



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
E ENGENHARIA DE MATERIAIS



Antonio de Araujo Pereira

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO
CIMENTÍCIO LEVE PARA ELEMENTOS DE VEDAÇÃO NO CONTEXTO DE
SMART BUILDINGS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba – PPCEM-UFPB, como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Materiais Cimentícios

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marçal Rosas F. Lima Filho

João Pessoa – PB
Agosto-2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na publicação Seção de Catalogação e Classificação

P436d Pereira, Antonio de Araujo.

Desenvolvimento e caracterização de compósito cimentício leve para produção de elementos de vedação no contexto de smart buildings / Antonio de Araujo Pereira. - João Pessoa, 2021.
103 f. : il.

Orientação: Marçal Rosas F Lima Filho.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Compósitos cimentícios leves. 2. Alvenaria. 3. Agregados leves. 4. Envoltória. 5. Protótipo. I. Lima Filho, Marçal Rosas F. II. Título.

UFPB/BC

CDU 666.94(043)

Antonio de Araujo Pereira

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO LEVE PARA ELEMENTOS DE VEDAÇÃO NO CONTEXTO DE SMART BUILDINGS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais da Universidade Federal da Paraíba - PPCEM-UFPB, como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Materiais Cimentícios

Banca examinadora

Prof. Dr. MARCAL ROSAS F LIMA FILHO - UFPB/PPCEM
(Presidente, Orientador)

Prof^a. Dr^a. LISZANDRA FERNANDA ARAUJO CAMPOS
(Examinadora Interna do Programa)

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
(Examinador Externo ao Programa)

Prof. Dr. ALUIZIO CALDAS E SILVA
(Examinador Externo à Instituição)

Prof. Dr. JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO
(Examinador Externo à Instituição)


ANTONIO DE ARAUJO PEREIRA

Discente

Emitido em 31/08/2021

ATA Nº 1/2021 - PPECM (11.01.17.35)
(Nº do Documento: 1)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 06/09/2021 18:03)
SANDRO MARDEN TORRES
ASSESSOR
3581068

(Assinado digitalmente em 10/09/2021 08:12)
LIZANDRA FERNANDA ARAUJO CAMPOS
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
1737199

(Assinado digitalmente em 03/09/2021 15:44)
MARCAL ROSAS F LIMA FILHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
1160815

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufpb.br/documentos/> informando seu número: 1, ano: 2021, documento (espécie): ATA, data de emissão: 03/09/2021 e o código de verificação: aeb4a45b8f

DEDICATÓRIA

*Na vida, não vale tanto o que temos,
nem tanto importa o que somos.
Vale o que realizamos com aquilo que
possuímos e, acima de tudo, importa o
que fazemos de nós.*

Chico Xavier

*À Deus, minha mãe, minha esposa, meus irmãos
e filhos, por estarem comigo durante essa
empreitada.*

Deus sempre estará no comando!

AGRADECIMENTOS

- À Deus, por me dar tranquilidade e equilíbrio para seguir sempre em busca dos meus objetivos e não desistir frente as adversidades;
 - À Minha **MÃE**, sertaneja forte que abdicou de muitas coisas em sua vida pelos seus filhos;
 - Ao meu amor, **Francisca Nilma de Souza Vieira** e a meu filho **Antonio Victor Vieira Pereira** pela compreensão, paciência e apoio;
 - Agradeço aos meus **IRMÃOS**, principalmente a **Hélio Araújo Pereira** e **Francilda de Araújo Inácio**, pelo apoio e motivação;
 - Ao **Prof. Dr. Marçal Rosas F. Lima Filho**, orientador dedicado ao trabalho de disseminação do conhecimento, exemplo de integridade e sabedoria;
- Ao **Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho** pela disponibilidade e ajuda na realização dos ensaios de atenuação de ondas eletromagnéticas, no IFPB;
- Aos Professores da Pós-Graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais da **UFPB**;
 - Ao **Prof. Dr. Sandro Marden Torres**, pela atenção dispensada e disponibilidade Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais;
 - Ao **Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho** por disponibilizar o seu tempo para realização os ensaios de atenuação de onda eletromagnética;
 - À **Marcos Santana**, pelo apoio e companheirismo;
 - À **Nelly Marçal**, pela disponibilidade, e amizade;
 - Ao **IFPB**, por disponibilizar o Laboratório de Engenharia Elétrica para realização de ensaios;
 - Ao **IFBA**, pela oportunidade de capacitação, em especial a reitoria;
 - Aos colaboradores do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas – UFPB: **Sebastião e Delby**.

RESUMO

O uso eficiente e racional de energia pode ser promovido através de melhorias construtivas na envoltória de edificações, em conformidade com a norma de desempenho, agregando novas tecnologias e materiais alternativos, pois atua diretamente em todos os sistemas consumidores da edificação. *Smart buildings*¹ são construções capazes de economizar energia, além de contribuir com metas de sustentabilidade. Eles devem ser capazes de maximizar o aproveitamento de recursos através de tecnologias já disponíveis, tanto as construtivas e de aproveitamento de materiais, ou mesmo tecnologias da indústria de alta tecnologia. Diante do exposto, esse trabalho tem o propósito de desenvolver um compósito cimentício leve, utilizando a argila expandida como agregado, e elaborar um protótipo de elemento de alvenaria visando a sua aplicação na envoltória de edificações. Os materiais utilizados para a produção dos compósitos cimentícios foram: cimento CPV ARI; argila expandida de granulometria 2,50 mm (lamelar); argila expandida de granulometria 5,00 mm. Para a caracterização dos materiais foram realizados os ensaios de: massa unitária e volume de vazios, conforme a NBR NM 45:2006; massas específica e absorção segundo NBR NM 52:2009. O ensaio para determinação granulométrica dos agregados foi realizado conforme a ABNT NBR 248:2003, e foram classificados de acordo com a NBR 7211:2005. Em um segundo momento foram executadas composições experimentais (traços) em três proporções 1:4, 1:5 e 1:6 (Cimento:Argila Expandida:água). Para cada traço, com teor inicial de argila expandida 2,50 mm, de 100% em massa, foram realizadas substituições por argila expandida de 5,00 mm nos teores de 0%, 25% e 50%. Dessas composições, resultaram nove traços em massa ensaiados a resistência à compressão em conformidade com a norma NBR 6136-2014. Os compósitos cimentícios leves foram caracterizados em nível macro: resistência à compressão simples, porosidade, massa específica, absorção e índice de vazios, condutividade térmica, coeficiente de atenuação sonora, além de caracterização microestrutural via MEV. Por fim, um protótipo de elemento de vedação foi projetado e executado com vistas a iniciar a aplicação prática do estudo. Os resultados obtidos, no tocante as propriedades mecânicas (NBR 6136:2004) e das propriedades físicas dos compósitos, qualificam os compósito cimentícios obtidos dos traços TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 3(50%), como compósitos cimentícios leve. Quanto ao desempenho térmico, os

¹ Smart Buildings: Tradução para o inglês de Edifícios Inteligentes. São edificações que racionalizam o consumo de energia obedecendo preceitos de sustentabilidade

compósitos cimentícios leves obtidos dos traços TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 3(50%) apresentaram uma condutividade média de 0,13 W/m.K, o que corresponde a 7,6% da condutividade térmica do concreto convencional. O elemento de alvenaria leve pré-moldado leve, da moldagem do traço TR 3(50%), apresentou bons resultados no que diz respeito ao seu comportamento quanto a atenuação de ondas eletromagnética, quando comparado com os resultados encontrados na bibliografia. De uma maneira geral, percebe-se a viabilidade técnica de confecção de elementos de vedação utilizando compósitos cimentícios leves com argila expandida e sua aplicação em *smart buildings*.

Palavras-chave: *compósitos cimentícios leves, agregados leves, envoltória, alvenaria, protótipo.*

ABSTRACT

The efficient and rational use of energy can be promoted by constructive improvements in the envelope of buildings in accordance with the performance, adding new Technologies and alternative materials, as it acts directly in all consumer systems of the building. Smart buildings are buildings capable of saving energy, as well as contributing to sustainability goals. They should be able to maximize the use of resources through technologies already available, both constructive and use of materials, or even high tech industry technologies. In view of the above, this work aims to develop a light cementitious composite, using expanded clay as aggregate, and elaborate a prototype masonry element aiming at its application in the wrapping of buildings. The materials used for the production of cementitious composites were: CPV ARI cement; expanded clay of 2,50 mm (lamellar) granulometry; expanded clay of granulometry 5,00 mm. For the characterization of the materials, the tests of: unit mass were carried out and volume of voids according to NBR NM 45:2006; specific masses and absorption according to NBR NM 52:2009. The test for granulometric determination of the aggregates was performed according to ABNT NBR 248:2003, and were classified according to NBR 7211:2005. In a second moment experimental compositions (traces) were performed in three proportions 1:4, 1:5, and 1:6 (Cement:Expanded Clay:water). For each trace, with initial content of expanded clay 2,50 mm, 100% by mass, substitutions were performed by expanded clay of 5,00 mm at the levels of 0%, 25% and 50%. Of these compositions, nine mass strokes tested for compressive strength in accordance with NBR 6136-2014 were tested. The mild cementitious composites were characterized at the macro level: simple compression resistance, porosity, specific mass, absorption and void index, thermal conductivity, coefficient attenuation, as well as microstructural characterization via MEV. Finally, a prototype of sealing element was designed and executed with a view to initiating the practical application of the study. The results obtained, with regard to the mechanical properties (NBR 36:2004) and the physical properties of composites qualify the composites cementis obtained from TR 1(100%), TR 2(75%) and TR 3(50%), as mild cementitious composites. As for thermal performance, composites mild cementitious obtained from TR 1(100%), TR 2(75%) and TR 3(50%) had an average conductivity of 0.13 W/m.K, which corresponds to 7.6% conductivity of conventional concrete. The lightweight precast lightweight masonry element, from TR 3(50%) trace molding presents good results

regarding its behavior regarding the attenuation of electromagnetic waves, when compared with the results found in the bibliography. In general, the technical feasibility of making sealing elements using light cementitious composites with expanded clay and its application in *smart buildings* can be seen.

Keywords: *lightweight cementitious composites, lightweight aggregates, masonry, prototype.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Southerwestern Bell Telephone Company.	11
Figura 2.2: Ponte na baía de San Francisco.	11
Figura 2.3: Classificação do concreto leve estrutural e suas massas específicas Correspondentes.	13
Figura 2.4: Aparelho de ultrassom e, seus transdutores posicionados na amostra.	16
Figura 2.5: Barra metálica isolada termicamente em temperaturas constantes.	20
Figura 2.6: Esquema de um Fluxímetro K30.	21
Figura 2.7: Espectro eletromagnético e suas aplicações.	24
Figura 2.8: Representação de uma onda eletromagnética propagando-se para a direita.	25
Figura 2.9: (a) Reflexão e Refração, (b) Difração, (c) Espalhamento.	28
Figura 2.10: Vista isométrica do teste para atenuação de ondas eletromagnéticas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos.	31
Figura 2.11: Vista isométrica do teste para atenuação de ondas eletromagnéticas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos, aonde o vão central no escudo é mostrado.	31
Figura 2.12: A estrutura de teste de material de parede em forma de colmeia.	32
Figura 3.1: Materiais utilizados na pesquisa: (a) Cimento Portland CPV ARI (b) Argila expandida 2,50 mm e (c) Argila expandida 5,00 mm	34
Figura 3.2: Materia e equipamentos necessários para realizaro ensaio:a) material quarteado; (b) Série de peneiras e agitador mecânico.	37
Figura 3.3: Material e equipamentos utilizados no ensaio para determinaçãoda massa unitária e volume de vazios:argila expandida; (b) balança de precisão e recipiente de volume conhecido.	39
Figura 3.4: Material e equipamentos utilizados no ensaio para determinação da da massa específica e absorção de água:(a) quarteamento do material (b)imersão do material em água;(c)becker graduado;d) determinação do estado saturado de superfície seca (sss) do material;(e) estufa para secagem do material.	41
Figura 4.1: Fluxograma da pesquisa.	43
Figura 4.2: Design do traço experimental.	43

Figura 4.3: Modelo numérico de regressão quadrática.	45
Figura 4.4: Sequência de execução da modelagem dos corpos de prova: (a) quarteamento do material, após pesado; (b) imersão do material em água por 24 horas; (c) escoamento do excesso de água; (d) mistura do material; (e) moldagem dos corpos de prova.	47
Figura 5.1: Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova dos compósitos cimentícios leves: (a) mistura do material; (b) moldagem dos corpos de prova (c) desmoldagem dos corpos de prova; (d) capeamento dos corpos de prova; (e) rompimento dos corpos de prova.	48
Figura 5.2: Corpos de prova e equipamentos necessário para determinação da massa específica dos compósitos cimentícios leves: (a) estufa; (b) becker graduado, (c) balança de precisão e corpos de prova.	49
Figura 5.3: (a) Condutivímetro K30; (b) câmera para inserção da placa.	50
Figura 5.4: Ensaio utilizando o equipamento de ultrassom.	51
Figura 5.5: Microscópio eletrônico de varredura.	52
Figura 5.6: Equipamento de Difração de Raio X (DRX).	53
Figura 6.1: Etapas realizadas para a confecção do protótipo.	55
Figura 6.2: Protótipos.	55
Figura 6.3: Elemento de alvenaria leve.	56
Figura 6.4: Ensaio de atenuação da onda eletromagnética.	57
Figura 7.1: Curvas granulométricas dos agregados leves AE-2,50 mm e AE-0500.	59
Figura 7.2: Curvas granulométricas das misturas dos agregados e as curvas granulométricas das argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500.	60
Figura 7.3: Difratoograma de Raio X da argila AE-0500.	61
Figura 7.4: Teores de absorção de água por imersão, porosidade total e índice de vazios dos CCL.	62
Figura 7.5: Resistência à compressão simples.	64
Figura 7.6: Ilustração de corpos de prova após ensaio de resistência à compressão axial dos CCL, ruptura do agregado.	65
Figura 7.7: Micrografia Eletrônica de Varredura do compósito cimentício leve-TR 3(50%).	66

Figura 7.8: Correlação entre os resultados de massa específica e condutividade térmica (ABNT NBR 15220:2005), aos 28 dias de idade, correspondentes aos compósitos TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%).	67
Figura 7.9: Absorção acústica aos 28 dias de idade, dos compósitos cimentícios leves (CCL).	70
Figura 8.1: Protótipo.	71
Figura 8.2: Atenuação da onda eletromagnética através de placas.	72
Figura 8.3: Atenuação de ondas eletromagnética através de cada placa para a frequência 2,40 GPa.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 : Compostos e abreviações individuais dos óxidos.	4
Tabela 2.2 : Proporção de óxidos no clínquer de Cimento Portland, em percentagem.	5
Tabela 2.3 : Composição química da argila expandida (CINEXPAN, 2020).	6
Tabela 2.4: Valores de referência das massas específicas dos concretos leves estruturais.	12
Tabela 2.5 : Correlação entre valores de massa específica e de condutividade térmica.	18
Tabela 2.6: Perdas de penetração em obstáculos para a frequência operacional de 2,4 GHz.	26
Tabela 3.1 : Características e propriedade do cimento CPV ARI.	35
Tabela 3.2 : Composição granulométrica da Argila 2,50 mm (AE-2,50 mm) (NBR NM 248:2003).	37
Tabela 3.3 : Composição granulométrica da Argila 5,00 mm (AE- 0500) (NBR NM 248:2003).	38
Tabela 3.4 : Resultados obtidos em ensaio para a determinação da massa unitária e do volume de vazios para a argila expandida AE-2,50 mm.	39
Tabela 3.5 : Resultados obtidos no ensaio para a determinação da massa unitária e do volume de vazios para a argila expandida AE-0500.	40
Tabela 3.6 : Resultados obtidos no ensaio para a determinação da massa específica e absorção de água por imersão para a argila expandida AE-2,50 mm.	42
Tabela 3.7 : Resultados obtidos em ensaio para a determinação da massa específica e absorção de água por imersão para a argila expandida AE-0500.	42
Tabela 4.1 : Composições obtidas (traços).	44
Tabela 4.2 : Resultados obtidos pelo modelo de regressão quadrática.	46
Tabela 7.1 : Propriedades físicas do agregado leve AE-2,50 mm (lamelar).	58
Tabela 7.2 : Propriedades físicas do agregado leve AE-0500.	58
Tabela 7.3 : Composição granulométrica das argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500.	59

Tabela 7.4 :Composição granulométrica das misturas dos agregado leves AE-2.50 mm e AE-0500 dos CCL.	60
Tabela 7.5 : Massas específicas, absorção por imersão e índice de vazios dos compósitos cimentícios leves (CCL) com seu respectivos desvios padrão.	62
Tabela 7.6 : Resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias, com seus respectivos desvios padrão.	64
Tabela 8.1 : Coeficiente de atenuação de onda eletromagnética para cada placa.	73

ÍNDICE DE ABREVIATURAS, SIGLAS E NOMENCLATURAS

A_i	Amplitude inicial de uma onda
A_f	Amplitude final de uma onda
AE-25	Argila expandida de diâmetro 2,50 mm (lamelar)
AE-0500	Argila expandida de diâmetro 5,00 mm
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
ARI	Alta resistência inicial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
CCL	Compósito cimentício leve
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C_2S	Silicato dicálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_4AF	Ferro-Aluminato Tetracálcico
CP	Cimento Portland
E	Módulo de deformação
EB	Especificação Brasileira
GPa	Giga Pascal
I_v	Índice de Vazios
K	Condutividade Térmica
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MF	Módulo de Finura
MPa	Mega Pascal
M_{sat}	Massa Saturada
m_s	Massa Seca
m_i	Massa Imersa
NBR	Norma brasileira Regulamentadora
PLC 1	Placa 1 - confeccionada com o traço TR 3(50%), com de espessura 9,0 cm

PLC 2	Placa 2-confeccionada com o traço TR 3(50%),com espessura de 12,0 cm
PLC 3	Placa 3-confeccionada com o traço TR 3(50%),com espessura de 14,0 cm
PLC- REB	Placa rebocada - confeccionada com o traço TR 3(50%), com espessura de 12,0 cm.
PLC-ALV 1	Placa de alvenaria construída com bloco de concreto, com 9,0 cm de espessura
PLC-ALV 2	Placa de alvenaria construída com bloco cerâmico com 9,0 cm de espessura.
SSS	Estado saturado de superfície seca
TR 1(100%)	Traço 1 com 100% de argila expandida 2,50 mm
TR 2(75%)	Traço 2 com 75% de argila expandida 2,50 mm
TR 3(50%)	Traço 2 com 50% de argila expandida 2,50 mm
ρ_s	Massa específica da amostra seca
ρ_r	Massa específica real
ρ_{sa}	Massa específica da amostra saturada

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	3
2.0	REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1	Cimento Portland	4
2.1.1	Composição química do Cimento Portland	4
2.2	Agregado leve-Argila expandida	5
2.2.1	Processos de fabricação	6
2.2.2	Propriedades	7
2.3	Concreto leve	11
2.3.1	Propriedades físicas e mecânicas do concreto leve	13
2.3.1.1	Resistência à compressão	13
2.3.1.2	Porosidade e absorção de água	14
2.4	Propriedades acústicas do concreto	14
2.4.1	Absorção acústica	15
2.4.2	Atenuação acústica	16
2.5	Propriedades térmicas do concreto	17
2.5.1	Condutividade térmica	19
2.5.1.1	Medição da condutividade térmica utilizando o condutímetro K30	20
2.6	Microestrutura do concreto	21
2.6.1	Análise por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	21
2.7	Smart Buildings	22
2.7.1	Histórico	22
2.7.2	Conceitos	23
2.8	Ondas eletromagnéticas	23
2.8.1	Propagação da onda eletromagnética	24
2.8.1.1	Formas de propagação e fenômenos de incidência de uma onda Eletromagnética	25
2.8.1.2	Equipamentos utilizados para medição de ondas eletromagnéticas	29
2.8.1.3	Métodos para análise da atenuação eletromagnética em sistemas Construtivo	30

3.0	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	34
3.1	Materiais	35
3.1.1	Cimento	35
3.1.2	Argila expandida	35
3.1.3	Água	36
3.2	Métodos	36
3.2.1	Composição granulométrica dos agregados	36
3.2.2	Composição granulométrica da argila expandida 2,50 mm	36
3.2.3	Composição granulométrica da argila expandida 5,00 mm	37
3.2.4	Massa unitária e volume de vazios-Método C	38
3.2.5	Massa específica e absorção de água do agregado miúdo	40
4.0	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
4.1	Metodologia	43
4.1.1	Design e modelagem do traço experimental	43
4.1.2	Moldagem e cura dos corpos de prova	46
5.0	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITO CIMENTÍCIOS LEVES	48
5.1	Metodologia	48
5.1.1	Resistência à compressão simples	48
5.1.2	Massa específica, absorção de água e índice de vazios	48
5.1.3	Porosidade	50
5.1.4	Condutividade térmica	50
5.1.5	Coefficiente de atenuação sonora	51
5.1.6	Análise microestrutural	52
5.1.6.1	Micrografia eletrônica de varredura (MEV)	52
5.1.7	Ensaio de Difração de Raio X (DRX)	53
6.0	CONFECÇÃO DO PROTÓTIPO	54
6.1	Projeto e design do novo elemento de alvenaria pré-moldado leve	55
6.2	Ensaio de atenuação de onda eletromagnética	56
7.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
7.1	Caracterização do material de partida	58
7.1.1	Argila expandida	58
7.2	Caracterização dos compósitos cimentícios (CCL)	61

7.2.1	Massa específica, absorção de água e índice de vazios	61
7.2.2	Resistência à compressão simples	63
7.2.3	Micrografia eletrônica de varredura (MEV)	66
7.2.4	Desempenho térmico	67
7.2.5	Desempenho acústico	69
8.0	PROTÓTIPOS DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO PRÉ-MOLDADO LEVE	71
8.1	Ensaio para determinação da atenuação das ondas eletromagnéticas ao transpor o protótipo	71
9.0	CONCLUSÕES	75
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1.0 INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil está relacionada com a própria história da humanidade, ela é responsável por desenvolver e gerar inovações que auxiliam no modo de vida. Sendo assim, em plena era digital, a grande inovação que a engenharia pode proporcionar, é oferecer um novo conceito em construção de edifícios: Os edifícios inteligentes (COELHO et al., 2017).

Uma necessidade crescente de adoção de medidas sustentáveis no setor da construção civil leva à necessidade de que todo o processo construtivo seja detalhadamente preparado, como meio de tornar os edifícios os mais eficiente possíveis. Os edifícios devem ser espaços básicos de bem-estar, conforto e devem ser acima de tudo saudáveis, tanto para os seus habitantes como para o meio ambiente.

Smart buildings são construções capazes de economizar energia e, ao mesmo tempo, obedece a preceitos de sustentabilidade. Eles devem ser capazes de maximizar o aproveitamento de recursos através de tecnologias já disponíveis, tanto as construtivas e de aproveitamento de materiais, ou mesmo tecnologias da indústria de alta tecnologia. A estimativa para 2020 era de que o mercado global de edifícios inteligentes, atingisse a cifra de cerca de US\$ 36,0 bilhões (ZION MARKET RESERACH, 2020).

O uso eficiente e racional de energia pode ser promovido através de melhorias construtivas na envoltória de edificações, em conformidade com a norma de desempenho (ABNT NBR 15575:2013), agregando novas tecnologias e materiais alternativos, pois atua diretamente em todos sistemas consumidores da edificação seleção de materiais e métodos que melhor se adéquam à situação são incentivados (RODRIGUES et al., 2009).

Estudo da “National Human Activity Pattern Survey”, realizado pela Berkeley Lab Energy, apontou que passamos em média 90% do tempo de nossas vidas em ambientes fechados. Viver em um ambiente agradável e confortável aumenta o bem-estar e a satisfação das pessoas. Essas condições são particularmente importantes em edifícios comerciais, educacionais e de saúde, onde a qualidade ambiental interna influencia a produtividade, o aprendizado e a convalescença (FRONTCZAK et al., 2011). Estudos apontam que até 2025, 42% da eletricidade mundial será consumida por edificações apenas, sejam elas comerciais, residenciais, aeroportos, fábricas, etc.

O consumo de energia elétrica no Brasil somou 474.231 GWh em 2020. O volume corresponde a uma queda de 1,6% na comparação com o consumo de energia em 2019. Por outro lado, com mais pessoas em casa em razão da pandemia, o consumo

de energia residencial cresceu 4,1%, para 148.223 GWh. Ou seja, esse foi o único segmento que registrou crescimento em 2020. (EPE, 2020).

