foi feita mistura de casca do arroz seca com pasta de cimento, o compósito estudado nesta pesquisa teve uma redução de resistência de aproximadamente 52%. Essa grande diferença encontrada pode ser atribuída a menor interação fibra-matriz, conforme já ilustrado e apontado na Figura 85.

Assim, incrementando o proposto por diversos autores (GRAM, 1998; MOHR et al. 2005; TOLEDO FILHO et al., 2005 e JAUBERTHIE et al., 2003) que a redução da resistência ocorre em função da degradação das fibras vegetais, pode-se afirmar que ela também ocorre pela grande redução da ancoragem da fibra por parte da matriz, tudo em função da redução do volume inicial da fibra caracterizado pela lenta saída da água da estrutura interna do material.

4.3.4 Condutividade térmica

Os resultados de condutividade térmica estão apresentados na Tabela 31. Todos os valores foram obtidos através da média de três amostras, os dados completos individuais constam no Apêndice F.

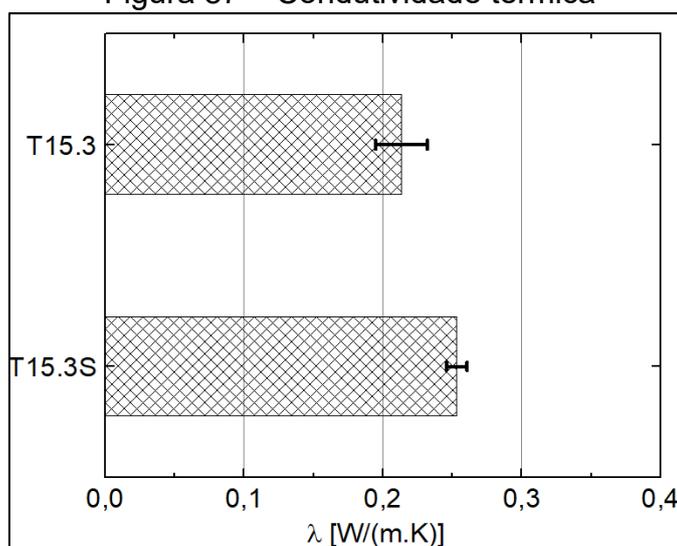
Tabela 31 – Condutividade térmica dos compósitos

Traço	Condutividade Térmica (W/m.K)	Desvio Padrão	Variância	C.V. (%)
T15.3	0,2133	0,0186	3,47E-04	8,73
T15.3S	0,2530	0,0075	5,57E-05	2,95
T15.3S-91 dias	0,2132	0,0065	4,25E-05	3,06
T15.3S-Ciclos	0,2002	0,0182	3,33E-04	9,11

Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentados numericamente pela Tabela 31 são ilustrados nas figuras subsequentes. As análises foram feitas primeiramente através da comparação entre o T15.3 e o T15.3S com cura de 28 dias à temperatura e umidade ambiente. A Figura 87 ilustra um gráfico para melhor visualização dos desempenhos:

Figura 87 – Condutividade térmica

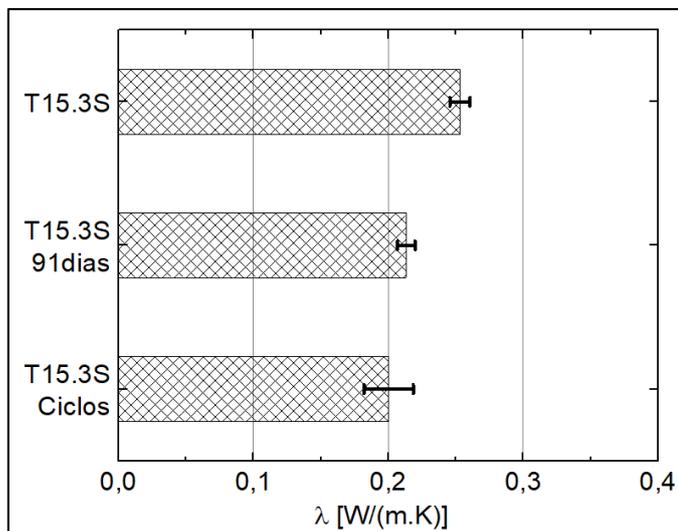


Fonte: Elaboração própria

Após os 28 dias de cura o T15.3S - com casca e palha do arroz saturadas - obteve uma condutividade térmica significativamente superior ao T15.3. A justificativa para esse valor está provavelmente na presença de água na estrutura interna das amostras, uma vez que com a adição da CA e da PA saturadas houve um grande acréscimo de água nos materiais. Assim, para ter uma noção mais exata da causa desse aumento é necessário realizar comparações com as amostras em idades superiores, pois com o passar do tempo a tendência é que a água, presente

principalmente nas fibras vegetais, seja extraída. Diante disto, a Figura 88 ilustra essa comparação:

Figura 88 - Condutividade térmica X idade e da metodologia de cura



Fonte: Elaboração própria

Para confirmar a hipótese de que a presença de água foi responsável pelo acréscimo da condutividade térmica nas primeiras idades, é possível verificar (na Figura 88) que aos 91 dias de cura a condutividade térmica foi reduzida significativamente e obteve um resultado estatisticamente semelhante ao T15.3.

Através desta análise, pode-se estimar que a saturação da palha e da casca do arroz não teve influência significativa no desempenho térmico. No entanto, é incorreto afirmar isso com exatidão, uma vez que um estudo com idades superiores ou secagem em forno por maior tempo pode ser necessário para retirada de maior quantidade de água da estrutura interna, o que poderia acarretar em uma mudança de desempenho térmico, em todos os casos diminuindo a condutividade térmica.

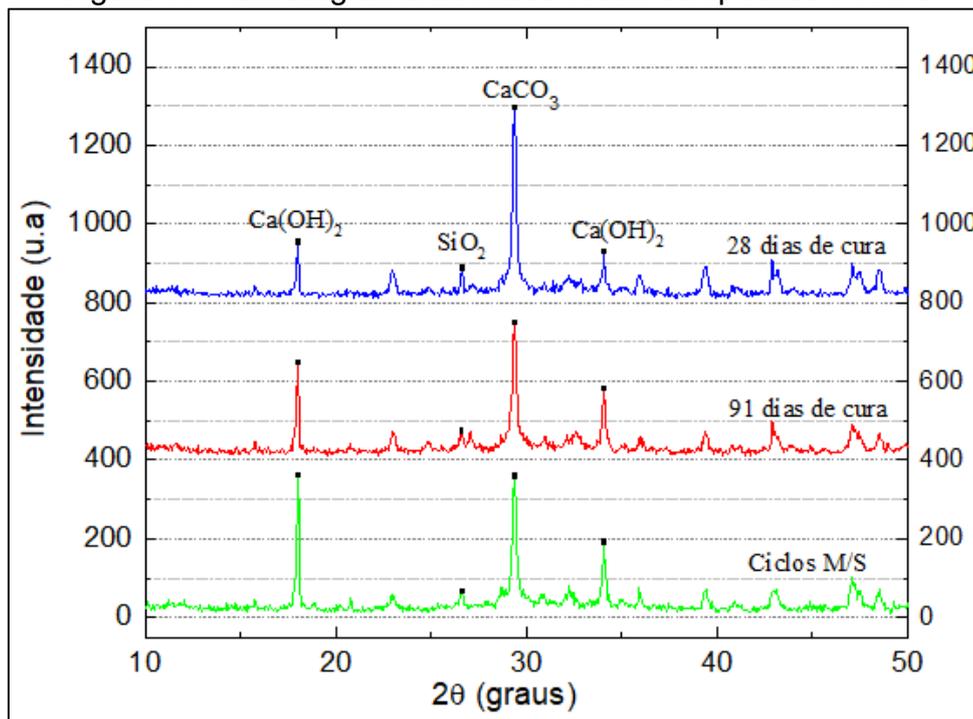
As amostras que foram submetidas aos ciclos de molhagem e secagem tiveram uma condutividade térmica média menor que todas as demais estudadas nesta pesquisa, no entanto, não é possível afirmar que esse valor é estatisticamente inferior, uma vez que as faixas de erro (Figura 88) sobrepõem-se em relação às amostras com 91 dias de cura à temperatura ambiente.

Mesmo assim, é evidente a melhora do desempenho térmico obtido com a incorporação de CA e PA no Concreto Celular, tanto em comparação com o Concreto Celular convencional quanto em comparação ao Traço Referência, ambos com valor de 0,2420 [W/(m.K)] e 0,2756 [W/(m.K)] respectivamente.

4.3.5 Ensaios de difração de raios X

Determinados os desempenhos térmico e mecânico do compósito com casca e palha de arroz saturadas foram realizados ensaios de difração de raios X para as amostras submetidas aos 28 e aos 91 dias de cura à temperatura ambiente e aos 91 dias de cura sob ciclos de molhagem e secagem. A Figura 89 ilustra os difratogramas de cada tempo e condição de cura para as misturas T15.3S.

Figura 89 – Difratograma de Raios X dos compósitos T15.3S



Fonte: Elaboração própria

A caracterização das amostras realizada através de difração de raios X determinou a presença de CSH ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) nos três difratogramas. Mesmo assim a maior intensidade de CH (Ca(OH)_2 ou $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$) foi observada nas amostras submetidas aos 91 dias de cura sob ciclos de molhagem e secagem. A intensidade de hidróxido de cálcio nas amostras submetidas a ciclos de molhagem e secagem ficou com valor superior ao dobro das amostras com 28 dias de cura à temperatura ambiente e foi aproximadamente 45% maior que as amostras com 91 dias de cura à temperatura ambiente. Por conseguinte, pode-se justificar o aumento da resistência à compressão axial em função da presença de CSH (mesma condição utilizada por Jauberthie et al. (2003)) e ao gradativo aumento de CH em função do tempo de cura e dos ciclos de molhagem e secagem.

