

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EDUARDO CESAR PACHLA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO CELULAR E CASCA
DE ARROZ: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E ACÚSTICA**

**Alegrete
2015**

EDUARDO CESAR PACHLA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO CELULAR E CASCA
DE ARROZ: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E ACÚSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Ederli Marangon

Coorientador: Wang Chong

**Alegrete
2015**

EDUARDO CESAR PACHLA

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE CONCRETO CELULAR E CASCA
DE ARROZ: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA E ACÚSTICA**

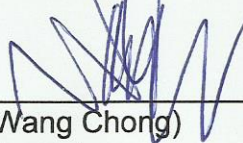
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 02/12/15

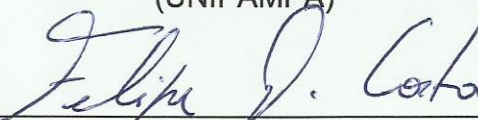
Banca examinadora:



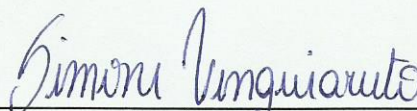
Prof. Dr. Ederli Marangon
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. (Wang Chong)
Coorientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. (Felipe Denardin Costa)
(UNIPAMPA)



Prof. Msc. (Simone Dornelles Venquiaruto)
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho aos meus pais
Leomar e Tânia Pachla e aos meus irmãos
Edilson e Wellington Pachla.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, irmãos e avós por todo amor, carinho e incentivo.

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

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

Aos amigos e colegas de pesquisa, Pedro Jucá e Thiago Victor, que participaram das concretagens e ensaios executados ao longo desses dois anos de pesquisa.

Aos amigos que sempre estiveram apoiando e dispostos a ajudar na realização da pesquisa: Ângelo, Diego, Raphael e Vinicius.

A empresa ECOPORE pela doação do aditivo utilizado na pesquisa.

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

Ao CNPq pela concessão da bolsa de iniciação científica.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

Com a intenção de desenvolver materiais para vedação de ambientes, residências e edifícios com melhores propriedades termo acústicas que os atuais, foram desenvolvidos, para análise, compósitos de concreto celular com adição de casca de arroz. O concreto celular é conhecido principalmente pelo seu baixo peso específico, e pelo seu bom desempenho térmico e acústico. Por sua vez, a casca de arroz carece de uma aplicação que não degrade o meio ambiente, já que grande parte da casca residual da indústria arroseira é queimada para geração de energia. Pensando em criar um destino sustentável para o resíduo, minimizar a retração por secagem do concreto celular, melhorar a resistência à flexão e a resistência acústica, foram desenvolvidos três compósitos. Para testar o desempenho dos compósitos foram feitas as caracterizações físicas, mecânicas e acústicas. Na caracterização física foram determinadas as massas específicas no momento de moldagem dos corpos de prova para o estado fresco, aos sete e aos vinte e oito dias de cura para o estado endurecido. Na avaliação das propriedades mecânicas foram medidas a resistência à compressão axial e à tração na flexão em três pontos. A absorção e o isolamento acústico foram avaliados utilizando um tubo de impedância. A incorporação da casca de arroz no concreto celular demonstrou boa eficiência, apresentando melhora em todas as características estudadas. Na resistência à compressão axial os compósitos, bem como o concreto celular convencional seguiram a lógica de que quanto maior a densidade do material, maior a resistência. Já para a resistência à tração na flexão a casca de arroz melhorou os materiais deixando todos os compósitos com resistência superior ao concreto referência. Já a absorção acústica seguiu ao que foi determinado na revisão bibliográfica, sendo que os materiais mais porosos foram também os que mais absorveram som. Nos ensaios de isolamento acústico todos compósitos com casca de arroz obtiveram melhor capacidade de isolar ruídos a partir de 1250 Hz, não seguindo os padrões verificados na referência bibliográfica, na faixa de frequência de 50 Hz a 1250 Hz verificou-se a relação de que quanto maior a massa específica do material, melhor sua capacidade de isolar som, conforme determinado na revisão bibliográfica.

Palavras-chaves: concreto celular, casca de arroz, massa específica, resistência mecânica, desempenho acústico.

ABSTRACT

With the intention of develop materials for sealing environments, homes and buildings with better term acoustic properties than the current ones have been developed for analysis, composite cellular concrete with addition of rice husk. The cellular concrete is mainly known for its low specific weight and its good thermal and acoustic performance. By your turn the rice husk lacks an application that doesn't degrade the environment, already that the residual shell of rice-growing industry is burned to create energy. Thinking in to create a sustainable destination for the residue, to minimize the retraction of the cellular concrete, to improve flexural strength and acoustic resistance, were developed three composites. To test the performance of the composites were made physical, mechanical and acoustic characterizations. In physical characteristics were determined the specific mass in the moment of molding the body of proof for fresh, in the seventh and twenty-eighth day of cure for the most hardened state. In evaluating the mechanical properties were measured resistance to axial compression and to traction in three point bending. The absorption and sound insulation were evaluated using an impedance tube. The incorporation of rice husk in cellular concrete demonstrated good efficiency, showing improvement in all studied characteristics. The compressive strength composites as well as the conventional cellular concrete followed the logic that the higher the material density, higher will be the resistance. Already for the tensile strength in bending the rice husk improved materials leaving all composites with superior resistance to concrete reference. Ever the sound absorption followed what was determined in the literature review, being that the most porous materials were also the ones who absorb sound. In soundproofing trials all composites with rice husk had better ability to isolate noise from 1250 Hz, not following the patterns observed in the bibliographic reference, in the frequency range of 50 Hz to 1250 Hz there was the relationship that the the higher the specific mass of the material, better is your ability to isolate sound, according determined in the literature review.

Keywords: cellular concrete, rice husk, density, mechanical resistance, acoustic performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do concreto celular.....	6
Figura 2 - Transmissão, absorção e reflexão de ruídos.....	9
Figura 3 - Tubo de impedância para ensaio de absorção acústica	11
Figura 4 - Amostra no tubo de impedância	12
Figura 5 - Relação do índice de redução sonora com a frequência	14
Figura 6 - Organograma simplificado sobre a pesquisa realizada.....	15
Figura 7 - Casca de arroz utilizada.....	16
Figura 8 - Gerador de espuma.....	17
Figura 9 – Geração da espuma	18
Figura 10 - Organograma de mistura para concretagem.....	20
Figura 11 - Imagens dos procedimentos de mistura	21
Figura 12 - Preparação dos moldes.....	22
Figura 13 - Corpos de prova aptos a receber o concreto	23
Figura 14 - Determinação da massa do concreto no estado fresco	24
Figura 15 - Determinação da massa do concreto no estado endurecido.....	25
Figura 16 - Retífica utilizada.....	25
Figura 17 - Amostra preparada para ser ensaiada.....	26
Figura 18 - Amostra em ensaio de flexão em 3 pontos.....	27
Figura 19 - Preparação das amostras.....	28
Figura 20 - Amostras utilizadas para ensaio de baixa frequência	29
Figura 21 - Amostras utilizadas para ensaio de alta frequência	29
Figura 22 – Encaixe das espumas para ensaio de isolamento acústico.....	30
Figura 23 – Preparação pra encaixe da amostra no tubo de impedância com vedação em silicone	30
Figura 24 – Amostra encaixada no tubo de impedância.....	31
Figura 25 - Esquema do ensaio de absorção acústica	32
Figura 26 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção com frequência de 50 Hz a 1600 Hz	33
Figura 27 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção com frequência entre 50 Hz e 1600 Hz.....	33
Figura 28 - Esquema do ensaio de isolamento acústico	34

Figura 29 – Tubo de impedância pronto para ensaio de isolamento com frequência de 500 Hz a 6300 Hz	35
Figura 30 - Relação entre a média da massa específica no estado endurecido e da resistência à compressão axial dos CPs ensaiados.....	42
Figura 31 - Relação entre a média da massa específica no estado endurecido e da resistência à tração na flexão em três pontos dos CPs ensaiados.....	43
Figura 32- Frequência x Absorção acústica	44
Figura 33 - Frequência x Isolamento acústico	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação resistência mecânica e densidade	7
Tabela 2 - Traços fornecidos pela ECOPORE	7
Tabela 3 - Resistência a tração do concreto celular espumoso	8
Tabela 4 - Traços dos concretos celulares espumosos CCE 400 e CCE 600	8
Tabela 5 - Coeficientes de absorção acústica de materiais da construção civil	12
Tabela 6 - Faixas de frequência perceptíveis para o ser humano	13
Tabela 7 - Isolamento acústico de materiais da construção civil	14
Tabela 8 - Traços massa combinado com volume	19
Tabela 9 - Material utilizado para produção de 1 m ³ de concreto celular	36
Tabela 10 – Custo para produção de 1 m ³ de concreto celular	36
Tabela 11 - Massa específica real no estado fresco	37
Tabela 12 - Médias das massas específicas no estado endurecido	37
Tabela 13 - Razão entre a massa específica no estado fresco e a massa específica no estado endurecido aos sete dias	38
Tabela 14 - Resistências médias de compressão axial aos 7 dias	39
Tabela 15 – Média da resistência à tração na flexão aos sete e aos vinte e oito dias	40
Tabela 16 – Média das massas específicas dos traços	41
Tabela 17 - Relação entre massa específica e tensão de compressão	41
Tabela 19 - Relação entre massa específica e tensão de tração	42
Tabela 20 - Absorção acústica dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz	44
Tabela 21 - Isolamento acústico dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz	46
Tabela 22 - Resistência à compressão axial do Traço 1	53
Tabela 23 - Resistência à compressão axial do Traço 2	53
Tabela 24 - Resistência à compressão axial do Traço 3	53
Tabela 25 - Resistência à compressão axial do Traço 4	54
Tabela 26 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 1	55
Tabela 27 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 2	55
Tabela 28 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 3	55
Tabela 29 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 4	56

Tabela 30 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 1.....	57
Tabela 31 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 2.....	57
Tabela 32 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 3.....	57
Tabela 33 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 4.....	57
Tabela 34 - Absorção acústica dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz.....	58
Tabela 35 - Isolamento acústico dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CAAL – Cooperativa Agroindustrial Alegrete LTDA;

CCE – Concreto Celular Espumoso;

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico;

CP IV – Cimento Portland com pozalana;

CP V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial;

CP's – Corpos de prova;

EPI – Equipamento de proteção individual;

ISO – International Organization for Standardization;

NBR – Norma brasileira;

SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização do tema	1
1.2	Definição do problema e da questão da pesquisa	2
1.3	Objetivos	3
1.3.1	Objetivo geral	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
1.4	Justificativa da escolha do concreto celular e da casca de arroz	3
1.4.1	Concreto celular	3
1.4.2	Casca de arroz	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Concreto celular	5
2.1.1	Classificação	5
2.1.2	Resistência mecânica	7
2.2	Resistividade acústica	8
2.2.1	Absorção acústica	9
2.2.2	Isolamento acústico	12
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	15
3.1	Introdução	15
3.2	Materiais	16
3.2.1	Cimento	16
3.2.2	Casca de arroz	16
3.2.3	Espuma	17
3.3	Métodos experimentais	19
3.3.1	Definição dos traços	19
3.3.2	Método de mistura	20
3.3.3	Moldagem dos corpos de prova	22
3.3.4	Massa específica fresca e massa específica seca	23
3.3.5	Ensaio de resistência à compressão axial	25
3.3.6	Ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos	26
3.3.7	Ensaio de absorção e isolamento acústico	27
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1	Estudo dos custos dos materiais de cada compósito	36

4.2	Determinação da massa específica no estado fresco e no estado endurecido dos compósitos	37
4.3	Ensaio de resistência à compressão axial	38
4.4	Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos	39
4.5	Relação entre massa específica e resistência mecânica	40
4.6	Ensaio de absorção acústica	44
4.7	Ensaio de isolamento acústico	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
5.1	Conclusões	48
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICES.....	53

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

A busca para melhorar o desempenho acústico das edificações habitacionais brasileiras vem aumentando gradativamente nos últimos anos, principalmente com a atualização e publicação de novas Normas Brasileiras. Com isso, torna-se necessário a qualificação dos materiais de vedação e acabamento das edificações para que os mesmos possam obter o melhor desempenho frente a resistividade acústica, sem apresentar perdas em suas propriedades mecânicas.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) é a norma brasileira responsável pela determinação do desempenho geral das edificações brasileiras, que abrange a execução, as disposições físicas do local, a qualidade dos acabamentos, características e resistências dos materiais para cada aplicação, etc. Dentre esses desempenhos a norma condiciona indispensável a interpretação de diversas outras normas, sendo cada destinada a sua área de aplicação. Para o foco de ruídos acústicos é citada a *NBR 10151 - Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimentos* e a *NBR 10152 - Níveis de ruído para conforto acústico*.

“Propiciar condições de isolamento acústica entre as áreas comuns e ambientes de unidades habitacionais e entre unidades habitacionais distintas” (NBR 15575-1, 2013, p.23) é uma das características destacadas. Ainda que o isolamento seja de extrema importância, o que realmente garante a qualidade da audição é a capacidade que o ambiente possui em absorver os ruídos, dessa forma, diminuindo a reverberação dos sons (FLACH, 2012), que é determinado por ensaios de absorção acústica.

No entanto, é imprescindível que pelo menos as caracterizações mecânicas e físicas do material sejam detalhadas, já que a falta de especificações técnicas limita o uso do produto. A NBR 15270-1 (ABNT, 2005) determina uma resistência de compressão axial mínima de 1,50 MPa para as alvenarias de vedação, já a NBR 10151 (ABNT, 2003) e a NBR 10152 (ABNT, 1992) determinam as caracterizações de acústica, tanto em isolamento como absorção dos materiais.

A resistência mecânica, a absorção acústica e o isolamento acústico estão diretamente ligados a massa específica do concreto. Dessa forma, torna-se

necessário fazer um trabalho que englobe e relacione valores numéricos testados em laboratório para todos os itens.

1.2 Definição do problema e da questão da pesquisa

O concreto celular possui estrutura porosa e fibrosa apresentando assim boa capacidade de absorção de ruídos. Existem muitos produtos que oferecem boa capacidade de isolamento acústico, no entanto, o material que possui essa característica geralmente não tem bons resultados na absorção acústica (CARVALHO, 2006). Entretanto, o concreto celular é classificado como um bom material de isolamento acústico por empresas como a CONSTRUPOR, a ISOCEL e a ECOPORE.

Assim, surge a seguinte dúvida: segundo as definições de Carvalho (2006), o concreto celular teria boa capacidade de absorção acústica, no entanto pouca resistência ao isolamento. Porém, diversas empresas citam como característica do material o bom isolamento acústico. Afinal, quais são os desempenhos de absorção e isolamento acústico do concreto celular?

O concreto leve possui elevada retração por secagem (TEIXEIRA FILHO, 1992), o que implica no uso de diversas fibras artificiais e expansores sintéticos para sua composição. Dessa forma, aproveitando um material de baixo valor agregado e de alta disponibilidade na região do pampa, será utilizado a casca de arroz, que formará um compósito de concreto celular. Sua função será minimizar os efeitos provocados no concreto nas primeiras idades (retração) e proporcionar ligação entre as fissuras no estado endurecido e conseqüentemente melhorar as propriedades de tração.

Uma vez que a resistência do concreto celular ao fogo é unanimidade entre diversos autores, se nos ensaios em laboratório for constatada boa resistência mecânica, e que comprovadamente possuir bom isolamento e boa absorção acústica, cria-se uma excelente opção para compor alvenarias, lajes e forros.