Com a evolução dos meios de informação a partir dos anos 1970, a crescente popularização do computador pessoal (PC) possibilitou a manipulação de dados cada vez mais rapidamente. Assim, no início dos anos 80, com a evolução da informática aliada aos novos meios de utilização do espaço, surge o conceito de prédios inteligentes (PÁDUA, 2006). Apesar dessa evolução, a transmissão de dados em ambientes fechados ainda sofre interferências em consequência da atenuação de sinal, provocado pela dificuldade em vencer os obstáculos impostos. A parede é um dos principais obstáculos a afetar a redução do sinal de rádio frequência. A atenuação do sinal está diretamente relacionada aos seus materiais constituinte e à sua espessura. A propagação de sinal sem fio sempre enfrenta problemas em ambientes fechados, como observaram Bahaweres et al., 2015. Por outro lado, existe uma lacuna nas publicações científicas acerca das discussões em torno de como projetar edifícios que tenham a capacidade de permitir a mobilidade do sinal de rádio frequência com eficiência, sem reduções significativas do sinal.

A massa térmica é um benefício inerente às estruturas construídas com concreto, o que diminui a quantidade de energia necessária para refrigeração ou aquecimento. Além disso, o concreto tem uma pegada de baixo carbono devido à sua economia em termos de reparo e substituição (SHARIATZADEH et al., 2019). A pegada de carbono contabiliza as emissões e remoções de gases de efeito estufa que ocorrem durante o ciclo de vida de um produto (GEE, 2020).

O concreto tem um impacto mínimo no meio ambiente, pois as estruturas de concreto são duráveis e duram muito tempo em comparação com outros materiais. Além disso, o desperdício de material associado pode ser minimizado produzindo e/ou eliminando os acabamentos das estruturas de concreto (GEORGOPOULOS et al., 2014)

O manual para aplicação dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (PROCEL–2014), coloca que a envoltória pode ser comparada à pele da edificação, sendo composta por elementos construtivos que estão em contato com o exterior. Na seleção do material que constituirá a envoltória de um *smart buildings* deverão ser levadas em consideração as propriedades do elemento de alvenaria que proporcione um bom desempenho a edificação.

Diante do exposto, esse trabalho tem o propósito de desenvolver e caracterizar um compósito cimentício leve, para elementos de vedação no contexto de *smart buildings*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um compósito cimentício leve, utilizando a argila expandida e elaboração de um elemento de vedação leve, visando à aplicação em *smart buildings*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterização da matéria prima;
- Design e modelagem do traço experimental do compósito cimentício leve;
- Investigação das propriedades físicas e mecânica dos compósitos leves;
- Projeto e design do novo elemento pré-moldado de vedação;
- Investigação das propriedades térmica e acústica do novo elemento pré-moldado leve, preconizada pela norma de desempenho (NBR 15575:2013).

2.0 REVISÕES DA LITERATURA

2.1 Cimento Portland

O Cimento Portland é ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nesta Norma (ABNT NBR 16697:2018).

O cimento Portland é produzido a partir do aquecimento a altas temperaturas (próximas de 1450°C) da mistura pré-determinada de calcário e argila, ou outros materiais de comprovada reatividade que apresentam na sua composição sílica e cálcio, elementos primários constituintes do cimento portland (Taylor, 1990).

2.1.1 Composição química do Cimento Portland

O estágio de equilíbrio químico atingido pelas matérias-primas que compõem o cimento Portland na produção do clínquer é obtido através da interação entre seus principais componentes, principalmente o calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, formando uma série de produtos mais complexos. A velocidade de resfriamento desse processo acaba por influenciar o grau de cristalização desses compostos, alterando a quantidade de material amorfo (NEVILLE, 1997).

Os compostos individuais dos óxidos são expressos usando abreviações como as apresentadas na tabela 2.1.

CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	Š
H ₂ O	H

Tabela 2.1: Compostos e abreviações individuais dos óxidos.

Os teores de óxidos básicos (CaO) e óxidos ácidos (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), de acordo com Taylor (1990), que compõem o clínquer, são mostrados na tabela 2.2.

Oxido	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Outros
Teor (%)	67	22	5	3	3

Tabela 2.2: Proporção de óxidos no clínquer de cimento Portland, em percentagem (TAYLOR, 1990).

2.2 Agregado leve-Argila expandida

A argila expandida é o único agregado leve produzido no Brasil, onde cerca de 60% da produção de argila expandida destina-se ao setor da construção civil nacional e os outros 40% são absorvidos pelos setores de lavanderia (20%), paisagismo, refratários e demais aplicações, como substratos (ROSSIGNOLO, 2009).

Esse material é classificado como um agregado leve em função da sua massa específica reduzida. O processo de obtenção desse agregado é o tratamento térmico da matéria-prima argila. A argila é formada por silicatos de alumínio e óxidos de ferro e alumínio e pode ter propriedades expansivas quando exposta a altas temperaturas, que promovem a expansão de gases, fazendo com que o material se transforme em grãos porosos de variados diâmetros (HAGEMANN, 2011).

Ambrozewicz (2012) afirma que a argila expandida apresenta camada vítrea que reduz a absorção de água e sua granulometria varia de 4,8 mm a 25 mm, com massa unitária na ordem de 400 kg/m³, sendo, portanto utilizada em produção de concretos leves.

A argila expandida normalmente apresenta uma fina camada externa com baixa porosidade e, no seu interior, uma grande quantidade de poros, no entanto, não há uma interconectividade entre os mesmos. A maior porosidade da superfície interna está relacionada ao surgimento de vesículas de gases originados no processo de produção da argila expandida (ACI 213R-03:2003)

Qualquer agregado cuja massa específica real das partículas seja inferior a 2000 kg/m³ ou que possuam massa unitária menor que 1200 kg/m³ são classificados como agregados leves (RILEM, 1975). A NBR NM 35 (1995) define agregado leve como agregados que possuem massas unitárias menores que 1120 kg/m³.

A baixa massa unitária dos agregados leves se verifica pelo fato de parte dos constituintes do material se fundir a altas temperaturas, gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa, expandindo-a em até sete vezes seu volume inicial. Essa estrutura porosa se mantém após o resfriamento (MORAIVE et al., 2006).

Os agregados leves obtidos pelo processo de forno rotativo apresentam formato arredondado envolto por uma camada vítrea de baixa permeabilidade e de variada granulometria (ROSSIGNOLO et al., 2003).

Durante a fase de peneiramento, etapa de separação por granulometria, alguns agregados expõem parte de seus poros internos devido a sua quebra. Os poros expostos são muito permeáveis e rapidamente preenchidos quando exposto a umidade. Os poros internos absorvem água mais lentamente, necessitando portanto, de um maior tempo de imersão em água para atingir a saturação. Poros internos são essencialmente não interconectados e permanecem vazios mesmo depois de anos de imersão em água (ACI 213: 2003).

A Tabela 2.3 mostra o resultado de uma análise química do agregado da argila expandida, feita pela CINEXPAN (2019). Observa-se a predominância de elementos como sílica, alumínio e ferro na sua composição.

Composição químicas	
Silício em (SiO ₂)	63,19%
Alumínio em (Al ₂ O ₃)	18,02%
Ferro em (Fe ₂ O ₃)	7,63%
Titânio em (TiO ₂)	0,92%
Cálcio em (CaO)	0,64%
Magnésio em (MgO)	3,26%
Sódio em (Na ₂ O)	0,61%
Potássio em (K ₂ O)	4,91%
Óxido de Fosforo em (P ₂ O ₅)	0,20%
Óxido de Manganês em (MnO)	0,08%
Óxido de Bário em (BaO)	0,09%
Perda ao fogo	0,20%

Tabela 2.3: Composição química da argila expandida.
Fonte: CINEXPAN, 2019.

2.2.1 Processos de fabricação da argila expandida

Os agregados leves são classificados segundo sua origem em naturais e artificiais. Os agregados leves naturais são extraídos a partir de depósitos vulcânicos, como por exemplo, pedra-pomes, cinzas vulcânicas e tufa (NEVILLE, 1997). Já os

agregados artificiais utilizados na produção de concretos estruturais leves são produzidos em fábricas a partir do tratamento térmico de matérias-primas naturais como xisto, argilas, ardósias, vermiculita, folhelhos ou de subprodutos industriais como cinzas volantes e escórias de alto forno. Segundo Neville (1997) apenas os agregados obtidos por expansão a altas temperaturas como argila, xisto e ardósia podem ser usados em concreto estrutural.

Os dois processos mais utilizados para a fabricação dos agregados leves artificiais são forno rotativo e sinterização.

No processo do forno rotativo, o cilindro do forno é revestido por material refratário, similar ao utilizado na produção de cimento Portland, ligeiramente inclinado com longa e lenta rotação, produz partículas esféricas que são recobertas com película protetora impermeável, conferindo maior resistência, melhor trabalhabilidade e menor absorção de água no concreto do que os dos agregados de poros abertos. A massa unitária desses agregados produzidos em fornos rotativos varia entre 300 kg/m^3 e 650 kg/m^3 (MORAVIA et al., 2006).

No processo de sinterização, a matéria-prima é misturada com uma proporção adequada de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Em seguida, submete-se esse material a altas temperaturas, utilizando uma grelha móvel, com consequente expansão, em função da formação de gases (GOMES NETO, 1998). Normalmente, os valores da massa específica desse tipo de agregado variam entre 650 kg/m^3 e 900 kg/m^3 .

2.2.2 Propriedades

Algumas propriedades de agregados leves influenciam diretamente algumas propriedades importantes do concreto, como por exemplo, a resistência mecânica.

O ACI 213 de 2003, elenca as principais propriedades dos agregados que afetam diretamente as propriedades do concreto, são elas:

- Forma das partículas, textura superficial e granulometria;
- Massa específica e massa unitária;
- Resistência do agregado;
- Porosidade total, umidade e absorção de água;
- Módulo de deformação.

- **Forma das partículas, textura superficial e granulometria**

A textura e a forma das partículas dos agregados leves artificiais dependem, essencialmente, do processo de fabricação. Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa. Esse tipo de agregado proporciona boa aderência à pasta de cimento em função da rugosidade da superfície; entretanto, apresenta também altos valores de absorção de água em função da alta porosidade externa (ROSSIGNOLO, 2009). Em decorrência de a forma angular, esses agregados aumentam a quantidade de água da mistura para a obtenção da trabalhabilidade desejada (Zhang GjΦrv, 1990; CEB/FIP, 1977).

A forma e a textura da superfície dos agregados leves exercem influência fortemente as propriedades do concreto no estado fresco, como por exemplo, na trabalhabilidade, na relação entre agregado miúdo e graúdo e na quantidade de água a ser utilizada. Efeitos esses observados também, nos concretos com agregados convencionais.

A granulometria exigida para agregados leves diverge da granulometria dos agregados normais, pois a resistência à compressão, para um dado consumo de água e de cimento, pode ser aumentada ao se reduzir a dimensão máxima do agregado graúdo e/ou substituir parcialmente o agregado miúdo leve por areia natural de boa qualidade (MEHTA et al., 2008).

Em concreto leve, o tamanho e a granulometria do agregado têm maior influência nos valores da resistência à compressão do que em concretos convencionais. Isso porque os valores da resistência à compressão dos agregados leves, como no caso da argila expandida brasileira, são inversamente proporcionais às suas dimensões.

Na maioria dos processos de fabricação de agregados leves, o diâmetro das partículas varia entre 1 mm e 25 mm, com valores de massa específica inversamente proporcional ao diâmetro (ROSSIGNOLO, 2009).

- **Massa específica e massa unitária**

Em decorrência da estrutura celular dos agregados leves, a massa específica e massa unitária apresentam valores menores do que as dos agregado convencionais. Há ainda, uma variação em decorrência do tamanho das partículas, apresentando valores mais elevados para partículas miúdas e valores menores para partículas graúdas. A magnitude da variação depende do processo de fabricação.

• **Resistência à compressão**

A resistência à compressão do concreto leve depende fortemente da resistência do agregado.

Meyer e Kahn (2002), em estudando concretos leves, observaram que, para os concretos produzidos com o mesmo tipo de agregado e maiores teores de cimento, apresentaram resistências ligeiramente superiores, evidenciando que o aumento no teor de cimento não produziu um aumento de maneira proporcional na resistência. Os mesmos observaram que a resistência pode ser aumentada, de forma significativa, reduzindo-se o diâmetro máximo do agregado graúdo.

De acordo com Holm e Bremner (1994) os agregados leves com baixa resistência mecânica tem pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto.

Estudos mais detalhados da microestrutura do concreto mostram que, no caso de concreto leve, a zona de interfase entre a matriz e o agregado se comporta de forma completamente diferente da estrutura da matriz da pasta de cimento (argamassa) no concreto convencional. O contorno entre a matriz e o agregado leve tem forma e espessura distintas, medindo aproximadamente 10 μm de espessura, dependendo da região e localização ao longo da superfície do agregado. No concreto convencional, essa espessura varia de 10 μm a 50 μm .

• **Porosidade, umidade e absorção de água**

As características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem dos seguintes fatores: a) porosidade total; b) conectividade entre os poros; c) características da superfície do agregado; e d) umidade do agregado antes da mistura (Neville, 1997; Euro Light Con, 1998).

Em consequência da estrutura porosa do agregado leve, ele é capaz de absorver mais água do que os agregados convencionais. É importante que, no momento do preparo da mistura seja descontada a quantidade de água absorvida pelo agregado leve.

Testes de absorção de água após 24h, tendo como base a norma ASTM C127:2003, mostraram que os agregados leves absorvem de 5% a 25% em massa, o peso de agregado seco. Os agregados convencionais, de massa normal, apresentaram absorção de menos de 2% de umidade. Esta grande diferença da absorção de água entre os agregados leve e convencional se deve ao fato de que o agregado leve absorve água tanto superfície quanto no se interior das partículas.

• **Módulo de deformação**

De acordo com Holm e Bremner (1994), os agregados leves com baixa resistência mecânica têm pouca participação na transmissão das tensões internas no concreto. Assim, quanto maior for a diferença entre os valores do módulo de deformação do agregado e da pasta de cimento, maior será a diferença entre a resistência à compressão da pasta de cimento e do concreto. O aumento do módulo de deformação do agregado leve aumenta também os valores da resistência à compressão e o do módulo do de deformação do concreto (ROSSIGNOLO, 2009).

A variação do valor do módulo de deformação do concreto leve está entre 50% e 80% do valor do módulo de deformação do concreto com massa específica normal e, com resistência à compressão variando entre 20 MPa e 50 MPa. Essa relação também se aplica aos concretos com argila expandida brasileira (ROSSIGNOLO, 2005),

O valor do módulo de deformação dos agregados leves pode ser estimado segundo a Equação 1 (FIP, 1983), que relaciona o módulo de deformação E_c (MPa) e a massa específica aparente γ (kg/m³) do agregado leve. Segundo Holm e Bremner (1994), os valores do módulo de deformação dos agregados leves utilizados em concretos estruturais variam entre 10 GPa e 18 GPa.

$$E_c = 0,008 \cdot \gamma^2 \text{ (MPa)} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

Onde:

E_c = Módulo de deformação das partículas do agregado leve (MPa);
 γ =Massa específica aparente das partículas do agregado leve, (kg/m³)

2.3 Concreto leve

Rossignolo (2009), disserta que a primeira aplicação dos concretos com agregados leves foi no ano 1100 a.C., quando construtores pré-colombianos, originários da região da atual cidade de El Tajin, localizada no México, utilizaram uma mistura de pedra-pomes com um ligante à base de cinzas vulcânicas e cal para a construção de elementos estruturais.

A primeira aplicação do concreto leve estrutural em edifícios de múltiplos pavimentos ocorreu em 1929, na cidade de Kansas, na expansão do edifício de escritórios da Southwestern Bell Telephone Company, (ROSSIGNOLO, 2009), figura 2.1.

Segundo Metha e Monteiro (2008), a utilização de concreto leve, na construção da pista superior da ponte na baía de San Francisco - Oakland (EUA), proporcionou uma economia em torno de 3 milhões de dólares em aço. figura 2.2.



Figura 2.1: Southerwestern Bell Telephone Company
Fonte: Rossignolo, 2009.



Figura 2.2: Ponte na baía de San Francisco
Fonte: Rossignolo, 2009.

Os concretos leves se caracterizam pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais, consequência da substituição da parte dos materiais sólidos por ar ou pela substituição parcial dos agregados convencionais por agregados leves (ROSSIGNOLO, 2009).

Concreto estrutural leve é um concreto estrutural, considerando todos os aspectos, excetuando-se que o concreto é feito com agregados leves, com massa específica seca sendo aproximadamente igual a dois terços da massa específica do concreto convencional (CLARK, 2005).

De modo geral, os concretos leves são caracterizados por apresentar massa específica aparente abaixo de 2000 kg/m^3 , de acordo com a tabela 2.4.

Referência	Massa específica aparente (kg/m ³)
MN 35	1680 < γ < 1840
ACI 213R03 (2003)	1120 < γ < 1920
EUROCODE 2 (2007)	900 < γ < 2000
NS 3473 E (1998)	1200 < γ < 2200
CEB-FIP (1977)	γ < 2000
RILEM (1975)	γ < 2000

Tabela 2.4: Valores de referência da massa específica dos concretos leves estruturais.
Fonte: Rossignolo, 2009.

A ACI 213R (2003) especifica que o concreto leve estrutural deve apresentar massa específica entre 1120 MPa e 1920 MPa, devendo apresentar uma resistência à compressão acima de 17 MPa, aos 28 dias.

.Concreto com massa específica variando entre 300 kg/m³ e 2000 kg/m³, resistência à compressão em amostras cúbicas variando de 1 MPa a 60 MPa e condutividade térmica de 0,2 W/mK a 1,0 W/mK, são definidos como concretos leves (NEWMAN, 2005). O concreto convencional apresenta massa específica entre 2100 – 2500 MPa, e a resistência em amostra cúbica entre 15 MPa e 100 MPa e condutividade térmica de 1,6 W/mK a 1,9 W/mK.

A utilização dos concretos leves deve-se aos benefícios promovidos pela diminuição da massa específica do concreto, redução de esforços solicitantes, economia com formas e cimbramento, bem como a diminuição dos custos com transporte e montagem (ROSSIGNOLO, 2009).

Catoia (2012), elenca alguns benefícios obtidos proporcionados pela utilização do concreto leve estrutural como: redução entre 20% e 50% dos custos utilizado para transporte, por unidade de volume de concreto; diminuição do tempo de montagem de estruturas por volta de 25% a 50%; e possibilidade de execução de peças com maiores dimensões.

Neville (2015) ressalta que, nos concretos de densidade usual, o módulo de elasticidade da pasta de cimento é, geralmente, bem menor que o módulo dos agregados. Porém, no concreto estrutural leve, os valores do módulo de elasticidade das partículas do agregado leve e da pasta de cimento são bastante próximos resultando numa melhor aderência na zona de transição agregado-pasta.

A figura 2.3 ilustra a classificação estrutural dos concretos leves e suas massas específicas secas, relacionadas a utilização de cada tipo de agregado.

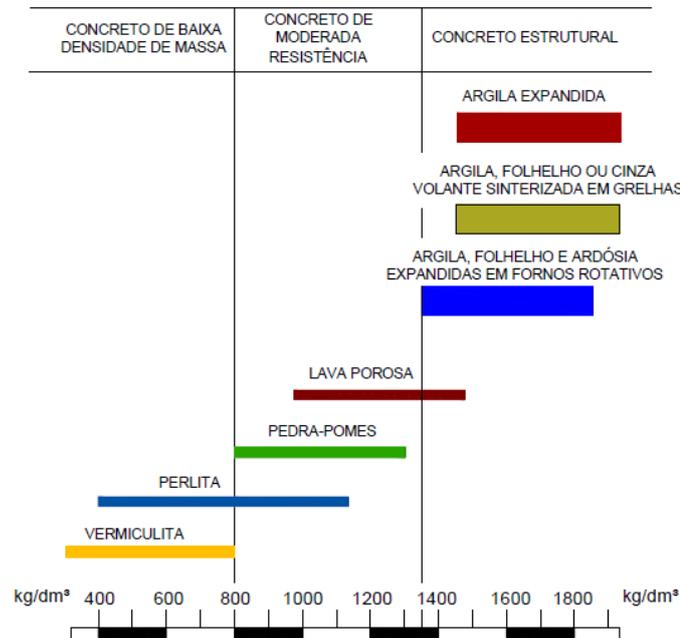


Figura 2.3: Classificação do concreto leve estrutural e suas massas específicas correspondentes.

Fonte: Neville, 1997

2.3.1 Propriedades físicas e mecânicas do concreto leve

Rosignolo (2009) afirma que são vários os fatores que influenciam as propriedades dos concretos leves no estado endurecido. As propriedades dos agregados influenciam diretamente na qualidade do concreto. Pode-se elencar: trabalhabilidade, resistência mecânica, propriedades térmicas, acústicas e resistência ao fogo, teor de absorção de água e porosidade.

Neste trabalho, serão analisados apenas os fatores relacionados aos agregados leves, isto é, as alterações provocadas nas propriedades dos concretos em função da substituição dos agregados tradicionais por agregados leves.

2.3.1.1 Resistência à compressão

A resistência do concreto está relacionada à tensão necessária para originar a ruptura, sendo determinada como a tensão máxima que a amostra de concreto pode tolerar. (METHA et al., 2008).

Avelino (2011) diz que os principais fatores que influenciam na resistência são o tipo de cimento, relação água/cimento, idade, temperatura, relação agregado/cimento e tamanho do agregado.

A resistência à compressão, a massa específica e a relação entre essas duas propriedades são os parâmetros mais utilizados na caracterização dos concretos leves estruturais, estando diretamente relacionados com o tipo e a granulometria do agregado leve utilizado. Por isso, concreto com agregados leves, utiliza-se mais eficientemente a resistência mecânica potencial da argamassa em função da maior similaridade entre os valores do módulo de deformação do agregado e da argamassa e da melhor qualidade da zona de transição pasta-agregado (ROSSIGNOLO, 2009).

2.3.1.2 Porosidade e absorção de água

As características de porosidade e absorção de água dos agregados leves afetam significativamente as propriedades dos concretos no estado fresco e o processo de hidratação do cimento. A velocidade e a quantidade de água absorvida pelos agregados leves dependem dos seguintes fatores: porosidade total, conectividade entre os poros, características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura (NEVILLE, 2015).

Para agregados leves com altos valores de absorção de água, recomenda-se a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar a formação de bolhas de ar ao redor do agregado. Contudo, apesar da pré-saturação dos agregados aumentar a absorção final de água dos agregados, observa-se a redução da absorção de água após a mistura (ROSSIGNOLO, 2009). A absorção de água dos agregados leves apresenta alguns aspectos positivos, como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, com a redução do efeito parede. Além disso, a água absorvida pelo agregado leve beneficia a "cura interna" do concreto (BAUER, 2008).

2.4 Propriedades acústicas do concreto

A poluição sonora é um problema permanente para os habitantes das zonas urbanas e industriais, mas, muitas vezes, não era adequadamente abordada por regulamentos de construção. Materiais densos são frequentemente usados como revestimento externo como um meio de impedir transmissão de som para ambientes internos, neutralizando os efeitos negativos que a exposição ao ruído pode causar, como problemas de saúde, redução da privacidade e distúrbios do sono.

Para promover a redução de ruído em edificações, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) incluiu mudanças na ABNT NBR 15575:2013, a qual estabelece critérios para desempenho acústico, como a inclusão de camadas entre os elementos construtivos. Estas mudanças motivaram o desenvolvimento de sistemas de

isolamento acústico na construção civil brasileira, principalmente quanto ao uso de novos materiais na produção de concretos especiais (CORREDOR-BEDOYA et al., 2017).

A transmissão sonora é uma propriedade acústica que está diretamente relacionada à espessura e a densidade do concreto. Mesmo para espessuras relativamente delgadas, a densidade do concreto convencional pode ser suficiente para refletir a maior parte do som. Pesquisas anteriores definiram o concreto como um bom isolante, podendo refletir até 99% da energia sonora. No entanto, este tipo de concreto é um absorvedor de som pobre, que pode levar ecos para dentro de espaços fechados (HOLMES et al., 2014).

A fim de melhorar as propriedades acústicas, como atenuação e absorção acústica, em elementos cimentícios, diversas pesquisas, como a de Aliabdo et al. (2015) e Carbajo et al. (2015), têm incorporado agregados leves a estas misturas, como a argila expandida e resíduos de pneus inservíveis, obtendo resultados expressivos frente às características acústicas.

Agregados leves, apesar de apresentarem propriedades mecânicas limitadas, surgem no mercado como produtos a serem aplicados em concretos não estruturais, além de contribuir para a destinação correta de resíduos inertes, sendo materiais capazes de promover o melhoramento das propriedades acústicas, quando comparado aos agregados convencionais, como o basalto (HOLMES et al., 2014).

Diante do exposto, faz-se necessário um estudo aprofundado das propriedades acústicas dos concretos elaborados nesta pesquisa. Os subitens a seguir descreverão as propriedades de absorção e atenuação acústica, bem como as principais técnicas utilizadas para suas medições.

2.4.1 Absorção acústica

A capacidade do material para absorver o som pode ser medida usando o coeficiente de absorção acústica. Materiais tipicamente utilizados para absorver o som são fibrosos, como as lãs, ou porosos, como espumas, apresentando características de leveza, não possuindo características estruturais (COLOM et al. 2013; CARBAJO et al., 2015).

