

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

PATRICIA FERNANDA BERGMANN BECKER

**DESEMPENHO MECÂNICO E TERMOACÚSTICO DE ARGAMASSAS
ISOLANTES PARA REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

JOINVILLE

2020

PATRICIA FERNANDA BERGMANN BECKER

**DESEMPENHO MECÂNICO E TERMOACÚSTICO DE ARGAMASSAS
ISOLANTES PARA REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da
Universidade do Estado de Santa Catarina
como requisito parcial à obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.
Orientadora: Dra. Carmeane Effting

**JOINVILLE
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Becker, Patricia Fernanda Bergmann
Desempenho mecânico e termoacústico de argamassas
isolantes para revestimento de edificações / Patricia Fernanda
Bergmann Becker. -- 2020.
123 p.

Orientadora: Carmeane Effting
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2020.

1. Argamassa termoacústica. 2. Argamassa revestimento.
3. Vermiculita. 4. Poliestireno expandido (EPS). 5. Sílica
aerogel. I. Effting, Carmeane. II. Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

PATRICIA FERNANDA BERGMANN BECKER

**DESEMPENHO MECÂNICO E TERMOACÚSTICO DE ARGAMASSAS
ISOLANTES PARA REVESTIMENTO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Carmeane Effting
UDESC

Membros:

Dr. Itamar Ribeiro Gomes
UDESC

Dr. Adriano Michael Bernardin
UNESC

Joinville, 14 de dezembro de 2020.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelos Teus planos para minha vida serem sempre maiores do que os meus sonhos.

À minha mãe, Sônia, pelo amor incondicional e por sempre incentivar todos os meus sonhos.

Ao meu esposo, Felippe, pelo companheirismo e paciência em todos os momentos.

À Universidade do Estado de Santa Catarina pela minha formação profissional.

À minha orientadora, Profa. Dra. Carmeane Effting, por todos os conselhos e conhecimentos compartilhados durante todos os anos de convivência na graduação e no mestrado.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil, em especial ao Dr. Adilson Schackow, pela ajuda no desenvolvimento de toda a pesquisa.

À CABOT Corporation pela doação das amostras de sílica aerogel.

À Vibroacústica pelo suporte e realização do ensaio no tubo de impedância, em especial ao Edmar Baars e o Gustavo Rafael Bernardes por toda a colaboração.

Ao laboratório Fab3D, do departamento de Matemática da UDESC, em especial à professora Elisandra Bär de Figueiredo, pela modelagem e impressão dos moldes 3D.

“Sou muito grato às adversidades que apareceram na minha vida, pois elas me ensinaram a tolerância, a simpatia, o autocontrole, a perseverança e outras qualidades que, sem essas adversidades, eu jamais conheceria”.
(Napoleon Hill)

RESUMO

O avanço da construção civil é estimulado pela necessidade de tornar os ambientes agradáveis aos usuários. Para tanto, buscam-se materiais alternativos que proporcionem melhor desempenho e otimização dos processos construtivos. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de argamassas com propriedades mecânicas e termoacústicas destinadas ao revestimento de edificações, substituindo parcialmente o agregado miúdo por agregados alternativos: vermiculita, poliestireno expandido e sílica aerogel. Foram produzidas argamassas de referência, argamassas com substituição de 10%, 15% e 20% do agregado miúdo por vermiculita e poliestireno expandido e com a sílica aerogel, a substituição do agregado miúdo foi de 40% e 60% em volume. As argamassas foram caracterizadas quanto as propriedades no estado fresco (índice de consistência, retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado), no estado endurecido (resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios, densidade de massa aparente, calor específico, condutividade térmica, absorção acústica e perda de transmissão), com o intuito de verificar a qualidade de uso do material. De modo a determinar a eficiência térmica e acústica das argamassas, foram determinadas as suas respectivas propriedades para comparações com a norma de desempenho vigente no Brasil. Notou-se com o cálculo dos parâmetros térmicos, que o uso dos agregados permite uma redução expressiva na espessura das argamassas de revestimento em comparação com o atendimento dos pré-requisitos determinados por norma. No sistema de alvenaria de tijolos cerâmicos, a argamassa contendo sílica aerogel atende à todas as exigências normativas com uma espessura de reboco interno e externo de 1,5 cm, enquanto a argamassa de referência necessita de uma espessura de 3,5 cm. Em relação ao isolamento acústico, a argamassa com o poliestireno expandido obteve os maiores valores para a perda de transmissão.

Palavras chave: Argamassa termoacústica. Argamassa revestimento. Vermiculita. Poliestireno expandido (EPS). Sílica aerogel.