Por sua vez, o aumento de hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - em função do tempo e da metodologia de cura em combinação com a alta porosidade dos materiais e da elevada presença de água na estrutura interna possibilita o surgimento de patologias.

A alta porosidade do material facilita a difusão de elementos presentes na atmosfera, dentre eles o dióxido de carbono (CO_2). A alta quantidade de água presente na estrutura interna dos compósitos, principalmente retida pelas fibras vegetais tende a reagir com o dióxido de carbono e formar ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido carbônico reage com o hidróxido de cálcio e forma o carbonato de cálcio, elemento identificado nos difratogramas da Figura 89 com intensidade bastante elevada.

O carbonato de cálcio não causa deterioração diretamente no concreto, no entanto, consome o hidróxido de cálcio e CSH, reduzindo o valor do pH do material. A carbonatação inicia-se na superfície do material gerando manchas brancas, as quais foram visualmente identificadas principalmente nas amostras submetidas à ciclos de molhagem e secagem. Além disso, o avanço da carbonatação da superfície para o interior dos compósitos gera inviabilidade no uso de armadura ou qualquer componente de aço devido a forte possibilidade de despassivação das mesmas.

Observando a Figura 89, nota-se que o carbonato do cálcio reduziu a intensidade em função do aumento do tempo de cura, indicando que há necessidade de realizar análises de durabilidade com maior tempo de cura. De qualquer forma, uma opção para reduzir o aumento do hidróxido de cálcio é adicionar sílica da casca do arroz, uma pozolana abundante na região, que possibilitaria a formação de maiores quantidades de silicato de cálcio hidratado (CSH), uma vez que a intensidade da sílica encontrada na difração de raios X foi muito pequena e reduziu significativamente com o aumento do tempo de cura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões da pesquisa com foco em explicitar se o objetivo geral e os objetivos específicos foram atingidos. Em seguida, serão elencadas sugestões para trabalhos futuros, as quais serão feitas com base nos resultados de desempenho dos compósitos e nas conclusões finais.

5.1 Conclusões

Diante de todas as análises realizadas, experimentais e teóricas, é possível concluir que o objetivo geral da pesquisa foi atingido. Tal constatação se dá pelo fato da melhora no desempenho térmico, no desempenho acústico e no desempenho mecânico dos compósitos em comparação ao material utilizado como matriz; o Concreto Celular.

Abaixo são citadas as conclusões obtidas a partir dos objetivos específicos:

- A adição da casca do arroz ao concreto celular reduziu a resistência à compressão axial e aumentou a resistência à tração na flexão em três pontos. A substituição em volume de parcelas de casca por palha do arroz acarretou na redução da resistência à compressão apenas a partir de 15% de substituição, por sua vez a introdução da PA incrementou a resistência à tração na flexão. A saturação das fibras reduziu significativamente a resistência à compressão e à tração dos compósitos uma vez que reduziu a ancoragem das fibras na matriz.
- A incorporação da casca e da palha reduziu a condutividade térmica dos compósitos, neste caso, quanto maior a dimensão da palha melhor foi o desempenho térmico. A absorção acústica foi incrementada com a adição da casca, e posteriormente com a adição da palha do arroz. Por outro lado, os valores de isolamento acústico foram estatisticamente semelhantes para todos os materiais.
- O traço com melhor desempenho geral foi o T15.3. Esse compósito obteve resistência à compressão axial superior aos 3,00 MPa, atendendo a todos os requisitos normativos referenciados. A absorção acústica deste compósito teve aprimoramento se comparado ao Traço Referência e ao Concreto Celular, e devido ao alto desvio padrão, os resultados não podem ser considerados estatisticamente diferentes se comparados aos demais compósitos com PA. A condutividade térmica deste compósito foi a menor

dentre todos os materiais estudados, fator preponderante para o avanço das análises desta mistura.

- No estudo da durabilidade, verificou-se que a resistência à compressão axial aumenta em função do tempo de cura e com o tratamento por ciclos de molhagem e secagem. A resistência à tração na flexão reduziu aproximadamente 52% após o tratamento por ciclos de molhagem e secagem, comprovando que as fibras vegetais perdem a capacidade de reforço em função do avanço da degradação. A condutividade térmica reduziu após o aumento do tempo de cura e a realização de ciclos de molhagem e secagem, indicando que a degradação das fibras é positiva para a melhora do desempenho térmico.
- Ficou constatado que a incorporação de alguma pozolana aos compósitos pode reduzir a intensidade do hidróxido de cálcio e, conseqüentemente, o carbonato de cálcio. Como foram utilizados apenas CPV-ARI-RS e casca e palha do arroz, não houve pozolanas em quantidades suficientes para reduzir a formação de hidróxido de cálcio, o que através do carbonato de cálcio acarretou no surgimento de manchas brancas nas superfícies das amostras, principalmente naquelas submetidas aos ciclos de molhagem e secagem.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O objetivo geral da pesquisa é criar materiais que possam melhorar o desempenho térmico e acústico das edificações mantendo a resistência mecânica mínima requerida por norma. A ideia para realização deste estudo se deu por eventos de âmbito regional (tragédia da boate Kiss) e de âmbito nacional (publicação de NBR 15.575). Desta forma, buscou-se uma matriz que inicialmente já tivesse boas qualidades no que tange ao desempenho térmico-acústico e, para aprimoramento da mesma, foram procurados materiais oriundos da produção orizícola, atividade agrícola de grande importância na região em que está inserida a universidade. Assim a casca e a palha do arroz surgiram como materiais viáveis, uma vez que a indústria orizícola é preponderante na cidade de Alegrete.

Sendo este estudo o primeiro realizado na região, verificou-se que há fortes possibilidades de criar um material de alta qualidade e com desempenho superior aos materiais convencionais. No entanto, há condições de melhorar todos os desempenhos determinados neste estudo alterando as definições de volume de casca do arroz, volume e comprimento de palha do arroz, adição de pozolana, etc. Diante disto, são elencadas algumas sugestões para pesquisas posteriores:

- Utilizar mais variações no volume de casca do arroz adicionadas ao concreto celular;
- Aumentar o comprimento e a porcentagem de palha do arroz;
- Realizar adições de palha do arroz ao invés de substituições.
- Realizar mais estudos sobre a durabilidade dos materiais, principalmente em relação à capacidade dos compósitos de proteger componentes de reforço de aço;
- Adicionar pozolanas às misturas a fim de reduzir o aumento do hidróxido de cálcio, melhorando a durabilidade dos compósitos. Sugere-se a adição de cinza da casca do arroz, produto abundante e de baixo valor agregado na região;

Consolidando os compósitos desenvolvidos através de melhoria da durabilidade e do desempenho térmico-acústico poderá obter-se um produto passível de utilização a nível industrial, o qual geraria uma grande melhora no conforto ambiental das edificações e beneficiaria a economia da região.

REFERÊNCIAS

AGOUDJIL, B., BENCHABANE, A., BOUDENNE, A., IBOS, L., FOIS, M. **Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood.** Journal: Energy and Buildings, v. 43, p. 491-497, 2011.

AHMAD, M. M., AHMAD, F., AZMI, M., ZAHID, M. Z. A. M, **Properties of Cement Mortar Consisting Raw Rice Husk.** Journal: Applied Mechanics and Materials, v. 802, p.267-271, 2015.

ALLARD, J. F., DAIGLE, G. **Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing materials.** The journal of the acoustical society of America, v. 95, p. 2785, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C518: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus,** 2015.

ARDANUY, M., CLARAMUNT, J., GARCÍA-HORTAL, J. A., BARRA, M. **Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers.** Journal: Cellulose, v.18, p.218-289, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.179: Tratamento acústico em recintos fechados – Procedimento.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12.644: Concreto leve celular estrutural – Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12.645: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12.646: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 13.438: Blocos de concreto celular autoclavado — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13.440: Blocos de concreto celular autoclavado — Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13.554: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 14.956: Bloco de concreto celular autoclavado – Execução de alvenaria sem função estrutural.** Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15.220: Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15.270: Componentes e requisitos – Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos** Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Requisitos gerais.** Rio de Janeiro, 2013.

____. **NBR 5733: Cimentos Portland de alta resistência inicial.** Rio de Janeiro, 1991.

____. **NBR 5737: Cimentos Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria.** Rio de Janeiro, 2014.

____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, 2015.

BENMANSOUR, N., AGOUDJIL, B., GHERABLI, A., KARECHE A., BOUDENNE, A. **Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building.** Journal: Energy and Buildings, v. 81, p. 98-104, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites.** Livro: 2ª ed, Taylor & Francis Group, Londres, 2007.

CANAHUA, S. F. C. **En concreto: Los beneficios del concreto celular.** Revista Civilízate, nº 5, p. 36-37, 2014.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, R. P. **Acústica Arquitetônica.** Thesaurus. Brasília, 2006.

CHIKHI, M., AGOUDJIL, B., HADDADI, M., BOUDENNE, A. **Numerical modelling of the effective thermal conductivity of heterogeneous materials.** Journal of Thermoplastic Composite Material, v. 26, p.336-345, 2011.

CORREDOR-BEDOYA, A.C., ZOPPI, R.A., SERPA, A.L. **Composites of scrap tire rubber particles and adhesive mortar – Noise insulation potential.** Journal: Cement & Concrete Composites, v.82, p.45-66, 2017.