Nestes materiais, a absorção ocorre pela dissipação da energia sonora por atrito, devido ao movimento das partículas no interior do material, quando da passagem da onda sonora. Um material bom absorvente é aquele que permite às partículas do ar penetrar e se movimentarem em seu interior. Assim, pode-se concluir que a

maximização da absorção sonora requer uma resistência ótima à passagem do som através do material (BISTAFA, 2011).

2.4.2 Atenuação acústica

O coeficiente de atenuação acústica é determinado medindo a redução da amplitude de uma onda, que se propaga através do material pelo efeito combinado de espalhamento e absorção. Segundo Albano et al. (2005), a atenuação é, geralmente, proporcional à mudança de amplitude da onda plana em decomposição.

O espalhamento das ondas sonoras está relacionado com o tamanho dos materiais cristalinos, enquanto a absorção das ondas é intrínseca a fenômenos como a viscosidade, densidade, energia cinética, condutividade térmica, entre outros (ALIABDO et al., 2015).

Um dos métodos mais usuais para avaliar a atenuação acústica é pelo teste ultrassônico. Esta é uma técnica não destrutiva, onde a medida da onda sônica é utilizada para calcular as velocidades longitudinais e transversais e, o coeficiente de atenuação acústica. O pulsador de onda ultrassônica possui dois conjuntos de transdutores de ondas, longitudinais e transversais, nos quais são aplicados acoplantes, a fim de melhorar a aderência entre os transdutores e a amostra. A figura 2.4 ilustra um aparelho de ultrassom genérico e seus transdutores.

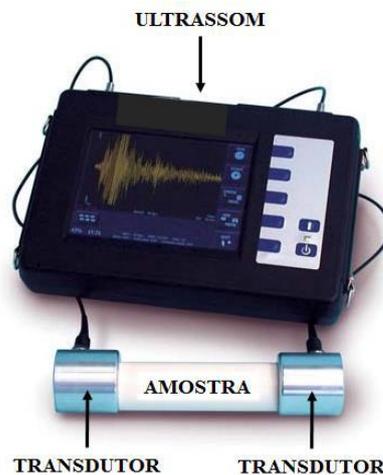


Figura 2.4: Aparelho de ultrassom e, seus transdutores posicionados na amostra.

Fonte: www.novadidacta.com.br

Para calcular as velocidades longitudinais e transversais dessa propriedade no concreto, pode-se considerá-lo como sendo um material isotrópico, ou seja, possui as mesmas propriedades físicas, independentemente da direção considerada.

Por meio de transdutores², transversais ou de cisalhamento, para o cálculo das velocidades das ondas de compressão e cisalhamento, pode-se direcionar a polarização das ondas, isto é, a direção da vibração das partículas. Assim, pode-se polarizar direções diferentes e, depois a média aritmética dos valores obtidos pode ser calculada. Este procedimento é feito para cálculos de velocidade transversal e atenuação do som relacionada a ondas de cisalhamento (*ondas S*). Para as ondas longitudinais, também conhecidas como ondas de pressão (*ondas P*), é utilizado o transdutor de onda longitudinal e a direção da propagação da onda é a mesma da polarização das ondas (GONÇALVES et al., 2011). Segundo Aliabdo e.t al. (2015), o coeficiente de atenuação do som pode ser calculado por,

$$\alpha = -\frac{20}{h} \log \frac{A_f}{A_i} \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde A_i é a amplitude inicial da onda e A_f é a amplitude final da onda depois de viajar a distância h .

2.5 Propriedades térmicas do concreto

Um dos grandes desafios atuais é a minimização do consumo de energia, a qual está diretamente correlacionada com valores econômicos e ambientais. O setor da construção civil, por ser considerado um dos setores que mais crescem rapidamente, tem um papel importante no consumo global de energia. Neste contexto, é de suma importância, para esta indústria, um crescimento sustentável, considerando a responsabilidade ambiental, social e econômica (PESSETTE et al., 2012; OKTAY et al., 2015).

Dos elementos construtivos o concreto é aquele que mais se destaca, devido a suas propriedades e ampla versatilidade. Portanto, visando melhorar a qualidade de vida das pessoas e a eficiência energética das edificações, devem-se melhorar as características de isolamento térmico dos concretos, visto a relevância do seu uso (SUKONTASUKKUL, 2009).

A propriedade térmica é definida como uma medida de resposta de um dado material à aplicação de calor. À medida que um material absorve energia sob a forma de

² O transdutor emite um impulso ultrassônico que atravessa o material a inspecionar e reflete nas interfaces, originando o que chamamos ecos. Estes ecos retornam ao transdutor e gera, no mesmo, o sinal elétrico correspondente.

calor, sua temperatura e dimensões aumentam. Dentre as propriedades termofísicas de uma estrutura de construção destacam-se a condutividade térmica, calor específico, densidade e difusividade térmica (OKTAY et al., 2015).

Em particular, é desejável um baixo valor da condutividade térmica devido à capacidade associada de fornecer isolamento térmico. Os valores desta propriedade são fornecidos pela ABNT NBR 15220:2005, a qual correlaciona estes valores com a massa específica, conforme ilustra a tabela 2.5.

Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)
2200-2400	1,75
1600-1800	1,05
1400-1600	0,85
1200-1400	0,70
1000-1200	0,46

Tabela 2.5: Correlação entre valores de massa específica e de condutividade térmica. Fonte: ABNT NBR 15220:2005.

As propriedades térmicas de um concreto são fortemente afetadas pelo tipo e proporcionamento dos agregados, teor de umidade e adições minerais. No entanto, os agregados geralmente constituem cerca de 70-80% em volume do concreto, ou seja, se espera que os agregados tenham uma influência maior que os demais parâmetros (OKTAY et al., 2015).

Conforme observado por Sacht et al., (2010), as propriedades térmicas dos concretos leves são significativamente diferentes das observadas nos concretos tradicionais, principalmente devido ao ar aprisionado na estrutura celular de alguns agregados leves, como a argila expandida, que reduz a transferência e a absorção de calor em relação aos agregados tradicionais.

Além disso, Shah et al. (2014), Aliabdo et al. (2015) e Oktay et al. (2015) observaram que a utilização da borracha reciclada de pneus como agregado leve em concretos torna-se atrativa, proporcionando sistemas mais leves, melhorando seu isolamento térmico, minimizando o consumo de agregados naturais, além de contribuir para a resolução de um dos problemas ambientais mais cruciais, a deposição dos resíduos sólidos.

Frente ao exposto, a construção civil cada vez mais vem se preocupando com estudos das propriedades térmicas dos concretos especiais. Normas de desempenho

térmico buscam aprimorar a qualidade requerida de elementos de concreto, a partir do estabelecimento de recomendações para avaliação de tais propriedades.

De acordo com Sukontasukkul (2009) e Pessette et al. (2012), a maneira mais eficiente para a determinação da condutividade térmica é pelo método da placa quente protegida (ABNT NBR 15220:2005 – Parte 4), o qual envolve a medição do gradiente de temperatura médio estabelecido sobre o corpo-de-prova, a partir de certo fluxo de calor e em condições de regime permanente.

A partir da obtenção do valor da condutividade térmica da peça de concreto é possível caracterizar outras propriedades térmicas, como a resistência térmica. Tais valores permitem a classificação dos concretos de acordo com as prescrições estabelecidas pela ABNT NBR 15220:2005, que ainda relaciona os valores obtidos no ensaio térmico com a propriedade de massa específica, sendo esta relação de extrema importância no estudo de concretos produzidos com agregados leves.

2.5.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade depende da estrutura física da matéria, a níveis atômicos e moleculares, que por sua vez está relacionada ao seu estado físico. Esta propriedade assume um papel crítico no desempenho de materiais em muitas aplicações (OKTAY et al. 2015).

Baixos valores de condutividade térmica são exigidos quando se pretende minimizar as perdas de calor. Por outro lado, a transferência de calor de uma região do material para outra ocorre mais facilmente em materiais de condutividade térmica mais alta (GHEDAN et al. 2011).

Assim sendo, dados confiáveis de condutividade térmica são essenciais na seleção de um material para que ele possa ter o melhor desempenho possível em uma dada aplicação. Esta propriedade determina a faixa de temperatura de trabalho de um dado material, sendo um importante parâmetro em problemas envolvendo transferência de calor. A equação de Fourier (Eq. 2.1), obtida empiricamente, diz que o calor (q) é proporcional à variação de temperatura ao longo de uma direção, chamada de gradiente térmico (dT/dx) e, à área (A) perpendicular à direção do calor. A constante de proporcionalidade representa a condutividade térmica (k) do material (INCROPERA et al., 2003).

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Considere uma barra metálica, isolada termicamente e com temperaturas mantidas constantes, T_1 e T_2 em suas extremidades. Considerando que T_1 é maior que T_2 , o calor percorre a direção x , mostrada na figura 2.5. Isto explica o sinal negativo na equação de Fourier, pois o calor sempre vai na direção da menor temperatura. Mantendo-se T_1 e T_2 constantes durante um longo tempo e considerando que a barra é de um material homogêneo, ou seja, sua condutividade térmica não se altera ao longo de seu comprimento ou da área da seção transversal, o calor que atravessa a barra se torna constante e o regime permanente é atingido.

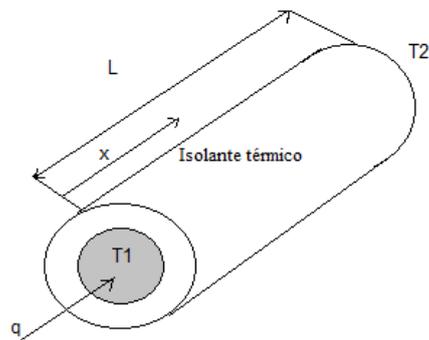


Figura 2.5: Barra metálica isolada termicamente, com temperaturas constantes.

Fonte: Incropera, et al., 2003.

2.5.1.1 Medição da condutividade térmica utilizando o condutímetro K30

O princípio de funcionamento do fluxímetro K30 consiste na aplicação de uma densidade de fluxo de calor constante e através da zona central de medição de um fluxímetro e da zona central do corpo de prova em forma de placas, determinando a densidade de fluxo de calor que atravessa o corpo de prova a partir do sinal fornecido pelo fluxímetro e da constante de calibração do fluxímetro, após validação das condições de regime permanente e do cálculo da resistência térmica do corpo de prova pelo quociente da diferença de temperatura entre as faces do corpo de prova e da densidade de fluxo de calor (ABNT NBR 15220:2005).

A determinação da condutividade térmica em um condutímetro K30 se inicia com a introdução de um corpo de prova (placa) em uma câmara de processamento onde duas placas do fluxímetro exercem uma pressão na face superior e inferior do corpo de prova gerando um gradiente de térmico pelo aquecimento da placa superior e um esfriamento da placa inferior por dissipação.

A figura 2.6 mostra de forma esquemática a medição da condutividade térmica no condutivímetro K30.

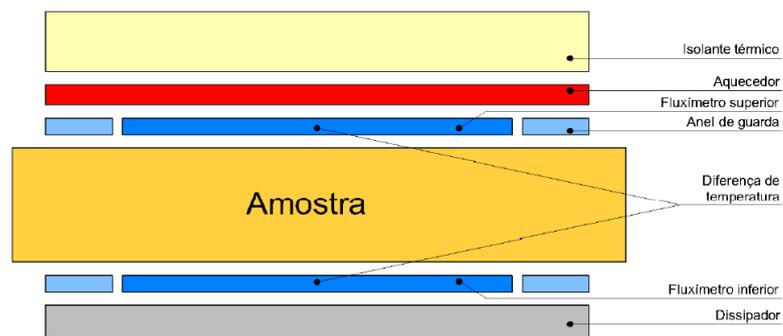


Figura 2.6: Esquema de um Fluxímetro K30.

Autor: Antonio Carlos (2018).

2.6 Microestrutura do concreto

A resistência da matriz da pasta de cimento depende, essencialmente, das forças de atração de Van der Waals, ou seja, a resistência será maior quanto mais compacta for a pasta e, quanto menos cristalinos forem os produtos de hidratação. Desta forma, a zona de transição na interface apresenta resistência mecânica mais baixa do que a da matriz da pasta de cimento (GOLEWSKI et al., 2014).

Os fatores que mais influenciam na baixa resistência mecânica da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento são os grandes cristais de hidróxido de cálcio orientados preferencialmente, o elevado volume de poros e a presença de microfissuras (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

De acordo com Gopi et al. (2015), a zona de transição pode sofrer modificações de inúmeras maneiras. A mais efetiva é utilização da incorporação de adições de minerais tais como, sílica ativa, que contribui na melhora do desempenho das propriedades relacionadas à resistência e durabilidade do concreto

Em concretos produzidos com agregados leves porosos, ocorre a redução da espessura da zona de transição na interface, em função da diminuição da relação água/cimento da pasta nessa região, ocasionada pela absorção de água dos agregados. Este efeito é denominado, por alguns pesquisadores, como filtragem ou densificação (ROSSIGNOLO, 2009).

2.6.1 Análise por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de análise da microscopia de concretos por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) vem sendo utilizada por diversos pesquisadores, devido aos excelentes resultados obtidos por meio das imagens geradas, auxiliando em

melhores diagnósticos da zona de transição entre agregado leve-matriz (JALAL et al., 2012; MOHAMMED et al., 2013; GOPI et al., 2015).

Sendo assim, o uso da técnica de MEV é importante e necessário e, seu princípio de funcionamento ocorre quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, originando diferentes sinais, como elétrons secundários e retroespalhados. Estas respostas podem ser detectadas independentemente e, depois de transformadas em sinais elétricos, permite a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional (ROSSIGNOLO, 2009).

Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes da colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido na amostra. Seu registro possibilita a caracterização da topografia da amostra, com identificação do tamanho e textura superficial. Os elétrons retroespalhados, por sua vez, são partículas de alta energia espalhados pela amostra. Neste caso, a imagem é formada pelo contraste devido aos números atômicos das diferentes fases que compõem a amostra (BORJA, 2011).

Na microscopia eletrônica de varredura, quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e, depois de transformadas em sinais elétricos, permite a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional.

2.7 Smart Buildings

2.7.1 Histórico

O conceito de Prédio Inteligente ou Smart Buildings originou-se no início dos anos 1980. Em 1984, por exemplo, um artigo do New York Times descrevia que os construtores estavam criando “uma nova geração de edifícios que pensa por si mesmo chamado de prédios inteligentes” (SINOPOLI, 2010).

O termo “*smart buildings*” foi usado primeiramente em uma definição dada pelo Intelligent Building Institute (IBI) de Washington, DC, eles classificam essas construções como algo que pode integrar vários sistemas para administrar de forma eficiente os recursos de forma coordenada para maximizar o desempenho técnico, economia de custos operacionais e de investimentos além de possuir flexibilidade (DEREK et al., 1997).

2.7.2 Conceitos

Segundo o Smart Buildings Institute (2015), um edifício concebido para ser inteligente deve aumentar seu desempenho e facilitar as operações de manutenção durante seu ciclo de vida. O objetivo primário dessa construção é minimizar os custos de longo prazo sobre o seu ciclo de vida para proprietários, ocupante e o meio ambiente. Em um prédio de alto desempenho onde todos os componentes do edifício são integrados de forma a trabalharem juntos. Isso melhora o desempenho operacional, aumenta o conforto e satisfação dos ocupantes e provém aos usuários da construção com sistemas, tecnologias e ferramentas para administrar e minimizar o consumo de energia.

Os edifícios inteligentes também podem ser caracterizados como “*Green Build*” quando se leva em conta o desempenho da construção utilizando o conceito de “edifício sustentável”, ou seja, a eficiência energética, arquitetura bioclimática, uso racional da água, materiais sustentáveis, conforto no ambiente construído, processos e tecnologias construtivas sustentáveis, gestão de resíduos de obra e resíduos gerados na operação do edifício, responsabilidade social, entre outros (RODRIGUES et al., 2009).

A diferença essencial entre um edifício inteligente seja de habitação, indústria, comércio ou serviços, e um edifício que utiliza tecnologias tradicionais, está na forma como todas as funcionalidades se integram e complementam, fluindo a informação entre o sistema de segurança, os equipamentos de climatização, os eletrodomésticos, o controle de acesso, a rega automática, a rede informática, a rede telefônica, o sistema de difusão digital de áudio e vídeo, etc. (ALVES et al., 2003).

Rodrigues e Perensin (2009) dizem que a busca da sustentabilidade nas edificações é uma constante cada vez mais presente nas construções do mundo inteiro, no Brasil ela se mostra como um paradigma que se populariza cada vez mais. Todos os setores ligados ao setor de construção civil já demonstram interesse, que enxergam tanto os benefícios ecológicos quanto sociais e econômicos.

2.8 Ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas respeitam todas as leis que regem a teoria dos fenômenos ondulatórios, como: reflexão, refração, difração, superposição, interferência, entre outros (JÚNIOR, 2006). As ondas eletromagnéticas viajam em alta velocidade, que depende diretamente do meio de propagação, e dependendo de sua frequência podem atravessar diferentes obstáculos físicos, tais como gases, água, paredes, superfícies condutoras, dentre outras (PAUL, 2006). O comportamento de interação das ondas eletromagnéticas com o meio depende de sua frequência. As aplicações práticas

das ondas eletromagnéticas são divididas em faixas de frequência bem definidas. A divisão do espectro de frequência e algumas aplicações práticas podem ser observadas na figura 2.7.

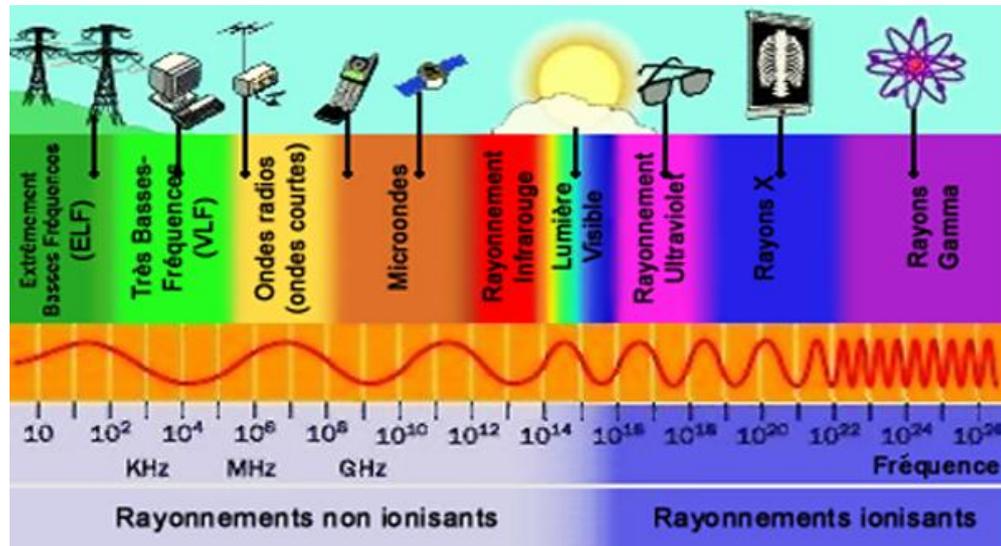


Figura 2.7: Espectro eletromagnético e suas aplicações.
Fonte: Astronoon.

Ondas eletromagnéticas caracterizam-se pelo seu comprimento (λ) m, frequência (Hz) e energia E (J ou V), sendo os três parâmetros inter-relacionados (MARTINS, 2000).

A existência das ondas eletromagnéticas. Previstas pelas equações de Maxwell, foram estudadas inicialmente por Heinrich Hetz (SADIKU, 2008). Seybold (2005) afirma que todas as ondas reais são esféricas, mas em uma distância suficiente da fonte, a onda esférica pode ser bem aproximada para uma onda plana com componentes de plano linear, sobre uma extensão limitada. Em ondas planas, campo elétrico, campo magnético e a direção da propagação são todas mutuamente ortogonais.

2.8.1 Propagação da onda eletromagnética

Nas últimas décadas houve um aumento significativo no conhecimento dos modos de propagação e nos efeitos que os meios exercem sobre as características das ondas eletromagnéticas. A atenuação no espaço livre, a propagação por múltiplos percursos e as interações que a onda mantém com obstáculos são fenômenos mais relevantes associados à propagação em ambientes indoor (interiores).

As ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a mesma velocidade de propagação da luz (MAXWELL, 1883), e que a propagação da luz é um caso particular de propagação de ondas eletromagnéticas em geral (MAXWELL, 1954).

A propagação da onda eletromagnética nos modelos teóricos é descrita pelas equações de Maxwell. Essa teoria afirma que um campo magnético variável no tempo produz campo elétrico e vice-versa. Assim, as ondas eletromagnéticas são capazes de se propagar.

As experiências de Heinrich Hertz, em 1889, confirmaram o que previam os trabalhos de Maxwell (CORSON et al., 1970). Daí as interações de campos elétricos e magnéticos convencionam-se chamar de onda eletromagnética, figura 2.8.

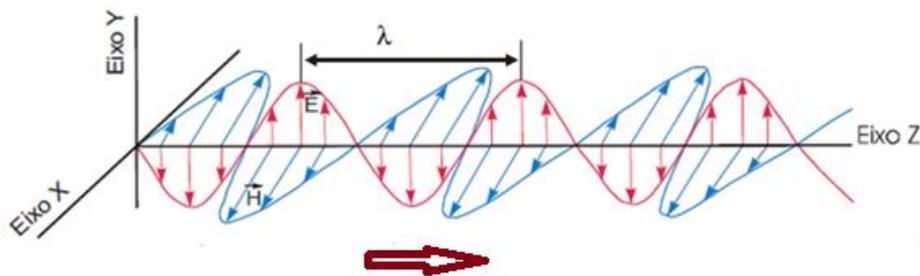


Figura 2.8: Representação de uma onda eletromagnética propagando-se para a direita.

As ondas eletromagnéticas diferem das ondas mecânicas longitudinais (ondas P) e das ondas sísmicas transversais (ondas S), que mostram sempre a mesma natureza nas duas direções de vibrações no espaço. Essas ondas mecânicas transversais interagem com a matéria causando deslocamentos cisalhantes na partícula, enquanto as ondas eletromagnéticas formam campos elétricos e campos magnéticos alternados interagindo com a matéria.

As ondas eletromagnéticas tem uma velocidade que varia conforme o meio. Teoricamente, a velocidade de uma onda eletromagnética, no vácuo, é de 3×10^8 m/s; porém, a melhor medida experimental foi $2,99792458 \times 10^8$ m/s (Halliday et al., 1993).

2.8.1.1 Formas de propagação e fenômenos de incidência de uma onda eletromagnética

A propagação de sinal em espaço livre ocorre quando um sinal é emitido uniformemente em todas as direções em um local onde não estão presentes quaisquer materiais ou sinais emitidos que não seja o do próprio sinal emitido de uma antena em todas as direções (FARAHANI, 2008). No espaço livre, quando a distância de uma antena é dobrada, a potência do sinal será reduzida 4 vezes, a chamada Lei dos Quadrados. O autor ainda cita que ao se aumenta a frequência de um sinal, mais se reduz a potência do sinal a uma mesma distância da antena. Partes de um sinal

transmitido serão absorvidos em diferentes materiais no entorno, outras partes serão refletidas múltiplas vezes de vários objetos e versão tardia do sinal poderão ser acrescidas ao sinal original.

A existência de elementos próximos à linha de visada entre antenas, como edificações, vegetação e relevo, permite ainda sim a recepção do sinal, mesmo com certa atenuação (QUEIROZ, 2011).

A propagação indireta descreve a propagação terrestre onde a linha de visão (line of sight) está obstruída. Nesse caso, a reflexão e difração em volta de uma edificação podem fornecer sinal com força suficiente para a realização da comunicação.

Frequências HF podem penetrar facilmente em edificações e vegetação densa. VHF e UHF também conseguem, porém com menor grau. Simultaneamente, VHF e UHF terão grande tendência de difratar em volta ou refletir/dispersar em objetos no caminho. Para Queiroz (2011), além das características físicas da região, as propagações das ondas eletromagnéticas podem sofrer variações ao longo do tempo, com a temperatura, pressão e umidade.

Quando um sinal atravessa um objeto, sendo obstruído pelo mesmo no seu caminho entre origem e destino da comunicação, este sinal sofre com uma redução do seu nível de potência, correspondendo estas perdas, às perdas de penetração.

A perda de penetração é inclusive dependente da constituição do material o qual compõe o objeto. Obstáculos como paredes e janelas, por exemplo, apresentam valores diferentes de perdas de penetração. Assim, procura-se demonstrar para efeitos de informação, através da tabela 2.6, os valores relativos às perdas para as frequências de 2,4G Hz medidos pelo *European COST 231(1990)* para os obstáculos mais comuns em ambientes *indoors* e *outdoors*. Os valores em foram obtidos para frequência de 2,4 GHz (DOHLER, 1999).