Considerando estes elementos a questão proposta para este trabalho é:

Qual é o custo, o desempenho acústico e mecânico dos compósitos de concreto celular e casca de arroz e qual é a relação com a massa específica do material?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver compósitos de concreto celular contendo fibras de casca de arroz e avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e acústicas.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Produzir concreto celular com retração minimizada utilizando fibras de casca de arroz;
- Estudo dos custos dos materiais para produzir os compósitos;
- Determinação da massa específica no estado fresco e da massa específica no estado endurecido do concreto aos sete e aos vinte e oito dias;
- Caracterização dos compósitos de concreto celular e casca de arroz através de ensaios mecânicos de compressão axial e tração na flexão em três pontos;
- Estudo da capacidade de absorção e isolamento acústico dos compósitos e comparação com outros materiais.

1.4 Justificativa da escolha do concreto celular e da casca de arroz

A seguir são demonstradas informações referentes ao motivo da escolha, pela criação de um compósito de concreto celular e casca de arroz proposta para minimizar a falta de conforto acústico, preponderante na maioria das edificações brasileiras.

1.4.1 Concreto celular

O concreto celular possui massa específica menor do que o convencional, conforme LEGATSKI (1978, p. 562) tem limites estipulados entre 320 Kg/m³ e 1920 Kg/m³, e segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) para o material ser classificado como concreto leve sua massa específica deve ser inferior a 2000 Kg/m³.

A baixa massa específica é obtida através da incorporação de ar durante o processo de mistura, o qual permanece em seu interior após o processo de cura,

gerando micro poros não interligados. Esses poros criam vazios, onde o som perde maior quantidade de energia, conseguindo boa capacidade de absorver os ruídos acústicos.

1.4.2 Casca de arroz

O concreto celular possui elevada retração por secagem (TEIXEIRA FILHO, 1992), o que acaba mudando drasticamente não só seu volume como também sua forma física. Para minimizar esse problema, atualmente são utilizados aditivos expansores e diversos tipos de fibras. Desse modo, a casca de arroz torna-se uma opção plausível por ser uma fibra de procedência natural, com baixo peso específico e um resíduo agroindustrial abundante na região do pampa gaúcho, diminuindo o custo do material produzido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto celular

Caracterizado por ser um concreto com baixa massa específica e estrutura porosa obtida através da incorporação de ar (MELO, 2009). O ar incorporado é resultado de uma espuma especial adicionada ao material na fase de mistura, a qual pode ser produzida de diversas formas e com aditivos naturais e químicos sintéticos.

O concreto celular é um tipo de concreto leve, que pode conter aglomerantes e agregados finos ou apenas aglomerantes, que passam por tratamentos físicos, mecânicos e químicos para obterem alta quantidade de poros esféricos, indeformáveis e não interligados de dimensão milimétrica e regular que permanecem estáveis, incomunicáveis e indeformáveis após a cura (FERREIRA, 1986 apud MELO, 2009). Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015) para que o concreto seja classificado como concreto do tipo leve, o mesmo deve ter massa específica menor que 2000 Kg/m³.

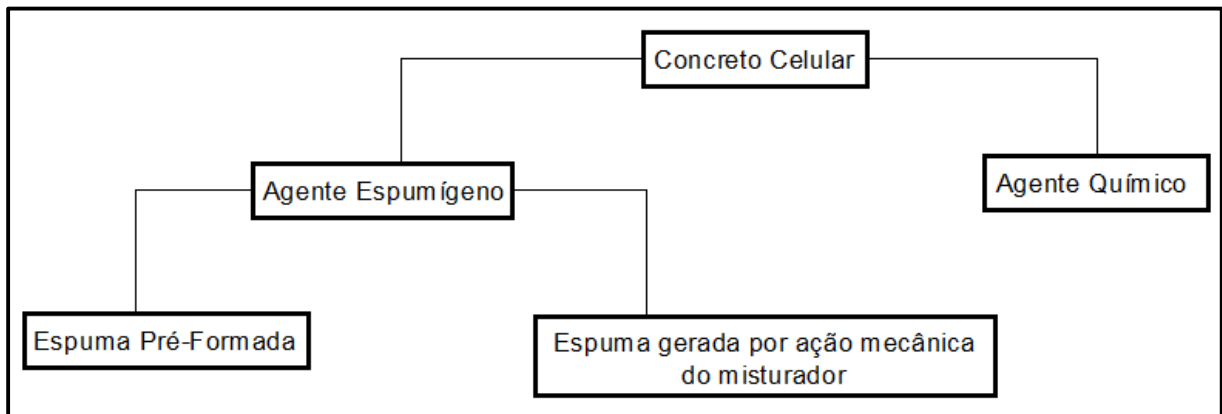
Se o agente espumígeno for diluído na água e colocado na forma líquida na betoneira, o concreto celular pode ser produzido sem maquinário especial e mão de obra especializada. Além disso, é autonivelante, não necessita vibração e a cura pode ser feita em condições atmosféricas normais, desde que o concreto tenha em sua composição uma adição ou aditivo que minimizem a acentuada retração que o material sofre durante o processo de cura (TEIXEIRA FILHO, 1992).

Além de ser utilizado para vedações verticais, isolamento termo acústico e amortecimento de impacto, o concreto celular pode também ser utilizado para fins estruturais, desde que possua resistência maior que 17,2 MPa e massa específica menor que 2000 Kg/m³, seguindo critério da NBR 8953 (ABNT, 2015) (ISAIA, 2011).

2.1.1 Classificação

O concreto celular pode ser classificado em duas famílias, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Classificação do concreto celular



Fonte: Adaptado de Melo (2009)

Os concretos aerados, celulares ou autoclavados podem ser divididos em dois grandes grupos, os aerados com agente espumígeno (com espuma pré-formada) e com agentes químicos (também chamados de gasosos), sendo a principal diferença entre eles a formação dos poros (MELO, 2009).

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

Os concretos aerados formados por agente espumígeno podem incorporar as bolhas de duas formas:

1. Espuma pré-formada, com características controladas e geradas em equipamentos específicos e introduzida após o preparo da argamassa (MELO, 2009);
2. Espuma gerada por ação mecânica, com o agente espumígeno já diluído em água e misturado às matérias primas no interior do aparelho misturador, onde, durante a operação, a espuma é gerada pela velocidade do equipamento (MELO, 2009).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas tem três normas que regulamentam um padrão de qualidade e metodologias de ensaios dos variados tipos de concreto celular existentes. As normas que regulam o padrão de qualidade dos concretos celulares são:

- NBR 12644 – 2014: Concreto leve celular estrutural — Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco;

- NBR 12645 – 1992: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local;
- NBR 12646 – 1992: Paredes de Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local.

2.1.2 Resistência mecânica

A empresa fornecedora do traço referência, do aditivo espumígeno e do incorporador de ar forneceu uma tabela que relaciona a densidade do concreto com a resistência mecânica de compressão axial aos 28 dias de cura. Esses dados estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação resistência mecânica e densidade

Densidade (Kg/m ³)	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Resistência (MPa)	1	4	3	4	6-8	10-12	16-18

Fonte: Adaptado de ECOPORE, 2014

Os dados fornecidos pela ECOPORE, são referentes ao concreto celular produzido com agente espumígeno, no grupo da espuma pré-formada. O cimento utilizado para estes valores foi do tipo Portland CP V ARI. Não foi fornecido no catálogo a marca, o lote e as propriedades do cimento.

Os traços fornecidos pela ECOPORE para produção de 1 (um) metro cúbico de concreto constam na Tabela 2.

Tabela 2 - Traços fornecidos pela ECOPORE

Densidade (kg/m ³)	400	600	800	1000	1200	1400	1600
Traço	0:1	0:1	1:1	2:1	2:1	3:1	3:1
Areia (kg)	0	0	412	696	864	960	1152
Cimento (kg)	332	443	412	348	288	320	384
Água na mistura (kg/l)	108	198	165	139	112	132	174
Espuma (l)	801	620	562	481	422	385	248
Água na Espuma (kg/L)	58	51	41	35	32	28	18
Densidade Fresca (kg/m ³)	499.18	748.03	1030.21	1213.44	1323.57	1520.54	1722.94
Uso de Aditivo (kg)	1.46	1.3	1	0.88	0.8	0.7	0.45
Fator a/c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Fonte: Adaptado de ECOPORE, 2014

Melo (2009) encontrou para resistência à tração na flexão os valores apresentados na Tabela 3. Os materiais estudados foram o concreto celular espumoso de 400 kg/m³ (CCE 400) e o concreto celular espumoso de 600 kg/m³ (CCE 600).

Tabela 3 - Resistência a tração do concreto celular espumoso

Material	Resistencia à tração na Flexão (MPa)	Desvio Padrão	Coef. De Variação (%)
CCE 400	0.29	0.09	5.76
CCE 600	0.38	0.08	6.77

Fonte: Adaptado de MELO, 2009

Os traços utilizados para o CCE 400 e para o CCE 600 constam na Tabela 4.

Tabela 4 - Traços dos concretos celulares espumosos CCE 400 e CCE 600

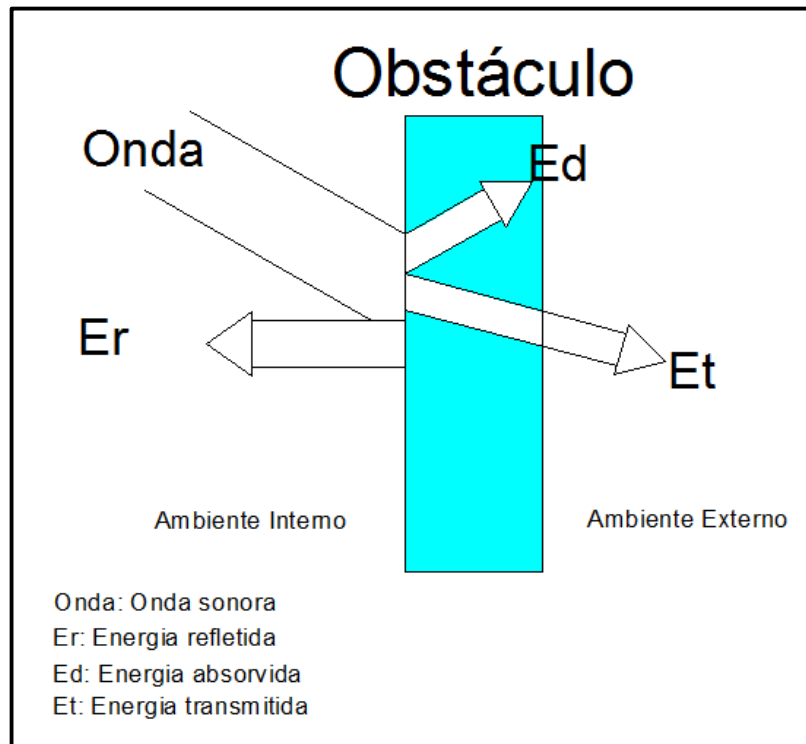
Material	Cimento	Neopor 600 (% da água)	Fator A/C	Areia	Cal
CCE 400	1	28,2	0,57	0	0,2
CCE 600	1	24,6	0,53	1	0

Fonte: Adaptado de MELO, 2009

2.2 Resistividade acústica

No contexto da acústica deve-se ter cuidado em diferenciar o isolamento e a absorção acústica. A Figura 2 ilustra os efeitos sonoros em incidência sobre um material. Os itens 2.2.2 e 2.2.3 caracterizam absorção e isolamento acústico respectivamente.

Figura 2 - Transmissão, absorção e reflexão de ruídos



Fonte: Adaptado de Silva (1971)

Na Figura 2 é representada a incidência de som sobre um material qualquer, o mecanismo de transmissão consiste em 3 divisões. Uma parte da energia que incide no material reflete para o interior do ambiente, esta divisão da energia é representada na Fig. 2 pelo “Er”. O “Ed” é a parte da energia que é transmitida através dos poros do material e por vibração longitudinal do mesmo, ou seja, o choque das moléculas, nesse processo a energia absorvida é transformada em energia calorífica ou mecânica. O “Ed” nada mais é que a absorção acústica. 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).

2.2.1 Absorção acústica

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 (FLACH, 2012).

A qualidade acústica de um ambiente é determinada pela capacidade de absorção sonora do próprio ambiente, 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 essa energia sonora 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).

Este fato ocorre porque os materiais absorventes são constituídos por cerca de 90% de poros, de tal forma que a estrutura do material se distribui em filetes, e qualquer esforço sobre ele solicita sua rigidez uniaxial e não a volumétrica (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.

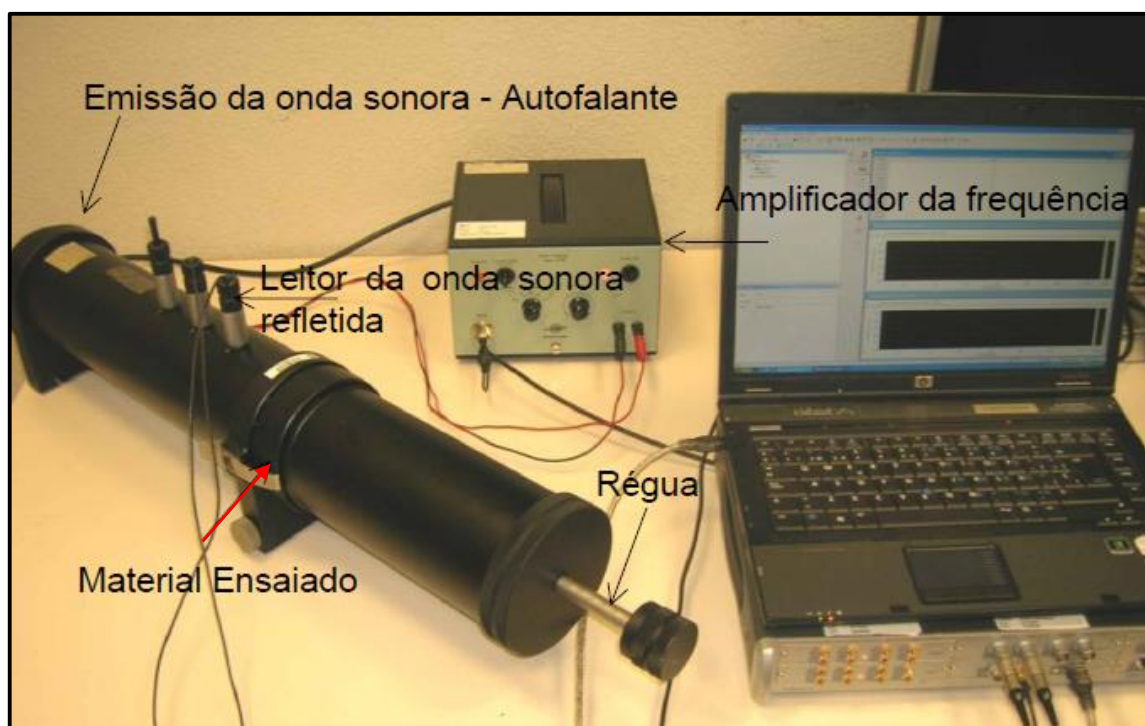
As três primeiras se referem às interações a que o ar, no interior do material, está sendo submetido. Essas interações são difíceis de serem determinadas em escala microscópica, devido à complexidade geométrica dos poros. Por isso o material é avaliado em escala macroscópica em volume suficientemente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

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

Os métodos usados para determinar as características acústicas em tubo de impedância (Figura 3) são relativamente simples e de fácil implementação. O princípio

básico de funcionamento do tubo é baseado na superposição de duas ondas planas. A primeira 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).