CORREIA, C. **Conforto Termo-Acústico de Uma Habitação de Baixo Custo.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CORTELASSI, E. M. **Avaliação do Comportamento de Concretos Celulares Espumosos de Alto Desempenho.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

DELLA, V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de resíduos agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica**. Revista Cerâmica Industrial, p. 22-25, 2005.

FLACH, F. **Investigação do potencial de absorção de compósitos de argamassa com materiais reciclados**. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo-RS, 2012.

FERREIRA, O. A. R. **Concretos Celulares Espumosos**. Boletim Técnico do Departamento de Construção Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1987.

G1, Globo. **Perícia Confirma que Espuma da Kiss Liberou Cianeto Durante Incêndio**. Página da Internet. 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 01 de julho de 2017, 19:09.

GARCIA, D. **Análise do Isolamento Sonoro de Sistemas Construtivos Residenciais Estruturados em Aço**. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

GERGES, S. N. Y. **Ruído: Fundamentos e Controle**. 3ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GRAM, H. E. **Durability of natural fibres in concrete**. Swamy RN (ed) Concrete Technology and Design, University of Sheffield, 5ed, p.143-171, 1998.

H.K. KIM, J.H., JEON, H.K. LEE. **Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air**. Journal: Construction and Building Materials, v. 29, p.193-200, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8301: Thermal insulation -- Determination of steady-state thermal resistance and related properties -- Heat flow meter apparatus**, 1991.

IRGA, Instituto Rio Grandense de Arroz. **Safra 2016/2017 – Produção por municípios, 2017**.

JAMES, M., RICHARD, E., STUART, C.R., BENJAMIN, W.M., KERRY, K. **Natural fibre composite energy absorption structures**. Journal: Composite Science and Technology, v.72, p. 211-217, 2012.

JANBUALA, S., WASANAPIARNPONG, T. **Effect of Rice Husk and Rice Husk Ash on Properties of Lightweight Clay Bricks**. Journal: Key Engineering Materials, v. 659, p. 74-79, 2015.

JAUBERTHIE, R., RENDELL, F. TAMBA, S., CISSE, I. **Origin of the pozzolanic effect of rice husks**. Journal: Construction and Building Materials, v.14, p. 419-423, 2000.

JAUBERTHIE, R., RENDELL, F., TAMBA, S., CISSÉ, I. K. **Properties of cement – rice husk mixture**. Journal: Construction and Building Materials, v. 17, p. 239-243, 2003.

KASHANI, A., NGO, T. D., MENDIS, P., BLACK, J. R., HAJIMOHAMMADI, A. **A sustainable application of recycled tyre crumbs as insulator in lightweight cellular concrete**. Journal of Cleaner Production, v. 149, p. 925-935, 2017.

LEGATSKI, L.M. Cellular concrete. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Significance of tests and properties of concrete and concrete-marking materials**. Philadelphia, 1978.

LERTWATTANARUK, P. SUNTIJITTO, A. **Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications**. Journal: Construction and Building Materials, v. 94, p. 664-669, 2015.

LIMA, P. G. **Absorção Sonora de Materiais Revestidos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 1999.

MAIA, M. A. **Contribuição ao mapeamento do ruído urbano na cidade de Porto Alegre - RS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2003.

MELO FILHO, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MELO, G.F. **Concreto celular polimérico: Influência da adição de resíduo de poliéster insaturado termofixo**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MÉNDEZ, A. M., STORNINI, A. J., SALAZAR, E. B., GIULIANO, G., VELIS, A. G., AMARILLA, B. C. **Acústica arquitectonica**. Livro, Universidad del Museo Social Argentino, Buenos Aires, 1994.

MOHR, B. J., NENKO, H., KURTIS, K. E. **Durability of termo-mechanical pulp fiber-cement composites to wet/dry cycling**. Journal: Cement & Concrete Composites, v.35, p. 1646-1649, 2005.

NEUBAUER, P. M. **Estudo comparativo entre diversas composições com pisos flutuantes de madeira natural-assoalho e tacos - quanto ao isolamento ao ruído de impacto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2009.

NGUYEN, M. N., DULTZ, S., PICARDAL, F., BUI, A. T. K., PHAM, Q. V., SCHIEBER, J. **Release of potassium accompanying the dissolution of rice straw phytolith**. Journal: Chemosphere, v. 119, p. 371-376, 2015.

PACHLA, E.C. **Desenvolvimento de compósitos de concreto celular e casca de arroz: caracterização física, mecânica e acústica**. 2015. 1 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Alegrete-RS, 2015.

PISELLO, A. L., FABIANI, C., MAKAREMI, N., CASTALDO, V. L., CAVALAGLIO, G., NICOLINI, A., BARBANERA, M., COTANA, F. **Sustainable New Brick and Thermo-Acoustic Insulation Panel from Mineralization of Stranded Driftwood Residues**. Journal: Energies, v. 9, p. 619, 2016.

RAMAMURTHY, K., KUNHANANDAN NAMBIAR E.K., INDU SIVA RANJANI, G., **A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete**. Journal: Cement & Concrete Composites. v. 31, p. 388-396, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural**. São Paulo: PINI, 2009.

SACHT, H., ROSSIGNOLO, J., SANTOS, W. **Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida**. Revista Matéria, p. 031-032, 2010.

SILVA, C. A. O. **Estudo de Dosagem e Avaliação de Concreto Celular com Fins Estruturais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Maceió, 2015.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica**. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 1971.

STOCHERO, N. P. **Desenvolvimento de Cerâmica Refratária com Fibra de Aço e Sílica Residual Proveniente da Queima da Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado. UNIPAMPA, Alegrete, 2015.

TA Instruments. Disponível em: < <http://www.tainstruments.com/fox-314/#ffs-tabbed-23> > Acesso em: 02 de Abril de 2017.

TEIXEIRA FILHO, F. J., & TEZUCA, Y. **Considerações sobre algumas propriedades dos concretos celulares espumosos**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1992.

TOLEDO FILHO, R. D., GHAVAMI, K., SANJUÁN, M. A., ENGLAND, G. L. **Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres**. Journal: Cement & Concrete Composites. p.537-546, 2005.

TONOLI, G. H. D., SANTOS, S., RABI, J., SANTOS, W., & SAVASTANO JUNIOR, H. **Thermal performance of sisal fiber-cement roofing tiles for rural constructions**. Journal: Sci. Agric., p. 1-7, 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Resultados da massa específica

Tabela 32 – Massas específicas no estado endurecido

	CP	Massa	Altura	Volume (cm ³)	Massa Esp.
		(g)	(cm)		(Kg/m ³)
Concreto Celular	1	1207,70	19,30	1515,82	796,73
	2	1036,70	18,60	1460,84	709,66
	3	1055,80	19,20	1507,96	700,15
	Média				735,51
	Desvio Padrão				53,23
	Variância				2,83E+03
	C.V (%)				7,24
Traço Referência	1	1148,30	19,20	1507,96	761,49
	2	1082,80	18,90	1484,40	729,45
	3	1072,20	18,30	1437,28	745,99
	Média				745,64
	Desvio Padrão				16,02
	Variância				2,57E+02
	C.V (%)				2,15
T5.1	1	1179,70	18,80	1476,55	798,96
	2	1044,20	18,70	1468,69	710,97
	3	1176,40	18,20	1429,42	822,99
	Média				777,64
	Desvio Padrão				58,97
	Variância				3,48E+03
	C.V (%)				7,58
T5.2	1	1140,80	19,50	1531,53	744,88
	2	1152,10	19,40	1523,67	756,13
	3	1131,30	19,70	1547,23	731,18
	Média				744,06
	Desvio Padrão				12,50
	Variância				1,56E+02
	C.V (%)				1,68

Continua na próxima página

Continuação Tabela 32

	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
T5.3	1	1042,20	19,25	1511,89	689,34	
	2	1091,90	19,15	1504,04	725,98	
	3	1079,80	19,55	1535,45	703,25	
	Média					706,19
	Desvio Padrão					18,50
	Variância					3,42E+02
	C.V (%)					2,62
	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
T10.1	1	1114,50	19,00	1492,26	746,86	
	2	1137,20	19,00	1492,26	762,07	
	3	1180,30	19,80	1555,09	758,99	
	Média					755,97
	Desvio Padrão					8,04
	Variância					6,47E+01
	C.V (%)					1,06
	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
T10.2	1	1049,20	19,50	1531,53	685,07	
	2	1044,10	18,60	1460,84	714,73	
	3	1014,70	18,50	1452,99	698,35	
	Média					699,38
	Desvio Padrão					14,86
	Variância					2,21E+02
	C.V (%)					2,12
	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
T10.3	1	1137,30	19,45	1527,60	744,50	
	2	1139,00	19,20	1507,96	755,32	
	3	1125,30	19,50	1531,53	734,76	
	Média					744,86
	Desvio Padrão					10,29
	Variância					1,06E+02
	C.V (%)					1,38

Continua na próxima página

Continuação Tabela 32

	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
T15.1	1	1122,00	19,60	1539,38	728,86	
	2	1158,80	19,70	1547,23	748,95	
	3	1084,50	19,60	1539,38	704,50	
	Média					727,44
	Desvio Padrão					22,26
	Variância					4,95E+02
	C.V (%)					3,06
T15.2	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
	1	1142,10	19,90	1562,94	730,74	
	2	1109,30	19,95	1566,87	707,97	
	3	1043,30	19,25	1511,89	690,06	
	Média					709,59
	Desvio Padrão					20,39
	Variância					4,16E+02
C.V (%)					2,87	
T15.3	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
	1	1106,80	19,40	1523,67	726,40	
	2	1095,50	18,70	1468,69	745,90	
	3	1087,00	19,00	1492,26	728,43	
	Média					733,58
	Desvio Padrão					10,72
	Variância					1,15E+02
C.V (%)					1,46	
T15.3S - com CA e PA Saturados	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)	
	1	1024,70	19,00	1492,26	686,68	
	2	1027,10	19,00	1492,26	688,29	
	3	1022,50	19,20	1507,96	678,07	
	Média					684,34
	Desvio Padrão					5,50
	Variância					3,02E+01
C.V (%)					0,80	