Obstáculo	Perda adicional (dB)
Espaço livre	0,0
Janela (tinta não metálica)	3,0
Janela fina (madeira)	5,0 a 8,0
Parede fina (madeira)	5,0 a 8,0
Parede média (madeira)	10,00
Parede espessa (aprox. 15 cm)	15,0 a 20,0
Piso/teto espesso)	15,0 a 20,0
Piso/teto muito grosso	20,0 a 25,0
Parede espessa (aprox. 30 cm)	20,0 a 25,0

Tabela 2.6: Perdas de penetração em obstáculos, para a frequência operacional de 2,4 GHz. Fonte: DOHLER, 1999.

Além da reflexão e difração, existe uma variedade de fenômenos que ocorrem quando uma onda eletromagnética incide em uma superfície. Esses fenômenos dependem da polarização da onda, da geometria da superfície e das características da superfície relativa ao comprimento da onda eletromagnética. São eles:

Pode-se dizer que o multipercurso é originado pelo fenômeno da reflexão, da difração, da refração e do espalhamento do sinal em propagação. Estes fenômenos, quando combinados, acabam por fazer com que o sinal percorra diversos caminhos da origem até o destino, cada qual levando um tempo diferente até atingir o receptor. No receptor, estes sinais são combinados e podem interferir destrutivamente (degradando o nível de sinal no receptor) ou construtivamente (melhorando o nível do sinal), pois se trata de uma soma vetorial. Os sinais que chegam ao receptor podem ainda estar contendo, quando existir, com o sinal de visada direta.

- **Reflexão** – ocorre quando a onda rádio incide sobre um objeto de proporções maiores que o comprimento da onda incidente, e que por suas características constituintes, reflete o sinal em várias direções. Pode haver ou não penetração de parte do sinal incidente, dependendo da constituição da superfície refletora. Existem dois tipos de reflexão, a especular e a difusa, que possui as características do espalhamento.

- **Difração** – esta ocorre quando uma onda em propagação é obstruída por um objeto em sua extremidade para altas frequências, porém para baixas frequências o sinal é desviado de sua trajetória original atingindo uma região que antes não seria coberta pelo mesmo, ou seja, provavelmente seria uma região de sombra. Este mecanismo de propagação faz uso do princípio de Huygens onde cada ponto de uma frente de onda se comporta como uma fonte pontual irradiando para todas as direções.

- **Refração** – este efeito ocorre quando uma onda penetra em um meio cuja densidade é diferente do meio em que se propagava e tem sua trajetória alterada e seu nível de potência reduzido, pois parte do sinal será refletido. Cada material tem seu coeficiente de reflexão e o de refração.

- **Espalhamento** – quando uma onda incide sobre um objeto cujas dimensões são da mesma ordem ou menores que o comprimento de onda do sinal incidente, ocorre à atenuação no sinal e reflexão do mesmo em diversas direções. É por este motivo que as comunicações satélite que utilizam faixas de frequências bastante elevadas, como as bandas Ku e Ka, sofrem as atenuações provocadas por chuvas e por gases respectivamente, dentre outros males por assim dizer. Em regiões do globo terrestre, como a América do Sul, não é empregada a comunicação satélite para bandas Ka e

superiores principalmente devido a grande incidência de chuvas e umidade que interrompem a comunicação. O mesmo motivo retardou a entrada de sistemas em banda Ku, que somente se tornou realidade após anos de desenvolvimento tecnológico.

A figura 2.9 procura exemplificar estes efeitos de forma bem direta.

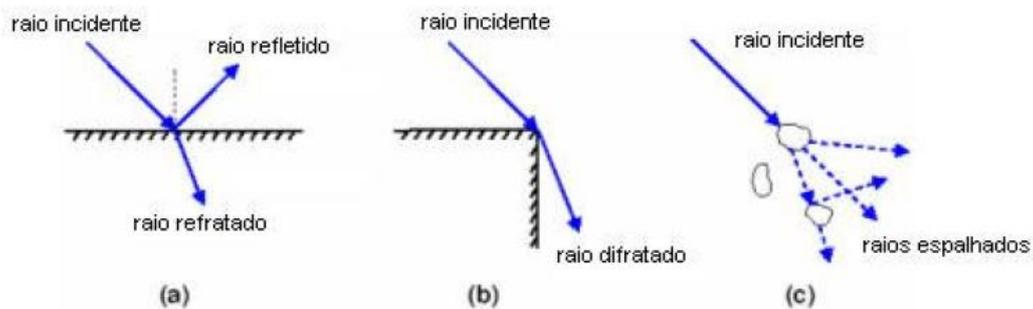


Figura 2.9: (a) Reflexão e Refração, (b) Difração, (c) Espalhamento.

Fonte: Matos, 2006.

Efeito da umidade

A grande incidência de chuvas eleva a umidade local e este efeito natural causa maior perda de potência no sinal quando o mesmo se propaga ao longo de um ambiente carregado de umidade, pois faz com que se aumente o coeficiente de absorção do mesmo. Objetos como aquários, quando presentes, são bastante prejudiciais para a propagação das ondas, pois a água é um grande absorvedor de energia. Sendo assim, objetos úmidos, causam uma perda de penetração cerca de 10% (BreezeNET PRO.119, 1998) maior que o valor quando os mesmos estão mais secos. Ainda, quanto maior a frequência de operação, maior será a perda também diante deste efeito, desta maneira, sistemas *wireless* em 5,2 GHz tendem a apresentar maior susceptibilidade ao efeito da umidade no ambiente.

Um efeito interessante e que talvez mereça algum comentário no momento, diz respeito à propagação *outdoor* onde uma fonte externa origina sinais que chegam a ambientes internos, ou *indoors* em edifícios ou construções. A penetração em andares baixos talvez receba bastante obstrução devido aos objetos próximos ao solo, mas para andares mais elevado, caso haja um receptor próximo a uma janela, por exemplo, a perda por penetração será menor nestes andares, pois os mesmos estarão mais livres de obstruções.

2.8.1.2 Equipamentos utilizados para medição de ondas eletromagnéticas

Seybold (2005), diz que a caracterização de um material como condutor ou dielétrico é baseada na propriedade dominante do material.

As ondas eletromagnéticas podem ser medidas com diversos equipamentos, como os analisadores de espectros, receptores de banda larga, antenas de medição ou medidores de sinal ou de modulação.

Analisador de espectro

Os analisadores de espectro detectam a intensidade da radiação, a potência do campo, a frequência e a modulação com grande precisão e seletividade. Esses aparelhos permitem a visualização precisa, no monitor ou conectado a um computador quais picos em uma ampla variação de frequência se produzem em cada espectro e relacionar exatamente os valores medidos com determinada emissoras, (IBN, 2011). Ao mesmo tempo em que indicam a intensidade do campo, o tipo de modulação dentre outros dados.

Linhas de transmissão

Frenzel Jr. (2008) cita que a configuração de condutores de uma linha de transmissão é tal que os campos elétricos e magnéticos ficam contidos internamente.

A linha de transmissão propicia o confinamento dos campos eletromagnéticos ao dielétrico existente entre os condutores (WENTWORTH, 2009).

Antenas

Para Sadiku (2008), ocorre irradiação quando as ondas eletromagnéticas se propagam para longe das fontes que as originaram.

A antena é um elemento fundamental em qualquer sistema de comunicação sem fios por ondas eletromagnéticas, e funciona como interface entre os elementos do sistema que guiam a onda e o meio no qual ela se propaga. Servem tanto para transmissão como para recepção de ondas, e suas dimensões físicas são normalmente de ordem de grandeza do comprimento de onda associada associado à frequência do sinal a ser transmitido ou captado (DODE, 2010).

Conforme Farahani (2008), a impedância equivalente de uma antena varia com a frequência, e como um receptor é projetado para ter um desempenho ótimo com uma determinada impedância de uma antena. É importante saber se a impedância da antena é próxima o suficiente para o valor recomendado pelo fabricante.

2.8.1.3 Métodos para análise da atenuação eletromagnética em sistemas construtivos

(a) Seidel e Rapaport

Apresentaram em seu trabalho análises estatísticas de medição de perdas no caminho em uma frequência de 914 MHz dentro de quatro edificações, e então classificaram as medições baseadas nas envoltórias físicas do espaço. Um modelo estatístico de uma forma simples de “d” é usado para relatar perda média para o registro da distância onde a distância d é a distância entre o transmissor e o receptor medido em três direções, e n é a média exponencial da perda, sendo $n=2$ em espaço aberto.

(b) Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos

O Programa de Atenuação da Construção Nº 3, intitulado Atenuação do Sinal Eletromagnético em Materiais de Construção, publicou uma série de dados referentes à atenuação de ondas eletromagnéticas em vários sistemas construtivos. Segundo Stones (1997), este experimento apresenta dados sobre:

- Atenuação de potência em função da espessura do elemento construtivo;
- Valores da permissividade elétrica e constantes dielétricas de um determinado material, em função da frequência;

Stones (1997) analisou vários materiais, para cada material foram produzidos amostras com espessuras para medir a atenuação em função da distância de penetração. Cada amostra foi colocada em uma área de teste especial que consiste de antenas tipo corneta. Estas estavam dispostas a 2 m de distância com uma barreira de isolamento de metal entre as antenas para eliminar os sinais refletidos. O obstáculo de isolamento continha um vão em seu centro onde as amostras eram posicionadas.

Ensaio preliminares com sistemas de radar mostram problemas devido aos múltiplos sinais distorcendo a transmissão do sinal (STONES, 1997). Estudos mostram que o escudo eletromagnético, com 2,50 m² e 3 mm de espessura do painel feito de alumínio bloqueia qualquer múltiplo sinal refletido, exceto aqueles originados das reflexões internas dentro da espessura da amostra, como mostra a figura 2.10.

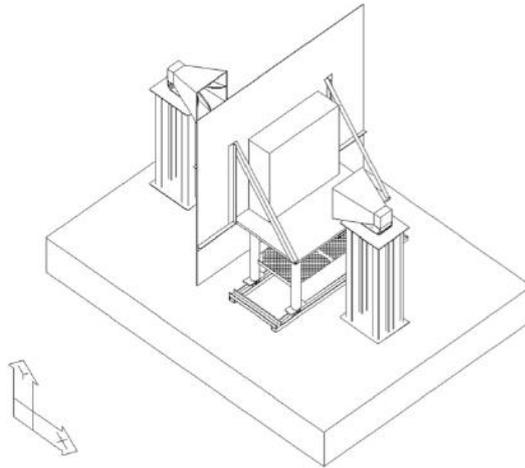


Figura 2.10: Vista isométrica do teste para atenuação de ondas eletromagnéticas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos.
Fonte: Stone (1997).

O escudo eletromagnético tem um vão de 914mm^2 no centro, cujo sinal transmitido pode passar sem obstrução, como mostra a figura 2.11. A difração de múltiplos sinais originada pelas bordas do escudo alcança o receptor posterior, sendo facilmente eliminada.

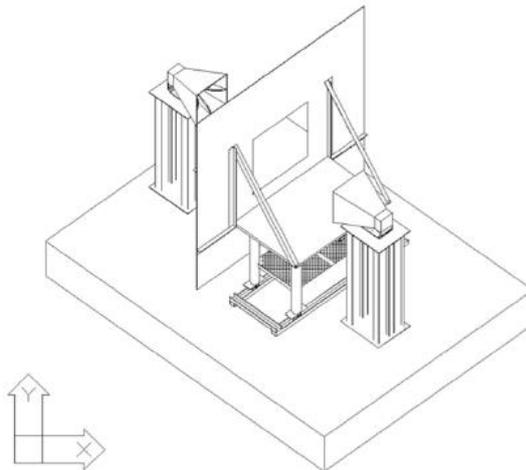


Figura 2.11: Vista isométrica do teste de ondas eletromagnéticas do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos, aonde o vão central no escudo é mostrado.
Fonte: Stone (1997).

(c) Wilson, 2002

Seu experimento investiga a propagação de ondas de rádio frequência (RF) através de diferentes sistemas construtivos dentro de uma faixa de uma faixa de frequência. O mesmo analisou e comparou a energia transmitida, refletida e absorvida

em duas bandas de frequência especificadas para sistemas WLAN nos padrões da do IEEE 802.11:

- 2.2 GHz a 2.4 GHz ISM
- 5.15 GHz a 5.354 GHz UNII

Foram realizados testes nos materiais compostos, tanto em ambiente construído como modelos construídos em laboratório para determinas e modelar as perdas através destas estruturas. Estes ensaios são considerados como em espaços abertos, realizados com antenas tipo corneta. Analisaram-se em espaço fechado os materiais: vidro, alvenaria de tijolo cerâmico, paredes de concreto, paredes de drywall.

Em ambiente construído foram analisados os materiais: pisos de edifícios e, paredes internas e externas.

(d) Sagnard e El Zein (2003)

Investigou como diferentes paredes e diferentes materiais afetam a atenuação eletromagnética nas diferentes frequências de 433 MHz , 868 MHz, 2,4 GHz e 5,5 GHz. Segundo os autores, foram analisadas paredes de concreto, madeira e chapa de gesso com diferentes espessuras: 0,15 m, 0,20 m, 1,25 m, e 0,40 m. Foram realizadas análises através de modelos numéricos de propagação, denominados Multi-Channel-Coupling. A simulação foi em ambientes construídos,

(e) Shariatzadeh et al. (2019)

Na avaliação da propagação de rádio frequência dentro de paredes feitas com diferentes materiais, os autores utilizaram uma estrutura virtual de teste, em formato de colmeia, em função da sua simetria geometria, ilustrada na figura 2.12.

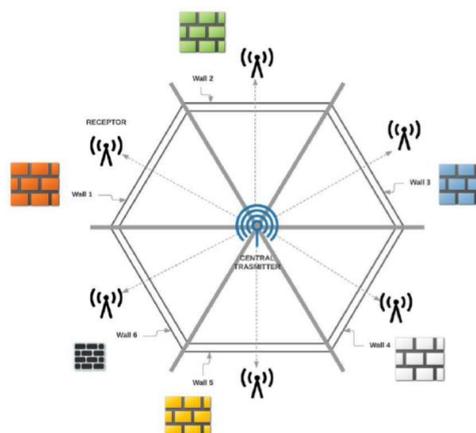


Figura 2.12: Estrutura de teste de material de parede em forma de colmeia.
Fonte: Shariatzadeh, Cleonilson Protásio e Orlando Baiocchi.

Para o experimento foram construídas seis paredes laterais de 12 cm de espessura, todas feitas com materiais diferentes (madeira, drywall em camadas, vidro, tijolo, concreto e metal) e nome a de parede 1 até a parede 6. Na parte central da colmeia foi colocado um transmissor de RF transmitindo uniformemente o sinal em todas as direções. Externamente a estrutura, por trás de cada parede, foi colocada um receptor de RF para receber o sinal do transmissor de RF. O transmissor de RF e o receptor de RF ficaram a uma distância é de cerca de 10 m, um do outro.

Utilizou-se um transmissor TX de 2,40 GHz, com potência de saída específica (20 dBm ou 0,1 Watts). Os níveis de energia recebidos de cada receptor RX foram determinados por simulação.

Micheli et al. (2015), realizou um método de coleta de atenuação para a faixa de frequência de 700 MHz – 5 GHz onde a atenuação da parede do edifício e as perdas internas afetam fortemente o nível dos campos eletromagnéticos. Nesse estudo, não foram realizados o detalhamento sobre a atenuação eletromagnética de paredes construídas com diferentes materiais e técnicas de alvenaria, ou seja, o autor dá ênfase aos muros de edifícios construídos há muitos séculos em Roma na Itália, utilizando de composição o concreto, que representam a maioria dos edifícios urbanos na Europa. Para a coleta de dados utilizou da distância fixa entre a antena TX e a RX, variando a profundidade de inserção entre 5 cm a cada vez na estrutura.

3.0 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os ensaios para a caracterização dos materiais foram realizados no LABEME- Laboratório de Ensaio de Materiais e Estrutura do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba-UFPB.

Os materiais utilizados para a produção dos compósitos cimentícios foram:

- Cimento CPV ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial);
- Argila expandida de granulometria 0 a 2,50 mm (AE-2,50 mm lamelar). Equivalente a granulometria da areia média (CINEXPAN, 2020);
- Argila expandida de granulometria 0 a 5,00 mm (AE- 0500). Equivalente a granulometria da areia grossa (CINEXPAN, 2020);

As argilas foram adquiridas junto à empresa CINEXPAN Indústria e comércio Ltda, instalada na cidade de Várzea Paulista, interior de São Paulo. O cimento CPV ARI foi cedido pela fábrica Elizabeth Cimentos, localizada no Município de Alhandra, Estado da Paraíba. A água utilizada foi a fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba- CAGEPA.

A figura 3.1 mostra os materiais utilizados nesta pesquisa.

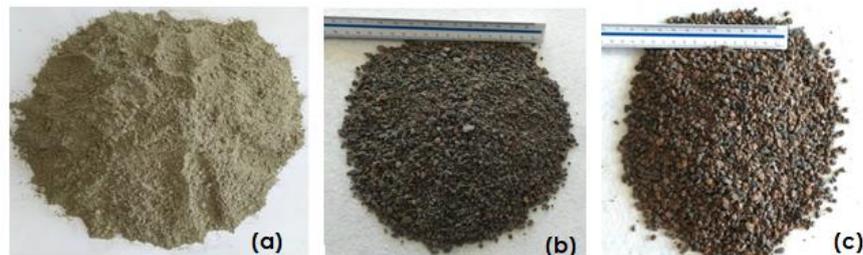


Figura 3.1: Materiais utilizados na pesquisa: (a) Cimento Portland CPV ARI (b) Argila expandida 2,50 mm e, (c) Argila expandida 5,00 mm.

A qualificação e quantificação dos materiais constituintes do compósito cimentício leve foram avaliadas seguindo uma metodologia que teve como base as normas da ABNT NBR NM 45, 52 e 248, para concreto leves. Os materiais utilizados foram:

Posteriormente a aquisição dos materiais em quantidade suficiente para a realização do estudo, seguiu-se com a caracterização desses materiais.

Para a caracterização dos materiais foram realizados os ensaios de:

- Massa unitária e volume de vazios ABNT NBR NM 45:2006);
- Massa específica e absorção ABNT NBR (NM 52:2009 e NM 30:2001);
- Porosidade (Método de Pascal)

- Determinação granulométrica (ABNT NBR 248:2003), e foram classificados de acordo com a (ABNT NBR 7211:2005).

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento

No desenvolvimento da pesquisa utilizou-se o Cimento Portland CPV ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial), sendo o mesmo normatizado pela ABNT NBR 5733:1991. A escolha por utilizar esse tipo de cimento se deu pelo fato do seu elevado emprego na indústria de pré-moldado, por possuir uma alta resistência inicial o que permite uma desforma rápida e, também, por possuir um baixo percentual de adição de minerais.

Na tabela 3.1 apresentam-se as características e propriedades desse cimento, conforme informações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tipo de cimento	CPV-ARI
Perda ao fogo (%)	5,02
Resíduos insolúveis (%)	1,09
SiO ₂ (%)	17,59
Al ₂ O ₃ (%)	3,95
Fe ₂ O ₃ (%)	2,19
CaO (%)	58,11
MgO (%)	6,15
SO ₃ (%)	4,03
Na ₂ O (%)	0,17
K ₂ O (%)	1,04
P ₂ O ₅ (%)	0,44
Blaine (cm ² /g)	5590
Início de pega (min)	150
Fim de pega (min)	205
Resistência à compressão (MPa)	37,20 – 3 dias
	40,90 – 7 dias
	50,10 – 28 dias

Tabela 3.1: Características e propriedade do cimento CPV ARI.

Fonte: Elizabeth Cimentos Ltda.

3.1.2 Argila expandida

Utilizou-se como agregado miúdo as argilas expandidas de granulometria 2,50 mm (AE-2.50 mm) e a argila expandida de granulometria 5,00 mm (AE-0500), equivalentes a granulometria da areia média e grossa, respectivamente. A argila expandida foi adquirida junto a empresa CINEXPAN - Indústria e Comércio de Argila expandida, estabelecida na cidade de Várzea Paulista, no Estado de São Paulo.

3.1.3 Água

A água potável utilizada, foi a fornecida pela concessionária de água do Estado da Paraíba - CAGEPA.

3.2 Métodos

3.2.1 Composição granulométrica dos agregados

A curva granulométrica originada pelo ensaio de composição do agregado é uma linha que une os pontos que representam o resultado da análise granulométrica, ou seja, as aberturas das malhas nas abscissas e a porcentagem acumulada nas ordenadas (ABNT NBR NM 248:2003).

A dimensão máxima característica é uma grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa (NBR NM 248:2003).

O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100 (ABNT NBR NM 248:2003). Uma forma de se interpretar é que este valor representa uma dimensão média ponderada do agregado, e quanto maior estes valores maiores serão suas partículas (ABNT NBR NM 248:2003). Através do módulo de finura, é possível classificar o agregado miúdo, utilizando quadro 3.1.

Grossa	De 2,71 a 4,02
Média	De 2,11 a 3,38
Fina	De 1,71 a 2,85
Muito fina	De 1,35 a 2,22

Quadro 3.1: Classificação da areia quanto ao módulo de finura.

Fonte: Bauer

3.2.2 Composição granulométrica da argila expandida 2,50 mm

A argila expandida foi quarteada previamente, em conformidade com a NBR NM 27:2000, com a finalidade de homogeneizar o material. Para a realização do ensaio de granulometria, a argila expandida de 2,50 mm foi quarteada para posteriormente passar por uma série de peneiras formadas pelas peneiras 4.80 mm, 2.40 mm, 1.2 mm,

0.600 μm , 0.300 μm , 0.150 μm e o fundo da série de peneiras. O material e os equipamentos estão ilustrados na figura 3.2.



Figura 3.2: Material e equipamentos necessários para realizar o ensaio:
(a) material quarteado; (b) Série de peneiras e agitador mecânico.

A composição granulométrica foi obtida conforme prescrição da ABNT NBR NM 248:2003. Essa norma rege o método para se determinar a composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto. A tabela 3.2 mostra os resultados obtidos em ensaio.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Massa acumulada (%)	
			Retida	Passante
4.8	3.50	0.54	0.54	99.48
2.4	142.30	21.80	22.43	77.57
1.2	155.70	23.95	46.38	53.62
0.6	105.90	16.29	62.68	37.32
0.3	74.20	11.42	74.09	25.91
0.15	50.80	7.82	81.91	18.09
Fundo	117.6	18.09		
Total	650.00	100		
Diâmetro máximo (mm)		4.80		
Módulo de finura		2.88		
Classificação granulométrica		Média		

Tabela 3.2: Composição granulométrica da Argila 2,50 mm (AE-2,50 mm).

3.2.3 Composição granulométrica da argila expandida 0500

Para o ensaio de granulometria da argila expandida 5,00 mm utilizou-se a mesmos procedimentos descritos para o ensaio anterior para argila expandida 2,50 mm. Os valores obtidos estão mostrados na tabela 3.3.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	Porcentagem retida (%)	Massa retida acumulada (%)	
			Retida	Passante
4.8	18.00	2.86	2.86	97.14
2.4	371.40	57.14	60.00	40.00
1.2	204.03	31.39	91.39	8.61
0.6	40.70	6.26	97.65	2.35
0.3	9.00	1.38	99.04	0.96
0.15	3.09	0.48	99.51	0.49
Fundo	3.1	0.49		
Total	650.00	100		
Diâmetro máximo (mm)		4.80		
Módulo de finura (%)		4.50		
Classificação granulométrica		Grossa		

Tabela 3.3: Composição granulométrica da Argila 5.00 mm (AE-0500).

3.2.4 Massa unitária e volume de vazios - Método C (ABNT NBR NM 45:2006)

Massa unitária de um agregado é a relação entre sua massa e seu volume sem compactar, considerando-se também os vazios entre os grãos. É utilizada para transformar massa em volume e vice-versa (ANNT NBR NM 45:2006).

Para o cálculo da massa unitária dos agregados miúdos, uniformizado pela norma, procedeu-se da seguinte maneira:

- Determinar a massa do recipiente vazio (m_r), em kg. Balança de precisa de 0,1 g;
- Enchê-lo até transbordar, usando concha de agregados e despejando o material de uma altura de 5 cm da borda superior do recipiente. Evitar a segregação do agregado;
- Nivelar a camada superior com a régua metálica e, em seguida medir a massa do recipiente mais o material (m_{ar}), em kg;
- Nota: Ensaio com o material seco, o mesmo deverá ser secado na estufa até massa constante normalmente 24 + 4 horas.

A determinação do valor da massa unitária se deu pela fórmula:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde: ρ_{ap} = massa unitária do agregado, em kg/m³;
 m_{ar} = massa do recipiente mais com o material;
 m_r = massa do recipiente vazio, em kg;
 V = volume do recipiente, em m³.