ABSTRACT

The advancement of civil construction is stimulated by the need to make environments pleasant to users, so that they feel comfortable in relation to the environment. Therefore, alternative materials are sought that provide better performance and optimization of construction processes. This work aimed at the development of mortars with mechanical and thermoacoustic properties intended for the coating of buildings, partially replacing the fine aggregate with alternative aggregates: vermiculite, expanded polystyrene and airgel silica. Reference mortars were produced, mortars with replacement of 10%, 15% and 20% of the fine aggregate by vermiculite and expanded polystyrene and with the airgel silica, the substitution of the fine aggregate was 40% and 60% by volume. Mortars were characterized in terms of properties in the fresh state (consistency index, water retention, mass density and incorporated air content), in the hardened state (compressive strength, water absorption and voids index, apparent mass density, specific heat, thermal conductivity, sound absorption and loss of transmission), in order to verify the quality of use of the material. In order to determine the thermal and acoustic efficiency of mortars, their respective properties were determined for comparisons with the current performance standard in Brazil. It was noticed with the calculations of the thermal parameters, that the use of the aggregates allows a significant reduction in the thickness of the coating mortars in comparison with the compliance with the prerequisites determined by norm. In the ceramic brick masonry system, the mortar containing airgel silica meets all the normative requirements with an internal and external plaster thickness of 1.5 cm, while the reference mortar needs a thickness of 3.5 cm. Regarding acoustic insulation, the mortar with expanded polystyrene obtained the highest values for the loss of transmission.

Keywords: Thermoacoustic mortar. Mortar coating. Vermiculite. Expanded polystyrene (EPS). Airgel silica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Troca de calor através de paredes opacas	25
Figura 2 - Troca de calor através de paredes transparentes ou translúcidas.....	25
Figura 3 - Esquema de trocas de calor em edificação	26
Figura 4 - Esquema de transmissão, absorção e reflexão do som.....	35
Figura 5 - Material absorvente e material isolante.....	37
Figura 6 - Argamassa para revestimento de paredes ou tetos.....	43
Figura 7 - Microestrutura de pastas à base de diferentes tipos de cimento e IA's	47
Figura 8 - Transmitância térmica em função da espessura do revestimento	52
Figura 9 - Vermiculita	53
Figura 10 - Microestrutura da vermiculita	54
Figura 11 - Concreto leve contendo vermiculita e concreto convencional.....	55
Figura 12 - Poliestireno Expandido	56
Figura 13 - Concreto leve contendo EPS e concreto convencional.....	56
Figura 14 - Argamassas contendo EPS	57
Figura 15 - a) Estrutura da sílica aerogel, b) e c) SEM da estrutura da sílica aerogel	58
Figura 16 - Comparativo entre a condutividade de materiais	59
Figura 17 - Comparação entre a) grânulos de sílica aerogel e b) sílica aerogel monolítica	60
Figura 18 - Parede de cortina em Yale University	60
Figura 19 - Fluxograma representativo do procedimento experimental	61
Figura 20 - Fluxograma das etapas de caracterização das argamassas	62
Figura 21 - Vermiculita	66
Figura 22 - Poliestireno Expandido	66
Figura 23 - Microscopia ótica dos grânulos de sílica aerogel	67
Figura 24 - Grânulos de sílica aerogel	67
Figura 25 - Processo de seleção das argamassas.....	69
Figura 26 - Argamassa sobre a mesa de consistência.....	71
Figura 27 - Funil de Buchner	73
Figura 28 - Corpo de prova na prensa hidráulica	75
Figura 29 - Condutímetro.....	76

Figura 30 - Esquema para medição da condutividade térmica.....	77
Figura 31 - Esquema de medição de temperatura utilizando termopares	78
Figura 32 - Medição do coeficiente de absorção acústica em tubo de impedância... Figura 33 - a) Tubo de impedância para amostras de Ø100mm, b) Tubo de impedância para amostras de Ø29mm	40 81
Figura 35 - a) Microscópio eletrônico, b) Metalizadora.....	81
Figura 35 - Alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces.....	82
Figura 36 - Alvenaria de tijolos maciços rebocados em ambas as faces	83
Figura 37 - Índice de consistênciaFonte: A autora (2020).....	85
Figura 38 - Resistência à compressão	87
Figura 39 - Resistência à compressão <i>versus</i> densidade de massa aparente (vermiculita e EPS).....	90
Figura 40 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces.....	92
Figura 41 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos em função da espessura da argamassa de revestimento	93
Figura 42 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos maciços rebocados em ambas as faces	94
Figura 43 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos maciços em função da espessura da argamassa de revestimento.....	95
Figura 44 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado.....	98
Figura 45 - a) Absorção de água, b) índice de vazios	99
Figura 46 - MEV argamassa a) AREF, b) AV15, c) AE15, d) ASA60	100
Figura 47 – Microscópia ótica das argamassas a) AREF, b) AV15, c) AE15, d) ASA60	101
Figura 48 – Coeficiente de absorção acústica.....	102
Figura 49 - Perda de transmissão (80 – 500 Hz).....	103
Figura 50 - Custo para 1m ² de argamassa com 2,0cm de espessura.....	106
Figura 51 - Espessura mínima da argamassa de revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos cerâmicos	107
Figura 52 - Custo das argamassas em relação à espessura mínima do revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos cerâmicos	108