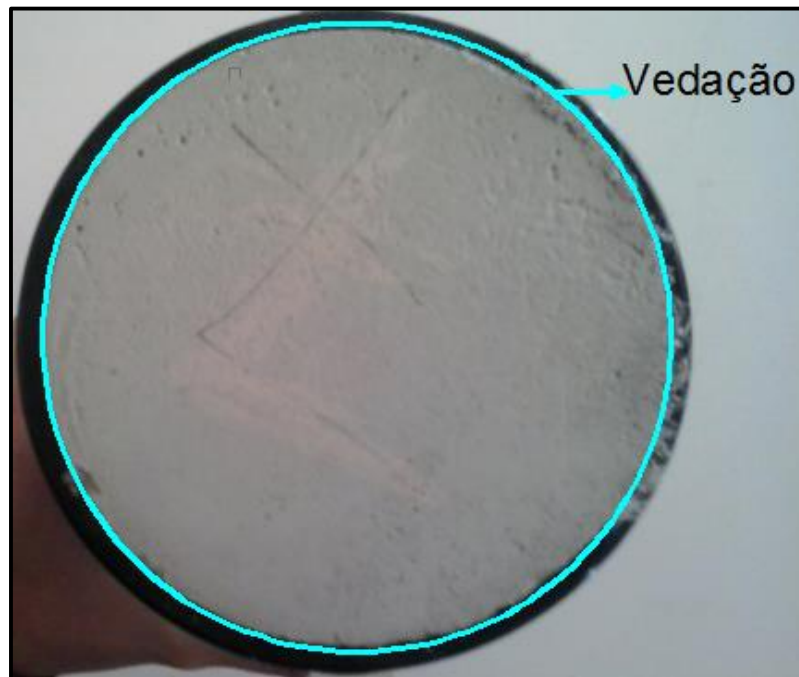
Figura 3 - Tubo de impedância para ensaio de absorção acústica



Fonte: Adaptado de Foundation Cidaut (2015)

Allard (2009) alerta 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 4 ilustra a amostra encaixada no tubo de impedância e o local onde deve ser feita a vedação. A vedação pode ser feita com vários tipos de polímeros.

Figura 4 - Amostra no tubo de impedância



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 5 apresenta os coeficientes de absorção acústica de alguns materiais utilizados na construção civil. 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
Vidraça de janela	-	0.04	0.03	0.02	-	-
Portas de madeira, fechada	0.14	-	0.06	-	0.10	-
Madeira compensada de 3mm, a 50mm da parede	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06
Cadeira estofada, chata, com tecido	0.13	-	0.20	-	0.25	-
Estuque	0.03	-	0.04	-	0.07	-

Fonte: Adaptado da NBR 12179 (ABNT,1992)

2.2.2 Isolamento acústico

O isolamento acústico caracteriza-se pela capacidade que determinados materiais têm 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, p.113) salientam alguns fatores influentes no isolamento sonoro de uma parede por exemplo. O fator mais importante é a porosidade, o qual é inversamente proporcional a capacidade de isolamento do material. Os demais itens que podem influenciar o transpasse do som de um ambiente a outro é o nível sonoro no local de emissão, distribuição do espectral do ruído, o índice de redução sonora da parede divisória, a superfície da parede divisória, a absorção total do local receptor e a natureza das paredes adjacentes, devido às transmissões que ocorrem pelos flancos.

Em concordância com Méndez e Carvalho, 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 esta 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 (NEUBAUER, 2008).

Como não se faz necessário estudar as frequências sonoras que não são perceptíveis pelo ser humano, Carvalho (2006), estipula os valores de frequência que devem ser considerados ao ser analisado um material ou ambiente. A Tabela 6 mostra as frequências perceptíveis pelo ouvido humano:

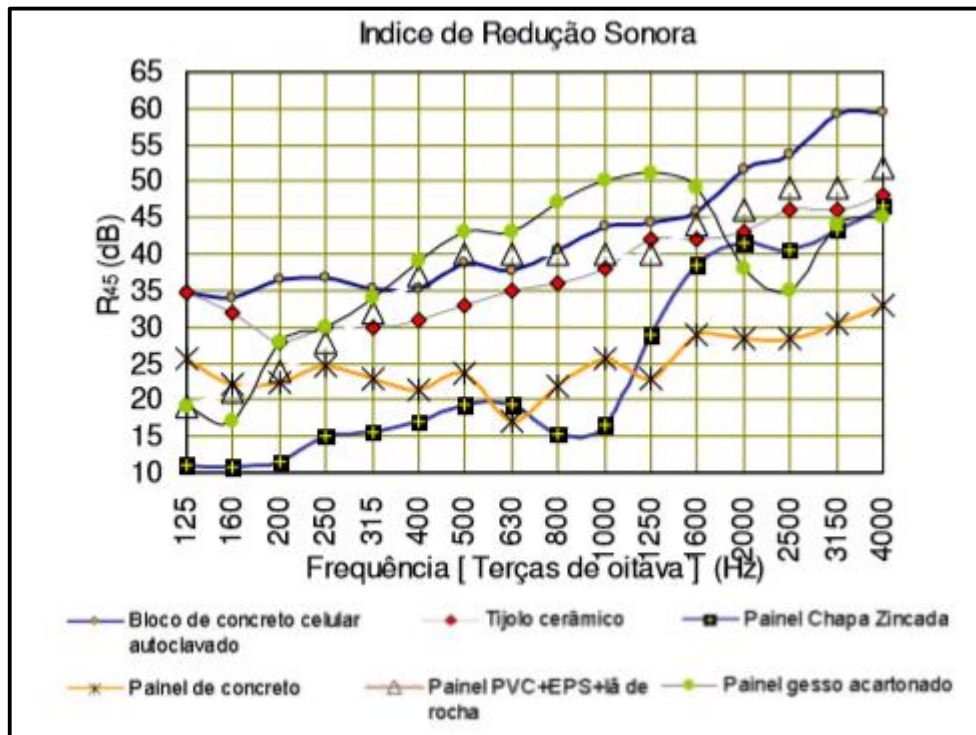
Tabela 6 - Faixas de frequência perceptíveis para o ser humano

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: CARVALHO, 2006

Garcia (2004) determinou os índices de redução sonora do concreto celular autoclavado e ainda de outros materiais em várias frequências. A Figura 5 ilustra um gráfico comparativo entre os materiais

Figura 5 - Relação do índice de redução sonora com a frequência



Fonte: GARCIA, 2004

A Tabela 7 apresenta valores de isolamento acústico de alguns materiais utilizados na construção civil segundo a NBR 12179 (ABNT, 1992).

Tabela 7 - Isolamento acústico de materiais da 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 maciço (espessura de 30cm)	53.00 dB
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 40cm)	55.00 dB
Alvenaria de tijolo furado (espessura de 25cm)	10.00 dB
Chapa de fibra de madeira tipo "Soft-board" (espessura de 12mm)	18.00 dB
Chapas ocas de gesso (espessura de 10cm)	24.00 dB
Concreto - Lajes entre pavimentos	68.00 dB
Vidro janela (espessura de 2,00 a 4,00 mm)	20 a 24 dB

Fonte: Adaptado da NBR 12179 (ABNT, 1992)

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Introdução

Com a finalidade de atender os objetivos descritos no trabalho serão analisados três traços de concreto celular com adição de casca de arroz e um traço utilizado como parâmetro de referência sem adição de casca de arroz.

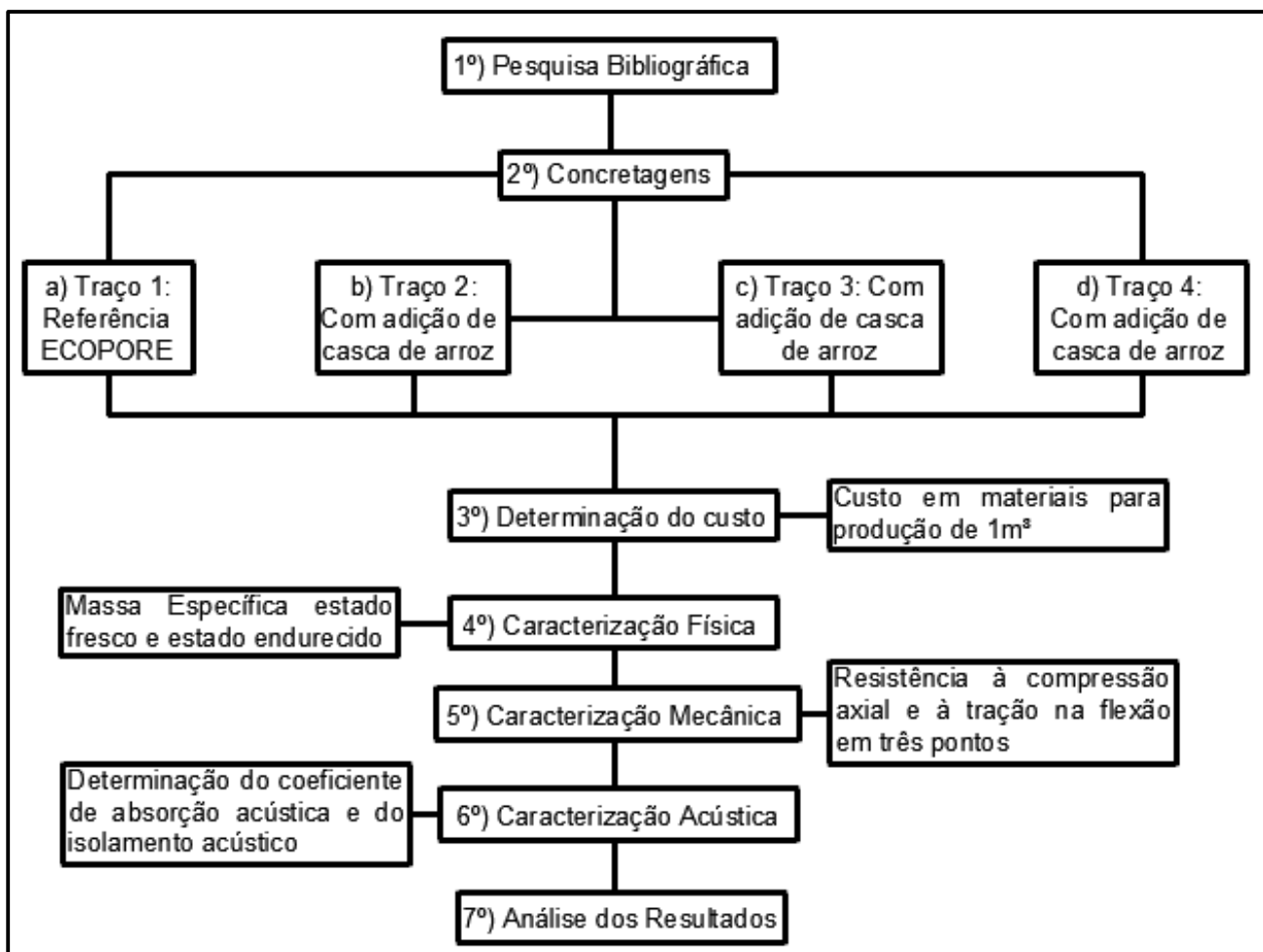
As idades para caracterização física foram:

- Durante a moldagem dos corpos de prova (CP's) para a densidade no estado fresco do concreto;
- 7 e 28 dias para a medida da densidade no estado endurecido do concreto.

As resistências de compressão axial e tração na flexão em três pontos foram avaliadas aos sete e aos vinte e oito dias.

A Figura 6 ilustra um organograma simplificado do que foi realizado na pesquisa.

Figura 6 - Organograma simplificado sobre a pesquisa realizada



3.2 Materiais

3.2.1 Cimento

Embora a empresa fornecedora dos equipamentos e do aditivo utilizado na pesquisa aconselhe a utilização do cimento Portland CP V para que a cura seja rápida, a sua pouca disponibilidade na cidade de Alegrete- RS, conduziu ao desenvolvimento do concreto utilizando o CP IV – 32. Portanto, o cimento Portland utilizado foi o CP IV - 32 da marca CIMPOR, uma vez que é o cimento com boa facilidade de aquisição na região do pampa gaúcho.

3.2.2 Casca de arroz

A casca de arroz utilizada na pesquisa foi doada pela Cooperativa Agroindustrial de Alegrete LTDA (CAAL).

O material foi armazenado em ambiente seco e fechado. Não houve tratamento químico ou físico da casca de arroz, sendo a mesma utilizada de forma totalmente natural. A Figura 7 mostra uma imagem da casca utilizada.

Figura 7 - Casca de arroz utilizada



Fonte: Elaboração própria

3.2.3 Espuma

O aditivo utilizado na pesquisa é 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 a massa de 40 kg de água e então adicionar 1 kg de espuma, sem agitar os recipientes. Esta proporção água/aditivo gera aproximadamente 550 litros de espuma com uma densidade de 75 g/l.

Com os materiais misturados o recipiente é levado a uma bancada que fica em um nível superior ao incorporador de espuma ECOFOAMER-100W-10BP, o qual está ilustrado na Figura 8, já que o mesmo possui para bombeamento do líquido uma bomba hidráulica de recalque (A).

Após instalado o equipamento, utilizando equipamentos de proteção individual (EPIs) como jaleco, óculos de proteção e protetor auricular, é acionado o compressor de ar (B). Quando o marcador de pressão (D) apontar mais de 80 libras, um operador deve abrir o registro de liberação do líquido bombeado pela bomba (F) e em seguida o registro responsável pela liberação da pressão (C), que será liberada ao duto que passa o composto líquido (H), formando a espuma. O próximo passo é ligar a bomba (A). Uma pessoa segura a mangueira de saída da espuma, a qual é encaixada no duto de alumínio (I), pois a mesma sofrerá forte agitação devido a pressão.

Figura 8 - Gerador de espuma



Fonte: Manual do Usuário – Gerador de Espuma ECOFOAMER-100W-10BP

- A. Bomba de recalque;
- B. Compressor de ar;
- C. Registro de liberação do ar já comprimido;
- D. Marcador de pressão;
- E. Registro utilizado para limpeza: ao ser aberto o líquido não passa pela bomba;
- F. Registro de liberação do líquido, seja pela bomba ou não;
- G. Caixa de disjuntores, o da direita, responsável por ligar o compressor e o da esquerda, responsável por ligar a bomba;
- H. União do ar liberado e do líquido;
- I. Duto de saída da espuma.

Não é possível apontar uma densidade exata para o material, já que a mesma é muito instável e começa a perder água no instante em que é criada. Como o fabricante aconselha a utilizar uma densidade de pelo menos 75 g/l, todas as misturas foram feitas com densidade superior a esta. A espuma gerada é inicialmente homogênea, conforme se observa na Figura 9.

Figura 9 – Geração da espuma



Fonte: Elaboração própria

3.3 Métodos experimentais

3.3.1 Definição dos traços

A dosagem de referência foi obtida do catálogo fornecido pela empresa ECOPORE, indústria que vende produtos no ramo do concreto leve, tais como: incorporadores de ar, aditivos geradores de espuma além de produzir diversos tipos de concreto celular. Assim, Traço 1 produzido nesse trabalho foi o mesmo utilizado pela empresa para produção de concreto com massa específica de 600 kg/m^3 e resistência a compressão de $4,00 \text{ MPa}$ aos 28 dias. Considerado na pesquisa como o traço referência, foi a partir dele que se iniciou a adição de casca de arroz e realizada a alteração no volume de espuma ao concreto para a criação dos compósitos.

Visando obter uma resistência à compressão axial igual ou superior a $1,50 \text{ MPa}$, resistência mínima para blocos cerâmicos de vedação, segundo a NBR 15270-1 (ABNT, 2005), e massa específica aproximada de 600 kg/m^3 , foram executadas mudanças no traço até adequar os compósitos a essas características.