Continua na próxima página

Continuação Tabela 32

T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)
	1	1027,10	19,20	1507,96	681,12
	2	1030,30	19,20	1507,96	683,24
	3	970,90	18,90	1484,40	654,07
Média					672,81
Desvio Padrão					16,26
Variância					2,65E+02
C.V (%)					2,42
T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias com ciclos M/S	CP	Massa (g)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa Esp. (Kg/m ³)
	1	1028,00	18,70	1468,69	699,94
	2	1023,80	19,30	1515,82	675,41
	3	1064,50	18,90	1484,40	717,12
Média					697,49
Desvio Padrão					20,96
Variância					4,39E+02
C.V (%)					3,01

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE B - Resultados de resistência à compressão axial

Tabela 33 – Resistência à compressão axial

	CP	Tensão (MPa)		CP	Tensão (MPa)
Concreto Celular	1	3,40	Traço Referência	1	2,88
	2	3,09		2	2,77
	3	2,98		3	2,90
	Média	3,16		Média	2,85
	Desvio Padrão	0,22		Desvio Padrão	0,07
	Variância	4,74E-02		Variância	4,90E-03
	C.V (%)	6,90		C.V (%)	2,46
T5.1	CP	Tensão (MPa)	T5.2	CP	Tensão (MPa)
	1	3,67		1	3,31
	2	3,12		2	3,12
	3	3,48		3	3,11
	Média	3,42		Média	3,18
	Desvio Padrão	0,28		Desvio Padrão	0,11
	Variância	7,80E-02		Variância	1,27E-02
	C.V (%)	8,16		C.V (%)	3,54
T5.3	CP	Tensão (MPa)	T10.1	CP	Tensão (MPa)
	1	3,09		1	2,99
	2	3,23		2	3,27
	3	3,07		3	3,06
	Média	3,13		Média	3,11
	Desvio Padrão	0,09		Desvio Padrão	0,15
	Variância	7,60E-03		Variância	2,14E-02
	C.V (%)	2,79		C.V (%)	4,71
T10.2	CP	Tensão (MPa)	T10.3	CP	Tensão (MPa)
	1	3,04		1	3,31
	2	2,82		2	3,72
	3	3,04		3	3,24
	Média	2,97		Média	3,42
	Desvio Padrão	0,13		Desvio Padrão	0,26
	Variância	1,61E-02		Variância	6,72E-02
	C.V (%)	4,28		C.V (%)	7,57

Continua na próxima página

Continuação Tabela 33

T15.1	CP	Tensão (MPa)	T15.2	CP	Tensão (MPa)
	1	2,42		1	2,97
	2	2,62		2	2,88
	3	2,29		3	2,68
	Média	2,44		Média	2,84
	Desvio Padrão	0,17		Desvio Padrão	0,15
	Variância	2,76E-02		Variância	2,20E-02
	C.V (%)	6,80		C.V (%)	5,22
T15.3	CP	Tensão (MPa)	T15.3S - com CA e PA Saturados	CP	Tensão (MPa)
	1	3,07		1	1,94
	2	2,92		2	1,96
	3	3,04		3	2,12
	Média	3,01		Média	2,01
	Desvio Padrão	0,08		Desvio Padrão	0,10
	Variância	6,30E-03		Variância	9,73E-03
	C.V (%)	2,64		C.V (%)	4,92
T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias	CP	Tensão (MPa)	T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias com ciclos M/S	CP	Tensão (MPa)
	1	1,98		1	2,60
	2	2,33		2	2,47
	3	2,36		3	2,50
	Média	2,22		Média	2,52
	Desvio Padrão	0,21		Desvio Padrão	0,07
	Variância	4,46E-02		Variância	4,63E-03
	C.V (%)	9,50		C.V (%)	2,70

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE C - Resultados de resistência à tração na flexão

Tabela 34 – Resistência à tração na flexão em três pontos

Concreto Celular	CP	Tensão (MPa)	Traço Referência	CP	Tensão (MPa)
	1	1,11		1	1,38
	2	1,07		2	1,38
	3	0,99		3	1,36
	Média	1,06		Média	1,37
	Desvio Padrão	0,06		Desvio Padrão	0,01
	Variância	3,98E-03		Variância	7,52E-05
	C.V (%)	5,96		C.V (%)	0,63
T5.1	CP	Tensão (MPa)	T5.2	CP	Tensão (MPa)
	1	1,67		1	1,62
	2	1,65		2	1,55
	3	1,67		3	1,59
	Média	1,66		Média	1,59
	Desvio Padrão	0,01		Desvio Padrão	0,03
	Variância	1,72E-04		Variância	1,22E-03
	C.V (%)	0,79		C.V (%)	2,20
T5.3	CP	Tensão (MPa)	T10.1	CP	Tensão (MPa)
	1	1,54		1	1,39
	2	1,57		2	1,37
	3	1,52		3	1,44
	Média	1,54		Média	1,40
	Desvio Padrão	0,03		Desvio Padrão	0,04
	Variância	6,46E-04		Variância	1,26E-03
	C.V (%)	1,65		C.V (%)	2,54
T10.2	CP	Tensão (MPa)	T10.3	CP	Tensão (MPa)
	1	1,55		1	1,34
	2	1,55		2	1,40
	3	1,42		3	1,40
	Média	1,51		Média	1,38
	Desvio Padrão	0,07		Desvio Padrão	0,03
	Variância	5,59E-03		Variância	1,16E-03
	C.V (%)	4,96		C.V (%)	2,47

Continua na próxima página

Continuação Tabela 34

	CP	Tensão (MPa)		CP	Tensão (MPa)
T15.1	1	1,36	T15.2	1	1,40
	2	1,41		2	1,42
	3	1,40		3	1,45
	Média	1,39		Média	1,42
	Desvio Padrão	0,02		Desvio Padrão	0,02
	Variância	5,71E-04		Variância	6,07E-04
	C.V (%)	1,72		C.V (%)	1,73
T15.3	CP	Tensão (MPa)	T15.3S - com CA e PA Saturados	CP	Tensão (MPa)
	1	1,42		1	0,88
	2	1,40		2	0,82
	3	1,40		3	0,92
	Média	1,40		Média	0,87
	Desvio Padrão	0,01		Desvio Padrão	0,05
	Variância	1,24E-04		Variância	2,53E-03
C.V (%)	0,79	C.V (%)	5,75		
T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias	CP	Tensão (MPa)	T15.3S - com CA e PA Saturados - 91 dias com ciclos M/S	CP	Tensão (MPa)
	1	1,13		1	0,51
	2	1,20		2	0,55
	3	1,06		3	0,57
	Média	1,13		Média	0,54
	Desvio Padrão	0,07		Desvio Padrão	0,03
	Variância	4,90E-03		Variância	8,13E-04
C.V (%)	6,19	C.V (%)	5,24		

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE D – Resultados de absorção acústica

Tabela 35 - Absorção acústica do Concreto Celular

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,00	0,00
63,00	0,0030	0,0030	0,0020	0,0027	0,00	21,65
80,00	0,0020	0,0020	0,0020	0,0020	0,00	0,00
100,00	0,0020	0,0020	0,0030	0,0023	0,00	24,74
125,00	0,0020	0,0020	0,0040	0,0027	0,00	43,30
160,00	0,0020	0,0020	0,0040	0,0027	0,00	43,30
200,00	0,0100	0,0040	0,0050	0,0063	0,00	50,76
250,00	0,0040	0,0030	0,0060	0,0043	0,00	35,25
315,00	0,0120	0,0100	0,0110	0,0110	0,00	9,09
400,00	0,0100	0,0110	0,0090	0,0100	0,00	10,00
500,00	0,0110	0,0090	0,0070	0,0090	0,00	22,22
630,00	0,0150	0,0150	0,0260	0,0187	0,01	34,02
800,00	0,0280	0,0230	0,0260	0,0257	0,00	9,80
1000,00	0,0120	0,0110	0,0130	0,0120	0,00	8,33
1250,00	0,0120	0,0150	0,0120	0,0130	0,00	13,32
1600,00	0,0260	0,0230	0,0180	0,0223	0,00	18,10
2000,00	0,0280	0,0250	0,0190	0,0240	0,00	19,09
2500,00	0,0300	0,0270	0,0200	0,0257	0,01	19,99
3150,00	0,0320	0,0290	0,0210	0,0273	0,01	20,80
4000,00	0,0310	0,0210	0,0280	0,0267	0,01	19,24
5000,00	0,0370	0,0310	0,0330	0,0337	0,00	9,07
6300,00	0,0370	0,0230	0,0390	0,0330	0,01	26,42