Figura 53 - Espessura mínima da argamassa de revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos maciços	108
Figura 54 - Custo das argamassas em relação à espessura mínima do revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos maciços	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência superficial interna e externa.....	29
Tabela 2 - Valores referenciais.....	30
Tabela 3 - Valores de absorância para radiação solar	31
Tabela 4 - Classificação de paredes em função da transmitância, atraso térmico e fator solar	31
Tabela 5 - Valores de transmitância térmica e capacidade térmica	32
Tabela 6 - Quadro de parâmetros térmicos.....	33
Tabela 7 - Valor de isolamento acústico em materiais.....	38
Tabela 8 - Valor de absorção acústica em materiais.....	39
Tabela 9 - Perda de transmissão	40
Tabela 10 - Classificação das argamassas	41
Tabela 11 - Tipos de argamassa em função do uso	42
Tabela 12 - Espessura da argamassa de revestimento	43
Tabela 13 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade	48
Tabela 14 - Classificação conforme a retenção de água	49
Tabela 15 - Densidade de massa em argamassas no estado fresco.....	49
Tabela 16 - Classificação de resistência à compressão.....	50
Tabela 17 - Composição química da vermiculita.....	54
Tabela 18 - Resistência à compressão e condutividade térmica.....	57
Tabela 19 - Composição das argamassas	63
Tabela 20 - Características do Cimento Portland CP II Z -32	64
Tabela 21 - Quantidade de corpos de prova para cada ensaio no estado endurecido e suas respectivas fases	84
Tabela 22 - Análise de variância da resistência à compressão.....	88
Tabela 23 - Teste de Tukey.....	88
Tabela 24 - Densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico	89
Tabela 25 - Atraso térmico, fator solar e capacidade térmica para os sistemas de alvenaria de tijolos cerâmicos e maciços	96
Tabela 26 - Retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado	98
Tabela 27 - Massa específica real (em g/cm ³)	100

Tabela 28 - Perda de transmissão (125 – 4000 Hz).....	104
Tabela 29 - Custo dos agregados	105

LISTA DE SÍMBOLOS

q	intensidade do fluxo térmico/fluxo de calor
K	coeficiente global de transmissão térmica
te	temperatura do ar externo
ti	temperatura do ar interno
α	coeficiente de absorção da radiação solar/absortância à radiação
Ig	intensidade de radiação solar incidente global
He	coeficiente de condutância térmica superficial externa
Rt	resistência térmica da parede
RT	resistência térmica total
U	transmitância térmica
CT	capacidade térmica
CText	capacidade térmica total da camada externa
λ	condutividade térmica
Rsi	resistência superficial interna
Rse	resistência superficial externa
c	calor específico do material
ρ	densidade de massa aparente
FSo	fator de ganho solar
Φ	atraso térmico
ZB	zona bioclimática
α_1	coeficiente de absorção sonora
ρ_1	coeficiente de reflexão sonora
τ	coeficiente de transmissão sonora
PT	perda de transmissão
M	densidade de massa superficial
f	frequência
W/C	fator água/cimento
mm	milímetro
cm	centímetro
cm ³	centímetro cúbico
m	metro

m^2	metro quadrado
m^3	metro cúbico
g	grama
kg	quilograma
ml	mililitros
MPa	mega Pascal
N	Newton
N/s	Newton por segundo
%	porcentagem
$^{\circ}C$	graus Celsius
K	kelvin
J	joule
s	segundo
h	hora
Hz	hertz
dB	decibéis
SiO ₂	dióxido de silício
W/m.K	watt por metro kelvin
W/m ² .K	watt por metro quadrado por kelvin
W/m ²	watt por metro quadrado
W/m ² . $^{\circ}C$	watt por metro quadrado por graus celsius
Kg/m ²	quilograma por metro quadrado
Kg/m ³	quilograma por metro cúbico
J/kg.K	joule por kelvin por quilograma
J/mol.K	joule por mol vezes kelvin
$m^2.K/W$	metro quadrado vezes kelvin por watt
$KJ/m^2.K$	quilojoule por metro quadro vezes kelvin
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ISO	Organização Internacional de Normalização
ASTM	American Society for Testing and Materials
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
2.1	CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES	23
2.2	NORMAS DE CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO	26
2.3	CONFORTO ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES	34
2.4	NORMAS DE CONFORTO ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES	37
2.5	ARGAMASSAS	41
2.5.1	Materiais constituintes.....	44
2.5.1.1	Cimento	44
2.5.1.2	Cal	44
2.5.1.3	Areia	44
2.5.1.4	Água	45
2.5.1.5	Aditivos químicos.....	46
2.5.2	Propriedades das argamassas.....	47
2.5.2.1	Propriedades no estado fresco.....	47
2.5.2.2	Propriedades no estado endurecido.....	49
2.5.2.3	Propriedades térmicas.....	50
2.6	ARGAMASSAS COM POTENCIAL DE ISOLAMENTO	51
2.6.1	Vermiculita	53
2.6.2	EPS	55
2.6.3	Sílica aerogel	57
3	METODOLOGIA	61
3.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	63
3.1.1	Cimento	64
3.1.2	Cal.....	64
3.1.3	Água	64
3.1.4	Areia	65
3.1.5	Aditivos	65