Os traços são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Traços massa combinado com volume

Materiais	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Cimento (kg)	1.00	1.00	1.00	1.00
Casca de Arroz (l)	0.00	0.35	0.70	0.35
Água na mistura (l)	0.40	0.40	0.40	0.40
Espuma (l)	1.40	0.70	0.70	2.80
Água na Espuma (l)	0.10	0.10	0.10	0.10
Fator a/c	0.50	0.50	0.50	0.50

Fonte: Elaboração própria

A partir do Traço 1 foram, de forma experimental, desenvolvidas as outras três dosagens. O volume de casca de arroz e o volume de espuma foram sendo alterados para que a massa específica do material ficasse o mais próximo possível de 600 kg/m^3 .

Para a obtenção do Traço 2, realizou-se a substituição de 50% do volume da espuma. Em substituição ao volume de espuma foi adicionado 25 % em volume de casca de arroz e 25 % em volume de cimento Portland CP IV.

Para obtenção do Traço 3, houve substituição de 50% do volume da espuma, sendo que foi adicionado o mesmo volume de casca de arroz.

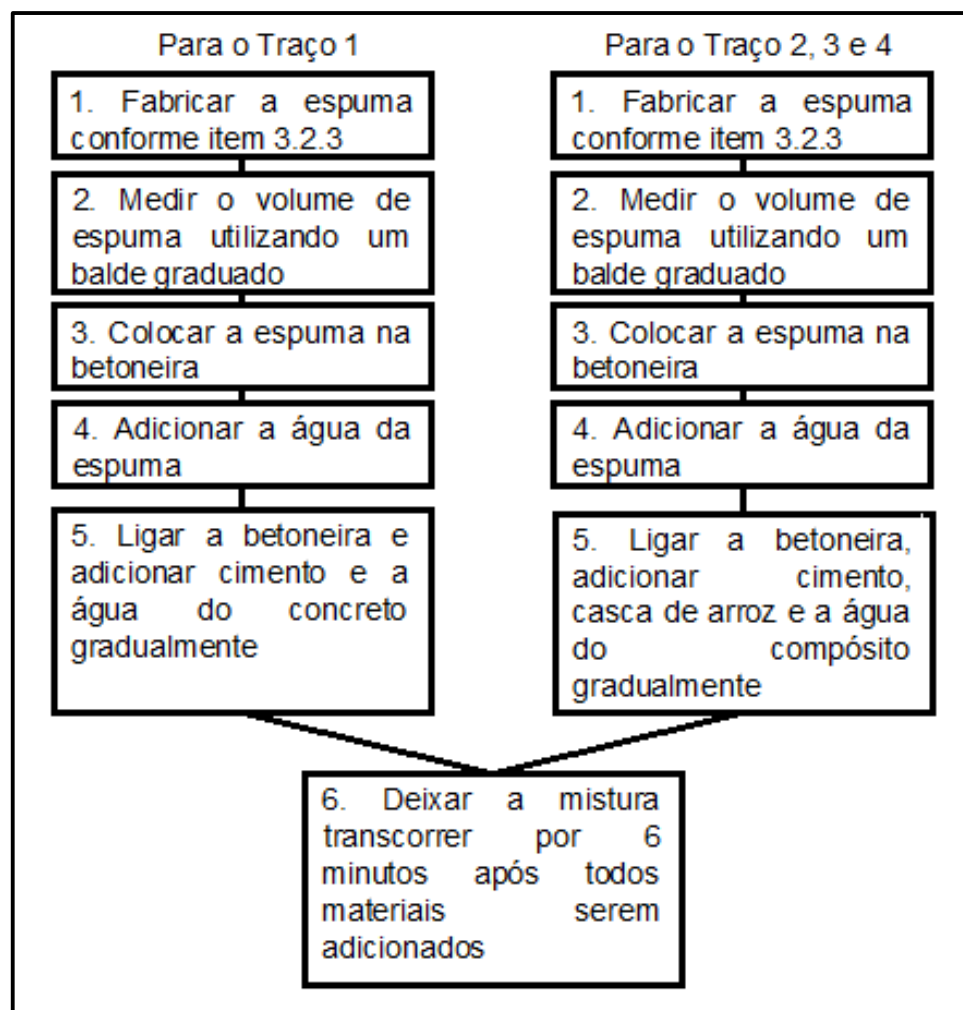
Com os resultados de resistência à compressão e as massas específicas obtidas, foi determinado o Traço 4, para que atingisse a menor massa específica possível conseguindo-se a resistência mínima de 1,50 MPa.

A partir das dosagens, foi estudado o custo dos materiais para produção de um metro cúbico de cada compósito.

3.3.2 Método de mistura

O concreto celular de cimento puro é composto basicamente por cimento, água e espuma. A metodologia de mistura seguiu os passos descritos e ilustrados nas Figuras 10 e 11 respectivamente.

Figura 10 - Organograma de mistura para concretagem



Fonte: Elaboração própria

Figura 11 - Imagens dos procedimentos de mistura



Fonte: Elaboração própria

A Figura 11 mostra os procedimentos de mistura em ordem de execução através de imagens. As Figuras “11A, 11B, 11C, 11D, 11F, 11G e 11H”, são referentes ao processo de mistura do Traço 1. Os Traços 2, 3 e 4 são referenciados por todas as imagens incluindo a adição da casca de arroz, representada na Figura “11E”. A Figura

“11A” ilustra os materiais já pesados e organizados sobre a bancada, a “11B” ilustra a fabricação da espuma incorporadora de ar. As Figuras “11C” e “11D” representam a adição de espuma e a água na espuma respectivamente, utilizando um balde graduado. A imagem “11E” mostra a adição da casca de arroz, no entanto, ela é adicionada de forma intercalada com o cimento e a água referente a mistura. A imagem “11F” apresenta a adição do cimento. As imagens “11G” e “11H” ilustram o concreto celular no estado fresco após o término da mistura.

3.3.3 Moldagem dos corpos de prova

Na preparação dos corpos de prova, eles foram vedados e em seu interior foi passado óleo de cozinha, para que desta forma no momento de desmoldar não ocorresse adesão entre o concreto e a forma. A Figura 12 ilustra esse procedimento:

Figura 12 - Preparação dos moldes



Fonte: Elaboração própria

Após a mistura do concreto e a determinação da massa específica no estado fresco foram moldados 24 corpos de prova prismáticos, de 16 cm de comprimento e 4 cm de altura e 4 cm base, além 32 corpos de prova cilíndricos de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A Figura 13 ilustra os moldes prontos para receberem o lançamento do concreto.

Figura 13 - Corpos de prova aptos a receber o concreto



Fonte: Elaboração própria

Para o lançamento do concreto nos moldes foi utilizado um recipiente que recebia o material da betoneira, em seguida o concreto era derramado em cada corpo de prova (CP) até que atingisse o nível máximo do molde. Feitas as moldagens os CP's foram deixados a temperatura ambiente até que houvesse resistência suficiente para o desmolde. A cura do concreto seguiu, após o desmolde, em temperatura ambiente.

3.3.4 Massa específica fresca e massa específica seca

A determinação da massa específica no estado fresco dos compósitos foi realizada logo após a finalização da mistura. A massa específica no estado endurecido foi avaliada aos 7 dias e aos 28 dias de cura.

O procedimento utilizado para determinação da massa específica no estado fresco foi baseado na NBR 12644 (ABNT,1992), consistindo em colocar o concreto aerado em um balde graduado e pesá-lo. Utilizando a Equação 2 foi calculada a densidade.

Para determinação da densidade no estado endurecido foi utilizado um paquímetro para medir o diâmetro e a altura exata das amostras e uma balança para determinação da massa. Para o cálculo da densidade no estado endurecido também foi utilizada a Equação 2.

$$d = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Sendo:

d = Densidade do material em g/cm³;

m = Massa do material em gramas;

V = Volume do material em cm³.

A Figura 14 e a Figura 15 mostram a determinação da massa do concreto no estado fresco e no estado endurecido respectivamente.

Figura 14 - Determinação da massa do concreto no estado fresco



Fonte: Elaboração própria

Figura 15 - Determinação da massa do concreto no estado endurecido



Fonte: Elaboração própria

3.3.5 Ensaio de resistência à compressão axial

Antes de iniciar os ensaios mecânicos de compressão todos os CPs foram passados em uma retifica (Figura 16) para regularização das superfícies.

Figura 16 - Retifica utilizada



Fonte: Elaboração própria

Cada mistura contou com pelo menos 3 amostras representativas, por ensaio, nas idades de 7 e 28 dias. A Figura 17 mostra um corpo de prova (CP) preparado para compressão axial na máquina de ensaio universal da marca EMIC com capacidade de 200 kN.

Figura 17 - Amostra preparada para ser ensaiada



Fonte: Elaboração própria

3.3.6 Ensaio de resistência à tração na flexão em 3 pontos

O ensaio de flexão foi baseado na NBR 12142 (ABNT, 2010) e a máquina utilizada para o ensaio foi a SHIMADZU AGS-X 5 KN de precisão de 0,01 N. A Figura 18 mostra a configuração do ensaio.

Figura 18 - Amostra em ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Elaboração própria

3.3.7 Ensaio de absorção e isolamento acústico

Pelo fato de não terem sido encontradas normas de origem brasileira, que determinam os procedimentos de ensaio para determinação da capacidade de isolamento e absorção acústica, o procedimento adotado foi baseado na ISO 10534-1 (1996).

Para cada traço foram utilizadas 6 amostras, sendo três para frequência de 50 Hz a 1600 Hz e três para frequência de 500 Hz a 6300 Hz. As amostras grandes (10 cm de diâmetro por 2 cm de espessura) foram cortadas de corpos de prova de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro (conforme imagem A da Fig. 19). Já as amostras pequenas (2,9 cm de diâmetro por 2 cm de espessura) foram retiradas das amostras grandes utilizando serra copo (imagem C da Fig. 19). As amostras prontas para o ensaio são ilustradas nas imagens B e D da Figura 19.

As amostras das extremidades superiores e inferiores dos corpos de prova foram descartadas, a fim de evitar variações devido diferenças físicas do concreto nas amostras. Após cortar as amostras na espessura de 2 cm, elas seguiram mantidas em temperatura ambiente até a realização dos ensaios.

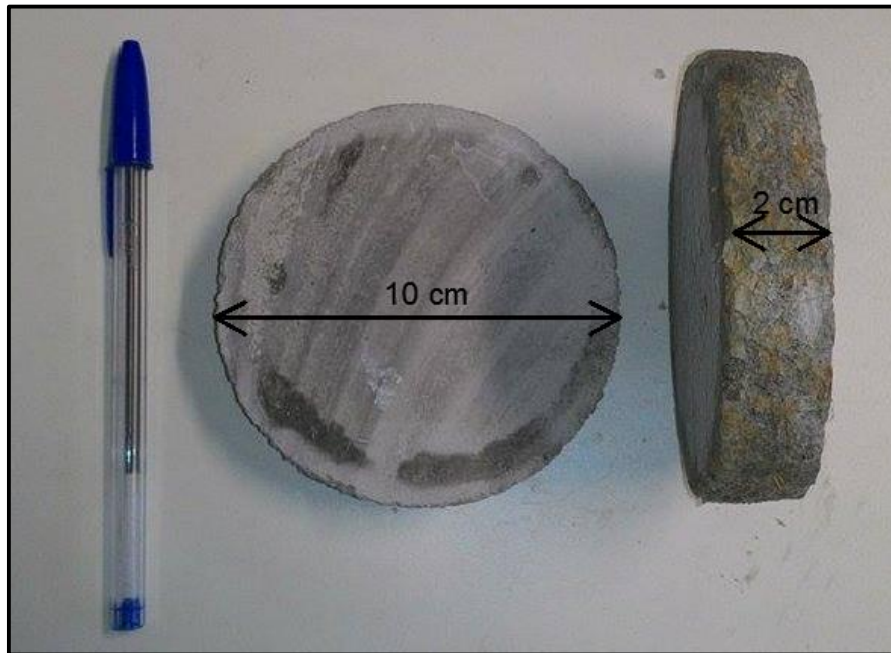
Figura 19 - Preparação das amostras



Fonte: Elaboração própria

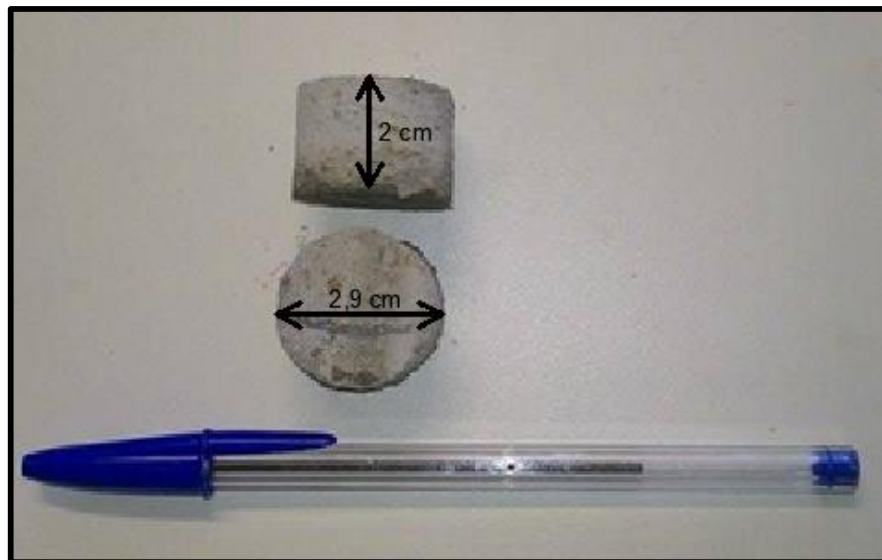
Como a intenção é desenvolver com estes compósitos painéis para revestimento de alvenaria, forros e lajes, todas as amostras feitas possuem 2 cm de espessura. Já os diâmetros das amostras é justificado pelas características do equipamento utilizado, independentemente de qualquer embasamento, além das próprias especificações da máquina.

Figura 20 - Amostras utilizadas para ensaio de baixa frequência



Fonte: Elaboração própria

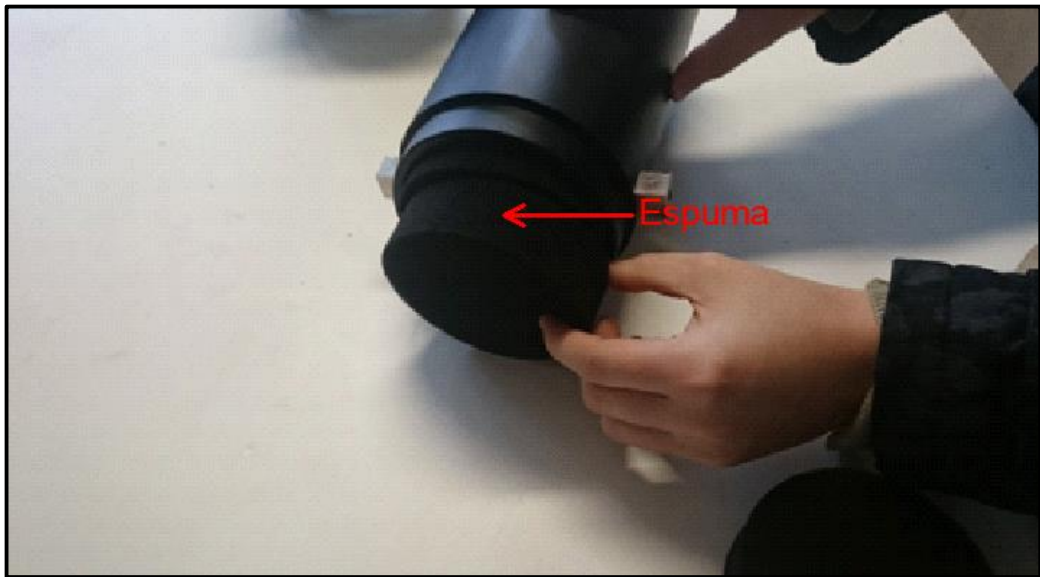
Figura 21 - Amostras utilizadas para ensaio de alta frequência



Fonte: Elaboração própria

Para realização dos ensaios de isolamento acústico são utilizadas espumas com alta capacidade de absorver som, este material é parte do equipamento e foi fornecido pela empresa fabricante do tubo de impedância. A Figura 22 ilustra o encaixe de uma espuma no tubo. Vale salientar que foram utilizadas 5 espumas para cada ensaio.