Fonte: Elaboração própria

Tabela 36 – Absorção acústica do Traço Referência

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0190	0,0280	0,0320	0,0263	0,01	25,28
63,00	0,0210	0,0230	0,0260	0,0233	0,00	10,79
80,00	0,0110	0,0150	0,0230	0,0163	0,01	37,41
100,00	0,0130	0,0110	0,0210	0,0150	0,01	35,28
125,00	0,0150	0,0240	0,0680	0,0357	0,03	79,52
160,00	0,0170	0,0470	0,0740	0,0460	0,03	61,99
200,00	0,0190	0,0640	0,0730	0,0520	0,03	55,64
250,00	0,0210	0,0690	0,0670	0,0523	0,03	51,89
315,00	0,0550	0,0570	0,0530	0,0550	0,00	3,64
400,00	0,0630	0,0460	0,0360	0,0483	0,01	28,24
500,00	0,0650	0,0750	0,0300	0,0567	0,02	41,70
630,00	0,0480	0,0140	0,0040	0,0220	0,02	104,84
800,00	0,0340	0,0450	0,0420	0,0403	0,01	14,10
1000,00	0,0330	0,0550	0,0600	0,0493	0,01	29,12
1250,00	0,0320	0,0600	0,0600	0,0507	0,02	31,91
1600,00	0,0460	0,0620	0,0620	0,0567	0,01	16,30
2000,00	0,0570	0,0710	0,0440	0,0573	0,01	23,55
2500,00	0,0550	0,0820	0,0710	0,0693	0,01	19,58
3150,00	0,0430	0,0540	0,1140	0,0703	0,04	54,33
4000,00	0,0500	0,0770	0,1080	0,0783	0,03	37,05
5000,00	0,0870	0,0720	0,1020	0,0870	0,02	17,24
6300,00	0,0890	0,0670	0,0960	0,0840	0,02	18,02

Fonte: Elaboração própria

Tabela 37 – Absorção acústica do T5.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0340	0,0480	0,0287	0,0369	0,01	27,02
63,00	0,0750	0,0910	0,0675	0,0778	0,01	15,42
80,00	0,0090	0,0070	0,0060	0,0073	0,00	20,83
100,00	0,0490	0,0340	0,0440	0,0423	0,01	18,04
125,00	0,1200	0,1190	0,1250	0,1213	0,00	2,65
160,00	0,0680	0,0820	0,0810	0,0770	0,01	10,14
200,00	0,0450	0,0840	0,0700	0,0663	0,02	29,78
250,00	0,0230	0,0560	0,0590	0,0460	0,02	43,42
315,00	0,0640	0,0950	0,1190	0,0927	0,03	29,76
400,00	0,0700	0,1660	0,0690	0,1017	0,06	54,80
500,00	0,0460	0,0660	0,0730	0,0617	0,01	22,72
630,00	0,1750	0,1760	0,1190	0,1567	0,03	20,82
800,00	0,1380	0,1280	0,1520	0,1393	0,01	8,65
1000,00	0,1270	0,1540	0,1410	0,1407	0,01	9,60
1250,00	0,0270	0,0200	0,0290	0,0253	0,00	18,65
1600,00	0,0700	0,0610	0,0740	0,0683	0,01	9,74
2000,00	0,0800	0,0810	0,0950	0,0853	0,01	9,83
2500,00	0,0760	0,0830	0,1070	0,0887	0,02	18,34
3150,00	0,0680	0,0760	0,0800	0,0747	0,01	8,18
4000,00	0,0760	0,0770	0,0780	0,0770	0,00	1,30
5000,00	0,1200	0,1090	0,1080	0,1123	0,01	5,93
6300,00	0,1640	0,1570	0,1430	0,1547	0,01	6,91

Fonte: Elaboração própria

Tabela 38 – Absorção acústica do T5.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0440	0,0380	0,0570	0,0463	0,01	20,96
63,00	0,1950	0,2060	0,2760	0,2257	0,04	19,47
80,00	0,1270	0,1670	0,2130	0,1690	0,04	25,46
100,00	0,1480	0,2030	0,2300	0,1937	0,04	21,58
125,00	0,1520	0,1590	0,1750	0,1620	0,01	7,28
160,00	0,2030	0,1630	0,1410	0,1690	0,03	18,60
200,00	0,0470	0,0430	0,0510	0,0470	0,00	8,51
250,00	0,0810	0,0560	0,0830	0,0733	0,02	20,52
315,00	0,1020	0,1340	0,0980	0,1113	0,02	17,72
400,00	0,0980	0,1300	0,0840	0,1040	0,02	22,67
500,00	0,0910	0,0600	0,1010	0,0840	0,02	25,45
630,00	0,1210	0,1520	0,1730	0,1487	0,03	17,60
800,00	0,1290	0,1690	0,1460	0,1480	0,02	13,56
1000,00	0,0980	0,1360	0,1190	0,1177	0,02	16,18
1250,00	0,0430	0,0340	0,0400	0,0390	0,00	11,75
1600,00	0,0400	0,0600	0,0900	0,0633	0,03	39,74
2000,00	0,0910	0,0820	0,0850	0,0860	0,00	5,33
2500,00	0,1020	0,0860	0,0730	0,0870	0,01	16,70
3150,00	0,0650	0,0800	0,0570	0,0673	0,01	17,34
4000,00	0,0710	0,0860	0,0680	0,0750	0,01	12,86
5000,00	0,0980	0,1190	0,1150	0,1107	0,01	10,08
6300,00	0,1010	0,1490	0,1370	0,1290	0,02	19,36

Fonte: Elaboração própria

Tabela 39 – Absorção acústica do T5.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0900	0,1120	0,0630	0,0883	0,02	27,78
63,00	0,1640	0,2370	0,3320	0,2443	0,08	34,48
80,00	0,1290	0,2520	0,1760	0,1857	0,06	33,43
100,00	0,1230	0,1590	0,2420	0,1747	0,06	34,94
125,00	0,1400	0,1270	0,2170	0,1613	0,05	30,15
160,00	0,0820	0,0600	0,0910	0,0777	0,02	20,53
200,00	0,0950	0,0590	0,1200	0,0913	0,03	33,57
250,00	0,0810	0,0690	0,0870	0,0790	0,01	11,60
315,00	0,1530	0,0940	0,1230	0,1233	0,03	23,92
400,00	0,1530	0,1000	0,1530	0,1353	0,03	22,61
500,00	0,0700	0,0930	0,1150	0,0927	0,02	24,28
630,00	0,1850	0,1760	0,1760	0,1790	0,01	2,90
800,00	0,1750	0,1570	0,2050	0,1790	0,02	13,55
1000,00	0,1430	0,1070	0,1630	0,1377	0,03	20,61
1250,00	0,0240	0,0360	0,0350	0,0317	0,01	21,03
1600,00	0,0950	0,0610	0,0930	0,0830	0,02	22,99
2000,00	0,1010	0,0550	0,0930	0,0830	0,02	29,61
2500,00	0,0970	0,0490	0,0760	0,0740	0,02	32,52
3150,00	0,0870	0,0670	0,0740	0,0760	0,01	13,35
4000,00	0,0960	0,0620	0,0800	0,0793	0,02	21,44
5000,00	0,1350	0,0800	0,1400	0,1183	0,03	28,13
6300,00	0,1740	0,1120	0,1720	0,1527	0,04	23,08

Fonte: Elaboração própria

Tabela 40 – Absorção acústica do T10.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,3050	0,4280	0,2270	0,3200	0,10	31,67
63,00	0,0290	0,0340	0,0470	0,0367	0,01	25,34
80,00	0,2730	0,1990	0,2470	0,2397	0,04	15,66
100,00	0,1130	0,1660	0,0980	0,1257	0,04	28,43
125,00	0,1820	0,1330	0,0990	0,1380	0,04	30,24
160,00	0,0930	0,0850	0,1260	0,1013	0,02	21,45
200,00	0,0490	0,0820	0,0690	0,0667	0,02	24,93
250,00	0,0520	0,0380	0,0500	0,0467	0,01	16,23
315,00	0,0680	0,0800	0,0700	0,0727	0,01	8,85
400,00	0,1600	0,1410	0,0980	0,1330	0,03	23,88
500,00	0,0540	0,0400	0,0440	0,0460	0,01	15,68
630,00	0,1400	0,1210	0,1160	0,1257	0,01	10,08
800,00	0,1670	0,1750	0,1830	0,1750	0,01	4,57
1000,00	0,1260	0,1000	0,1300	0,1187	0,02	13,73
1250,00	0,0160	0,0090	0,0120	0,0123	0,00	28,47
1600,00	0,0710	0,0530	0,0580	0,0607	0,01	15,32
2000,00	0,0780	0,0620	0,0670	0,0690	0,01	11,86
2500,00	0,0610	0,0560	0,0580	0,0583	0,00	4,31
3150,00	0,0480	0,0430	0,0440	0,0450	0,00	5,88
4000,00	0,0580	0,0470	0,0550	0,0533	0,01	10,66
5000,00	0,1270	0,0890	0,0900	0,1020	0,02	21,23
6300,00	0,2100	0,1260	0,1270	0,1543	0,05	31,24

Fonte: Elaboração própria

Tabela 41 – Absorção acústica do T10.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,4230	0,4320	0,4890	0,4480	0,04	7,99
63,00	0,3080	0,2130	0,3800	0,3003	0,08	27,89
80,00	0,1590	0,1240	0,2010	0,1613	0,04	23,90
100,00	0,1500	0,1690	0,2630	0,1940	0,06	31,19
125,00	0,1930	0,1440	0,1560	0,1643	0,03	15,54
160,00	0,0850	0,0870	0,0950	0,0890	0,01	5,95
200,00	0,0650	0,0560	0,0476	0,0562	0,01	15,48
250,00	0,0470	0,0410	0,0370	0,0417	0,01	12,08
315,00	0,1140	0,0830	0,0980	0,0983	0,02	15,77
400,00	0,1310	0,1080	0,1510	0,1300	0,02	16,55
500,00	0,0490	0,0740	0,0870	0,0700	0,02	27,59
630,00	0,1220	0,1610	0,1760	0,1530	0,03	18,22
800,00	0,1670	0,1640	0,2010	0,1773	0,02	11,59
1000,00	0,1300	0,1070	0,1610	0,1327	0,03	20,43
1250,00	0,0790	0,0870	0,0930	0,0863	0,01	8,14
1600,00	0,0980	0,1300	0,1760	0,1347	0,04	29,12
2000,00	0,1140	0,1750	0,1450	0,1447	0,03	21,08
2500,00	0,1250	0,1010	0,0690	0,0983	0,03	28,57
3150,00	0,0200	0,0430	0,0410	0,0347	0,01	36,75
4000,00	0,0590	0,0620	0,0730	0,0647	0,01	11,40
5000,00	0,1860	0,1530	0,1940	0,1777	0,02	12,23
6300,00	0,2310	0,2020	0,1550	0,1960	0,04	19,57