3.1.6	Vermiculita	65
3.1.7	EPS	66
3.1.8	Sílica aerogel	67
3.2	SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS	68
3.3	PREPARO DAS ARGAMASSAS.....	69
3.4	ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO	70
3.4.1	Índice de consistência	70
3.4.2	Densidade de massa e teor de ar incorporado	71
3.4.3	Retenção de água.....	72
3.5	ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	74
3.5.1	Resistência à compressão.....	74
3.5.2	Condutividade térmica	75
3.5.3	Densidade de massa aparente	77
3.5.4	Calor específico	77
3.5.5	Absorção de água e índice de vazios	79
3.5.6	Absorção acústica.....	80
3.5.7	Análise de microscopia.....	81
3.6	CÁLCULOS DOS PARÂMETROS TÉRMICOS.....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES – FASE I	84
4.1.1	Índice de consistência	85
4.1.2	Resistência à compressão.....	86
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES – FASE II	88
4.2.1	Condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico.....	89
4.2.2	Parâmetros térmicos	91
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE III.....	97
4.3.1	Retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado	97
4.3.2	Absorção de água e índice de vazios	99
4.3.3	Microscopia.....	100
4.3.4	Absorção acústica e perda de transmissão.....	102
4.3.5	Análise de custo e viabilidade.....	105
	CONCLUSÕES	110

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS.....	113

1 INTRODUÇÃO

Diante do processo de globalização mundial, tal realidade tem influenciado diretamente no aumento do consumo energético nas edificações. Logo, como consequência, episódios de crises energéticas ocorrem com maior frequência em todo o mundo, o que tem motivado o desenvolvimento de novos materiais que visam garantir o conforto térmico dos usuários e a eficiência energética das construções. À medida que o ser humano sofre as consequências com as crises energéticas, tem-se buscado minimizar o consumo de energia, de modo a maximizar o conforto térmico na arquitetura (PINTO, 2009).

A redução do consumo de energia das edificações é, atualmente, um dos maiores desafios, pois a maioria das edificações é executada com materiais que possuem baixos níveis de isolamento e elevadas perdas térmicas (ASTE *et al.*, 2015). A utilização de materiais com melhores propriedades térmicas afeta a maneira pela qual uma edificação reage frente às mudanças no ambiente externo e condições internas (KARLSSON *et al.*, 2013).

Tendo em vista que a argamassa de revestimento pode ser considerada como o envelope da edificação e suas propriedades térmicas auxiliam na redução do consumo energético, é importante garantir a eficácia quanto ao seu desempenho de modo a atender as mudanças nos processos normativos instituídos no país, que determinam critérios e requisitos mínimos para os sistemas de vedação verticais externos e internos (MORSY; AGLAN, 2007).

Cintra (2013) evidencia a importância de estudos que visam o desempenho termoacústico em argamassas de revestimento, abrangendo não só o ponto de vista térmico, mas também acústico, considerando que as argamassas são amplamente empregadas na construção civil e têm um papel importante no desempenho das edificações. Para obter-se o conforto acústico, é preciso garantir o isolamento acústico, objetivando minimizar a transmissão de ruídos, trazendo o conforto necessário ao usuário (FERREIRA NETO, 2009).

Considerando como alternativa que objetiva atender aos critérios normatizados no país para a obtenção de compósitos cimentícios leves, permitindo a redução da condutividade térmica e da absorção acústica,

diversos estudos têm aplicado o poliestireno expandido (EPS) e a vermiculita como alternativa viável e sustentável (SCHACKOW *et al.*, 2019; SCHACKOW *et al.*, 2014; LEAL, 2012). Em contrapartida, pesquisas têm demonstrado um potencial ainda maior de isolamento térmico e acústico, com o emprego da sílica aerogel, material este que possui baixa condutividade térmica quando comparado com outros materiais, obtido através de processos produtivos complexos e onerosos (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2011; GAO *et al.*, 2014).

Neste sentido, este trabalho pretende avaliar o potencial de isolamento termoacústico em argamassas destinadas ao revestimento de edificações, determinando suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas, visando atender aos critérios da NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013).

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à crescente globalização e o aumento populacional, a geração de energia elétrica não tem suprido toda a demanda, surgindo assim a necessidade de otimização dos recursos energéticos disponíveis (AL-HADHRAMI, AHMAD, 2008; NG *et al.*, 2016; SHOUKRY *et al.*, 2016) aliada à implantação de novas políticas que promovam a redução do consumo energético em edificações (NARAYAN *et al.*, 2007). Em meados de 2011 o Brasil enfrentou dificuldades na geração de energia, que levaram a políticas de racionamento que impulsionaram o incentivo em estratégias que visam garantir maior eficiência energética em edificações com o uso de materiais de construção alternativos (SCHACKOW *et al.*, 2019).

Diante da necessidade de tornar as edificações confortáveis no ponto de vista térmico e acústico, a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005) visa a avaliação de desempenho térmico em habitações e a NBR 15575 (ABNT, 2013) exige parâmetros mínimos de conforto aos usuários importantes para garantir a eficácia de um sistema alternativo.