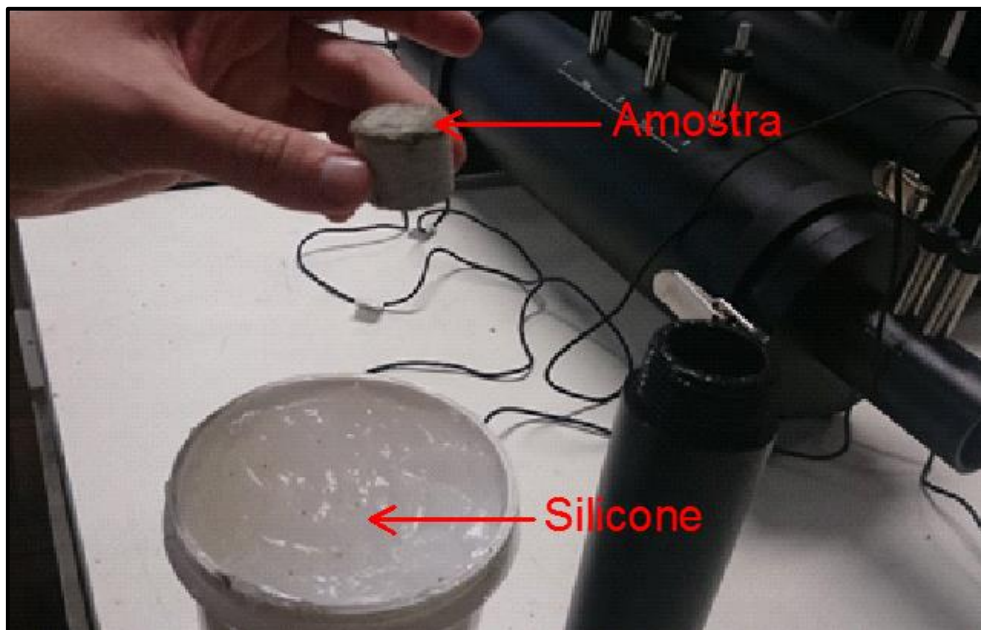
Figura 22 – Encaixe das espumas para ensaio de isolamento acústico



Fonte: Elaboração própria

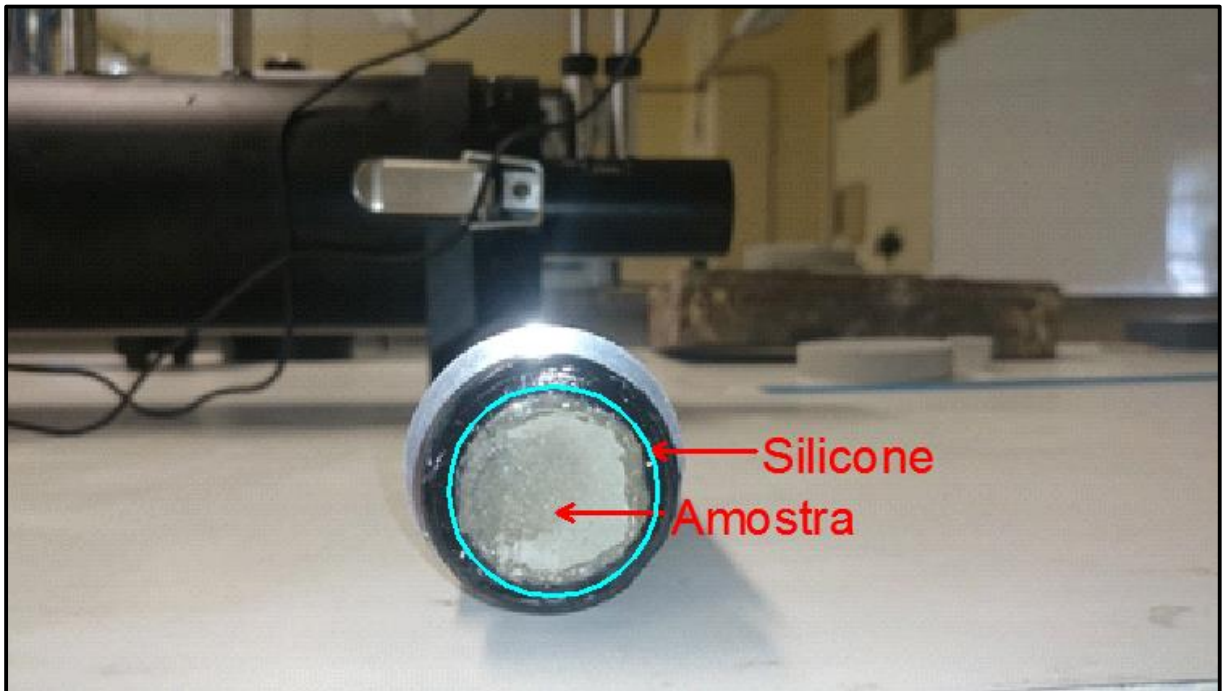
As Figuras 23 e 24 ilustram respectivamente o silicone utilizado para vedação, a amostra antes de ser encaixada no tubo e a amostra já encaixada e com a vedação feita.

Figura 23 – Preparação pra encaixe da amostra no tubo de impedância com vedação em silicone



Fonte: Elaboração própria

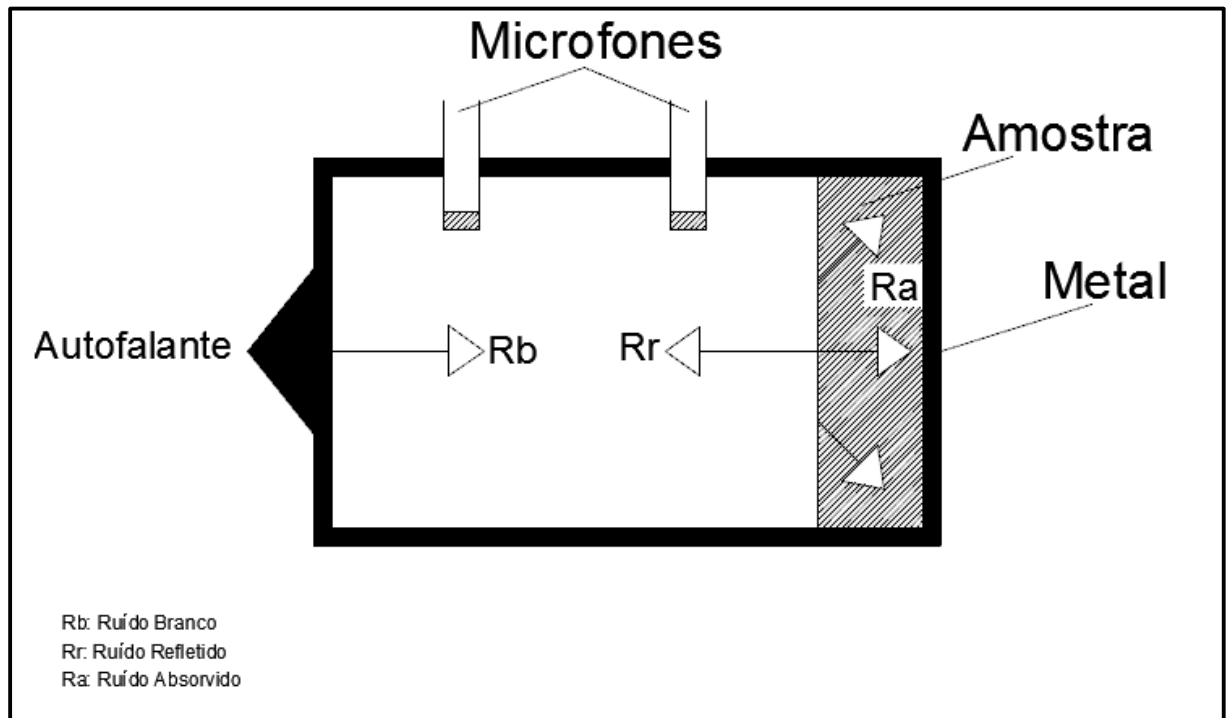
Figura 24 – Amostra encaixada no tubo de impedância



Fonte: Elaboração própria

Para realização do ensaio o equipamento 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 que é refletido pelo material também é lido pelos microfones e a partir desta leitura o software calcula o coeficiente de absorção do material. A vedação é importante, pois caso tenha algum vazio entre a amostra e o tubo, as ondas sonoras serão refletidas de maneira muito intensa porque irão colidir diretamente com a estrutura metálica. A Figura 25 ilustra um esquema do ensaio de absorção acústica.

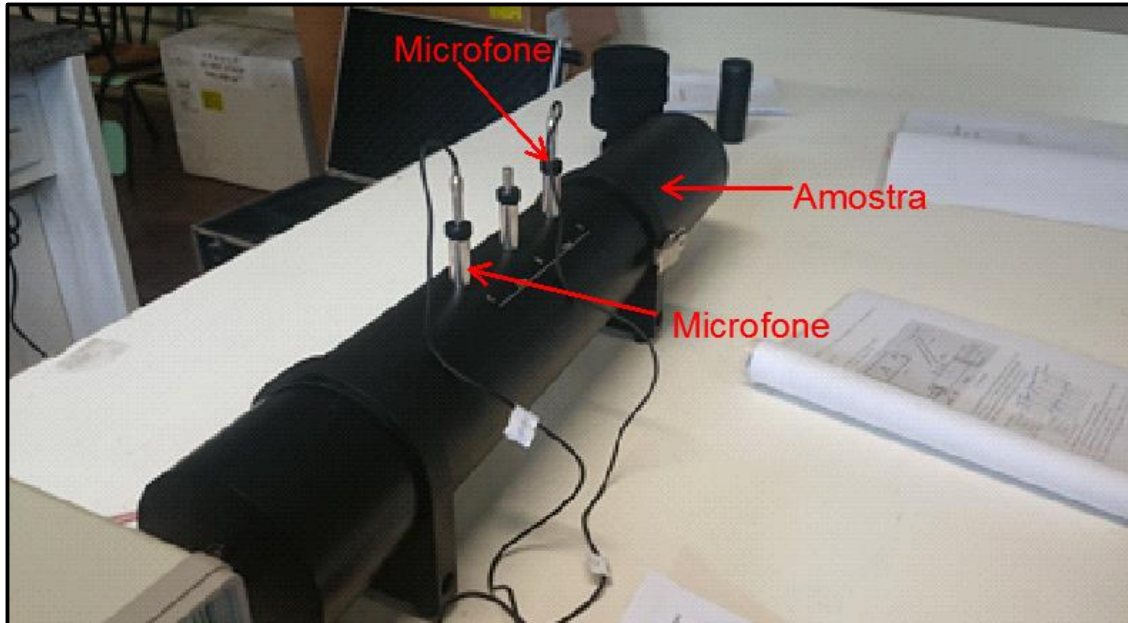
Figura 25 - Esquema do ensaio de absorção acústica



Fonte: Elaboração própria

Para os ensaios foi utilizado o equipamento AWA6290T. A Fig. 26 ilustra o equipamento pronto para o ensaio de absorção acústica de uma amostra circular com 10 cm de diâmetro e 2 cm de espessura. Esta amostra é encaixada no tubo de impedância e os espaços entre o tubo e a amostra são vedados com silicone.

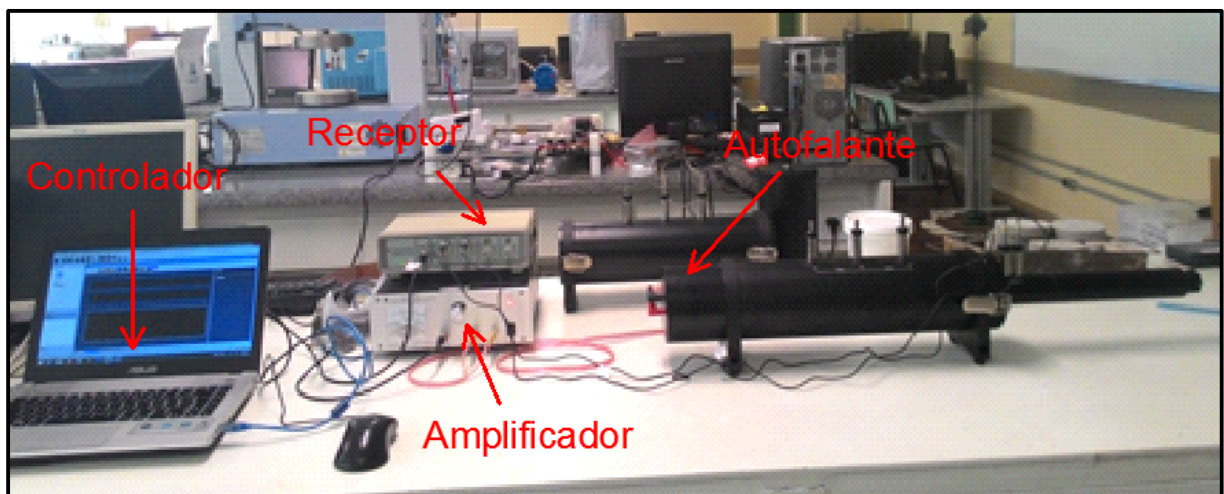
Figura 26 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção com frequência de 50 Hz a 1600 Hz



Fonte: Elaboração própria

A Figura 27 mostra o equipamento completo com o ensaio de absorção acústica em andamento, são evidenciados na imagem o controlador, o receptor, o amplificador e o autofalante.