Fonte: Elaboração própria

Tabela 42 – Absorção acústica do T10.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,2610	0,3910	0,3160	0,3227	0,07	20,22
63,00	0,1830	0,0830	0,1600	0,1420	0,05	36,88
80,00	0,1880	0,1920	0,2450	0,2083	0,03	15,27
100,00	0,1870	0,2830	0,1790	0,2163	0,06	26,75
125,00	0,1970	0,2000	0,2640	0,2203	0,04	17,18
160,00	0,0900	0,0780	0,1380	0,1020	0,03	31,13
200,00	0,0880	0,0890	0,0570	0,0780	0,02	23,32
250,00	0,0450	0,0680	0,0230	0,0453	0,02	49,64
315,00	0,0910	0,0800	0,0700	0,0803	0,01	13,08
400,00	0,1980	0,1470	0,2580	0,2010	0,06	27,64
500,00	0,0650	0,0540	0,0510	0,0567	0,01	13,01
630,00	0,1650	0,1560	0,1360	0,1523	0,01	9,74
800,00	0,1810	0,1560	0,1550	0,1640	0,01	8,98
1000,00	0,1260	0,1190	0,1110	0,1187	0,01	6,32
1250,00	0,0510	0,0350	0,0310	0,0390	0,01	27,14
1600,00	0,1250	0,0940	0,0860	0,1017	0,02	20,26
2000,00	0,1200	0,1160	0,0880	0,1080	0,02	16,14
2500,00	0,1020	0,1180	0,0720	0,0973	0,02	23,99
3150,00	0,0930	0,1150	0,0580	0,0887	0,03	32,42
4000,00	0,1130	0,1230	0,0680	0,1013	0,03	28,91
5000,00	0,1850	0,1570	0,1220	0,1547	0,03	20,41
6300,00	0,2210	0,1930	0,1490	0,1877	0,04	19,34

Fonte: Elaboração própria

Tabela 43 – Absorção acústica do T15.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,1290	0,1590	0,1550	0,1477	0,02	11,03
63,00	0,1790	0,1850	0,1160	0,1600	0,04	23,89
80,00	0,2120	0,1630	0,2220	0,1990	0,03	15,87
100,00	0,1550	0,1570	0,1000	0,1373	0,03	23,55
125,00	0,1720	0,1370	0,1500	0,1530	0,02	11,56
160,00	0,0430	0,0690	0,0410	0,0510	0,02	30,63
200,00	0,0760	0,0940	0,0530	0,0743	0,02	27,65
250,00	0,0920	0,0450	0,0650	0,0673	0,02	35,03
315,00	0,0720	0,0940	0,0840	0,0833	0,01	13,22
400,00	0,1280	0,0920	0,1100	0,1100	0,02	16,36
500,00	0,0770	0,0480	0,0540	0,0597	0,02	25,66
630,00	0,1720	0,1550	0,1830	0,1700	0,01	8,30
800,00	0,1160	0,1420	0,1960	0,1513	0,04	26,97
1000,00	0,1070	0,1270	0,1190	0,1177	0,01	8,56
1250,00	0,0150	0,0180	0,0110	0,0147	0,00	23,94
1600,00	0,0770	0,0690	0,0640	0,0700	0,01	9,37
2000,00	0,0750	0,0860	0,0700	0,0770	0,01	10,63
2500,00	0,0610	0,0600	0,0540	0,0583	0,00	6,49
3150,00	0,0530	0,0540	0,0400	0,0490	0,01	15,94
4000,00	0,0620	0,0630	0,0480	0,0577	0,01	14,54
5000,00	0,1120	0,1160	0,1020	0,1100	0,01	6,56
6300,00	0,1420	0,1400	0,1320	0,1380	0,01	3,83

Fonte: Elaboração própria

Tabela 44 – Absorção acústica do T15.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,0550	0,0870	0,0910	0,0777	0,02	25,41
63,00	0,3330	0,1990	0,3340	0,2887	0,08	26,90
80,00	0,1880	0,1560	0,1330	0,1590	0,03	17,37
100,00	0,1680	0,1960	0,2620	0,2087	0,05	23,13
125,00	0,1560	0,2100	0,1670	0,1777	0,03	16,06
160,00	0,1280	0,1090	0,1150	0,1173	0,01	8,28
200,00	0,0890	0,0700	0,1010	0,0867	0,02	18,04
250,00	0,0360	0,0370	0,0490	0,0407	0,01	17,79
315,00	0,0980	0,0970	0,1520	0,1157	0,03	27,21
400,00	0,0960	0,2060	0,1430	0,1483	0,06	37,21
500,00	0,0670	0,0580	0,0790	0,0680	0,01	15,49
630,00	0,1370	0,1590	0,2010	0,1657	0,03	19,63
800,00	0,1480	0,1720	0,1920	0,1707	0,02	12,91
1000,00	0,1260	0,1280	0,1310	0,1283	0,00	1,96
1250,00	0,0050	0,0090	0,0050	0,0063	0,00	36,46
1600,00	0,0160	0,0410	0,0110	0,0227	0,02	70,91
2000,00	0,0530	0,0870	0,0380	0,0593	0,03	42,31
2500,00	0,0710	0,0770	0,0840	0,0773	0,01	8,41
3150,00	0,0760	0,0560	0,0690	0,0670	0,01	15,15
4000,00	0,0230	0,0320	0,0200	0,0250	0,01	24,98
5000,00	0,0910	0,1040	0,1030	0,0993	0,01	7,28
6300,00	0,0890	0,1230	0,0950	0,1023	0,02	17,73

Fonte: Elaboração própria

Tabela 45 – Absorção acústica do T15.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Coefficiente de Absorção	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	0,1490	0,1350	0,1960	0,1600	0,03	19,97
63,00	0,2320	0,2950	0,3470	0,2913	0,06	19,77
80,00	0,1180	0,1500	0,1300	0,1327	0,02	12,19
100,00	0,2920	0,2840	0,2400	0,2720	0,03	10,29
125,00	0,1350	0,1870	0,2340	0,1853	0,05	26,72
160,00	0,1190	0,1290	0,0990	0,1157	0,02	13,21
200,00	0,1010	0,0780	0,0960	0,0917	0,01	13,20
250,00	0,0360	0,0480	0,0570	0,0470	0,01	22,42
315,00	0,0760	0,0570	0,0770	0,0700	0,01	16,10
400,00	0,0860	0,0930	0,0760	0,0850	0,01	10,05
500,00	0,0460	0,0500	0,0380	0,0447	0,01	13,68
630,00	0,1390	0,1600	0,1460	0,1483	0,01	7,21
800,00	0,1880	0,1720	0,1450	0,1683	0,02	12,91
1000,00	0,1100	0,1570	0,1200	0,1290	0,02	19,19
1250,00	0,0460	0,0330	0,0360	0,0383	0,01	17,76
1600,00	0,1050	0,0950	0,0620	0,0873	0,02	25,77
2000,00	0,1040	0,1040	0,0750	0,0943	0,02	17,75
2500,00	0,0850	0,0910	0,0660	0,0807	0,01	16,18
3150,00	0,0710	0,0780	0,0460	0,0650	0,02	25,88
4000,00	0,0820	0,0860	0,0470	0,0717	0,02	29,94
5000,00	0,1430	0,1310	0,0840	0,1193	0,03	26,13
6300,00	0,1980	0,1910	0,1120	0,1670	0,05	28,60

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE E – Resultados de isolamento acústico

Tabela 46 - Isolamento acústico do Concreto Celular

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	10,95	11,72	12,42	11,70	0,74	6,29
63,00	13,29	13,74	15,41	14,15	1,12	7,90
80,00	14,88	18,05	17,29	16,74	1,66	9,89
100,00	18,53	16,68	18,10	17,77	0,97	5,45
125,00	20,05	20,54	22,29	20,96	1,18	5,62
160,00	20,36	22,08	24,35	22,26	2,00	8,99
200,00	17,91	22,03	20,68	20,21	2,10	10,39
250,00	15,55	19,60	18,02	17,72	2,04	11,52
315,00	22,23	25,92	24,48	24,21	1,86	7,68
400,00	30,16	30,10	34,39	31,55	2,46	7,80
500,00	30,30	33,42	36,09	33,27	2,90	8,72
630,00	33,48	40,31	38,15	37,31	3,49	9,36
800,00	37,01	44,79	40,71	40,84	3,89	9,53
1000,00	42,78	45,80	49,99	46,19	3,62	7,84
1250,00	45,19	52,97	49,72	49,29	3,91	7,93
1600,00	45,78	52,18	49,76	49,24	3,23	6,56
2000,00	52,47	61,64	58,28	57,46	4,64	8,07
2500,00	55,56	61,00	67,56	61,37	6,01	9,79
3150,00	56,35	57,64	61,17	58,39	2,50	4,27
4000,00	58,47	60,07	63,01	60,52	2,30	3,81
5000,00	53,21	63,44	62,77	59,81	5,72	9,57
6300,00	57,16	71,61	66,23	65,00	7,30	11,24