O desempenho térmico das edificações está diretamente relacionado com os materiais empregados, devido à interação direta com o meio em que estão inseridos, pois os mesmos não possuem capacidade de adaptação ao

ambiente (CARNEIRO, 2013; MORSY, AGLAN, 2007). Logo, como alternativa para aprimorar o desempenho térmico, estudos têm avaliado o uso de argamassas isolantes com agregados leves que permitem a redução da condutividade térmica levando ao acréscimo na resistência térmica da argamassa (SHOUKRY *et al.*, 2016; PASSOS, CARASEK, 2018). A resistência térmica é o parâmetro que define quanto o material resiste a um fluxo de calor, quanto maior a resistência térmica do elemento, melhor é a sua eficácia de isolamento térmico (AL-SANEA *et al.*, 2013; AKANKALI, ALIBABA, 2018).

Segundo Stancato (2000), a avaliação da condutividade térmica em argamassas leves é um critério significativo para mensurar a capacidade térmica do material. Porém, além da condutividade térmica, outro fator que está diretamente ligado à eficiência do conjunto é a espessura da argamassa. O aumento da espessura da argamassa torna o sistema eficiente diante dos parâmetros térmicos, mas na prática representa complexidade de execução e elevado aumento de peso estrutural (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2011).

A crescente busca por novas tecnologias tem evidenciado a necessidade de reduzir custos, assim como elevar o bem-estar do consumidor (FLACH, 2012). Os detalhes construtivos e a previsão preliminar em projeto, influenciam diretamente na acústica dos ambientes. A escolha adequada dos elementos como a cobertura e o revestimento garante um melhor comportamento do som nos ambientes internos (LOPES, 2012). O método mais econômico e viável para a avaliação de propriedades acústicas como a perda de transmissão e absorção acústica é o tubo de impedância (CINTRA, 2013; FLACH, 2012).

Segundo CATAL *et al.* (2006), os materiais empregados na construção civil, como a alvenaria de vedação e estrutural, possuem características de isolamento acústico, mas não o suficiente para reduzir os ruídos indesejados. Logo o uso de materiais com composição fibrosa ou porosa é a alternativa eficiente para a dissipação da energia acústica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar o desempenho mecânico e termoacústico de argamassas termoacústicas isolantes para o revestimento de edificações, substituindo parcialmente o agregado miúdo por agregados leves e sílica aerogel.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar se a substituição do agregado miúdo por agregados isolantes afeta as propriedades físicas e mecânicas nos estados fresco e endurecido de argamassas;
- b) Determinar se o uso dos agregados isolantes altera a condutividade térmica, calor específico e o isolamento acústico das argamassas;
- c) Comparar o desempenho das argamassas estudadas com as normas vigentes nos países;
- d) Avaliar a influência da espessura das argamassas nos sistemas de vedação e mensurar o custo das argamassas;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordados os conceitos referentes ao conforto e desempenho térmico e acústico de edificações. Posteriormente, serão apresentados os conceitos de argamassa, seus componentes e propriedades no estado fresco e endurecido. Por fim, os materiais que conferem características isolantes às argamassas de revestimento: vermiculita, poliestireno expandido (EPS) e a sílica aerogel, suas propriedades e características.

2.1 CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES

O termo conforto térmico abrange aspectos físicos (referem-se às trocas de calor com o meio), fisiológicos (trocas fisiológicas do organismo) e psicológicos (diferentes percepções de cada indivíduo). Ao analisar o conforto térmico, é fundamental estabelecer “condições necessárias para a concepção de um ambiente térmico adequado às atividades e ocupação humanas” (LAMBERTS *et al.*, p.3, 2016).

A satisfação do ser humano com o meio em que ele está imerso é fundamental, se a pessoa está confortável diante de algum acontecimento, desperta a atenção à observação e/ou ao sentimento, sem preocupação ou incômodo. O ambiente físico torna-se neutro em relação a qualquer acontecimento (CORBELLÀ; YANNAS, 2003).

Conforme Frota e Schiffer (p. 15, 2001):

A Arquitetura deve servir ao homem e ao seu conforto, o que abrange o seu conforto térmico. O homem tem melhores condições de vida e de saúde quando seu organismo pode funcionar sem ser submetido a fadiga ou estresse, inclusive térmico. A Arquitetura, como uma de suas funções, deve oferecer condições térmicas compatíveis ao conforto térmico humano no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas.

Ainda segundo os autores a interligação entre os sistemas: homem, clima, características térmicas dos materiais e ideias iniciais de projeto, permitem o desenvolvimento de edificações que atendam as condições de conforto térmico aos usuários.

Nayak e Prajapati (2006, p.161) apresentaram os fatores que influenciam no desempenho térmico de uma edificação, são eles:

- I – Variáveis de projeto (dimensões geométricas de elementos do edifício, como paredes, teto e janelas, orientação, dispositivos de sombreamento, etc);
- II – Propriedades dos materiais (densidade, calor específico, condução térmica, transmissividade, etc);
- III – Dados climáticos (radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do ar, umidade, etc) e;
- IV – Dados de uso da construção (consequências da ocupação, luz e equipamentos, trocas de ar, etc).