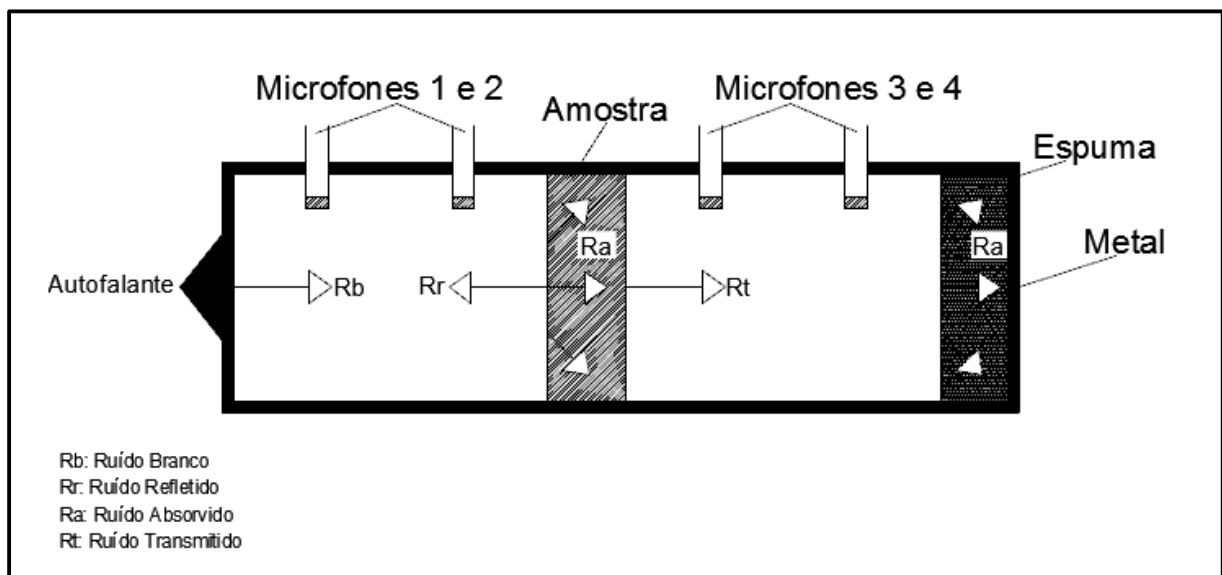
Figura 27 – Tubo de impedância preparado para ensaio de absorção com frequência entre 50 Hz e 1600 Hz



Fonte: Elaboração própria

A montagem do tubo de impedância para ensaio de isolamento é diferente da absorção acústica, pois a amostra é colocada entre 4 microfones. A emissão do ruído é feita da mesma forma que no ensaio de absorção acústica, com ruído branco, amplificador e autofalante. A Figura 28 ilustra a estrutura interna do equipamento para ensaio de isolamento acústico. A principal diferença do ensaio de isolamento é a leitura 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 passante pelo obstáculo é lido pelos dois últimos microfones (Microfones 3 e 4). No final do tubo, como mostrado nas Figuras 28 e 29, 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.

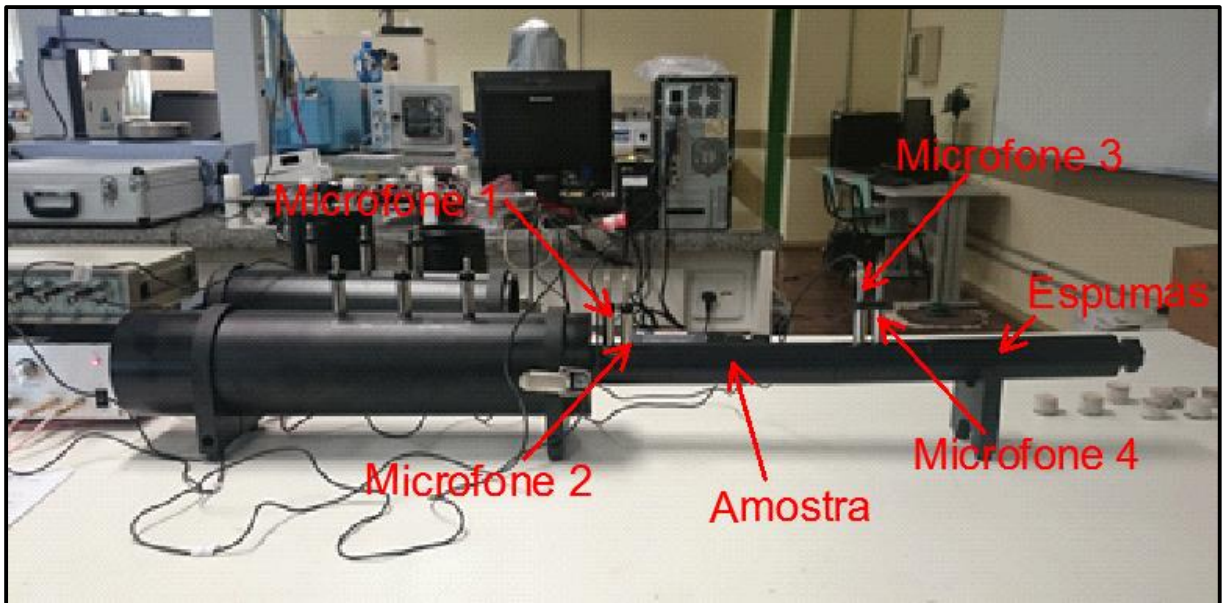
Figura 28 - Esquema do ensaio de isolamento acústico



Fonte: Elaboração própria

A Figura 29 ilustra o equipamento montado para realização dos ensaios de isolamento acústico.

Figura 29 – Tubo de impedância pronto para ensaio de isolamento com frequência de 500 Hz a 6300 Hz



Fonte: Elaboração própria

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Estudo dos custos dos materiais de cada compósito

A Tabela 9 apresenta a quantidade de cada material necessária para produção de 1 m³ de concreto celular. Salienta-se que não foi contabilizada a quantidade de água.

Tabela 9 - Material utilizado para produção de 1 m³ de concreto celular

Traço	Volume	Quantidade		
		Cimento	Espuma	Casca de Arroz
1	1 m ³	443 kg	620 l	0.00 l
2	1 m ³	524.4 kg	367 l	183.53 l
3	1 m ³	443 kg	310 l	310.15 l
4	1 m ³	250.00 kg	700 l	87.50 l

Fonte: Elaboração própria

Os valores de custo dos compósitos desenvolvidos na pesquisa constam na Tabela 10. Foi considerado a utilização de cimento Portland CP IV saco de 50 kg com valor unitário referenciado no SINAPI de julho de 2015. Para a espuma foi considerado que cada litro de aditivo incorporador de ar rende 550 litros de espuma (dados fornecidos pelo fabricante). O preço do aditivo foi referenciado no SINAPI de julho de 2015, entretanto, o valor muito abaixo do mercado, condicionou a tomada de preço junto ao fabricante do aditivo utilizado. A casca de arroz não possui valor atribuído no SINAPI, e em pesquisa feita com arroseiros locais, verificou-se que o único custo para adquiri-la é o transporte, ficando com valor de menos de um centavo por kg, portanto, seu valor não foi computado. É importante ressaltar que os valores consideram apenas o preço da matéria-prima para produção.

Tabela 10 – Custo para produção de 1 m³ de concreto celular

Traço	Volume	Custo			
		Cimento	Espuma	Casca de Arroz	Total
1	1 m ³	R\$ 213,03	R\$ 24,81	R\$ 0,00	R\$ 237,84
2	1 m ³	R\$ 252,12	R\$ 14,68	R\$ 0,00	R\$ 266,81
3	1 m ³	R\$ 213,03	R\$ 12,41	R\$ 0,00	R\$ 225,43
4	1 m ³	R\$ 120,20	R\$ 28,00	R\$ 0,00	R\$ 148,20

Fonte: Elaboração própria

É comprovado nestes valores que a adição da casca de arroz reduziu o valor agregado dos Traços 3 e 4. O Traço 4 possui um valor de 57,5 % do traço referência.

4.2 Determinação da massa específica no estado fresco e no estado endurecido dos compósitos

A massa específica no estado fresco é de grande importância para que seja possível reproduzir os materiais com as mesmas características dos estudados neste trabalho. Portanto, para verificar se o compósito reproduzido está adequado com os desenvolvidos na pesquisa antes de realizar os ensaios no estado endurecido, é necessário comparar as densidades no estado fresco. Caso o valor encontrado seja diferente das densidades que constam na Tabela 11, será necessário fazer pequenas correções adicionando cimento, caso a massa específica esteja abaixo dos valores fixados na Tabela 11, ou espuma, caso a densidade esteja acima do estipulado.

Tabela 11 - Massa específica real no estado fresco

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Massa específica no estado fresco	855 kg/m ³	1304 kg/m ³	1390 kg/m ³	740 kg/m ³

Fonte: Elaboração própria

Aos sete e aos vinte e oito dias de cura foram medidas as massas específicas no estado endurecido. Para este procedimento foram caracterizadas três amostras de cada compósito e então calculadas as médias e feito o tratamento estatístico destes dados conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Médias das massas específicas no estado endurecido

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Massa específica - 7 dias (kg/m³)	877,82	1327,95	1434,41	749,95
Desvio Padrão (kg/m³)	11,48	6,30	12,56	31,04
Coefficiente de Variação (%)	1,31	0,47	0,88	4,14
Massa específica - 28 dias (kg/m³)	788,81	1244,92	1278,72	729,36
Desvio Padrão (kg/m³)	19,60	22,51	22,05	66,82
Coefficiente de Variação (%)	2,48	1,81	1,72	9,16
Variação 7 - 28 dias	-0,10	-0,06	-0,11	-0,03

Fonte: Elaboração própria

O Traço Referência (Traço 1) obteve 788.81 Kg/m³ aos vinte e oito dias contrastando com os 600 kg/m³ indicado pela ECOPORE, possivelmente porque o material desenvolvido na pesquisa passou por cura a temperatura ambiente, enquanto a empresa fornecedora dos valores indicou uso de estufa a 100° C por 24 horas antes do ensaio.

Comparando as três massas específicas medidas é possível afirmar que durante os primeiros dias de cura a retração é acentuada, o que implica no aumento de peso entre a massa específica no estado fresco para a massa específica no estado endurecido aos sete dias. Esse aumento dá-se pela diminuição de volume (causado pela retração). Já a análise seguinte, a mediação da massa específica no estado endurecido aos vinte e oito dias, mostrou que a retração finda após a primeira semana de cura e que tanto o concreto referência como os compósitos perdem material, possivelmente água o que possibilita uma variação negativa, bem como ilustrado na Tabela 12.

A Tabela 13 apresenta a razão entre a massa específica no estado fresco e a massa específica no estado endurecido de cada traço, sendo que quanto mais próximo de um o resultado menor a retração.

Tabela 13 - Razão entre a massa específica no estado fresco e a massa específica no estado endurecido aos sete dias

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Razão	0,974	0,982	0,969	0,987

Fonte: Elaboração própria

Com exceção do Traço 3, os outros dois compósitos obtiveram menor retração que o concreto celular utilizado como referência. O que indica que até certo volume a casca de arroz reduz de forma eficiente a retração por secagem.

4.3 Ensaio de resistência à compressão axial

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial aos sete e aos vinte e oito dias e o tratamento estatístico destes dados constam na Tabela 14. Estes valores foram obtidos a partir da média de três corpos de provas para cada traço. Ressaltando que os CP's usados nestes ensaios foram os mesmos utilizados para calcular as massas específicas no estado endurecido da Tabela 12.

Tabela 14 - Resistências médias de compressão axial

-	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Fc - 7 dias (MPa)	1,99	5,49	6,02	1,11
Desvio Padrão (MPa)	0,22	0,42	0,37	0,10
C.V. (%)	11,18	7,69	6,11	8,98
Fc - 28 dias (MPa)	3,84	7,84	8,21	1,82
Desvio Padrão (MPa)	0,07	0,17	0,23	0,15
C.V. (%)	1,91	2,19	2,78	8,24
Variação do Fc (%)	0,94	0,43	0,36	0,64

Fonte: Elaboração própria

Como o concreto celular com adição de casca de arroz não foi encontrado na bibliografia o único traço passível de comparação é o Traço 1. A empresa fornecedora do traço referência apontou uma resistência aproximada de 4,00 MPa aos vinte e oito dias utilizando CP V ARI, o mesmo traço desenvolvido na pesquisa obteve uma resistência média de compressão de 3,84 MPa aos 28 dias.

Além das vantagens da utilização da casca de arroz destacadas no item 4.1 e no item 4.2, é possível observar a melhora que a mesma fornece ao compósito na resistência à compressão. O Traço 3 é o compósito com maior resistência, maior volume de casca de arroz e mesmo consumo de cimento em relação ao Traço 1. Em relação ao aumento da resistência dos 7 dias para os 28 dias a Tabela 14 mostra a percentagem do acréscimo da resistência, através da variação da resistência à compressão axial (Fc).

Os resultados de forma completa com os valores de resistência a compressão axial de cada corpo de prova aos sete e aos vinte e oito dias podem ser visualizados no Apêndice 1.

4.4 Ensaio de resistência à tração na flexão em três pontos

Os resultados dos ensaios de flexão em três pontos aos sete e aos vinte e oito dias constam na Tabela 15. Os valores de resistência à tração na flexão em três pontos são obtidos através das médias de três corpos de prova para cada compósito. O desvio padrão e o coeficiente de variação destes resultados também constam na Tabela 15.

Tabela 15 – Média da resistência à tração na flexão aos sete e aos vinte e oito dias

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Ft - 7 dias (MPa)	0.71	1.87	2.17	0.86
Desvio Padrão (MPa)	0.03	0.10	0.04	0.11
C.V. (%)	3.66	5.59	1.80	12.63
Ft - 28 dias (MPa)	0.90	2.47	2.88	1.24
Desvio Padrão (MPa)	0.01	0.12	0.09	0.06
C.V. (%)	1.07	4.83	3.13	4.87
Varição do Ft (%)	0.27	0.32	0.32	0.44

Fonte: Elaboração própria

Novamente o único traço passível de comparação com a bibliografia é o Traço 1. Comparando os valores mostrados na Tabela 15 com os valores da Tabela 3, o Traço 1 obteve uma resistência aproximadamente 2,35 vezes maior que o concreto celular estudado por Melo (2009).

Na resistência à tração na flexão, a adição da casca de arroz mostra mais uma vantagem em relação ao concreto sem adição da mesma. Se forem comparados os valores de resistência à compressão axial do Traço 1 e do Traço 4, observa-se que o Traço 1 tem melhor desempenho. Já na resistência a tração o Traço 4 possui uma resistência maior que do Traço 1, mesmo tendo menor consumo de cimento, menor densidade e menor custo. Em relação ao aumento da resistência dos 7 dias para os 28 dias a Tabela 15 mostra a percentagem que houve o acréscimo de resistência, através da variação da resistência à tração na flexão em três pontos (Ft).

Os resultados de forma completa podem ser visualizados no Apêndice 2.

4.5 Relação entre massa específica e resistência mecânica

Após análise das massas específicas e das resistências de cada compósito foram feitas relações entre estes valores. A Tabela 16 correlaciona as três massas específicas medidas na pesquisa.

Tabela 16 – Média das massas específicas dos traços

Traço	Massa Específica (kg/m ³)		
	Estado fresco	Estado Endurecido	Estado Endurecido
		7 Dias	28 Dias
1	855	877,82	788,81
2	1304	1327,95	1244,92
3	1390	1434,41	1278,72
4	740	749,95	729,36

Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 16 é observado que na comparação entre as massas específicas do estado fresco e do estado endurecido aos vinte e oito dias há uma perda de material. Isso pode ser afirmado, pois há uma redução substancial de massa entre estas idades. Aos sete dias de cura a massa de cada CP é maior que no estado fresco, o que possivelmente é causado pela retração por secagem do material.

A Tabela 17 apresenta a relação entre as massas específicas no estado endurecido e a resistência à compressão axial aos sete e aos vinte e oito dias. Estes valores foram retirados das Tabelas 12 e 14.