O índice de vazios foi determinado pela fórmula,

$$E_V = \frac{100 \times [(\gamma_1 \times \rho_w) - \rho_{ap}]}{\gamma_1 \times \rho_w} (\%) \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde: E_V = índice de volume de vazios nos agregados, em porcentagem;

γ_1 = massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme NBR NM 52;

ρ_w = massa específica da água, em kg/m^3 ;

ρ_{ap} = massa unitária média do agregado, em kg/m^3 .

Na figura 3.3 pode-se ver o material e os equipamentos utilizados no ensaio de determinação da massa unitária e volume de vazios.

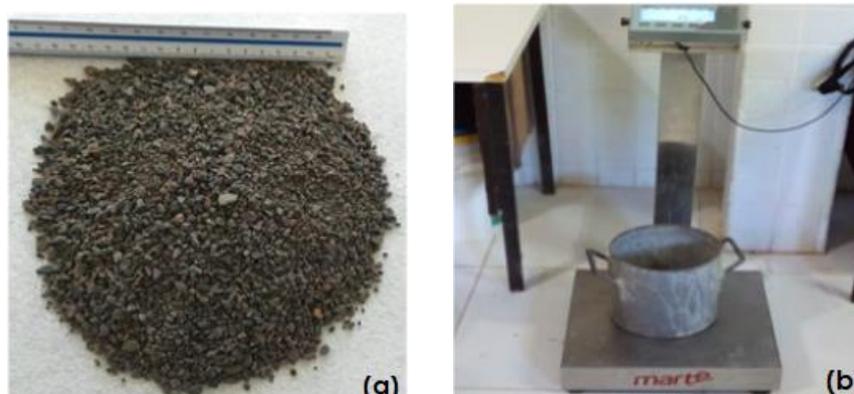


Figura 3.3: Material e equipamentos utilizados no ensaio para determinação da massa unitária e volume de vazios: (a) argila expandida; (b) balança de precisão e recipiente de volume conhecido.

Os resultados obtidos para a massa unitária e volume de vazios para a argila expandida 2,50 mm (AE-2,50 mm) estão apresentados na tabela 3.4.

MEDIÇÕES	Volume do recipiente (cm^3)	Massa da amostras (g)
1ª	18750,00	11800,00
2ª	18750,00	11800,00
3ª	18750,00	11900,00
Média	18750,00	11833,00
VALORES OBTIDOS		
Massa Unitária (g/cm^3)	631,00	
Volume de vazios (%)	55	

Tabela 3.4: Resultados obtidos em ensaio para determinação da massa unitária e índice de vazios para a argila expandida AE-2,50 mm.

Os resultados obtidos para a massa unitária e volume de vazios da argila expandida 5,0 mm (AE-0500) estão apresentados na tabela 3.5.

MEDIÇÕES	Volume do recipiente (cm ³)	Massa da amostras (g)
1 ^a	18750,00	12200,00
2 ^a	18750,00	12200,00
3 ^a	18750,00	12100,00
Média	18750,00	12166,00
VALORES OBTIDOS		
Massa Unitária (g/cm ³)	649,00	
Volume de vazios (%)	57	

Tabela 3.5: Resultados obtidos em ensaio para determinação da massa unitária e índice de vazios para a argila expandida AE-0500.

3.2.5 Massa específica e absorção de água do agregado miúdo (NBR NM 52:2009 e ABNT NBR NM 30:2001)

Para determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água pelo agregado miúdo, a pesquisa seguiu a norma, utilizando os seguintes procedimentos:

- a. Determinar imediatamente a massa de 500 g da amostra saturada superfície seca (sss) - m_s ;
- b. Colocar rapidamente a amostra (sss) no frasco de vidro (m_1);
- c. Colocar parcelas de água no frasco com amostra (sss), e em seguida mover o frasco de forma a eliminar bolhas de ar. Repetir esta operação até completar totalmente com água escoando pelo orifício da tampa;
- d. Colocar o frasco, a água e a amostra (sss) no banho com temperatura de 19 °C a 23°C por um período mínimo de 1 hora;
Nota: A temperatura da sala deve estar entre (25 + 2)°C ou (27 + 2) °C.
- e. Secar, com um pano, as paredes externas do frasco. Se baixar o nível de água no orifício da tampa, completar novamente com água;
- f. Determinar a massa do frasco, mais água, agregado e tampa (m_2).
- g. Retirar o agregado do frasco, em seguida secá-lo em estufa (100 + 5) °C até constância de massa, em aproximadamente 24 horas;
- h. Determinar a massa do agregado seco em estufa (m).

Massa específica (γ) - é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis à água.

$$\gamma = \frac{m}{(V - V_a) - \left(\frac{m_s - m}{\rho_a}\right)} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Onde: γ = Massa específica (g/cm³);

m = massa da amostra seca em estufa (g);

V = Volume do recipiente (cm³);

V_a = Volume de água adicionada ao frasco (cm³);

m = Massa do conjunto (recipiente + amostra) (g);

m_s = Massa da amostra na condição de saturada superfície seca, sss (g);

ρ_a = Massa específica da água – 1g/cm³.

Absorção (a)- é o aumento de massa do agregado devido ao preenchimento de seus poros permeáveis por água, expressa em porcentagem de sua massa seca. Todas as propriedades são importantes na dosagem de concretos.

$$a = \frac{m_s - m}{m} \times 100(\%) \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Onde: m_s = Massa da amostra na condição de saturada superfície seca, sss (g);

m = massa da amostra seca em estufa (g).

Na figura 3.4 pode-se ver o material e os equipamentos utilizados no ensaio de determinação da massa específica e absorção de água do material.



Figura 3.4: Material e equipamentos utilizados no ensaio para determinação da massa específica e absorção de água: (a) quarteamento do material; (b) material imerso em água; (c) becker graduado; (d) estado saturado de superfície seca (sss) do material ; (e) estufa para secagem do material.

Os resultados obtidos para a massa específica e absorção de água para argila expandida 2,50 mm (AE-2,50 mm) ensaio estão apresentados na tabela 3.6.

DADOS OBTIDOS EM ENSAIOS	
Massa da amostra seca em estufa – m (g)	431,70
Massa do recipiente + água – m ₁ (g)	657,60
Massa do recipiente+água+amostra - m ₂ (g)	1283,00
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO	
Massa específica (g/cm ³)	1,45
Absorção de água (%)	11,00

Tabela 3.6: Resultados obtidos em ensaio para determinação da massa específica e absorção de água para a argila expandida AE-2,50 mm.

Os resultados para a massa específica e absorção de água para argila expandida 5,0 mm (AE-0500) apresentados na tabela 3.7.

DADOS OBTIDOS EM ENSAIOS	
Massa da amostra seca em estufa – m (g)	467,50
Massa do recipiente + água – m ₁ (g)	1195,00
Massa do recipiente+água+amostra - m ₂ (g)	1546,80
RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO	
Massa específica (g/cm ³)	1,51
Absorção de água (%)	7,00

Tabela 3.7: Resultados obtidos no ensaio para determinação da massa específica e absorção de água para a argila expandida AE-0500.

4.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na figura 4.1 ilustra-se o fluxograma das etapas desenvolvidas na pesquisa.

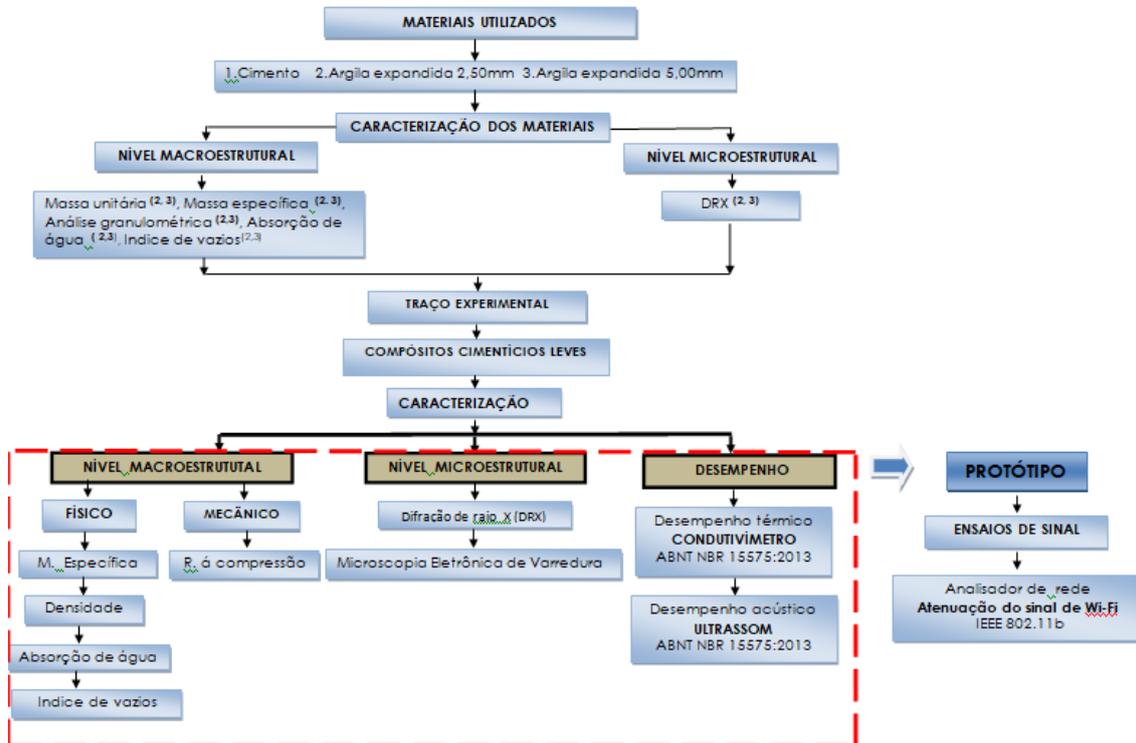


Figura 4.1: Fluxograma da pesquisa.

4.1 Metodologia

4.1.1 Design e modelagem do traço experimental

Finalizados os ensaios de caracterização dos agregados, deu-se início a produção experimental das argamassas. A figura 4.2 mostra o cronograma de execução para o traço experimental.

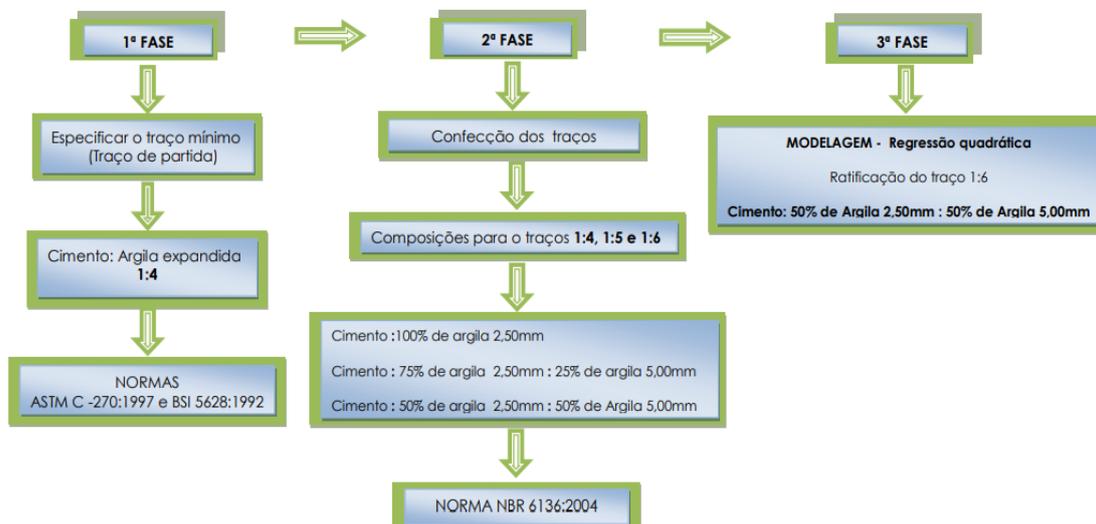


Figura 4.2: Design do traço experimental.

A dosagem da argamassa leve destinada ao esse estudo foi realizada no LABEME- Laboratório de Ensaios de Materiais e Estrutura do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba.

Os materiais utilizados para execução dos traços para a obtenção dos compósitos cimentícios leves foram: a argila expandida de granulometria 2,50 mm (AE-2,50 mm ,lamelar) e 5,00 mm AE-0500, adquiridas junto à empresa CINEXPAN; cimento Portland CPV ARI, produzido pela fabrica de cimento Elizabeth e, a água foi utilizada foi fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba-CAGEPA.

O traço 1:4 (cimento:argila) foi escolhido como o traço mínimo ou traço de partida para a confecção do compósito cimentício leve, constituído por cimento portland, argila expandida e água, obedecendo as normas BS-5628:1992 e ASTM C-270:1997.

Em um segundo momento foi executado algumas composições experimentais, substituindo-se a argila expandida AE-2,50mm (lamelar), nos os três traços (1:4, 1:5 e 1:6), por argila expandida de granulometria 5,00 mm. Para cada traço, com teor inicial de argila expandida 2,50 mm, de 100% em massa, foram realizadas substituições por argila expandida de 5,00 mm nos teores de TR 1 (100%), TR 2 (75%) e TR 3(50%). Dessas composições, resultaram nove composições (traços) em massa, como mostra a tabela 4.1. Todos os traços atingiram uma resistência à compressão em conformidade com a norma NBR 6136:2014.

Traço	Materiais	(% Percentual de substituição da argila 2,50 mm pela argila 5,00 mm)		
		0	25	50
1 : 4	Cimento	1,00	1,00	1,00
	Argila 2,50 mm	4,00	3,00	2,00
	Argila 5,00 mm	0,00	1,00	2,00
1 : 5	Cimento	1,00	1,00	1,00
	Argila 2,50 mm	5,00	3,75	2,50
	Argila 5,00 mm	0,00	1,25	2,50
1 : 6	Cimento	1,00	1,00	1,00
	Argila 2,50 mm	6,00	4,50	3,00
	Argila 5,00 mm	0,00	1,50	3,00

Tabela 4.1: Composições obtidas (traços).

Os valores obtidos para a resistência à compressão para os traços (composições) 1:4, 1:5, e 1:6 apresentaram uma redução das mesmas, com o decréscimo do consumo de cimento.

A definição do traço para fabricação do compósito cimentício pré-moldado leve foi subsidiado por um modelo numérico de regressão quadrática, evitando, portanto, o desperdício de tempo, de material. O gráfico e a equação do modelo são mostrados na figura 4.3.

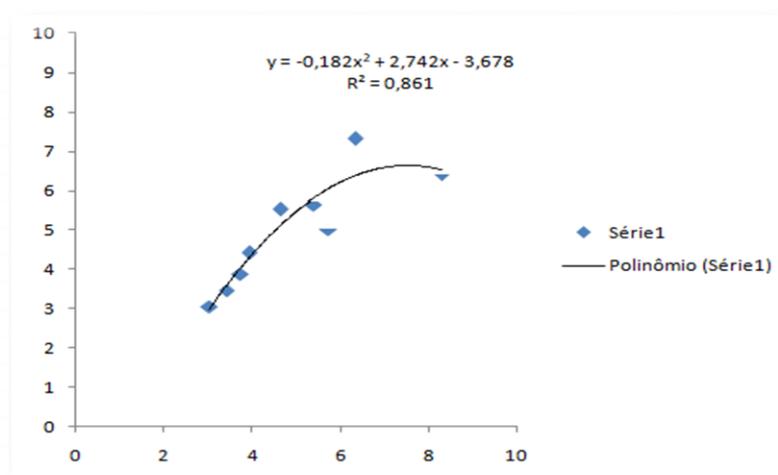


Figura 4.3: Modelo numérico de regressão quadrática.

A equação abaixo, fornecida pelo modelo numérico, mostra a dependência da resistência à compressão das variáveis: traço e proporção de argila expandida AE 2,50 mm de (lamelar) e AE-0500.

$$RC = (\beta_1 \cdot X_1) + (\beta_2 \cdot X_2) + (\beta_3 \cdot X_3) + (\beta_4 \cdot X_1^2) + (\beta_5 \cdot X_1 \cdot X_2) + (\beta_6 \cdot X_1 \cdot X_3) \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde: RC : Resistência à compressão;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$: Coeficientes determinados pelo modelo;

X_1 : Traço (composição);

X_2 : Proporção de argila expandida de granulometria 2,50 mm(lamelar);

X_3 : Proporção de argila expandida de granulometria 5,00 mm.

Como consequência, dos resultados da resistência á compressão, calculada pelo modelo de regressão, o traço 1:6, com proporções: 1 de Cimento: 50% de argila expandida 2,50 mm: 50% de argila 5,00 mm) foi ratificado, pois apresentou maior resultado para a resistência à compressão em conformidade com a norma NBR 6136:2001, e o menor consumo de cimento dentre as três composições (traços).

A tabela 4.2 mostra os valores de resistência à compressão obtida em laboratório, do traço de partida(mínimo)1:4 até o traço 1:6 (Cimento: argila expandida). A partir do traço 1:7, os valores para as resistências à compressão foram calculadas pelo modelo de regressão. Pode-se observar na tabela o declínio da resistência à compressão à medida que se diminui o consumo de cimento, O modelo de regressão referendou essa tendência, ratificando o comportamento observado em laboratório quanto aos resultados obtidos para a resistência a compressão, evitando a execução de novos traços.

REGRESSÃO QUADRÁTICA				
	X1	X2	X3	RC
1 : 4	0,25	100,00	0,00	4,63
1 : 4	0,25	50,00	50,00	6,33
1 : 4	0,25	75,00	25,00	8,28
1 : 5	0,20	100,00	0,00	3,94
1 : 5	0,20	50,00	50,00	5,40
1 : 5	0,20	75,00	25,00	5,72
1 : 6	0,17	100,00	0,00	3,10
1 : 6	0,17	50,00	50,00	3,79
1 : 6	0,17	75,00	25,00	3,48
1 : 7	0,14	100,00	0,00	1,58
1 : 7	0,14	50,00	50,00	2,11
1 : 7	0,14	75,00	25,00	1,84
1 : 8	0,13	100,00	0,00	0,62
1 : 8	0,13	50,00	50,00	0,97
1 : 8	0,13	75,00	25,00	0,79
1 : 9	0,11	100,00	0,00	-0,45
1 : 9	0,11	50,00	50,00	-0,27
1 : 9	0,11	75,00	25,00	-0,36

Tabela 4.2: Resultados obtidos pelo modelo de regressão quadrática.
Fonte: Autor da pesquisa.

A mistura dos materiais, cimento e argila expandida, foi realizada manualmente, com a argila úmida imersas em água por um período de 24 horas, agindo como reservatório de água, promovendo a cura interna.

4.1.2 Moldagem e cura dos corpos de prova - ABNT NBR 7215:2016

As argilas expandidas utilizadas em cada traço foram previamente pesadas, e imersas em água por um período de tempo de 24 horas com o objetivo de melhorar a trabalhabilidade da mistura.

As argilas forma imersas em água, posteriormente colocadas sobre uma peneira para que o excesso de água livre fosse escoado. Em seguida o material foi colocado em um bandejão de zinco, onde se adicionou o cimento e realizou-se a mistura manual do material. Todo o procedimento está ilustrado na figura 4.4.



Figura 4.4: Sequência para a execução da modelagem dos corpos de prova:
 (a) quarteamento do material, após pesado; (b) imersão do material em água por 24 horas; (c) escoamento do excesso de água; (d) mistura do material; (e) moldagem dos corpos de prova.

Para agregados leves com altos valores de absorção de água, recomenda-se a pré-saturação para evitar prejuízo da trabalhabilidade do concreto no estado fresco e evitar a formação de bolhas de ar ao redor do agregado. Contudo, apesar da pré-saturação dos agregados aumentar a absorção final de água dos agregados, observa-se a redução da absorção de água após a mistura (ROSSIGNOLO, 2009).

Foram moldados quatro corpos de prova em forma metálica cilíndrica de dimensões 50 mm x 100 mm, para cada composição (traço), totalizando 12 corpos de provas. Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e, em seguida, submetidos à cura a seco. Após 28 dias, foram realizados os ensaios de resistência à compressão desses corpos de prova.

5.0 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES

5.1 Metodologia

5.1.1 Resistência à compressão simples

Os corpos de provas das foram moldados em formas metálicas cilíndricas de dimensões 50 mm x 100 mm. Moldou-se uma série de quatro corpos de prova, pra as três composições (traço): Cimento: 100% de argila expandida 2,50 mm (lamelar), Cimento: 75% de argila expandida 2,50 mm (lamelar) e 25% de argila expandida de 5,00 mm, Cimento: 50% de argila expandida de 2.50 mm (lamelar) e 50% de argila expandida de 5,00 mm. No total foram feitos 12 corpos de prova, desmoldados e após 28 dias de cura a seco, os corpos de prova foram rompidos para determinação da resistência à compressão dos mesmos, dentro do recomendado pela ABNT NBR 7215:1996. As etapas executadas para a determinação da resistência à compressão estão mostradas na sequência de imagens da figura 5.1.



Figura 5.1: Determinação da resistência à compressão dos corpos de prova dos compósitos cimentícios leves: (a) mistura do material; (b) moldagem dos corpos de prova; (c) desmoldagem dos corpos de prova; (d) capeamento dos corpos-de-prova; (e) rompimento dos corpos de prova.

5.1.2 Massa específica, absorção de água e índice de vazios (ABNT NBR 9778:2005, (Modificada em 2009))

Para realização destes ensaios foram utilizadas três amostras de concreto cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada mistura. Os ensaios foram realizados após 28 dias de cura a seco, e em conformidade com a norma.

A amostra foi colocada a na estufa e mantê-la à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas. Determina e registrar a massa da amostra (m_s), em seguida faz-se a imersão da amostra em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante 72 horas. Passadas às 72 horas, colocar a amostra em um recipiente cheio de água, que deve ser progressivamente levada à ebulição, a qual deve começar depois de 15 minutos e antes de 30 minutos. A ebulição deve ser mantida por um período de 5 horas, mantendo aproximadamente constante o volume da água. A seguir, deixar a água esfriar naturalmente até a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Determinar e registrar a massa com auxílio de balança hidrostática (m_i).

Determinadas as massas necessárias, foi possível calcular o índice de vazios (I_v), a porosidade total (P_{total}), a absorção por imersão ($Ab_{imersão}$), e a massa específica da amostra (ME).

Os valores das características físicas foram obtidos através das expressões:

$$Ab_{imersão} = \frac{m_{sat}-m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{Equação 5.1})$$

$$I_v = \frac{m_{sat}-m_s}{m_{sat}-m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 5.2})$$

$$ME = \frac{m_s}{m_{sat}-m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 5.3})$$

$$P_{total} = \frac{m_{sat}-m_s}{V_t} \times 100 \quad (\text{Equação 5.4})$$

Onde: m_s é a massa seca da amostra; m_i é a massa imersa da amostra e m_{sat} é a massa saturada da amostra e V_t é o volume total da amostra ($196,0 \text{ cm}^3$).

A figura 5.2 mostra os materiais e equipamentos necessários para a realização do ensaio.

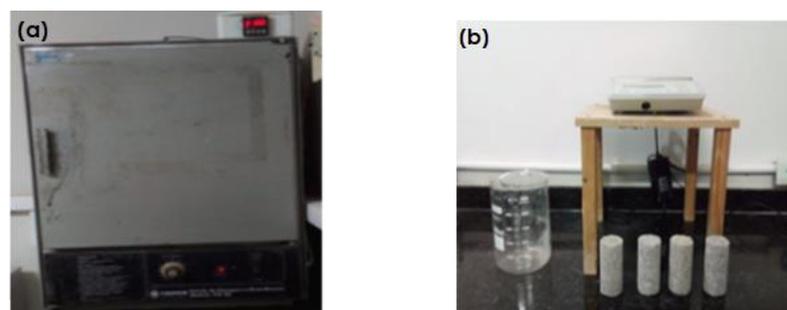


Figura 5.2: Corpos de provas e equipamentos necessário para determinação da massa específica dos compostos cimentícios leves: (a) estufa; (b) becker graduado, balança de precisão e corpos de prova.

5.1.3 Porosidade

Owens (2005) define como poros os espaços vazios (de ar) existentes no interior das partículas dos agregados e, os vazios, são os espaços intersticiais entre as partículas do agregado. A porosidade total é a soma dos poros (vazios) internos dos agregados e dos espaços intersticiais entre as partículas.

Em virtude de possuir uma estrutura celular porosa, o agregado leve, é capaz de absorver mais água do que o agregado normal.

Testes de absorção, após 24 horas, seguindo a norma ASTM C127, mostram que os agregados leves geralmente absorvem de 5% a 25%, em massa, o peso do agregado seco, variando segundo o sistema de poros do agregado. Se contrapondo, a maioria dos agregados de peso normal absorve menos que 2% de umidade. Dada esta grande diferença, deve-se considerar que o agregado leve absorve água tanto no interior das partículas como na superfície, ao passo que o agregado convencional a absorção se concentra somente na superfície.