De acordo com Lamberts *et al.* (2010) o comportamento térmico em edificações é reflexo dos ganhos de calor por superfícies, como: paredes, tetos, pisos e janelas, assim como o que é gerado pelos ocupantes e equipamentos e também pela renovação da ventilação de ar no ambiente.

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente ligado com as trocas térmicas da construção e o meio (COMIRAN, 2014). Quando a edificação sofre incidência do Sol, há um ganho de calor que será em função da intensidade da radiação incidente e das características térmicas da edificação, sendo classificados como trocas de calor por paredes opacas ou transparentes/translúcidas. Tratando-se de uma parede opaca exposta à radiação solar e sujeita a uma determinada diferença de temperatura entre os ambientes que as separa (Figura 1), a intensidade do fluxo térmico que atravessa essa parede é determinado pela Equação 1. Quanto a uma parede transparente ou translúcida (Figura 2) a intensidade de fluxo de calor é descrita pela Equação 2 (FROTA; SCHIFFER, 2001).

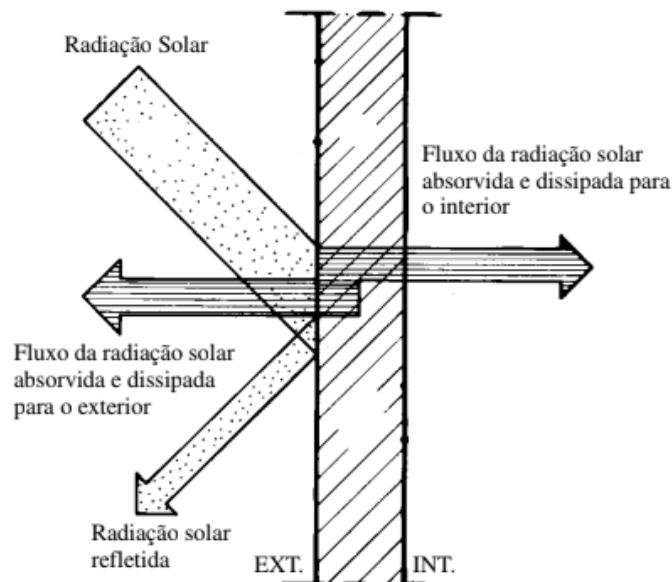
$$q = K \times \left(t_e + \frac{\alpha \times I_g}{h_e} - t_i \right) \quad (1)$$

$$q = \left(\frac{K \times \alpha}{h_e} + \tau \right) \times I_g + K \times (t_e - t_i) \quad (2)$$

Onde: q é a intensidade do fluxo térmico (W/m^2), K o coeficiente global de transmissão térmica ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), t_e é a temperatura do ar externo e t_i do ar interno ($^\circ\text{C}$), α é o coeficiente de absorção da radiação solar, I_g a intensidade

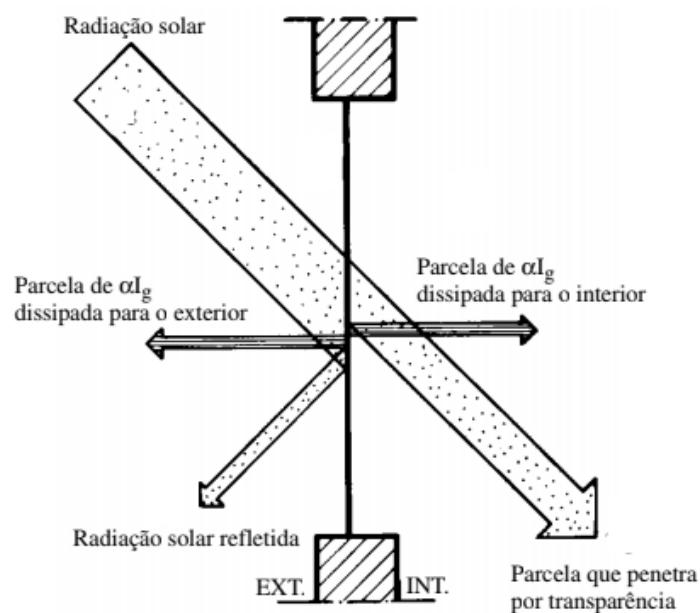
de radiação solar incidente global (W/m^2), h_e é o coeficiente de condutância térmica superficial externa ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Figura 1 - Troca de calor através de paredes opacas



Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2001).