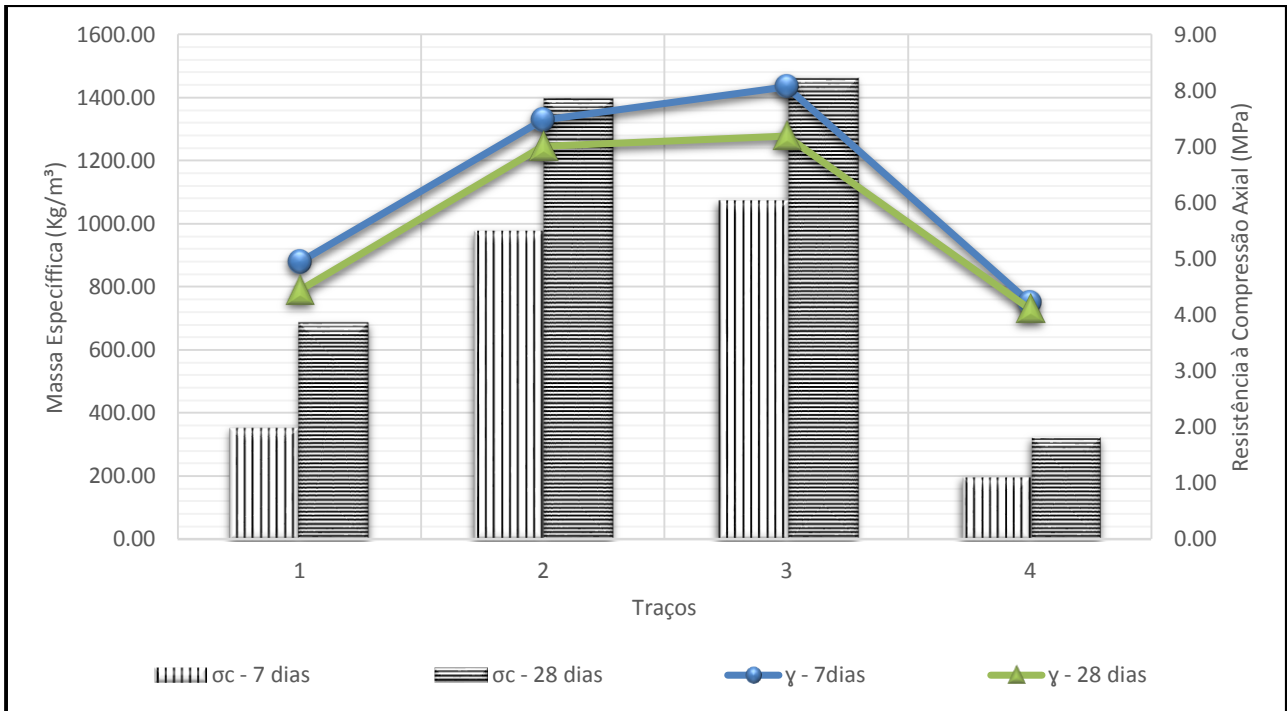
Tabela 17 - Relação entre massa específica e tensão de compressão

Traço	7 Dias		Traço	28 Dias	
	Massa Esp. (kg/m ³)	Tensão (MPa)		Massa Esp. (kg/m ³)	Tensão (MPa)
1	877,82	1,99	1	788,81	3,84
2	1327,95	5,49	2	1244,92	7,84
3	1434,41	6,02	3	1278,72	8,21
4	749,95	1,11	4	729,36	1,82

Fonte: Elaboração própria

A Figura 30 apresenta a relação entre a massa específica no estado endurecido e a resistência à compressão axial aos sete dias e aos vinte e oito dias. Sendo que a massa específica no estado endurecido é representado pela letra grega gama (γ) e a resistência a compressão axial é representada pelas letra grega sigma (σ).

Figura 30 - Relação entre a média da massa específica no estado endurecido e da resistência à compressão axial dos CPs ensaiados



Fonte: Elaboração própria

A Figura 30 mostra que a massa específica e a resistência a compressão axial possuem uma relação proporcional apenas para mesma idade, em diferentes tempo de cura a relação não é proporcional, já que aos vinte oito dias a resistência é maior do que aos sete dias e a massa específica é menor.

A Tabela 18 apresenta a relação entre as massas específicas e a resistência à tração na flexão aos sete a aos vinte e oito dias. Estes dados foram retirados das Tabelas 12 e 15.

Tabela 18 - Relação entre massa específica e tensão de tração

Traço	7 Dias		Traço	28 Dias	
	Massa Esp. (kg/m³)	Tensão (MPa)		Massa Esp. (kg/m³)	Tensão (MPa)
1	877,82	0,71	1	788,81	0,90
2	1327,95	1,87	2	1244,92	2,47
3	1434,41	2,17	3	1278,72	2,88
4	749,95	0,86	4	729,36	1,24

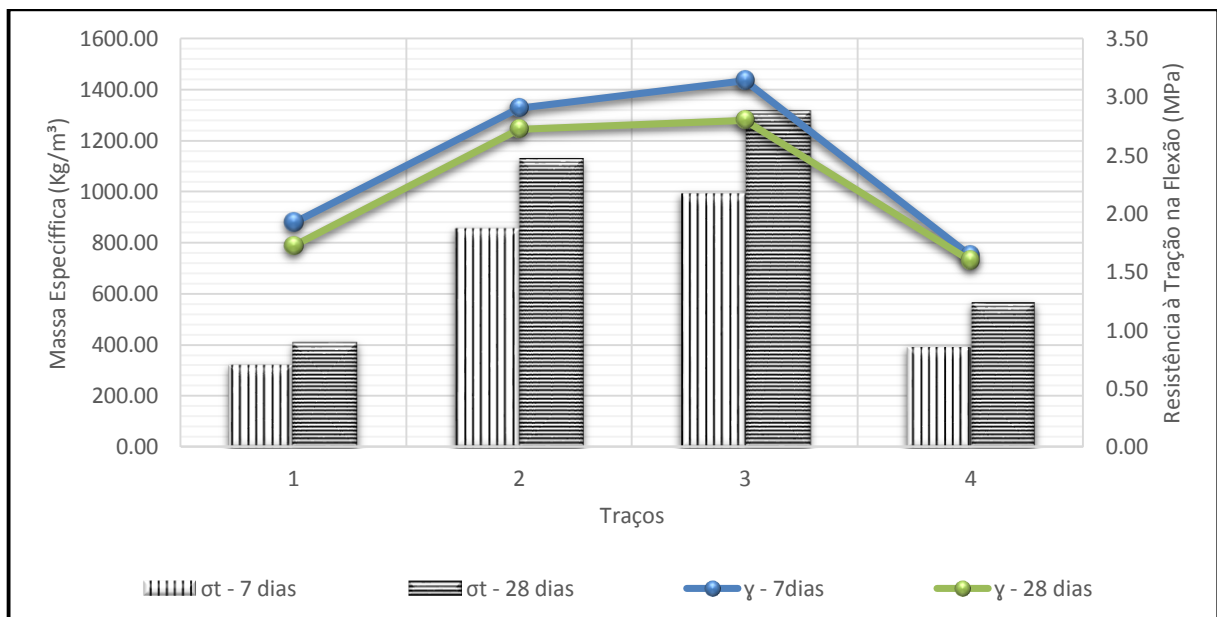
Fonte: Elaboração própria

A resistência à compressão axial foi 4,70% maior na relação entre o Traço 3 e o Traço 2 aos vinte e oito dias, já na resistência à tração na flexão em três pontos, a

diferença foi de 16,5% na mesma idade. Na comparação entre o Traço 4 e o Traço 1 surge a maior diferença, onde houve uma inversão de desempenho, constando para o Traço 4 uma resistência de tração aos sete dias maior que a resistência aos vinte e oito dias do Traço 1.

A Figura 31 ilustra a relação entre as massas específicas no estado endurecido e as resistências à tração na flexão em três pontos aos sete a aos vinte e oito dias.

Figura 31 - Relação entre a média da massa específica no estado endurecido e da resistência à tração na flexão em três pontos dos CPs ensaiados



Fonte: Elaboração própria

A Figura 31 destaca que os compósitos não podem ter a resistência à tração na flexão em três pontos diretamente relacionadas à massa específica, visto que o Traço 4 possui menor massa específica que o Traço 1 e maior resistência à tração na flexão em ambas as idades, já o Traço 3 possui maior massa específica que o Traço 2 e maior resistência à tração na flexão. A provável causa deste aumento da resistência de tração na flexão foi ocasionada pela adição da casca de arroz, visto que os compósitos com a fibra apresentaram ganho de resistência.

4.6 Ensaio de absorção acústica

Os ensaios de absorção acústica foram executados em um tubo de impedância considerando a frequência em escala logarítmica. A Tabela 19 apresenta os mesmos pontos que a Tabela 5, utilizando a frequência de 6300 Hertz. Para cada traço foram utilizadas seis amostras.

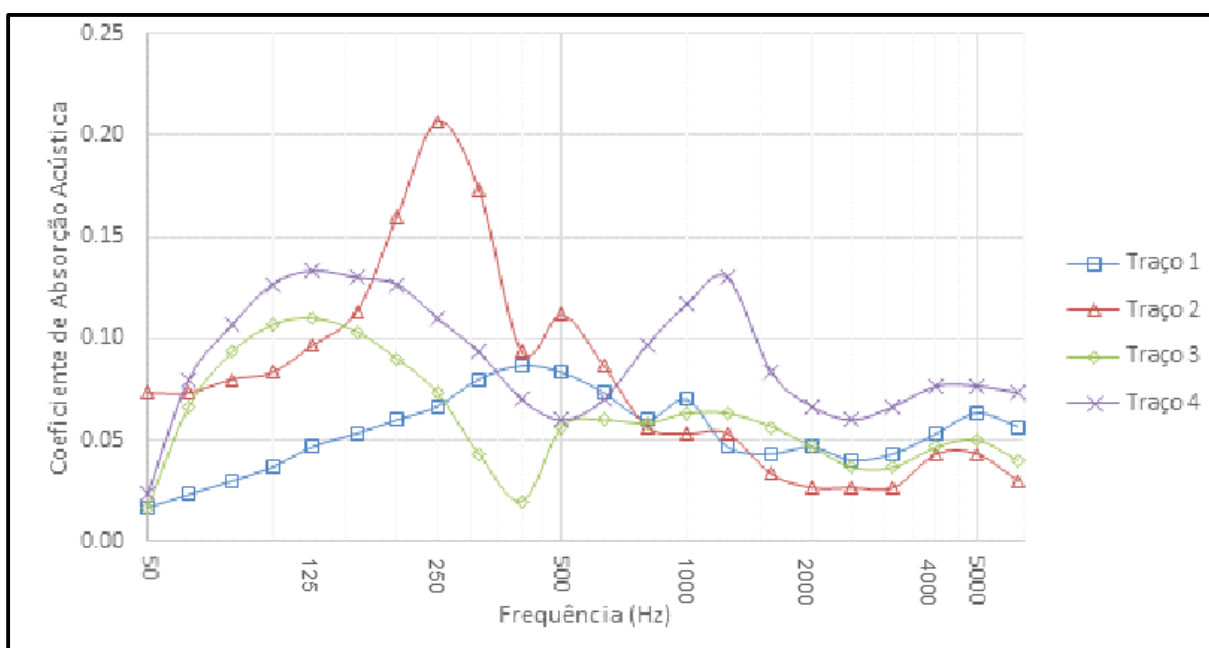
Tabela 19 - Absorção acústica dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz

Frequência(Hz)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção
125	0.05	0.10	0.11	0.13
250	0.07	0.21	0.07	0.11
500	0.08	0.11	0.06	0.06
1000	0.07	0.05	0.06	0.12
2000	0.05	0.03	0.05	0.07
4000	0.05	0.04	0.05	0.08
6300	0.06	0.03	0.04	0.07

Fonte: Elaboração própria

A Figura 32 ilustra as curvas de absorção acústica de cada compósito, no entanto, o gráfico contém mais pontos que a Tabela 19, no Apêndice 4, constam os dados de maneira completa.

Figura 32- Frequência x Absorção acústica



Fonte: Elaboração própria

Na comparação dos resultados obtidos pode-se observar que na faixa de frequência média a alta, o Traço 4 possui maior capacidade de absorver som. Isso ocorre possivelmente pelo mesmo ter a menor massa específica dos compósitos estudados e pela adição da casca de arroz. Como explicado no item 2.2.1, o material com maior índice de vazios tende a absorver mais som e transformá-lo em energia mecânica e/ou térmica.

Como a aplicação proposta dos compósitos é desenvolver materiais para revestimento e alvenarias de vedação é interessante comparar os resultados obtidos na pesquisa (Tabela 19) com os resultados referenciados na NBR 12179 (ABNT,1992) (Tabela 5 pg. 13):

- Reboco áspero, cal: O Traço 4 absorve até 433% a mais, e tem melhor desempenho em todas as faixas de frequência. Os demais traços obtiveram desempenho abaixo do reboco apenas aos 4000 Hz.
- Reboco liso: O Traço 4 obteve desempenho até 650% maior, apresentando melhor capacidade de absorção em todas as faixas. Os demais traços novamente obtiveram desempenho melhor em todas as frequências com exceção dos 4000 Hz.
- Teto pesado suspenso (de gesso): Os Traços 1, 3 e 4 tiveram desempenho melhor em todas as frequências. O Traço 2 obteve menor capacidade de absorção na frequência de 2000 Hz.
- Superfície de concreto: Análise semelhante ao reboco áspero. O desempenho deste tipo de superfície é ainda menor que o reboco.
- Madeira compensada de 3 mm, a 50 mm da parede: Nesta comparação o desempenho dos compósitos foi abaixo do compensado. No entanto, deve ser destacado que isso possivelmente ocorreu porque existe 5 cm de vão entre a parede e a madeira, sendo assim, há um local que possibilita melhor desempenho, já que o mesmo pode causar uma reverberação interna dos ruídos. Para comparação entre os materiais é mais confiável que o ensaio seja realizado na madeira compensada sem essa zona de vácuo.

4.7 Ensaio de isolamento acústico

Os ensaios de isolamento acústico foram executados em um tubo de impedância considerando a frequência em escala logarítmica e a espessura das amostras utilizadas foi de 2 cm. A Tabela 20 apresenta os mesmos valores de frequência utilizados para representação dos dados de absorção acústica, embora a norma brasileira, que referencia alguns dados de isolamento acústico, contenha apenas a frequência de 500 Hertz. Os dados de maneira completa de isolamento acústico constam no Apêndice 4.

Tabela 20 - Isolamento acústico dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Frequência(Hz)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)
125	33.01	41.74	33.26	27.45
250	27.26	31.45	26.78	19.17
500	35.90	41.56	38.75	33.97
1000	43.43	43.68	45.59	41.99
2000	41.99	49.51	49.56	48.73
4000	41.62	46.46	48.41	49.50
6300	48.29	59.99	66.20	58.66

Fonte: Elaboração própria

Em uma comparação com os materiais citados na NBR 12179 (ABNT 1992) (Tabela 7 pg. 15), os 2 cm da amostra do Traço 4 na frequência de 500 Hertz (Tabela 21), compósito com menor desempenho nessa frequência, obteve um isolamento acústico aproximadamente 340% maior em relação a um tijolo furado de espessura de 25 cm.