Fonte: Elaboração própria

Tabela 47 – Isolamento acústico do Traço Referência

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	14,94	15,37	17,70	16,00	1,49	9,28
63,00	17,71	17,30	19,42	18,14	1,12	6,20
80,00	20,44	19,26	21,06	20,25	0,91	4,51
100,00	22,78	20,49	22,16	21,81	1,18	5,43
125,00	24,08	21,22	22,82	22,71	1,43	6,31
160,00	23,13	21,03	22,66	22,27	1,10	4,95
200,00	20,50	18,90	19,71	19,70	0,80	4,06
250,00	18,45	19,19	16,43	18,02	1,43	7,93
315,00	24,55	20,79	22,97	22,77	1,89	8,29
400,00	26,61	23,45	25,78	25,28	1,64	6,48
500,00	32,06	29,72	28,29	30,02	1,90	6,34
630,00	36,92	35,46	30,76	34,38	3,22	9,36
800,00	29,82	35,82	33,33	32,99	3,01	9,14
1000,00	51,92	47,01	46,11	48,35	3,13	6,47
1250,00	50,95	43,19	49,49	47,88	4,12	8,61
1600,00	49,99	43,29	51,44	48,24	4,35	9,01
2000,00	52,49	46,40	51,99	50,29	3,38	6,72
2500,00	56,23	49,82	53,08	53,04	3,21	6,04
3150,00	56,19	54,60	55,5	55,43	0,80	1,44
4000,00	57,03	49,35	58,85	55,08	5,04	9,15
5000,00	60,15	55,14	60,86	58,72	3,12	5,31
6300,00	61,56	57,91	60,59	60,02	1,89	3,15

Fonte: Elaboração própria

Tabela 48 – Isolamento acústico do T5.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	19,93	16,21	20,04	18,73	2,18	11,64
63,00	21,62	18,24	22,80	20,89	2,37	11,33
80,00	22,91	19,91	23,67	22,16	1,99	8,97
100,00	24,99	21,28	24,70	23,66	2,06	8,72
125,00	25,29	21,48	25,22	24,00	2,18	9,08
160,00	22,85	18,49	23,56	21,63	2,74	12,69
200,00	20,75	17,71	19,79	19,42	1,55	8,00
250,00	18,50	15,48	17,51	17,16	1,54	8,96
315,00	24,87	21,81	24,49	23,72	1,67	7,03
400,00	27,70	24,39	27,24	26,44	1,79	6,77
500,00	36,24	36,00	32,23	34,82	2,25	6,45
630,00	38,14	37,19	34,48	36,60	1,90	5,18
800,00	43,04	41,24	38,41	40,90	2,33	5,70
1000,00	51,82	49,49	43,53	48,28	4,28	8,86
1250,00	30,25	47,78	44,21	40,75	9,26	22,74
1600,00	51,56	49,46	48,68	49,90	1,49	2,99
2000,00	54,32	52,07	53,78	53,39	1,17	2,20
2500,00	59,54	57,29	56,91	57,91	1,42	2,45
3150,00	51,04	59,06	61,59	57,23	5,51	9,62
4000,00	63,99	61,74	58,03	61,25	3,01	4,91
5000,00	63,67	61,61	61,22	62,17	1,31	2,11
6300,00	63,28	58,69	60,71	60,89	2,30	3,78

Fonte: Elaboração própria

Tabela 49 - Isolamento acústico do T5.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	11,99	13,73	11,05	12,26	1,36	11,09
63,00	14,57	15,50	12,70	14,26	1,43	10,00
80,00	15,90	17,00	13,80	15,57	1,63	10,44
100,00	17,44	18,47	15,49	17,13	1,51	8,83
125,00	18,32	19,34	17,00	18,22	1,17	6,44
160,00	16,35	19,38	17,51	17,75	1,53	8,61
200,00	15,01	17,22	16,07	16,10	1,11	6,87
250,00	12,65	13,56	13,28	13,16	0,47	3,54
315,00	18,52	19,31	19,14	18,99	0,42	2,19
400,00	21,66	22,57	22,21	22,15	0,46	2,07
500,00	26,10	31,07	30,87	29,35	2,81	9,59
630,00	31,20	37,45	37,14	35,26	3,52	9,99
800,00	31,86	34,59	33,43	33,29	1,37	4,12
1000,00	41,18	46,45	45,77	44,47	2,87	6,45
1250,00	43,76	47,65	47,80	46,40	2,29	4,94
1600,00	49,93	50,26	50,08	50,09	0,17	0,33
2000,00	50,01	51,77	50,93	50,90	0,88	1,73
2500,00	52,01	56,79	56,31	55,04	2,63	4,78
3150,00	55,45	56,42	55,43	55,77	0,57	1,01
4000,00	52,87	57,85	57,11	55,94	2,69	4,80
5000,00	57,08	61,64	61,97	60,23	2,73	4,54
6300,00	56,59	60,28	60,49	59,12	2,19	3,71

Fonte: Elaboração própria

Tabela 50 - Isolamento acústico do T5.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	15,83	8,08	14,61	12,84	4,17	32,45
63,00	17,42	11,91	16,47	15,27	2,95	19,29
80,00	18,23	15,97	18,03	17,41	1,25	7,19
100,00	19,07	19,04	19,42	19,18	0,21	1,10
125,00	19,40	21,07	20,46	20,31	0,85	4,16
160,00	19,63	22,14	20,26	20,68	1,31	6,32
200,00	18,25	20,79	18,01	19,02	1,54	8,10
250,00	15,57	17,85	14,94	16,12	1,53	9,50
315,00	21,57	23,09	21,38	22,01	0,94	4,26
400,00	24,44	25,25	23,93	24,54	0,67	2,71
500,00	32,99	31,97	30,79	31,91	1,10	3,45
630,00	36,19	37,05	33,13	35,46	2,06	5,81
800,00	36,11	44,78	43,04	41,31	4,58	11,10
1000,00	48,41	42,96	44,37	45,25	2,83	6,25
1250,00	49,69	44,64	49,90	48,08	2,98	6,19
1600,00	49,00	49,98	51,65	50,21	1,34	2,67
2000,00	51,63	50,60	53,67	51,97	1,56	3,01
2500,00	59,27	56,04	57,63	57,65	1,62	2,80
3150,00	54,48	57,99	54,97	55,81	1,90	3,41
4000,00	59,35	57,47	60,30	59,04	1,44	2,44
5000,00	65,67	59,89	62,41	62,66	2,90	4,63
6300,00	64,01	60,02	61,01	61,68	2,08	3,37

Fonte: Elaboração própria

Tabela 51 - Isolamento acústico do T10.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	15,50	12,60	15,17	14,42	1,59	11,01
63,00	16,60	14,44	16,64	15,89	1,26	7,92
80,00	18,53	16,05	18,41	17,66	1,40	7,92
100,00	19,54	15,86	18,82	18,07	1,95	10,79
125,00	19,76	15,81	18,91	18,16	2,08	11,44
160,00	17,60	16,65	18,25	17,50	0,80	4,59
200,00	16,88	15,61	17,37	16,62	0,91	5,45
250,00	14,46	13,00	15,70	14,39	1,35	9,39
315,00	20,74	18,63	22,30	20,56	1,84	8,96
400,00	23,61	21,90	25,54	23,68	1,82	7,69
500,00	38,12	37,66	35,94	37,24	1,15	3,09
630,00	31,05	32,15	31,98	31,73	0,59	1,86
800,00	37,52	38,20	37,61	37,78	0,37	0,97
1000,00	42,68	44,01	44,08	43,59	0,79	1,81
1250,00	44,92	46,89	46,62	46,14	1,07	2,31
1600,00	47,75	49,27	48,54	48,52	0,76	1,56
2000,00	52,88	53,45	51,78	52,70	0,85	1,61
2500,00	56,07	56,36	54,40	55,61	1,06	1,90
3150,00	58,97	59,22	57,23	58,47	1,08	1,85
4000,00	56,75	60,51	62,02	59,76	2,71	4,54
5000,00	57,41	61,37	63,08	60,62	2,91	4,80
6300,00	57,89	60,01	59,88	59,26	1,19	2,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 52 - Isolamento acústico do T10.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	16,76	15,39	16,13	16,09	0,69	4,26
63,00	17,71	16,88	17,45	17,35	0,42	2,45
80,00	17,74	18,29	19,26	18,43	0,77	4,18
100,00	18,54	19,49	20,24	19,42	0,85	4,39
125,00	19,47	19,58	20,29	19,78	0,45	2,25
160,00	19,94	18,43	18,86	19,08	0,78	4,08
200,00	18,41	17,42	17,72	17,85	0,51	2,84
250,00	15,57	14,85	15,20	15,21	0,36	2,37
315,00	21,46	20,87	21,20	21,18	0,30	1,40
400,00	24,21	23,75	24,09	24,02	0,24	0,99
500,00	38,89	41,06	40,98	40,31	1,23	3,05
630,00	32,84	37,48	37,67	36,00	2,74	7,60
800,00	37,80	40,44	40,55	39,60	1,56	3,93
1000,00	42,08	45,79	46,10	44,66	2,24	5,01
1250,00	42,30	44,56	44,66	43,84	1,33	3,04
1600,00	46,40	48,02	48,12	47,51	0,97	2,03
2000,00	52,58	51,91	51,99	52,16	0,37	0,70
2500,00	51,56	52,57	52,68	52,27	0,62	1,18
3150,00	59,25	59,66	59,84	59,58	0,30	0,51
4000,00	54,61	56,02	56,17	55,60	0,86	1,55
5000,00	57,19	58,29	58,56	58,01	0,73	1,25
6300,00	60,80	55,94	56,14	57,63	2,75	4,77