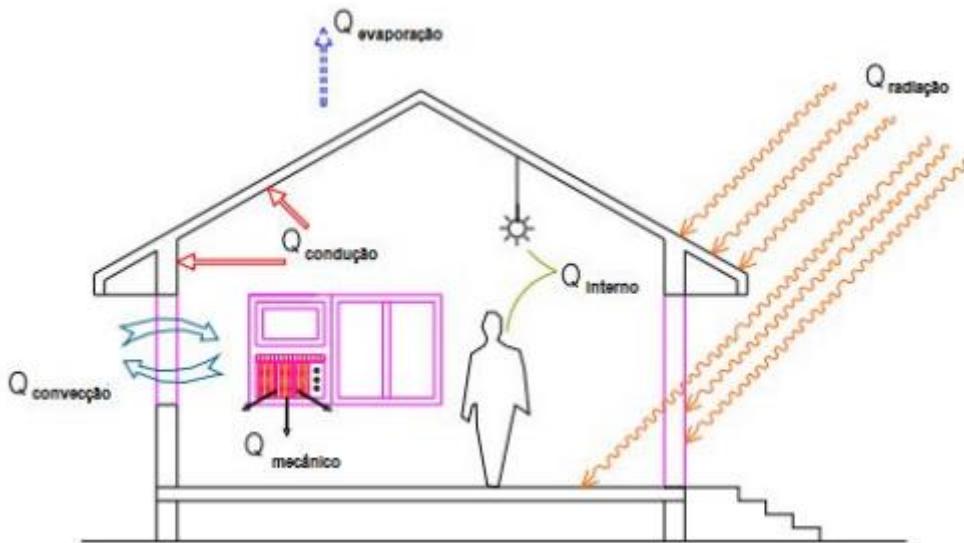
Figura 2 - Troca de calor através de paredes transparentes ou translúcidas



Fonte: Adaptado de Frota e Schiffer (2001).

A Figura 3 demonstra uma edificação sob a incidência de calor, através da radiação solar e o modo como o calor flui por condução pelas paredes, teto, cobertura e piso. Em diferentes superfícies ocorre também a transferência de calor por convecção e radiação (NAYAK; PRAJAPATI, 2006).

Figura 3 - Esquema de trocas de calor em edificação



Fonte: Adaptado de Nayak e Prajapati (2006).

2.2 NORMAS DE CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO

É primordial garantir que as edificações atendam os quesitos mínimos de conforto, qualidade e segurança aos que dela usufruem (AGOPYAN; JOHN; GOLDEMBERG, 2011). Para tanto, no Brasil há duas normas vigentes que tratam sobre o desempenho térmico em edificações, a NBR 15220 (ABNT, 2005) - Desempenho térmico de edificações e a NBR 15575 – Edifícios habitacionais (unifamiliares ou multifamiliares): desempenho (ABNT, 2013).

A NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta formas de avaliação de desempenho térmico em habitações unifamiliares de interesse social aplicáveis na fase de projeto ou a avaliação de edificações já construídas, através de medições *in loco*. Cabe salientar que esta norma leva em consideração o zoneamento bioclimático. A norma é dividida em cinco partes:

- Parte 1: Definições, símbolos e unidades;

- Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;
- Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;
- Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico;
- Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida.

A parte 1 apresenta uma série de definições, que abrangem as características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos; características térmicas de ambientes; e grandezas do clima, do ambiente e da fisiologia humana, relacionadas ao condicionamento térmico de edificações.

Entre as definições, destacam-se:

- Fluxo de calor ou taxa de fluxo de calor: quociente da quantidade de calor que atravessa uma superfície durante um intervalo de tempo pela duração desse intervalo;
- Densidade de fluxo de calor ou densidade de taxa de fluxo de calor: quociente do fluxo de calor que atravessa uma superfície pela área dessa superfície;
- Condutividade térmica: propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme;
- Resistência térmica de elementos e componentes: quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor;
- Resistência superficial interna/externa: resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna/externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção;
- Resistência térmica total: somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa;

- Transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor: inverso da resistência térmica total;
- Capacidade térmica: quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema;
- Calor específico ou capacidade térmica específica: quociente da capacidade térmica pela massa;
- Capacidade térmica dos componentes: quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área;
- Densidade de massa aparente: quociente de massa pelo volume aparente de um corpo;
- Difusividade térmica: quociente da condutividade térmica do material pela sua capacidade de armazenar energia térmica;
- Atraso térmico: tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e a sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor;
- Fator de ganho solar em elementos opacos: quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa de radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.

Na parte 2 são detalhados os procedimentos de cálculo considerando diferentes tipos de alvenaria, como: tijolos maciços, blocos de concreto sem reboco, tijolo cerâmico de 6 furos e paredes duplas com placas de concreto sem reboco. Além da alvenaria, para o caso dos tijolos maciços e cerâmicos de 6 furos, considera-se também a argamassa de revestimento e assentamento nos cálculos. Dessa forma, são obtidos os valores de resistência térmica da parede (R_t) ($m^2.K/W$), resistência térmica total (R_T) ($m^2.K/W$), transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$) e capacidade térmica (C_T) ($kJ/m^2.K$), conforme as Equações 3, 4, 5 e 6.

$$R_t = \frac{e_{alv}}{\lambda_{alv}} + \frac{e_{arg}}{\lambda_{arg}} \quad (3)$$

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{RT} \quad (5)$$

$$CT = (e \times c \times \rho)alv + (e \times c \times \rho)arg \quad (6)$$

Onde:

e corresponde à espessura do material (m);

λ é a condutividade térmica (W/m.K);

Rsi é a resistência superficial interna ($m^2.K/W$);

Rse a resistência superficial externa ($m^2.K/W$);

c é o calor específico do material (J/kg.K);

ρ corresponde à densidade de massa aparente (kg/m^3).