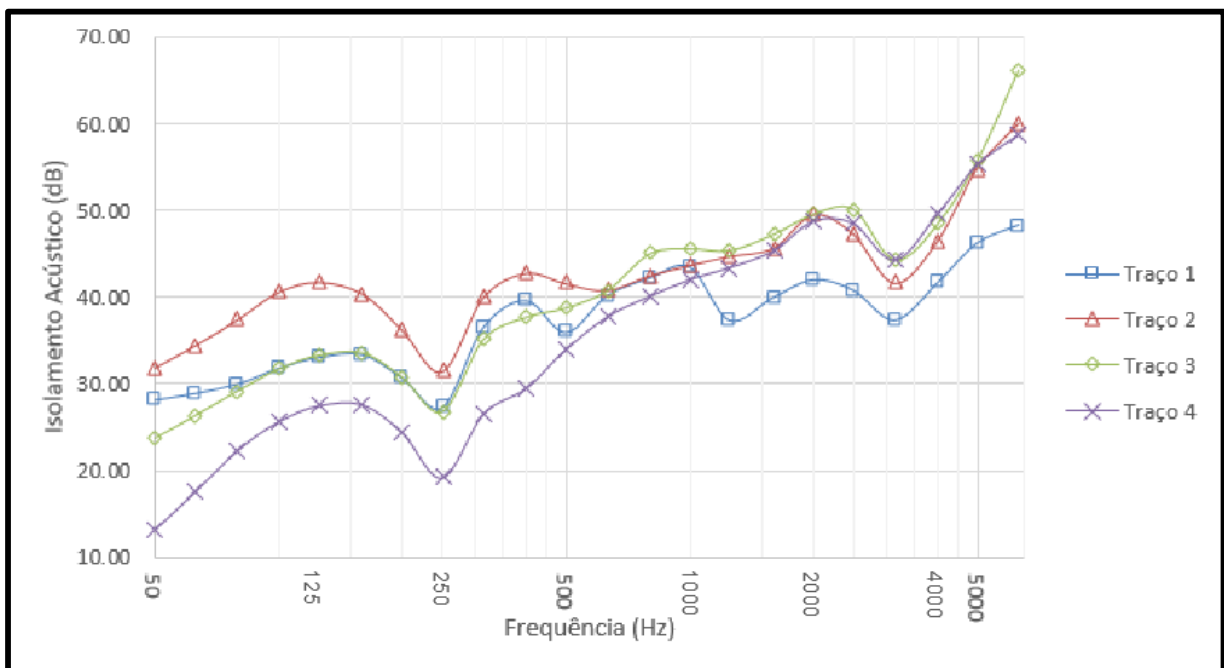
Na comparação com as alvenarias de tijolo maciço os compósitos obtiveram desempenho inferior, no entanto a menor espessura que consta na NBR 12179 (ABNT 1992) (Tabela 7) é de 10 cm, e as amostras dos compósitos possuíam apenas 2 cm. Possivelmente se forem avaliadas amostras de mesma espessura o desempenho de isolamento acústico dos compósitos será superior, já que o isolamento acústico da alvenaria de 40 cm foi 1,61 vezes maior que a amostra de 2 cm do Traço 4 e nas espessuras a diferença foi de 20 vezes.

Na comparação com os ensaios do concreto celular autoclavado feitos por Garcia (2004) todos os compósitos obtiveram melhor desempenho aos 500 Hz, com exceção do Traço 4 que teve isolamento de 34 dB para 35 dB do concreto testado por Garcia.

Essa grande melhoria dos compósitos com casca de arroz possivelmente se dá pelo fato do som, ao colidir e penetrar no concreto celular, agitar a casca transformando grande parte da energia sonora em vibração das partículas, gerando portanto energia mecânica.

A Figura 33 facilita a comparação dos resultados dos compósitos desenvolvidos na pesquisa. Como pode-se observar os compósitos com casca de arroz tiveram melhor desempenho a partir da frequência de 1250 Hz. Antes desta frequência, o Traço 1 obteve desempenho melhor apenas que o Traço 4 e que o Traço 3 em frequências intercaladas.

Figura 33 - Frequência x Isolamento acústico



Fonte: Elaboração própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

As conclusões obtidas na pesquisa foram as seguintes:

- A adição de casca de arroz até certo volume reduz a retração por secagem, caso observado para os compósitos dos Traços 2 e 4.
- A adição da casca de arroz reduziu os custos de matéria-prima para produção dos compósitos, os Traços 3 e 4 ficaram com valores abaixo do traço referência e com propriedades melhores na maioria dos aspectos físicos, mecânicos e acústicos.
- Na medição das massas específicas houve uma variação irregular. Relacionando a massa específica no estado fresco com a massa específica no estado endurecido aos sete dias houve um aumento de massa gerado pela retração, enquanto aos vinte e oito dias, houve uma queda de massa em relação a ambas as idades iniciais, gerado pela perda de material, possivelmente pela evaporação da água.
- Ficou comprovado que a adição da casca de arroz melhora o desempenho do concreto celular na resistência à compressão axial, mas principalmente na resistência à tração na flexão em três pontos;
- O Traço 4 obteve o melhor desempenho em absorver energia sonora, na maior faixa de frequência, em geral, o coeficiente de absorção foi inversamente proporcional a massa específica no estado endurecido;
- Os três compósitos com casca de arroz obtiveram melhores resultados que o concreto celular convencional para o isolamento acústico na maior faixa de frequência;

O melhor volume de casca de arroz a ser utilizado depende da aplicação em que se deseja utilizar o material. Caso a necessidade seja de resistência elevada e melhor isolamento acústico, o melhor volume é 310,15 litros (Traço 3). Caso a necessidade seja reduzida massa específica e melhor capacidade de absorção acústica, o melhor volume é 87,50 litros. Os compósitos desenvolvidos estão com as propriedades estudadas na pesquisa bem definidas e são viáveis para utilização na prática, já que seguem os padrões de qualidade mínimos exigidos pelas normas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para continuidade de caracterização desta pesquisa são sugeridos os seguintes tópicos:

- Realizar a caracterização térmica dos compósitos;
- Testar qual o limite de casca de arroz pode ser utilizado sem haver perda de resistência mecânica;
- Fazer medições da porosidade dos compósitos e correlacionar os dados obtidos com os resultados de resistividade acústica;
- Realizar os ensaios de absorção e isolamento acústico com a mesma metodologia da pesquisa, com amostras de espessuras de 1 cm, 3 cm, 4 cm e 5 cm, e propor uma equação, possibilitando projetar o material em função do desempenho desejado;

REFERÊNCIAS

ALLARD J. “**Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Abs Materials**”. Wiley, United Kingdom, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 12644: Concreto celular espumoso – Determinação da densidade de massa aparente no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2014.

____. **NBR 12645: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local**. Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 12646: Execução de Paredes em Concreto Celular Espumoso Moldadas no Local**. Rio de Janeiro, 1992.

____. **NBR 15270-1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.

____. **NBR 5738: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

____. **NBR 5739: Concreto Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007

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

CARMO, J.B.M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Parana, Curitiba, 2006.

CARVALHO, R.P. **Acústica Arquitetônica**. Brasilia/DF: Thesaurus, 2006.

CIDAUT FOUNDATION. **Technology Services Acoustics and Vibrations**. Disponível em: < <http://www.cidaut.es/en/tests-acoustics-and-vibrations>> Acesso em: 19 de junho 2015, 22:40.

ECOPORE. **ECOFOAM – Aditivo Espumante para Concreto Celular**. Disponível em:<<http://www.ecopore.com.br/ecofoam/>> Acesso em: 19 de junho 2015, 20:40.

ECOPORE. **Manual do Usuário – Gerador de Espuma ECOFOAMER-100W-10BP**.

EUROLIGHTCON – ECONOMIC DESIGN AND CONSTRUCTION WITH LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. **LWAC Material Properties, State-of-the-Art. Project BE96-3942/R2**. Noruega, 1998.

FLACH, F. – **Investigação do Potencial de Absorção Acústica de Compósitos de Argamassa com Materiais Reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

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.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 10534-1:1996: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-- Part 1: Method using standing wave ratio**, 1996.

LAZZARANII, V. E. P. **Elementos de Acústica**. Londrina, PR. 1998.

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.

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

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, Antonio Miguel et. al. **Acustica Arquitectonica**. Buenos Aires, 1994.

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 (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2009.

PAIXÃO, D.X. **Caracterização do Isolamento Acústico de uma Parede de Alvenaria, Utilizando Análise Estática de Energia (SEA)**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PRECON. **Ficha Técnica: Bloco de Concreto Celular Autoclavado**.

ROSSIGNOLO, J.A; AGNESINI, M.V.C. In: ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo, 2011. p 1531-1568.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais 1971.

TEIXEIRA FILHO, F.J. **Consideração sobre algumas Propriedades dos Concretos Celulares Espumosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Tabela 21 - Resistência à compressão axial do Traço 1

Traço 1					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	16938.00	2.16	4	30372.00	3.87
2	16211.00	2.07	5	30656.00	3.90
3	13621.00	1.74	6	29548.00	3.76
Média	15590.00	1.99	Média	30192.00	3.84
Desvio Padrão	1743.52	0.22	Desvio Padrão	575.51	0.07
Variação	3.04E+06	4.93E-02	Variação	3.31E+05	5.37E-03
C.V. (%)	11.18	11.18	C.V. (%)	1.91	1.91

Fonte: Elaboração própria

Tabela 22 - Resistência à compressão axial do Traço 2

Traço 2					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	42595.0	5.43	4	62379.0	7.94
2	40012.0	5.10	5	62379.0	7.94
3	46583.0	5.93	6	60038.0	7.64
Média	43063.33	5.49	Média	61598.67	7.84
Desvio Padrão	3310.44	0.42	Desvio Padrão	1351.58	0.17
Variação	1.10E+07	1.78E-01	Variação	1.83E+06	2.96E-02
C.V. (%)	7.69	7.69	C.V. (%)	2.19	2.19

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23 - Resistência à compressão axial do Traço 3

Traço 3					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	50489	6.43	4	66395.0	8.45
2	46362	5.90	5	64297.0	8.19
3	44928	5.72	6	62829.0	8.00
Média	47259.67	6.02	Média	64507.00	8.21
Desvio Padrão	2887.13	0.37	Desvio Padrão	1792.25	0.23
Variação	8.34E+06	1.35E-01	Variação	3.21E+06	5.21E-02
C.V. (%)	6.11	6.11	C.V. (%)	2.78	2.78

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24 - Resistência à compressão axial do Traço 4

Traço 4					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	9600	1.22	4	13300.0	1.69
2	8200	1.04	5	15600.0	1.99
3	8300	1.06	6	14000.0	1.78
Média	8700.00	1.11	Média	14300.00	1.82
Desvio Padrão	781.02	0.10	Desvio Padrão	1178.98	0.15
Variação	6.10E+05	9.89E-03	Variação	1.39E+06	2.25E-02
C.V. (%)	8.98	8.98	C.V. (%)	8.24	8.24

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE 2

Tabela 25 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 1

Traço 1					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	315.56	0.74	4	389.35	0.91
2	293.25	0.69	5	381.44	0.89
3	304.41	0.71	6	387.42	0.91
Média	304.41	0.71	Média	386.07	0.90
Desvio Padrão	11.15	0.03	Desvio Padrão	4.12	0.01
Variação	1.24E+02	6.84E-04	Variação	1.70E+01	9.33E-05
C.V. (%)	3.66	3.66	C.V. (%)	1.07	1.07

Fonte: Elaboração própria

Tabela 26 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 2

Traço 2					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	768.5423	1.80	4	1098.71	2.58
2	850.5678	1.99	5	1064.78	2.50
3	778.7689	1.83	6	998.66	2.34
Média	799.29	1.87	Média	1054.05	2.47
Desvio Padrão	44.70	0.10	Desvio Padrão	50.88	0.12
Variação	2.00E+03	1.10E-02	Variação	2.59E+03	1.42E-02
C.V. (%)	5.59	5.59	C.V. (%)	4.83	4.83

Fonte: Elaboração própria

Tabela 27 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 3

Traço 3					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)	CP	FORÇA (N)	TENSÃO (MPa)
1	909.68	2.13	4	1191.708	2.79
2	942.94	2.21	5	1268.012	2.97
3	926.31	2.17	6	1221.813	2.86
Média	926.31	2.17	Média	1227.18	2.88
Desvio Padrão	16.63	0.04	Desvio Padrão	38.43	0.09
Variação	2.77E+02	1.52E-03	Variação	1.48E+03	8.11E-03
C.V. (%)	1.80	1.80	C.V. (%)	3.13	3.13

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 - Resistência à flexão em três pontos do Traço 4

Traço 4					
7 DIAS			28 DIAS		
CP	Força (N)	Tensão (Mpa)	CP	Força (N)	Tensão (Mpa)
1	367.83615	0.86	4	501.3148	1.17
2	321.3739	0.75	5	546.2964	1.28
3	414.2984	0.97	6	545.9738	1.28
Média	367.84	0.86	Média	531.20	1.24
Desvio Padrão	46.46	0.11	Desvio Padrão	25.88	0.06
Variação	2.16E+03	1.19E-02	Variação	6.70E+02	3.68E-03
C.V. (%)	12.63	12.63	C.V. (%)	4.87	4.87

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE 3

Tabela 29 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 1

Traço 1 - 7 Dias			Traço 1 - 28 Dias		
CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)	CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)
1	889.63	2.16	4	781.70	3.87
2	877.12	2.07	5	810.97	3.90
3	866.70	1.74	6	773.77	3.76

Fonte: Elaboração própria

Tabela 30 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 2

Traço 2 - 7 Dias			Traço 2 - 28 Dias		
CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)	CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)
1	1330.56	5.43	4	1258.82	7.94
2	1320.76	5.10	5	1218.95	7.94
3	1332.52	5.93	6	1256.99	7.64

Fonte: Elaboração própria

Tabela 31 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 3

Traço 3 - 7 Dias			Traço 3 - 28 Dias		
CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)	CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)
1	1439.23	6.43	4	1298.05	8.45
2	1420.16	5.90	5	1283.41	8.19
3	1443.85	5.72	6	1254.71	8.00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32 - Relação entre densidade seca e tensão do Traço 4

Traço 4 - 7 Dias			Traço 4 - 28 Dias		
CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)	CP	Massa Esp. (Kg/m ³)	Tensão (MPa)
1	767.81	1.22	4	700.31	1.69
2	714.12	1.04	5	805.79	1.99
3	767.93	1.06	6	681.98	1.78

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE 4

Tabela 33 - Absorção acústica dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz

Frequência(Hz)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção	Coef. De Absorção
50	0.02	0.07	0.02	0.02
63	0.02	0.07	0.07	0.08
80	0.03	0.08	0.09	0.11
100	0.04	0.08	0.11	0.13
125	0.05	0.10	0.11	0.13
160	0.05	0.11	0.10	0.13
200	0.06	0.16	0.09	0.13
250	0.07	0.21	0.07	0.11
315	0.08	0.17	0.04	0.09
400	0.09	0.09	0.02	0.07
500	0.08	0.11	0.06	0.06
630	0.07	0.09	0.06	0.07
800	0.06	0.06	0.06	0.10
1000	0.07	0.05	0.06	0.12
1250	0.05	0.05	0.06	0.13
1600	0.04	0.03	0.06	0.08
2000	0.05	0.03	0.05	0.07
2500	0.04	0.03	0.04	0.06
3150	0.04	0.03	0.04	0.07
4000	0.05	0.04	0.05	0.08
5000	0.06	0.04	0.05	0.08
6300	0.06	0.03	0.04	0.07

Fonte: Elaboração própria

APÊNDICE 5

Tabela 34 - Isolamento acústico dos traços para uma faixa de frequência de 50 Hz a 6300 Hz

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Frequência(Hz)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)	Isolamento (dB)
50	28.12	31.88	23.71	13.17
63	28.89	34.49	26.38	17.65
80	30.01	37.51	29.24	22.42
100	31.78	40.60	31.70	25.63
125	33.01	41.74	33.26	27.45
160	33.32	40.39	33.55	27.57
200	30.61	36.16	30.72	24.34
250	27.26	31.45	26.78	19.17
315	36.50	40.01	35.11	26.51
400	39.54	42.76	37.67	29.46
500	35.90	41.56	38.75	33.97
630	40.15	40.81	40.74	37.70
800	42.18	42.49	45.01	40.10
1000	43.43	43.68	45.59	41.99
1250	37.29	44.70	45.38	43.37
1600	39.98	45.69	47.26	45.31
2000	41.99	49.51	49.56	48.73
2500	40.76	47.27	50.16	48.42
3150	37.31	41.62	44.30	44.21
4000	41.62	46.46	48.41	49.50
5000	46.21	54.86	55.76	55.20
6300	48.29	59.99	66.20	58.66

Fonte: Elaboração própria