5.1.4 Condutividade térmica

Baixos valores de condutividade térmica são exigidos quando se pretende minimizar as perdas de calor. Por outro lado, a transferência de calor de uma região do material para outra ocorre mais facilmente em materiais de condutividade térmica mais alta (GHEDAN et al., 2011).

Para determinar a condutividade e a resistência térmica foi utilizado Método do Condutímetro K30, mostrado na figura 5.3. Esse equipamento é recomendado pela ABNT NBR 15220-5:2005 para medição da condutividade térmica, através da simulação de uma diferença de temperatura entre as faces maiores de placas planas testadas, medindo o fluxo de calor que passa através da amostra.

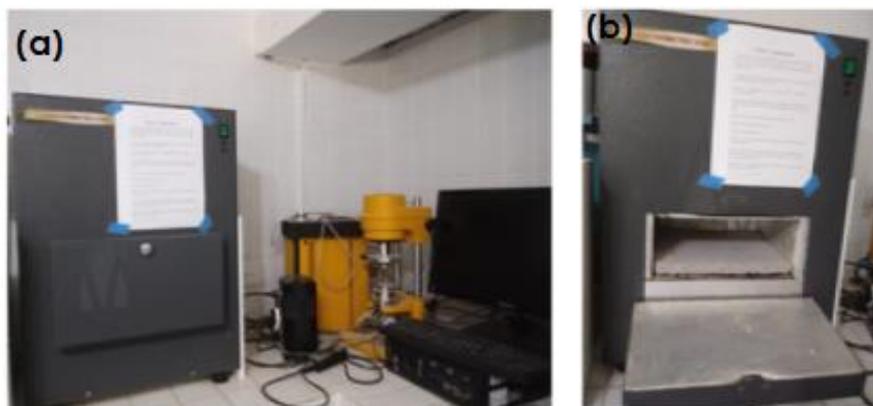


Figura 5.3: (a) Condutímetro K30; (b) câmera para inserção da placa.

Três placas de 30 cm x 30 cm x Y cm, com a espessura Y variando para cada placa. As placas foram moldadas para os traços TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 3(50%) (Cimento:argila expandida). Após 28 dias de cura os corpos de prova foram submetidos a testes de condutividade térmica no condutivímetro K30, no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas - LABEME, UFPB.

A medição no Condutivímetro K30 é realizada, iniciando pela colocação do corpo de prova (placa) em uma câmara de processamento, onde duas placas do fluxímetro são pressionadas sobre a face superior e inferior do corpo de prova, gerando um gradiente térmico pelo aquecimento da placa superior e resfriamento da placa inferior por dissipação.

5.1.5 Coeficiente de atenuação sonora

Um dos métodos mais usuais para avaliar a atenuação acústica é pelo teste ultrassônico (Figura 5.4). Esta é uma técnica não destrutiva, onde a medida da onda sônica é utilizada para calcular o coeficiente de atenuação acústica. O pulsador de onda ultrassônica possui dois conjuntos de transdutores de ondas, longitudinais e transversais, nos quais são aplicados acoplantes, a fim de melhorar a aderência entre os transdutores e a amostra.

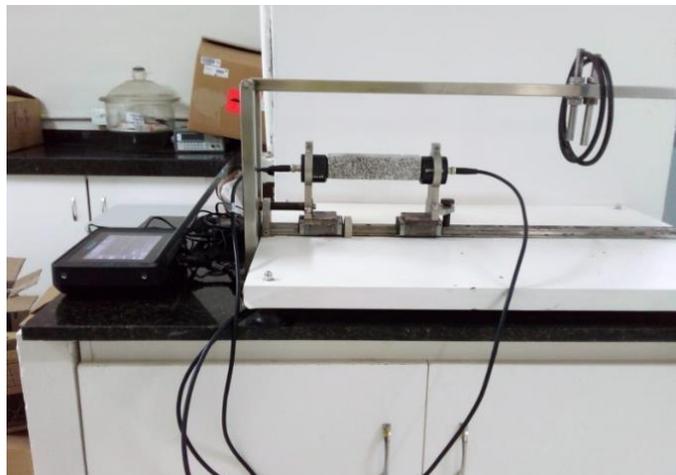


Figura 5.4: Ensaio utilizando o equipamento de ultrassom.

Para promover a redução de ruído em edificações, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) incluiu mudanças na NBR 15575:2013, a qual estabelece critérios para desempenho acústico, como a inclusão de camadas entre os elementos construtivos. Estas mudanças motivaram o desenvolvimento de sistemas de isolamento acústico na construção civil brasileira, principalmente quanto ao uso de novos materiais na produção de concretos especiais (CORREDOR-BEDOYA et al., 2017).

As velocidades de pulso ultrassônico das barras foram obtidas utilizando-se o equipamento PUNDIT PL 200 da empresa PROCEQ, o qual é composto por 02 transdutores de 54 kHz com diâmetro de superfície de contato de 36,77 mm e dataloger. Os corpos de prova foram ensaiados em uma estrutura que impedisse qualquer vibração externa que pudesse alterar o resultado.

5.1.6 Análise microestrutural

5.1.6.1 Micrografia eletrônica por varredura (MEV)

Na microscopia eletrônica de varredura, quando uma pequena região da amostra é atingida por um feixe de elétrons, são originados diferentes sinais, como elétrons secundários e elétrons retroespalhados, dentre outros. Essas respostas podem ser detectadas independentemente e, depois de transformadas em sinais elétricos, permite a aquisição de imagens de superfície, composição de fases e análise composicional. Elétrons secundários são partículas de baixa energia resultantes de uma colisão inelástica de elétrons primários do feixe emitido com elétrons da amostra. Seu registro possibilita a caracterização da topografia da amostra, com identificação do tamanho e textura superficial (SARKAR et al., 2001).

As análises foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura, mostrado na figura 5.5, com filamento de tungstênio, modelo INSPECT FEI (Company), com detecção de imagens a partir de elétrons retroespalhados e elétrons secundários, alocado no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais–TECNOMAT, da Universidade Federal da Paraíba, Campus de João Pessoa, PB.



Figura 5.5: Microscópio eletrônico de varredura.

5.1.7 Ensaio de Difração de Raios-X (DRX)

A análise mineralógica das da argila expandida AE-0500 foi realizada pelo através do ensaio de DRX, realizado, no equipamento XDR-600 da Shimadzu, do Laboratório de Química da UFPB, Campus de João Pessoa, PB, mostrado na figura 5.6.



Figura 5.6: Equipamento de Difração de Raios- X (DRX).

6.0 CONFECCÃO DO PROTÓTIPO

Para a fabricação dos protótipos, utilizados no ensaio de atenuação das ondas eletromagnéticas, seguiram-se as seguintes etapas:

(a) Preparação do material

Primeiro pesou-se o cimento e as argilas. Em seguida, as argilas foram homogeneizadas manualmente, acondicionadas em um contêiner onde se adicionou água para a pré-saturação, por um período de 24 horas.

Após as 24 horas de imersão, o material foi colocado em uma superfície inclinada para facilitar o escoamento do excesso de água livre.

(b) Mistura do material

Primeiro colocou-se a argila expandida na betoneira. Em seguida, após 3 minutos, adicionou-se o cimento, deixando a betoneira girar até se observar a homogeneidade da mistura.

(c) Moldagem das placas

As placas foram moldadas em formas de madeirite plastificada. Ao todo foram confeccionadas três placas do compósito cimentício leve nas com as dimensões especificadas abaixo:

- PLACA 01 – 40 cm x 40 cm x 9 cm;
- PLACA 02 – 40 cm x 40 cm x 12 cm;
- PLACA 03 – 40 cm x 40 cm x 14 cm.

Após três dias foram desmoldadas e submetidas à cura a seco.

Outras três placas foram confeccionadas: uma placa do compósito cimentício leve rebocada nas duas faces, 1,50 cm em cada face; uma placa confeccionada com blocos cerâmicos e outra com bloco de concreto. As dimensões para cada desse bloco de placas estão discriminadas abaixo.

- PLACA 01 – 40 cm x 40 cm x 9 cm;
- PLACA 02 – 40 cm x 40 cm x 9 cm;
- PLACA 03 – 40 cm x 40 cm x 9 cm.

As etapas de construção do protótipo (placas) podem ser visualizadas na figura 6.1.



Figura 6.1: Etapas realizadas para a confecção do protótipo.

No total foram confeccionadas 6 placas, figura para a realização do ensaio de para determinação atenuação da intensidade das ondas eletromagnéticas no composto cimentício. Todas as placas são visualizadas na figura 6.2.



Figura 6.2: Protótipos.

6.1 Projeto e design do novo elemento pré-moldado leve de vedação

Thomaz e Helene (2000) comentam que os projetos de alvenaria devem ser enfocados de maneira mais ampla, considerando-se aspectos tais como o desempenho térmico e acústico, a resistência ao fogo e permeabilidade à água, apontando cuidados

essenciais no projeto e execução e detalhes construtivos, inclusive traços referenciais para graute e argamassa de assentamento.

O designe do elemento de alvenaria leve deverá ser concebido de maneira a otimizar o tempo de execução do sistema construtivo, figura 6.3.

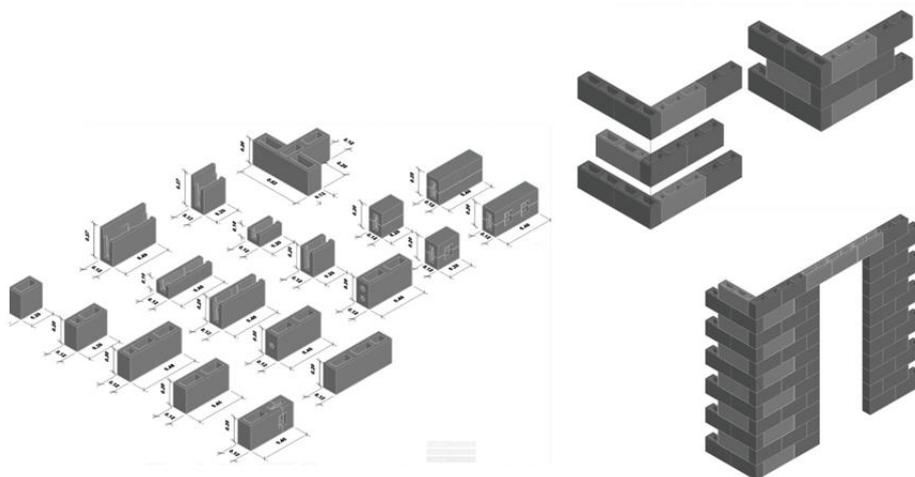


Figura 6.3: Elemento de alvenaria leve.

6.2 Ensaio de atenuação de onda eletromagnética

A análise do comportamento do compósito cimentício pré-moldado leve ao ser atravessado por onda eletromagnética foi feita dentro da faixa de frequência operacional de 2,40 GHz, utilizada no Brasil.

Os ensaios de atenuação de ondas eletromagnéticas foram realizados no laboratório de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba–IFPB. O ensaio consiste na utilização de uma antena de banda larga (900-5000 MHz). Uma antena ficou localizada a 51 cm da amostra perpendicular ao centro da placa (corpo de prova). Outra antena ficou posicionada simetricamente a outra antena, com a amostra localizada a mesma distância de ambas. Essas antenas foram acopladas a um analisador de rede vetorial, modelo 16451B fabricado pela AGILENT, que analisa a potência e frequência recebida através das placas.

As amostras são expostas a ondas eletromagnéticas que correspondem às faixas de frequência de operação de telefonia celular no Brasil, 2,40 GHz. Uma antena acoplada a um gerador de sinal emitem sinais em direção às amostras na frequência de 2,40 MHz. Situada no lado oposto à amostra, uma outra antena, acoplada ao mesmo analisador de rede recebe o sinal e assim, é identificada a atenuação eletromagnética. Esses sinais foram utilizados para avaliar a como o material analisado se comporta quanto à atenuação da onda eletromagnética ao transpassar esse material. O

experimento analisou a o comportamento da atenuação de onda eletromagnética para a frequência usual no Brasil, de 2,40 GHz.

A sequência do ensaio é mostrada na Figura 6.4.



Preparação do equipamento



Vista frontal do equipamento



Disposição do equipamento



Início do ensaio



Espectômetro de rede

Figura 6.4: Ensaio de atenuação da onda eletromagnética.

7.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Caracterização dos materiais de partida

Adquirido os materiais em quantidade suficientes para o desenvolvimento do estudo, a etapa seguinte consistiu em fazer a caracterização dos mesmos. Foram realizados os ensaios de caracterização, para as argilas expandidas tais como; análise granulométrica; massas específicas; massas unitárias; índice de vazios e absorção de água; utilizadas como agregados do compósito cimentício leve.

7.1.1 Argila expandida

Nas tabelas 7.1 e 7.2 apresentam-se as propriedades físicas das argilas AE-2,50 mm (Lamelar) e AE-0500, respectivamente.

Propriedades	AE- 2,50 mm
Massa Unitária (g/cm ³)	0,631
Massa Específica (g/cm ³)	1,45
Absorção de água por imersão- 24 horas (%)	11,00
Volume de vazios (%)	55

Tabela 7.1: Propriedades físicas do agregado leve AE-2,50 mm.

Propriedades	AE- 0500
Massa Unitária (g/cm ³)	0,651
Massa Específica (g/cm ³)	1,51
Absorção de água por imersão-24 horas (%)	7,00
Volume de vazios (%)	57

Tabela 7.2: Propriedades físicas do agregado leve AE-0500.

A determinação da composição granulométrica das argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500 foram determinadas de acordo com o que descreve NBR NM 248:2003. A granulometria é considerada como a propriedade do agregado com maior aplicação prática, principalmente para a determinação do módulo de finura (MF), da dimensão máxima característica e da curva granulométrica utilizadas na dosagem do concreto. Na tabela 7.3 estão apresentadas as composições granulométricas da argila AE-2,5 mm e AE-0500.

Abertura da peneira	AE-2,50 mm	AE-0500
	(%) Retida acumulada	(%) Retida acumulada
4,75 mm	0,54	2,88
2.36 mm	22,42	60,00
1,18 mm	46,38	91,39
600 μm	62,68	97,65
300 μm	74,09	99,04
150 μm	81,91	99,51
Fundo da série	100	100
$D_{\text{Máx}}$ (mm)	4,80	4,80
Módulo de Finura (MF)	2,88	4,50

Tabela 7.3: Composição granulométrica das argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500 (NBR NM 248:2003).

Na figura 7.1 estão ilustradas as curvas granulométricas dos agregados leves AE-2,50 mm e AE-0500.

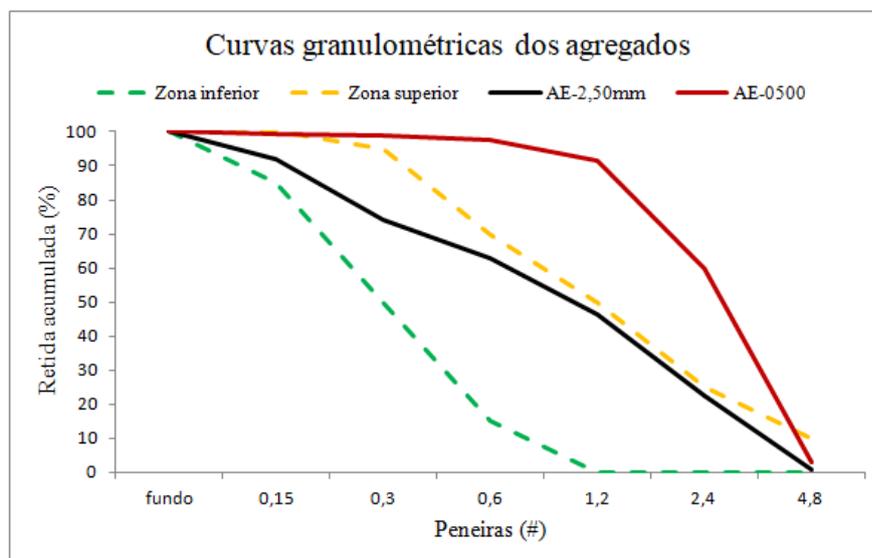


Figura 7.1: Curvas granulométricas dos agregados leves AE-2,50 mm e AE-0500.

Fazendo-se uma análise isolada da composição granulométrica das argilas, verifica-se que a argila expandida 2,50 mm (AE-2,50 mm) se adequa às faixas exigidas pela ABNT NBR 7211 (2005), o que não se verifica para a argila expandida 0500 (AE-0500). Como as argilas foram utilizadas em mistura para se obter os compósitos cimentícios leves, foram executadas composições em proporções percentuais utilizadas nas formulações e, posteriormente traçadas as curvas granulométricas para cada composição.

A tabela 7.4, apresenta o resultado para as granulométricas para argilas expandidas AE-2,5 mm e AE-0500 e para as duas misturas das mesmas utilizando os percentuais especificados abaixo:

- 75% de argila AE-2,50 mm e 25% de argila AE-0500 (Mistura 50-50).
- 50% de argila AE-2,50 mm e 50% de argila AE-0500 (Mistura 75-25).

Abertura da peneira	Porcentagem retida (%)			
	AE-2,50 mm	AE-0500	Mistura 50-50	Mistura 75-25
4,75 mm	0,54	2,88	0,96	1,48
2.36 mm	22,42	60	44,96	49,62
1,18 mm	46,38	91,39	74,53	70,71
0.600 μm	62,68	97,65	87,60	82,62
0.300 μm	74,09	99,04	92,97	88,71
0.150 μm	81,91	99,51	94,72	92,48
Fundo da série	100	100	100	100
D _{MAX} (mm)	4,80	4,80	4,80	4,80
Módulo de Finura	2,88	4,50	3,92	3,86

Tabela 7.4: Composição granulométrica das misturas dos agregados leves AE-2,50 mm e AE-0500 (NBR NM 248:2003).

Na figura 7.2, veem-se as curvas granulométricas para as duas composições de mistura das argilas expandidas TR 2(75%) e TR 3 (50%), juntamente com as granulometrias individuais de cada argila.

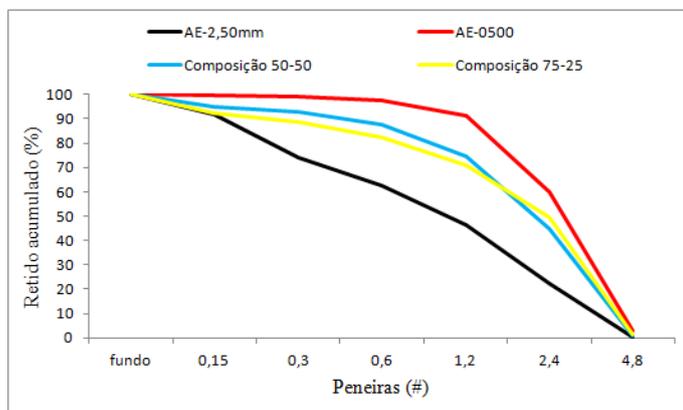


Figura 7.2 :Curva granulométricas das misturas dos agregados leves e curvas granulométricas das argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500 (NBR NM 248: 2003).

Com base nos dados apresentados, não foram identificadas diferenças significativas para as composições granulométricas estudadas. Como se pode observar, após análise, que as curvas granulométricas das composições (50-50 e 75-25) apresentam a mesma tendência, afastando-se da curva granulométrica da argila expandida AE-0500 e, se aproximando da curva granulométrica da argila expandida

AE-2,50mm, o que significa que as composições apresentam uma melhor uniformidade granulométrica quando comparadas com a AE-0500.

A figura 7.3 mostra difratograma da argila AE-0500. Analisando a figura, destaca-se como fase principal a sílica (SiO_2) e óxido de alumínio e magnésio [$\text{Mg}(\text{SiO}_4)$] na forma de espinélio, que se trata de uma substância inorgânica obtida sinteticamente por sinterização com elevada estabilidade térmica.

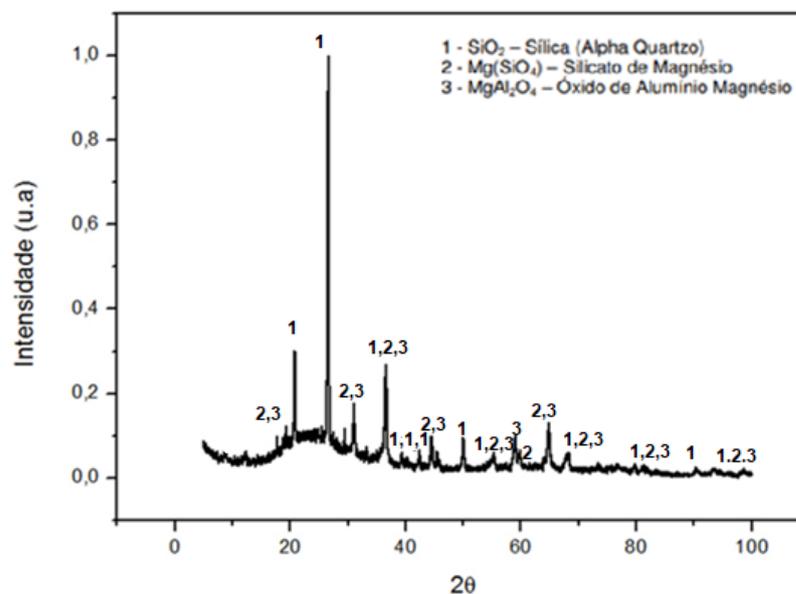


Figura 7.3: Difratograma de Rios-X da argila AE-0500.

7.2 Caracterização dos compósitos cimentícios leve (CCL)

7.2.1 Massa específica, absorção de água e índice de vazios

Para realização destes ensaios foram utilizadas três amostras do compósito cimentício leve cilíndricas de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para cada mistura, os traços TR 1(100%); TR 2 (75%) e TR3 (50%), perfazendo um total de nove corpos de prova. Os ensaios foram realizados em conformidade com a ABNT NBR 9778:2005-Corrigida em 2009.

Na tabela 7.5 são apresenta os resultados para a massa específica, absorção de água e índice de vazios. Todos os resultados são relacionados às formulações (traços) TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 3(50%), referente à proporção de argila expandida AE-2,50 mm nas composições (traços). Os valores apresentados são referentes à média aritmética de cada série de três corpos de prova.

Propriedades físicas	TR 1 (100%)	TR 2 (75%)	TR 3 (50%)
Massa específica (kg/m ³)	980,00 (± 0,0031)	991,00 (± 0,0111)	1042,00 (± 0,0088)
Absorção de água (%)	27,18 (± 0,2924)	25,80 (± 0,4150)	22,47 (± 0,7703)
Índice de vazios (%)	26,61 (± 0,2177)	25,57 (± 0,1260)	23,41 (± 0,6058)
Porosidade (%)	25,00 (± 0,00175)	24,00 (± 0,00085)	21,00 (± 0,002)

Tabela 7.5: Massas específicas, absorção de água por imersão e índice de vazios dos compósitos cimentícios leves (CCL) com seus respectivos desvios padrão.

A figura 7.4 mostra os resultados de porosidade, absorção por imersão e índice de vazios para os compósitos cimentícios leves (CCL).

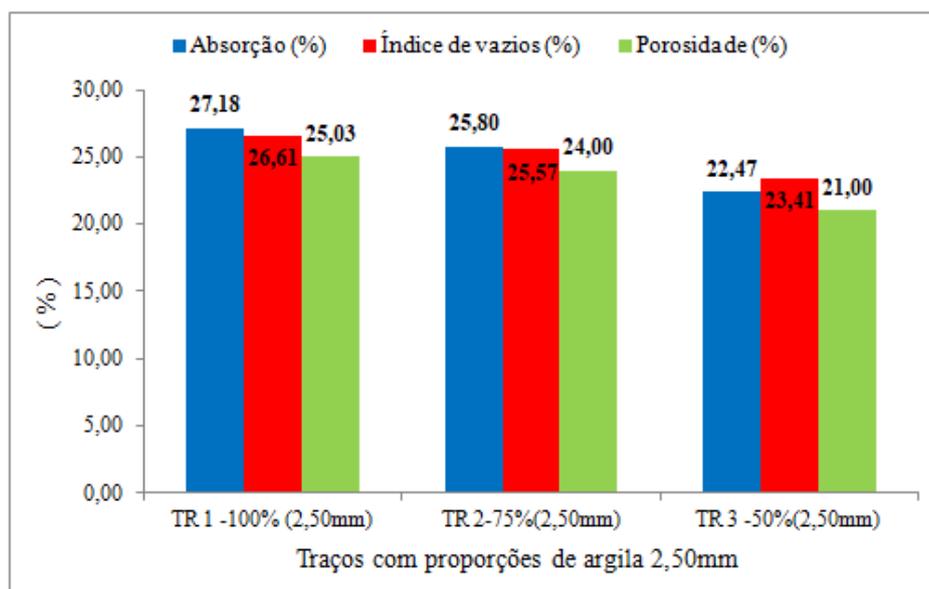


Figura 7.4: Teores de absorção de água por imersão, porosidade total e índice de vazios dos CCL.