Fonte: Elaboração própria

Tabela 53 - Isolamento acústico do T10.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	21,51	21,03	21,69	21,41	0,34	1,59
63,00	22,81	23,45	23,27	23,18	0,33	1,42
80,00	23,92	24,50	24,65	24,36	0,39	1,58
100,00	24,70	25,57	25,88	25,38	0,61	2,41
125,00	25,32	25,92	26,13	25,79	0,42	1,63
160,00	24,15	24,71	25,08	24,65	0,47	1,90
200,00	20,03	20,59	21,01	20,54	0,49	2,39
250,00	17,27	17,46	17,63	17,45	0,18	1,03
315,00	23,91	24,07	24,25	24,08	0,17	0,71
400,00	27,00	27,23	27,40	27,21	0,20	0,74
500,00	39,77	35,59	26,84	34,07	6,60	19,37
630,00	34,51	31,73	28,74	31,66	2,89	9,11
800,00	36,67	35,60	36,37	36,21	0,55	1,52
1000,00	42,45	39,25	41,39	41,03	1,63	3,97
1250,00	44,13	40,59	43,01	42,58	1,81	4,25
1600,00	47,14	46,40	47,08	46,87	0,41	0,88
2000,00	51,41	52,33	51,98	51,91	0,46	0,89
2500,00	55,65	57,16	56,52	56,44	0,76	1,34
3150,00	63,46	62,99	64,28	63,58	0,65	1,02
4000,00	58,23	58,51	59,29	58,68	0,55	0,94
5000,00	59,25	59,38	60,34	59,66	0,59	0,99
6300,00	59,73	58,87	59,63	59,41	0,47	0,79

Fonte: Elaboração própria

Tabela 54 - Isolamento acústico do T15.1

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	19,28	19,60	17,37	18,75	1,21	6,43
63,00	20,97	21,82	18,80	20,53	1,56	7,59
80,00	22,62	23,22	20,28	22,04	1,55	7,05
100,00	23,81	24,08	21,53	23,14	1,40	6,05
125,00	24,35	25,02	22,28	23,88	1,43	5,98
160,00	23,06	23,62	21,93	22,87	0,86	3,76
200,00	20,07	20,45	18,79	19,77	0,87	4,40
250,00	17,70	17,89	15,66	17,08	1,24	7,24
315,00	24,70	25,02	22,37	24,03	1,45	6,02
400,00	27,55	27,87	24,99	26,80	1,58	5,89
500,00	34,88	35,05	32,05	33,99	1,69	4,97
630,00	32,09	32,09	32,01	32,06	0,05	0,14
800,00	38,19	37,52	42,53	39,41	2,72	6,90
1000,00	45,76	44,73	43,57	44,69	1,10	2,45
1250,00	48,46	48,16	47,50	48,04	0,49	1,02
1600,00	48,04	47,40	50,02	48,49	1,37	2,82
2000,00	54,03	53,97	51,32	53,11	1,55	2,91
2500,00	53,54	52,75	58,47	54,92	3,10	5,64
3150,00	58,13	57,36	59,35	58,28	1,00	1,72
4000,00	58,25	58,29	57,43	57,99	0,49	0,84
5000,00	59,78	59,69	58,18	59,22	0,90	1,52
6300,00	59,86	59,85	58,64	59,45	0,70	1,18

Fonte: Elaboração própria

Tabela 55 - Isolamento acústico do T15.2

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	16,13	19,25	16,19	17,19	1,78	10,38
63,00	17,90	20,49	18,40	18,93	1,37	7,26
80,00	19,31	21,32	19,11	19,91	1,22	6,14
100,00	20,67	22,77	19,13	20,86	1,83	8,76
125,00	21,25	23,25	21,31	21,94	1,14	5,19
160,00	21,13	23,09	22,11	22,11	0,98	4,43
200,00	18,88	20,67	20,13	19,89	0,92	4,62
250,00	15,34	16,17	16,77	16,09	0,72	4,46
315,00	21,10	22,26	22,23	21,86	0,66	3,02
400,00	24,00	25,60	24,33	24,64	0,84	3,43
500,00	30,04	33,49	36,60	33,37	3,28	9,82
630,00	29,33	29,99	31,49	30,27	1,11	3,66
800,00	30,83	36,46	37,46	34,91	3,58	10,24
1000,00	32,63	37,05	37,14	35,61	2,58	7,25
1250,00	41,12	43,81	39,62	41,52	2,12	5,11
1600,00	48,82	46,49	42,74	46,02	3,07	6,67
2000,00	54,25	42,56	48,21	48,34	5,85	12,09
2500,00	61,69	40,23	54,63	52,18	10,94	20,96
3150,00	53,11	50,87	60,18	54,72	4,86	8,88
4000,00	60,25	55,46	60,88	58,86	2,96	5,04
5000,00	57,45	53,81	61,87	57,71	4,04	6,99
6300,00	59,64	52,51	60,65	57,60	4,44	7,70

Fonte: Elaboração própria

Tabela 56 - Isolamento acústico do T15.3

Frequência (Hz)	CP1	CP2	CP3	Média	Estatístico	
	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Desvio Padrão	C.V. (%)
50,00	17,83	12,89	6,45	12,39	5,71	46,06
63,00	19,61	14,00	9,89	14,50	4,88	33,65
80,00	20,78	15,25	12,85	16,29	4,07	24,96
100,00	21,50	16,23	15,00	17,58	3,45	19,64
125,00	22,51	17,70	16,47	18,89	3,19	16,89
160,00	22,26	18,46	17,09	19,27	2,68	13,90
200,00	19,92	17,34	15,91	17,72	2,03	11,47
250,00	16,60	14,58	13,28	14,82	1,67	11,29
315,00	22,45	20,17	19,16	20,59	1,69	8,18
400,00	25,29	23,35	22,65	23,76	1,37	5,76
500,00	32,03	30,75	30,58	31,12	0,79	2,54
630,00	32,13	34,21	31,61	32,65	1,38	4,21
800,00	38,06	38,63	36,74	37,81	0,97	2,56
1000,00	46,60	40,13	39,12	41,95	4,06	9,67
1250,00	46,24	41,09	40,02	42,45	3,33	7,83
1600,00	47,60	47,97	46,65	47,41	0,68	1,44
2000,00	50,91	57,98	58,56	55,82	4,26	7,63
2500,00	54,80	59,90	61,82	58,84	3,63	6,17
3150,00	59,60	56,45	54,35	56,80	2,64	4,65
4000,00	59,75	59,95	59,31	59,67	0,33	0,55
5000,00	59,77	59,41	59,36	59,51	0,22	0,38
6300,00	58,66	58,70	58,28	58,55	0,23	0,40

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE F – Resultados de condutividade térmica

Tabela 57 – Condutividade térmica

Concreto Celular	CP	Condutividade (W/m.K)	Traço Referência	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2316		1	0,2686
	2	0,2507		2	0,2908
	3	0,2438		3	0,2675
	Média	0,2420		Média	0,2756
	Desvio Padrão	0,01		Desvio Padrão	0,01
	Variância	9,35E-05		Variância	1,73E-04
	C.V (%)	4,00		C.V (%)	4,77
T5.1	CP	Condutividade (W/m.K)	T5.2	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2919		1	0,2785
	2	0,3203		2	0,2575
	3	0,2906		3	0,2413
	Média	0,3009		Média	0,2591
	Desvio Padrão	0,02		Desvio Padrão	0,02
	Variância	2,82E-04		Variância	3,48E-04
	C.V (%)	5,58		C.V (%)	7,20
T5.3	CP	Condutividade (W/m.K)	T10.1	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2296		1	0,2844
	2	0,2387		2	0,2448
	3	0,2059		3	0,2431
	Média	0,2247		Média	0,2574
	Desvio Padrão	0,02		Desvio Padrão	0,02
	Variância	2,87E-04		Variância	5,46E-04
	C.V (%)	7,53		C.V (%)	9,08
T10.2	CP	Condutividade (W/m.K)	T10.3	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2561		1	0,2296
	2	0,2493		2	0,2444
	3	0,2765		3	0,2430
	Média	0,2606		Média	0,2390
	Desvio Padrão	0,01		Desvio Padrão	0,01
	Variância	2,00E-04		Variância	6,68E-05
	C.V (%)	5,43		C.V (%)	3,42

Continua na próxima página

Continuação Tabela 57

T15.1	CP	Condutividade (W/m.K)	T15.2	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2603		1	0,2342
	2	0,2730		2	0,2510
	3	0,2357		3	0,2794
	Média	0,2563		Média	0,2549
	Desvio Padrão	0,02		Desvio Padrão	0,02
	Variância	3,60E-04		Variância	5,22E-04
	C.V (%)	7,40		C.V (%)	8,96
T15.3	CP	Condutividade (W/m.K)	T15.3S com CA e PA Saturados	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2074		1	0,2596
	2	0,1984		2	0,2449
	3	0,2342		3	0,2545
	Média	0,2133		Média	0,2530
	Desvio Padrão	0,02		Desvio Padrão	0,01
	Variância	3,47E-04		Variância	5,57E-05
	C.V (%)	8,73		C.V (%)	2,95
15.3S com CA e PA Saturados - 91 dias	CP	Condutividade (W/m.K)	T15.3S com CA e PA Saturados - 91 dias com ciclos M/S	CP	Condutividade (W/m.K)
	1	0,2143		1	0,2208
	2	0,2191		2	0,1862
	3	0,2062		3	0,1935
	Média	0,2132		Média	0,2002
	Desvio Padrão	0,01		Desvio Padrão	0,02
	Variância	4,25E-05		Variância	3,33E-04
	C.V (%)	3,06		C.V (%)	9,11

Fonte: Elaboração própria