No gráfico da figura 7.4, os dados mostram que, na medida em que se adiciona a argila expandida AE-0500 nas composições (traços), há uma redução no valor da absorção; do índice de vazios e da porosidade dos compósitos cimentícios leve (CCL). Essas características estão intimamente relacionadas com a propriedade de durabilidade do concreto.

Testes de absorção, após 24 horas, seguindo a norma ASTM C 127, mostram que os agregados leves geralmente absorvem de 5% a 25%, em massa, o peso do

agregado seco, variando segundo o sistema de poros do agregado. Se contrapondo, a maioria dos agregados de peso normal absorve menos que 2% de umidade.

A ABNT NBR 12655:2015 preconiza que, para concreto leve, a massa específica deverá apresentar valores inferiores a 2000 kg/m^3 ($2,00 \text{ g/cm}^3$). Os compósitos cimentícios leves estudados apresentaram um valor médio para a massa específica de $1,004 \text{ g/cm}^3$ (1004 kg/m^3). Quando comparado o valor da massa específica preconizada pela norma, com a massa específica média dos compósitos cimentícios leves obtidos nessa pesquisa, observou-se uma redução na mesma, de aproximadamente 50%.

Observou-se, quanto à absorção de água por imersão, valores médios de 27%; 25,80% e 22,47% para os compósitos cimentícios leves TR1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%) respectivamente, para os 28 dias, valores acima dos valores prescritos pela ABNT NBR 11173:1990. Os valores preconizados pela norma são referentes a concretos leves constituídos por diversos tipos de agregado, inclusive basáltico. Os compósitos cimentícios leves estudados neste trabalho são constituídos apenas por argilas expandidas, as quais possuem grande número de poros impermeáveis de diferentes tamanhos. O mesmo comportamento se observa para os valores do índice de vazios e da porosidade, ou seja, essas propriedades estão intimamente relacionadas com a proporção de argila expandida AE-0500 inserida nas composições (traços). Quanto a maior incorporação do agregado leve, maior é a quantidade de vazios permeáveis nos concretos (ANGELIM, 2014).

7.2.2 Resistência à compressão simples

Determinou-se a resistência à compressão dos concretos seguindo as prescrições da ABNT NBR 5739:2007, utilizando-se de corpos de prova cilíndricos, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, para a idade idades de 28 dias. Foram moldados 4 corpos de prova para cada composição (traço). Os corpos de prova foram rompidos em uma prensa hidráulica com carga máxima de 20 toneladas, com acionamento manual, fabricada pela Alfa Instrumentos.

Para análise dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial, foi considerada a média de cada uma das séries de quatro corpos de prova referentes aos traços TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 3(50%).

Na tabela 7.6 apresentam-se os resultados médios das resistências à compressão, com relação ao tempo de cura de 28 dias, com os seus respectivos desvio padrão.

Propriedades físicas	TR 1 (100%)	TR 2 (75%)	TR 3 (50%)
Resistência à compressão (MPa)	3,10 (± 0,144)	3,48 (± 0,136)	3,73 (± 0,285)

Tabela 7.6: Resistência à compressão dos compósitos cimentícios aos 28 dias, com seus respectivos desvios padrão.

Na figura 7.5, é mostrado em forma de gráfico os valores da resistência à compressão simples para cada compósitos cimentícios leve (CCL).

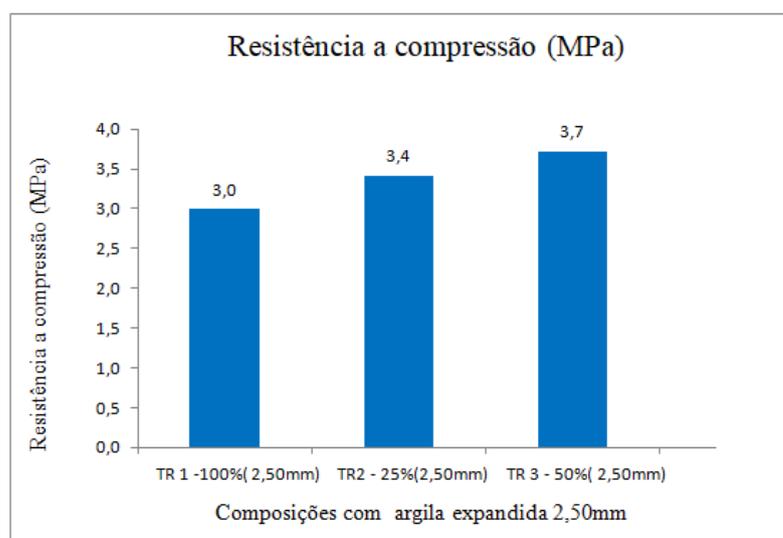


Figura 7.5: Resistência à compressão axial.

Os valores da resistência à compressão dos concretos apresentam um aumento à medida que se aumenta a proporção de argila expandida AE-0500 nas composições (traços). O valor médio da resistência à compressão para cada composição (traço) ficou próximo ao mínimo exigido pela norma ABNT NBR 6136:2016, que é de 3,00 MPa,

Considerando os valores da resistência à compressão das composições (traços) ao tempo de cura de 28 dias, há um aumento na resistência à compressão de aproximadamente 16,8% entre a composição (traço) TR 1(100%) e TR 3(50%). Quando comparadas as composições TR 2(75%) e TR 3(50%), observa-se um aumento da resistência, em torno de 6,7%.

O aumento da resistência à compressão se deu tanto pela diminuição da quantidade de água adicionada às composições (traços), como pela resistência ao esmagamento da argila expandida AE-0500. A argila expandida AE-0500 possui uma tenção de resistência ao esmagamento de 20,00 MPa, ao passo que a da argila expandida AE-2,50 mm é menor que 2,00 MPa (CINEXPAN, 2021).

No ensaio de ruptura para determinação da resistência à compressão, todos os corpos-de-prova dos compósitos cimentícios leves CCL apresentaram fissuras de rompimento de forma colunar, atravessando o agregado leve devido a sua fragilidade frente a maior rigidez da matriz cimentícia, como pode ser observada figura 7.6. Segundo Malaiskiene et al. (2011), Sim et al. (2012) e Angelin et al. (2013b), nos concretos com agregados leves, tipicamente menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras ocorre, normalmente, nos agregados, ocasionando um acúmulo de tensões na matriz de cimento, provocando, assim, uma ruptura brusca do concreto.



Figura 7.6: Ilustração de corpos-de-prova após ensaio de resistência à compressão axial dos CCL, ruptura do agregado.

Como podemos observar, os resultados obtidos para as resistências dos compósitos cimentícios estudados nesse trabalho mostraram-se compatíveis com os resultados observados na bibliografia consultada, conforme trabalhos de Rodrigues et al. (2017), que, analisando comparativamente as propriedades físico-mecânicas de blocos de concreto leve de EPS e bloco de concreto convencional, obteve uma resistência para o bloco de EPS de 1,40 MPa, Silva et al. (2016), que, trabalhando com concreto leve, utilizando-se de vermiculita e argila expandida, chegaram a um compósito leve de resistência de 3,50 MPa.

Rodrigues et al. (2017), analisando comparativamente as propriedades físico-mecânicas de blocos de concreto leve de EPS e bloco de concreto convencional, obteve uma resistência para o bloco de EPS de 1,40 MPa.

Silva et al. (2016), trabalhando com concreto leve, utilizando vermiculita e argila expandida chegaram a um compósito leve de resistência de 3,50 MPa.

Gomes (2015), utilizando o Etileno Acetato de vinila (EVA) como agregado leve, obteve uma resistência à compressão de 1,20 MPa para o compósito leve.

Rocha (2008), em seu estudo obteve uma resistência à compressão de 2,10 MPa para o compósito leve tendo como agregado o Etileno Acetato de vinila (EVA).

Os resultados obtidos para as resistências para os compósitos cimentícios estudados nesse trabalho mostraram-se compatíveis com os resultados observados na bibliografia consultada. Vale ressaltar que não foi possível comparar os valores das resistências dos compósitos estudados com a resistência de compósitos similares (mesmo material e granulometria) por não conseguido encontrar na bibliografia.

O compósito cimentício leve (CCL) do traço TR 3(50%) foi o adotado para a construção do protótipo pelo fato de apresentar maior resistência à compressão, dentre as três composições (traços).

7.2.3 Micrografia eletrônica por varredura (MEV)

Com o objetivo de validar os resultados obtidos no ensaio físico realizados nos corpos-de-prova dos compósitos cimentícios leves (CCL), foi feito o ensaio de microscopia, tendo como enfoque a porosidade do compósitos cimentício. A microscopia permite visualizar incidência de poros, mostrando uma redução ou aumento da porosidade dos compósitos cimentícios leves (CCL). Só foi possível fazer o ensaio de microscopia para o compósito TR 3(50%).

A micrografia apresentada a seguir é constituída pela imagem em uma amostra polida, utilizando elétrons retroespalhados.

A figura 7.7, mostra a micrografia do compósito cimentício leve (CCL) da composição (traço) TR 3(50%).

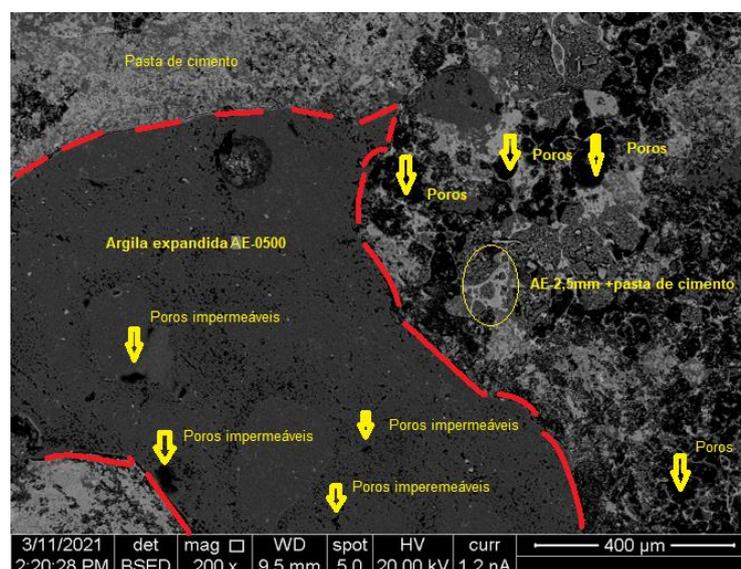


Figura 7.7: Micrografia Eletrônica de Varredura (MEV) do compósito cimentício leve TR 3(50%).

As fases existentes nos compósitos cimentícios leves (CCL) são discriminadas pelos tons de cinza e os poros são identificados pela cor preta. A diferença de tonalidades entre as fases se dá em função do número atômico dos elementos constituintes da fase. Quanto menor for o número atômico desses elementos, mais escura essa fase aparecerá na micrografia eletrônica de varredura.

A micrografia acima mostra a porosidade elevada do compósito TR 3(50%), ratificando o resultado do ensaio físico para a porosidade. A presença de poros permeáveis de tamanhos variados mostra um compósito cimentício leve poroso e permeável. A micrografia mostra os agregados AE-2,50 mm e AE-0500 com a presença de poros impermeáveis de diversos tamanhos. A porosidade elevada do compósito e dos agregados AE-2,50 mm e AE-0500 explica a baixa resistência á compressão do mesmo.

7.2.4 Desempenho térmico

As condutividades térmica para os concretos dos compósitos cimentícios leves (CCL) estudados foram obtida dentro do que prescreve a ABNT NBR 15220:2005.

Obtidos os valores da condutividade térmica dos compósitos cimentícios leves para os traços TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%), estes estão plotados no gráfico da figura 7.8, mostra correlação entre massa específica e condutividade térmica para cada composição (traço).

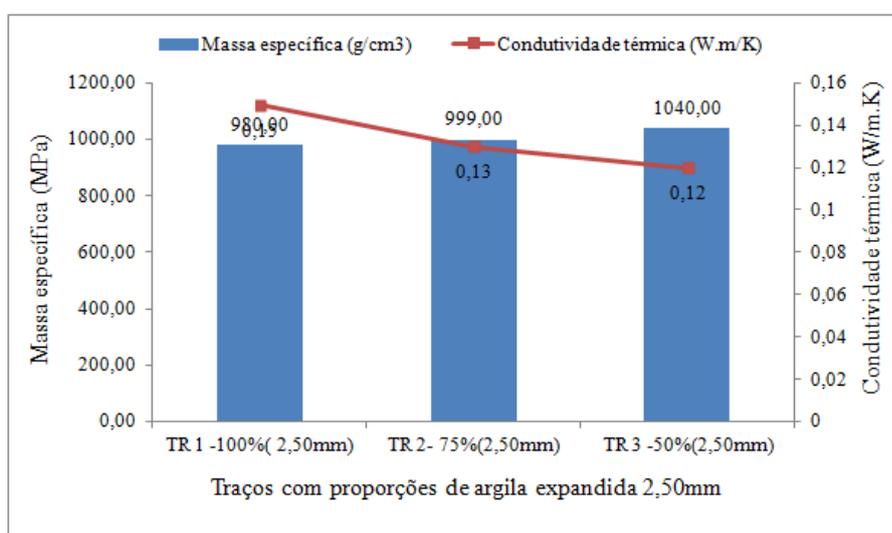


Figura 7.8: Correlação entre os resultados de massa específica e condutividade térmica (ABNT NBR 15220:2005), aos 28 dias de idade, correspondentes aos compósitos TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3 (50%).

Os dados obtidos são dos corpos de prova (placas) de espessuras distintas: TR 1 com 20,30 mm; TR 2 com 24,9 mm e TR 3 com 25,00 mm.

Sacht et al. (2010), diz que, ao substituir o agregado convencional por argila expandida, há uma pequena queda da condutividade térmica. Nesse trabalho, o concreto dos compósitos cimentícios leves é constituído apenas por agregado leve (argilas expandidas AE-2,50 mm e AE-0500), não houve a substituição de agregados convencionais, o que explica a pequena variação na massa específica dos compósitos cimentícios.

No gráfico da figura 7.8, comparado o valor da massa específica obtida para a composição (traço) TR 3(50%) com os valores obtidos para as composições TR 1(100%) e com o traço TR 2(75%), verifica-se um aumento 5%. Esse resultado é esperado uma vez que, a massa específica da argila expandida AE-0500 é maior do que a massa específica da argila expandida AE-2,50 mm.

Através dos dados mostrados no gráfico da figura 7.8 observa-se um decréscimo médio de 13% na condutividade térmica dos compósitos cimentícios leves para os traços TR 2 (75%) e TR 3(50%), quando comparados com o compósito do traço TR 1(100%). Essa variação explica-se pelas diferentes espessuras dos corpos de prova. Para uma espessura de 25 mm, comum a todos os corpos-de-prova, a tendência é que a condutividade térmica seja a mesma para todos os três compósitos cimentícios leves (CCL), uma vez que esses compósitos são feitos com mesmo material e os valores das suas massa específicas são bem próximos.

A condutividade térmica média obtida para os compósitos cimentícios leves foi de 0,13 W/m.K. Fazendo-se um comparativo entre a condutividade térmica do concreto convencional (1,70 W.m/K–NBR 15220-2:2005) com a condutividade térmica média dos compósitos cimentícios estudados, observa-se uma redução de 92,5%. Quando esse comparativo é feito em relação ao concreto leve com massa específica de 1800 kg/m³ (NBR 15220-2:2005) essa redução é de 87,6%.

A partir dos dados apresentados no gráfico acima, observa-se um acréscimo médio de 4,50% na condutividade térmica dos outros dois traços para os compósitos cimentícios (TR 1 e TR 2) leves com relação ao traço TR 3. Essa variação se explica em função das diferentes espessuras dos corpos de prova. A tendência é que, para uma espessura comum aos três corpos de prova, a resistência térmica seja a mesma para todos os traços dos os compósitos cimentícios leves (CCL).

Apresentados todos os resultados acima descritos, observa-se que o valor médio para a condutividade térmica dos compósitos estudados apresentou valor menor do que os observados na bibliografia, conforme podemos atestar nos seguintes estudos:

Massa (2018), em seu estudo avaliação de desempenho mecânico e térmico de material compósito para envoltória de habitações visando eficiência energética, obteve uma condutividade térmica de 0,17 W/m.K para um protótipo de paredes construídas com concreto leve, utilizando como um dos agregados a argila expandida. Gomes (2018), utilizando o Etileno Acetato de vinila (EVA) como agregado leve, obteve para o seu compósito leve uma condutividade térmica de 0,66 W/m.K e Angelim (2018), trabalhando com concreto leve autoadensável emborrachado, obteve uma condutividade térmica de 0,30 W/m.K.

Sacht et al. (2010), avaliando os valores da condutividade térmica de concretos leves com massa específica variando entre 12160 a 2364 Kg/m³, produzidos com argila expandida em substituição ao agregado graúdo natural (basalto), obteve uma condutividade térmica de leve de 0,54 W/m.K.

Explicando esse decréscimo da condutividade térmica, Oktay et al. (2015) apontam que esta ocorre principalmente devido ao ar aprisionado na estrutura celular dos agregados leves, fazendo com que seja reduzida a transferência e a absorção de calor.

7.2.5 Desempenho acústico

Os ensaios para análises do desempenho acústico dos compostos cimentício leves foram realizados em três corpos de prova prismáticos, de dimensões 40 mm x 40 mm x 161 mm, referentes às composições (traço) TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%) respectivamente. Os corpos de prova foram ensaiados em um aparelho ultrassônico no Laboratório de Tecnologia de Novos Materiais, da Universidade Federal da Paraíba-UFPB.

Pelos dados de saída do ensaio, só será possível fazer uma análise do desempenho acústico através das velocidades do som da onda de compressão.

A Figura 7.9 apresenta um comparativo das velocidades nos corpos de prova, medidos a partir da velocidade obtida no ensaio de ultrassom e da medição das dimensões dos corpos de prova.

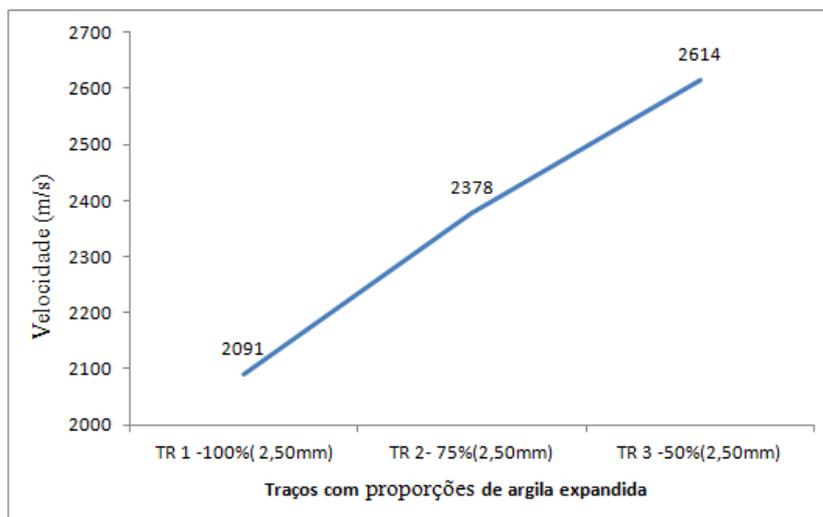


Figura 7.9: Velocidades das ondas de compressão em ultrassom.

O valor apresentado do concreto convencional possui valor de 4500 m/s (ANGELIN, 2018).

O aumento da velocidade do som para onda de compressão do compósito (traço) TR 3(50%) em relação aos traços TR 1(100%) e TR 2(75%) é de, aproximadamente, 20% e 10%, respectivamente.

Através do gráfico fica evidenciado o que há um aumento nas velocidades das ondas á medida em que se aumenta o teor de argila expandida AE-0500.

Iwamamoto (2020), em seu trabalho desempenho mecânico e acústico de concreto leve autoadensável com argila expandida e incorporação de EPS de diferentes granulometria, encontrou uma velocidade de onda para o seu compósito cimentício de 4361m/s.

Nogueira e Rens (2018) realizaram testes com concreto contendo EPS e mediram o tempo que as ondas ultrassônicas levavam para atravessar o corpo de prova, obtendo assim a velocidade das ondas no meio. Os resultados variaram de aproximadamente 4000 m/s, com zero adição de EPS, a 800 m/s, com um volume de 70% de EPS no concreto.

A velocidade média de propagação das ondas para os compósitos estudados é de aproximadamente 2361 m/s, em torno de 55% do valor encontrado na literatura. Os valores obtidos mostra que os compósitos estudados apresentam-se como um excelente propriedade acústica apto potencialidade para se utilizado em edificações como *smart buildings*, por exemplo.

8.0 PROTÓTIPO DO COMPÓSITO CIMENTÍCIO PRÉ-MOLDADO LEVE

Finalizada a etapa de caracterização física e mecânica dos compósitos cimentícios leves TR 1(100), TR 2(75%) e TR 3(50%), decidiu-se, usando como critério a segurança, fabricar o protótipo do compósito cimentício leve com o traço CP 3(50%) por ter atingido a maior resistência à compressão dentre os três compósitos estudados.

O protótipo obtido está ilustrado na figura 8.1, com dimensões, 30 cm x 30 cm x 9 cm. A resistência á compressão média para os corpos de prova do traço do protótipo atingiu 4,60 MPa.



Figura 8.1: Protótipo.

Thomaz (2000), em seu trabalho, comenta que os projetos de alvenaria devem ser enfocados de maneira mais ampla, considerando-se aspectos tais como o desempenho térmico e acústico, a resistência ao fogo e permeabilidade à água, apontando cuidados essenciais no projeto e execução.

No contexto de *Smart Buildings*, o design do novo elemento de alvenaria leve pré-moldado de vedação deverá ser desenvolvido de maneira a atender as exigências da norma ABNT NBR 6136:2014, quanto a resistência a compressão; e da norma ABNT NBR 15575:2013, quanto ao desempenho térmico e acústico.

8.1 Ensaios para determinação da atenuação das ondas eletromagnéticas ao transpor o protótipo

As análises das atenuações das ondas eletromagnéticas ao transpor os corpos-de-prova (placa) de um compósito cimentício pré-moldado leve foram feitas a partir dados gerados por ensaios realizados para a faixa de frequência operacional de 2,40 GHz, a utilizada no Brasil.

O gráfico da figura 8.2 mostra graficamente o comportamento da curva de cada placa (corpo de prova) quando submetidas ao ensaio de atenuação das ondas eletromagnéticas.

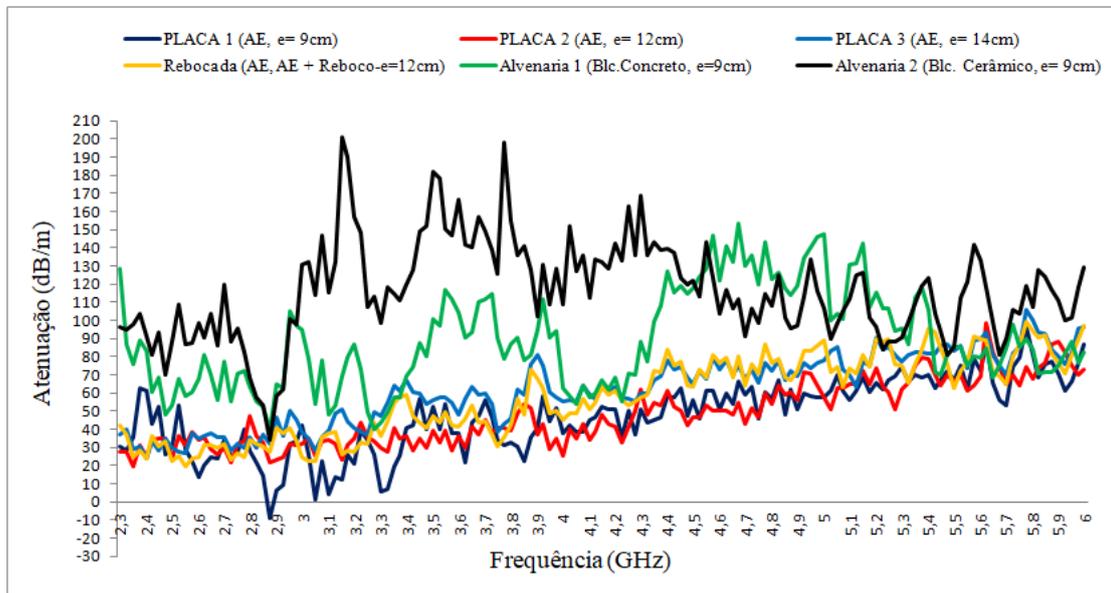


Figura 8.2: Atenuação da onda eletromagnética através de placas.

Observando-se o gráfico da figura 8.2, é possível observar um aumento da atenuação das ondas eletromagnéticas, quando essas atravessam as placas (corpos-de-prova) à medida que há um aumento da frequência. Para as PLC-ALV1 e PLCA-ALV2, construídas com elementos de alvenaria tradicional (bloco cerâmico e bloco de concreto), apresentaram maiores atenuações das ondas eletromagnéticas, quando comparadas com a PLC 1; PLC 2 ; PLC 3 e PLC-REB, construídas com o traço TR 3(50%).

As curvas correspondentes às placas PLC 1; PLC 2 ; PLC 3 e PLC-REB, com espessuras; 12 cm; 14 cm e 12 cm, respectivamente, mostram mesma tendência. As placas de alvenaria, construídas com elementos de alvenaria convencionais, PLC-ALV 1 (bloco de concreto) e PLC 2(bloco cerâmico), apresentam tendências distintas das outras placas.

O gráfico da figura 8.3 mostrar o comportamento da curva de atenuação das ondas eletromagnéticas para cada placa, especificamente para a faixa de frequência de operação de 2,40 GHz. É possível observar a semelhança na tendência das linhas de atenuações das ondas eletromagnéticas referentes às placas PLC 2; PLC 3 e PLC-REB, mostrando a variabilidade das curvas em função da espessura das placas. Foi observada uma pequena discrepância no comportamento mostrado pela PLC 1, causado

possivelmente por ruídos do próprio aparelho ou pelo ângulo de incidência da placa, por exemplo. Para a placa PLC-ALV 1 (bloco de concreto) e PLC 2 (bloco cerâmico), observa-se tendências distintas entre si, e em relação às outras placas. Esse comportamento se dá provavelmente pela natureza do material que as constituem, uma vez que, suas espessuras são as mesmas, de 9 cm.

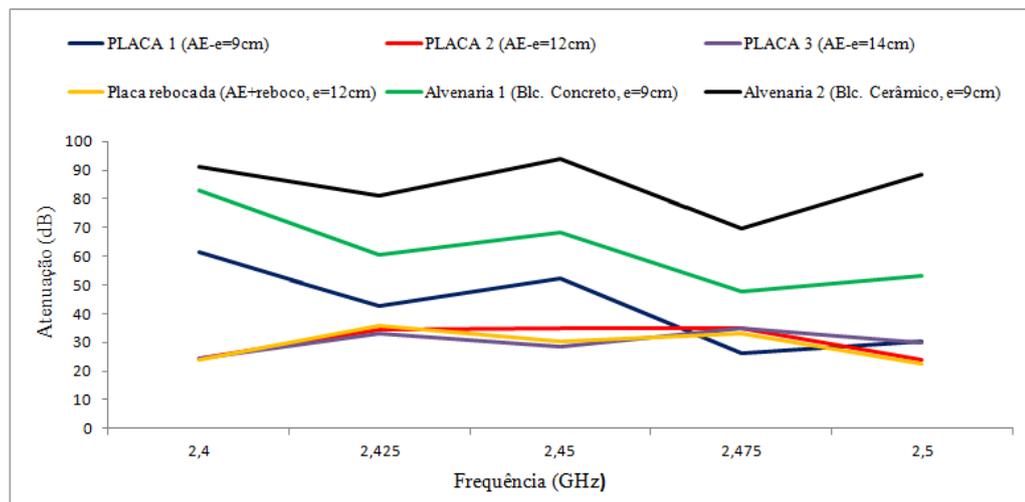


Figura 8.3: Atenuação de ondas eletromagnética através de cada placa para a frequência operacional 2,40 GHz.

A tabela 8.1 mostra os valores dos coeficientes de atenuação para cada placa (corpos-de-prova) para a faixa de frequência usual no Brasil, de 2,40 GHz.

Coeficiente de atenuação (dB)					
Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa rebocada	Alvenaria 1 (Blc. de Concreto)	Alvenaria 2 (Blc. Cerâmico)
4,11	3,87	4,23	3,71	5,90	7,60

Tabela 8.1- Coeficiente de atenuação de onda eletromagnética para cada placa (corpos de prova).

O valor médio do coeficiente de atenuação para as placas, PLC 1; PLC 2 e PLC 3, construídas com o mesmo material (AE-2,50 mm e AE-0500) e, variando as espessuras, foi de 4,00 dB. A placa rebocada foi a que apresentou menor coeficiente de atenuação, com 3,71 dB. As placas PLC-ALV 1 e PLC-ALV 2 apresentaram os piores desempenhos para o coeficiente de atenuação, 5,90 dB e 7,60 dB, respectivamente.

Richter (2019) em seu trabalho, atenuação de sinal de rádio frequência por diferentes materiais em ambiente indoor, determinou um coeficiente de atenuação de 16,80 dB para o bloco cerâmico de 6 furos. Para o bloco de concreto semi-estrutural de

espessura 9,0 cm, atenuação encontrada foi de 14,50 dB.

Huntner Júnior (2015), no estudo das eletromagnéticas de alta frequência: Determinação do coeficiente de atenuação sistemas construtivos de vedação encontrou um coeficiente de 21,12 dB para alvenaria não estrutural e de 11,50 dB, para alvenaria de concreto. O experimento foi realizado em ambiente aberto.

Ali-Rantala et al. (2003), verificando a atenuação de onda eletromagnética em paredes de concreto determinou o coeficiente de atenuação de 9,30 dB.

De acordo com Unir Junior (2015 Apud Dublin, 2005), estudos realizados por diversos autores mostram resultados discrepantes entre si, de forma que o autor resume a discussão a respeito dos materiais de construção fazendo uma classificação de materiais comumente utilizados em construção quanto à atenuação de perdas de sinal, da seguinte maneira:

- **Grande:** Os materiais como concreto espesso e alvenaria estão classificado como material de, com 10,00-20,00 dB/parede;
- **Perda modesta:** Paredes simples de tijolos, alvenaria fina, são materiais de, com 5,00-10,00 dB/parede.
- Baixa perda encontra-se a madeira compensada, paredes de Drywall, vidro, parede de divisórias com valores menores do que 5,00 dB/obstáculo.

O valor médio obtido nessa pesquisa para o coeficiente de atenuação das ondas eletromagnéticas para compósito cimentício do traço TR 3(50%) ficou abaixo dos encontrados na literatura quando comparados com outros elementos de alvenaria, tais como os blocos cerâmicos e de concreto.

O compósito cimentício leve pré-moldado obtido neste trabalho, mostra-se, de maneira promissora, como um produto com excelentes resultados quanto a atenuação de ondas eletromagnéticas, apto a ser utilizado como um elemento de alvenaria para edificações, principalmente no contexto de *smart buildings*.

9.0 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresenta um estudo sobre um tipo particular de concreto, com características e propriedades diferenciadas em função da utilização conjunta de cimento de alta resistência inicial e argila expandida. Este concreto pode ter aplicação específica no setor da construção civil, na produção de elementos pré-fabricados.

Após realização de análise, observou-se como resultados que as massas específicas obtidas para os compósitos cimentícios leves TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%) foram de 980, kg/m³; 991 kg/m³ e 1042,0 kg/m³, respectivamente. Houve um aumento de 5% na massa específica do compósito cimentício leve TR 3(50%) em relação ao compósito TR 1 (100%) e um aumento de 4,80% na massa específica do compósito TR 3(50%) em relação ao TR 2(75%), apresentando praticamente a mesma redução.

Quanto aos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão no estado endurecido, os compósitos cimentícios leves TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%) apresentaram valores para a resistência à compressão de 3,10 MPa, 3,40 MPa e 3,70 MPa, respectivamente. Observa-se um aumento de 16% na resistência do compósito cimentício leve TR 3(50%) em relação ao TR 1(100%). O aumento da resistência à compressão do compósito cimentício TR 3(%), agora confrontado com TR 2(75%), foi de 8,0%. O aumento da resistência à compressão verifica-se à medida que se substitui a argila expandida AE-2,5 mm pela AE-0500. As resistências à compressão obtidas para os três compósitos cimentícios leves (CCL) são superiores a 3,00 MPa, valor preconizado pela ABNT NBR 6136:2004.

Verificou-se ainda que os índices obtidos no ensaio de condutividade térmica, por meio do método do condutímetro K30 (ABNT NBR 15220:2005), nos compósitos cimentícios leves TR 1(100%), TR 2(75%) e TR 1(50%), foram de 0,16 W/m.K; 0,13 W/m.K e 0,12 W/m.K, respectivamente. A média da condutividade térmica para os compósitos cimentícios leve TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%) foi de 0,13 W/m.K.

Quanto à micrografia, esta evidenciou a alta porosidade do compósito cimentício leve CR 3(50%), o que explica a o excelente desempenho térmico, acústico e de atenuação de ondas eletromagnéticas.

O valor obtido para a atenuação de ondas eletromagnéticas para os compósito cimentícios pré-moldados leve TR 1(100%); TR 2(75%) e TR 3(50%), em media, foi 3,90 dB, valor inferior aos de materiais tradicionalmente utilizados na construção de edificações.

A partir do conjunto de informações obtido no programa experimental, observou-se que os compósitos cimentícios TR 1(100%) TR 2 (75%) e TR 3(50%) apresentaram propriedades bem semelhantes. Dentre os três compósitos cimentícios leves (CCL), O TR 3(50%) foi o escolhido para a confecção do protótipo, por apresentar maior resistência à compressão. Pode ser utilizado em elementos pré-moldados, devido, principalmente, à diminuição no tempo de moldagem e do baixo peso próprio. O elemento de alvenaria pré-moldado leve terá a finalidade de ser aplicação como um elemento de vedação com baixa massa específica, excelentes propriedades acústicas e térmicas que permitem a transparência da propagação de ondas eletromagnéticas.

Na temática do desenvolvimento de novos materiais, a indústria da construção civil tem a responsabilidade de fomentar o desenvolvimento de materiais inovadores capazes de ser utilizados na construção de edificações e que proporcionem conforto térmico, acústico e, ao mesmo tempo, permitam transparência da propagação para o sinal de rádio frequência. Nesse contexto, os *smart buildings* apresentam-se como um promissor nicho de mercado a absorver esses novos materiais de natureza mais sustentáveis.

Por fim, esperamos, através desse estudo, contribuir não apenas para inovações no meio da construção civil, mas também para ampliar as novas possibilidades de proteção ao meio ambiente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No transcorrer do desenvolvimento desta pesquisa e análises dos resultados, referentes ao desenvolvimento do compósito cimentício leve (CCL), observaram-se alguns aspectos do estudo que mereciam maior aprofundamento científico. Com isso, são sugeridas algumas propostas de desenvolvimentos para trabalhos futuros:

- estudo mais aprofundado da perda de transmissão acústica e análise do ciclo de vida (ACV);
- análise do comportamento estrutural de painéis do compósito pré-moldado leve armado;
- desenvolvimento de placas reforçadas com fibra, para utilização em forros e revestimento no tratamento térmico e acústico de ambientes já edificados;
- estudo mais aprofundado da condutividade térmica e da transparência a onda eletromagnética;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; ABDELBASET, M. M. *Utilization of waste rubber in non-structural applications*. Construction and Building Materials, v. 91, p. 195–207, 2015.

ALI-RANTALA, P. et al. *Different Kinds of Walls and Effect on the Attenuation of Radiowaves Indoors*. *IEEE*, pp. 1020-1023.02003

ALVES, A.; MOTA, J. **Casas Inteligentes**. 1. ed. Lisboa: Centro Atlântico, 2003. p. 141.

ANGELIN, A. F. *Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais*. Dissertação de mestrado. Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ANGELIM, Andressa Fernandes. **Análise dos desempenhos físicos mecânicos térmicos acústicos da microestrutura do concreto leve auto adensável emburrachado** (CLAE). Tese (doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia- Limeira, SP:2018.

ANGELIN, A.F.; Ribeiro, L.C.L.J.; Pires, M.S.G.; Jacintho, A.E.P.G.A.; Lintz, R.C.C.; Barbosa, L.A.G. *Effects of Consumption of Cement in Mechanical Properties of Lightweight Concrete Containing Brazilian Expanded Clay*. Applied Mechanics and Materials, v. 368-370, p. 925-928, 2013a.

AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção – Normas, Especificações, Aplicações e Ensaios de Laboratório**. 1. ed. São Paulo. Pini, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, "*Standard specification for mortar for unit masonry*", In: Annual Book of ASTM Standards: Chemical-Resistant Nonmetallic Materials; Vitrified Clay Pipe; Concrete Pipe; Fiber-Reinforced Cement Products; Mortars and Grouts; Masonry; Precast Concrete: Designation C270, v. 04.05, Pennsylvania, June 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2009 versão corrigida:2019**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018-Cimento Portland** - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.**NBR 12655: Concreto de cimento Portland-Preparo, controle, recebimento e aceitação-Procedimento**. Rio de Janeiro,2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria** - Requisitos. Rio de Janeiro,2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo –Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: 2005 Versão Corrigida 2:2009. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-5 - Desempenhotérmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575/2013-Norma de Desempenho – Edificações Habitacionais.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5728/2007- Concreto-Ensaio de compressão de corpos cilíndricos–** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 7215, 1996: Cimento Portland- Determinação da Resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35 – Agregados Leves para Concreto Estrutural – Especificações.** Rio de Janeiro, 1995.

ATKIS, P. e Jones, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente,** Porto Alegre: Bookman, 2001, p.39-40.

BAUER, L. A. Falcão. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 490 p.

BAHAWERES R. B., KARYA O. T., and ALAYDRUS M. **Transmission of Real-time Video Signal with Interference Density and Human Traffic.** *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 2015; 13(4), 1352-1360.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** 2ª edição. São Paulo, 2011.

BORJA, E. V. **Efeito da adição da argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BreezeNET PRO.11 Series Reference Guide, Cat. No. 213026, 1998. Disponível em: <www.dateline.ru/download/manual/man-breezenet-proref.pdf>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BSI-5628, *Code of practice for use of masonry. Structural use of unreinforced masonry*, Part 1, London, December 1992.

CARBAJO, J. et al. *Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates*. *Materiales de Construccion*, v. 65, n. 320, 2015.

COELHO, Darlene Figueiredo Borges; CRUZ, V. H. do Nascimento. *Edifícios inteligentes : uma visão das tecnologias aplicadas* [livro eletrônico] – São Paulo : Blucher, 2017. 136 p. ; PDF, il. color.

COLOM, X. et al. *Acoustic and mechanical properties of recycled polyvinyl chloride/ground tyre rubber composites*. *Journal of Composite Materials*, v. 48, n. 9, p. 1061–1069, 2013.

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

CORSON, D. & LORRAIN, P.; 1970. *Eletromagnetic fields and waves*, 2ª Ed., San Francisco (USA), W. H. Freeman and Company, 706 p.

COST 231, *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems*, Final Report – European Commission, 1999.

CINEXPAN. Disponível em <http://www.cinexpan.com.br/>. Acessado em 07/08/2021.

DEREK, ; CLEMENTS-CROOME, J. *What do we mean by intelligent buildings? Automation in Construction*, Reading, 1997. p. 6.

DOBKIN, D. M. *RF for Engineering for Wireless Networks: Hardware, Antennas, and Propagation (Communications Engineering)*, Newnes, 2015.

DÖHLER, M. *An Outdoor-Indoor Interface Model for Radio Wave Propagation for 2.4, 5.2 and 60 GHz*, Msc Thesis – King's College London, 1999. Disponível em: <<http://www.ctr.kcl.ac.uk/members/mischa.asp>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço energético nacional, 2020*. Disponível em: <<http://www.ctr.kcl.ac.uk/members/mischa.asp>>.

FARAHANI, S. Chapter 5 – *RF Propagation, Antenas, and Regulatory requirements*. In: *ZigBee Wireless Networks and Transceives*, PP. 171-205, Newnes, 2008.

FRENZER JR., L. E. *Fundamentos de comunicação eletrônica: Linhas, micro-ondas e antenas*. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FRONTCZAK, M.; WARGOCKI, P. (2011) *Literature Survey on How Different Factors Influence Human Comfort in Indoor Environments*. *Building and Environment*, 46, 922-937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>.

GHDAN R. H.; HAMZA D. M. *Effect of rubber treatment on compressive strength and thermal conductivity of modified rubberized concrete*. Journal of Engineering and Development, v. 15, n. 1813–7822, p. 8, 2011.

GOLEWSKI, G.J.; SADOWSKI, T. *An analysis of shear fracture toughness K_{IIc} and microstructure in concretes containing fly-ash*. Construction and Building Materials, p.207-214, 2014.

GOMES, Emilly Gércica Santos. **Desempenho térmico de alvenaria: uma alternativa com o uso de blocos EVA**. Dissertação (Mestrado): Universidade Federal da Paraíba- João Pessoa, 2015.

GOMES NETO, D. P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura – Estudo de caso**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 156p. 1998.

GEORGOPOULOS, Costas, and Andrew Minson. 2014. *Sustainable Concrete Solutions*. Oxford: John Wiley & Sons, Inc. <https://books.google.com.br/books?id=ZIWTAgAAQBAJ>.

HAGEMANN, Sabrina Elicker. **Apostila básica de materiais de construção básicos**. Rio Grande do Sul: Universidade Aberta do Brasil Instituto Federal Sul-Riograndense, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J; 1993. **Fundamentos da física-** Vol. 3 e 4, 4ª Ed., Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., Rio de Janeiro.

HOLMES, N.; BROWNE, A.; MONTAGUE, C. *Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement*. Construction and Building Materials, v. 73, p. 195–204, 2014

HUTNER JUNIOR, Ormy Leocádio. **Ondas eletromagnéticas de alta frequência: determinação do coeficiente de atenuação em sistemas construtivos de vedação**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro, 5 ed., 698 p., 2003.

INSTITUT FÖR BAUBIOLOGIE + NACHHALTIGKEIT (IBN). **Radiaciones**. Olba, Espanha: Plubidisa, 2011.

IWAMAMOTO, LUI CESAR. **Desempenho mecânico e acústico de concreto leve autoadensável com argila expandida e incorporação de EPS de diferentes granulometrias**. Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual de Campinas. Limeira, São Paulo, 2020

JALAL, M.; MANSOURI, E.; SHARIFIPOUR, M.; POULADKHAN, A.R. *Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles*. Materials and Design, p.389-400, 2012.

JUNIOR, W. V. **Avaliação do Ambiente Eletromagnético em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde**, Florianópolis: UFSC, 2006.

KHÁDIA, F. Q. R., MOURA, MOURA, H. B. S., ANCHIETA., R. G. A., SANTANA, J. R. P., SILVA., M. O.B. **Análise comparativa das propriedades físico-mecânicas de blocos de concreto leve de EPS e bloco de concreto convencional**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia-CONTECC, Belém – PA, 2017.

MALAISKIENE, J.; Vaiciene, M.; Zurauskiene, R. *Effectiveness of technogenic waste usage in products of building ceramics and expanded clay concrete*. In: Construction and Building Materials, VGTU (Vilnius ediminas Technical University), Lithuania, 2011.

MARTINS, V. G. **Medição de campos eletromagnéticos em alta frequência visando segurança pessoal**. Tese de Doutorado, UFMG-2000.

MASSA. A. C. X., **Avaliação de desempenho mecânico e termmico de material compósito para envoltória de habitações visando eficiência energética**. Dissertação (Mestrado);Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-Paraíba.

MAXWELL, J. C. ; 1954. *A Treatise on eletricity & Magnetism*. 3ª Ed. Alterada da 3ª Edição de 1891, New York (USA), Dover Publications, Inc., Vol. 1 e 2 , 506 e 500p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2ª Edição, São Paulo, IBRACON, 2014.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Convreto: estrutura propriedades e materiais*. IBRACON. São Paulo, 2008.

MICHELI, D.; DELFINI, A.; SANTONI, F.; VOLPINI, F.; MARCHETTI, M. **Measurement of electromagnetic field attenuation by building walls in the móbile phone and satellite navigation frequency bands**. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, v. 14, p. 698–702, 2015. IEEE.

MOHAMMED, M.K.; DAWSON, A.R.; THOM, N.H. *Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler*. Construction and Building Materials, p.84-92, 2013.

MORAVIA, W. G; OLIVEIRA, C. A. S.; VASCONCELOS, W. L. **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve**. Cerâmica, vil. 52, p. 193, 2006.

NEVILLE, A. M., **“Propriedades do Concreto”** – 2ª Edição – Ed. PINI, São Paulo, 2015.

NOGUEIRA, C. L.; RENS, K. L. **Ultrasonic wave propagation in EPS lightweight concrete and effective elastic properties**. Construction and Building Materials, v. 184, p. 634–642, 2018.

OKTAY, H.; YUMRUTAŞ, R.; AKPOLAT, A. *Mechanical and thermophysical properties of lightweight aggregate concretes*. Construction and Building Materials, v. 96, p. 217–225, 2015.

OWENS, P. L. *Lightweight aggregates for structural concrete*. In: *Structural lightweight aggregate concrete*. Edited by J.L. Clarke. 2005.

PÁDUA, I. H. D. **Caracterização de edifícios inteligentes: um caso exemplo**. 1. ed. Belo Horizonte: [s.n.], 2006. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de pós-graduação da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

PESSETTE, J. B.; PELISSER, F. *Efeito da borracha reciclada de pneus na condutividade de paredes de concreto*. Artigo submetido ao curso de Engenharia Civil da UNESC. Criciúma/SC, n. 1, p. 1–15, 2012

PAUL, C. R., *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

QUEIROZ, C. S. **Gestão de riscos da exposição humana a campos eletromagnéticos oriundos de estações rádio base: Estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto/MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011

ROCHA, Fabiano Melo Duarte. **Aproveitamento de resíduos sólidos industriais em materiais alternativos na perspectiva da construção seca: Bloco EVA-Intertravamento e racionalização das alvenarias**. Dissertação (Mestrado): Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2008.

RODRIGUES, D.; PERENSIN, S. **Edifícios Inteligentes X Certificação Green Building**, Santo André, 2009. .

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos.–dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

RICHTER, Ernesto Henrique. **Atenuação de sinal de rádio frequência por diferentes materiais em ambiente indoor**. Dissertação de mestrado- Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2020.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações**. 1ª Ed. Editora PINI. São Paulo 2009.

RILEM. *Terminology and definitions of lightweiight concrete, recommendation LCI*, 1st edition.1975.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. *Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida*. Revista Matéria, v. 15, n. 1, p. 031–039, 2010

SADIKO, M. N. **Elementos de eletromagnetismo**. 3ª Ed. Porto Alegre, Artmed Editora S/A. Porto Alegre- RS, 2008.

SAGNARD, F.; EL ZEIN, G. *In Situ Characterization of Building Materials for Propagation Modeling: Frequency and Time Responses*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 53 (10), PP 3166-3173, 2005

SARKAR, S. L., AIMIN, X., JANA, D. *Scanning electron microscopy X-ray microanalysis of concretes*. In: Ramachandran, V. S., Beaudoin, J. J. (eds). *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology – Principles, techniques, and applications*, New Jersey: Noyes Publications, pp. 231-274. 2001.

SEYBOLD, J. S, *Introduction to RF Propagation*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005

SHAH, S. F. A. et al. *Evaluation of Thermal and Structural Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate*. Arabian Journal for Science and Engineering, v. 39, n. 10, p. 6919–6926, 2014.

SILVA, F. H .L.; SAMPAIO, Z. L. M.; EUSTÁQUIO, H. M. B.; ALBUQUERQUE, A .A.; CAMPELO, M. S.; SILVA, I. O.B.; AMORIM, A . S.; CABRAL, F. R. **Análise das propriedades de blocos de concreto leve visando o atendimento da norma de desempenho**. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais., Natal, RN, Brasil- 2016.

SHARIATZDEH, Farhad; SOUZA, Cleonilson P.de Souza; Orland Baiocchi. **A Study of the Influence of Sustainable Material Based Walls on Wireless Communication inside Buildings**. The International Journal of the Constructed Environment 10 (2): 61-70. doi:10.18848/2154-8587/CGP/v10i02/61-70.2019.

SINOPOLI, J. **Smart Buildings, a handbook for the design and operation of building**. 1. ed. Austin: Spicewood Publishing, 2006. 33 p.

SIM, J.; Yang, K.; Kim, H.; Choi, B. *Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete*. Construction and Building Materials, p.854–864, 2012.

SUKONTASUKUL, P. *Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel*. Construction and Building Materials, v. 23, n. 2, p. 1084–1092, 2009

STONE, W. C. *Eletromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials*. NISTIR Construction Automation Program N° 3, United States Department of Commerce Technology Administration, 1997.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. Academy Press Inc. San Diego. 1990

THE SMART BUILDING INSTITUTE. Overview of High Performing Buildings. **Smart building institute.org**, 2015. Disponível em: <<http://www.smartbuildingsinstitute.org/>>. Acesso em: 3 nov. 2015.

THOMAZ, E., HELENE. P. R. L. **Qualidade no Projeto e na Execução de Alvenaria Estrutural e de Alvenarias de Vedação em Edifícios**. São Paulo: EPUSP. 2000. 31 p. (BT/PCC/252).

WENTWORTH, S. M. **Eletromagnetismo Aplicado – Abordagem Antecipada das Linhas de Transmissão**. ARTMED, 2009.

Wilson, R. *Reflection and Transmission Losses Ythrough Commom Buiçding Materials*. Fonte Networks, Inc: www.magisnerworks.com. Acesso em 25 de julho de 2020.