Os valores para de resistência superficial interna e externa são determinados conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Resistência superficial interna e externa

Rsi ($m^2.K/W$)			Rse ($m^2.K/W$)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
→	— ↑	↓ —	→	— ↑	↓ —
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: ABNT (2005).

Os valores de condutividade térmica (λ), calor específico (c) e densidade de massa aparente (ρ) são definidos por norma, conforme a Tabela 2.

A norma também demonstra os cálculos para o atraso térmico (φ) descrito nas Equações 7, 8, 9 e 10 e o fator de ganho solar (FSo) conforme Equação 11.

Tabela 2 - Valores referenciais

Material	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/(kg.K))
Argamassa comum	2000	1,15	1,00
Concreto normal	2400	1,75	1,00
Tijolo cerâmico	1600	0,90	0,92

Fonte: ABNT (2005).

$$\varphi = 1,32 \times R_t \times \sqrt{B_1 + B_2} \quad (7)$$

Considerando:

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_t} \quad (8)$$

$$B_0 = CT - C_{Text} \quad (9)$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \rho c)_{ext}}{R_t} \right) \times \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad (10)$$

Sendo que R_t é a resistência térmica de superfície do componente, CT é a capacidade térmica total e C_{Text} é a capacidade térmica total da camada externa do componente.

$$F_{So} = 4 \times U \times \alpha \quad (11)$$

Onde U é a transmitância térmica do componente e α é a absorção à radiação solar, conforme valores de referência da Tabela 3.

Na parte 3 da norma de desempenho térmico, segundo Ferreira, Souza e Assis (2017), são estabelecidos três tipos de parede (leve, leve refletora e pesada), para esta classificação devem ser determinados os valores limites de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar, como demonstra a Tabela 4.

Tabela 3 - Valores de absorção para radiação solar

Tipo de superfície		α
Chapa de alumínio (nova e brilhante)		0,05
Chapa de alumínio (oxidada)		0,15
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25
Caiação nova		0,12 / 0,15
Concreto aparente		0,65 / 0,80
Telha de barro		0,75 / 0,80
Tijolo aparente		0,65 / 0,80
Reboco claro		0,30 / 0,50
Revestimento asfáltico		0,85 / 0,98
Vidro incolor		0,06 / 0,25
Vidro colorido		0,40 / 0,80
Vidro metalizado		0,35 / 0,80
Pintura	Branca	0,20
	Amarela	0,30
	Verde clara	0,40
	"Alumínio"	0,40
	Verde escura	0,70
	Vermelha	0,74
	Preta	0,97

Fonte: ABNT (2005).

Tabela 4 - Classificação de paredes em função da transmitância, atraso térmico e fator solar

Vedações externas		Trasmitância térmica (W/m ² .K)	Atraso térmico (h)	Fator Solar (%)
Paredes	Leve	$\leq 3,00$	$\leq 4,3$	$\leq 5,0$
	Leve refletora	$\leq 3,60$	$\leq 4,3$	$\leq 4,0$
	Pesada	$\leq 2,20$	$\geq 6,5$	$\leq 3,5$

Fonte: ABNT (2005).

Enfim, nas partes 4 e 5 são apresentados os métodos laboratoriais para a obtenção dos valores de condutividade térmica e resistência térmica, seguindo o princípio da placa quente protegida, exemplificado na parte 4, ou

então através do método fluximétrico. Na metodologia deste trabalho, é explicado o princípio da placa quente protegida, método utilizado para a determinação das propriedades desta pesquisa.

Após a publicação da NBR 15220 (ABNT, 2005) surgiu a necessidade de aperfeiçoar e adaptar alguns critérios da norma (BOGO, 2016). Logo em 2013 foi instituída a NBR 15575 (ABNT, 2013) que une diversos parâmetros de qualidade, determinando níveis resistência, segurança e conforto proporcionados por cada um dos sistemas que compõem um imóvel: estrutura, pisos, vedações, coberturas e instalações, dividida assim em 6 partes:

- Parte 1: Requisitos gerais;
- Parte 2: Requisitos para sistemas estruturais;
- Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos;
- Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas;
- Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas;
- Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários.

Destaca-se a parte 4 da norma, que apresenta critérios de transmitância e capacidade térmica de paredes externas em função da zona bioclimática da edificação, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de transmitância térmica e capacidade térmica

Transmitância térmica (W/m ² .K)			
Zonas 1 e 2		Zonas 3 a 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^* \leq 0,6$	$\alpha^* > 0,6$	
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$	
* α é a absorção à radiação solar da superfície externa da parede			
Capacidade térmica (kJ/m ² .K)			
Zonas 1 a 7		Zona 8	
≥ 130		Sem requisito	

Fonte: ABNT (2013).

Por fim, tem-se um quadro resumo (Tabela 6) considerando as duas normas vigentes e os limites de cada parâmetro térmico em função da zona bioclimática.

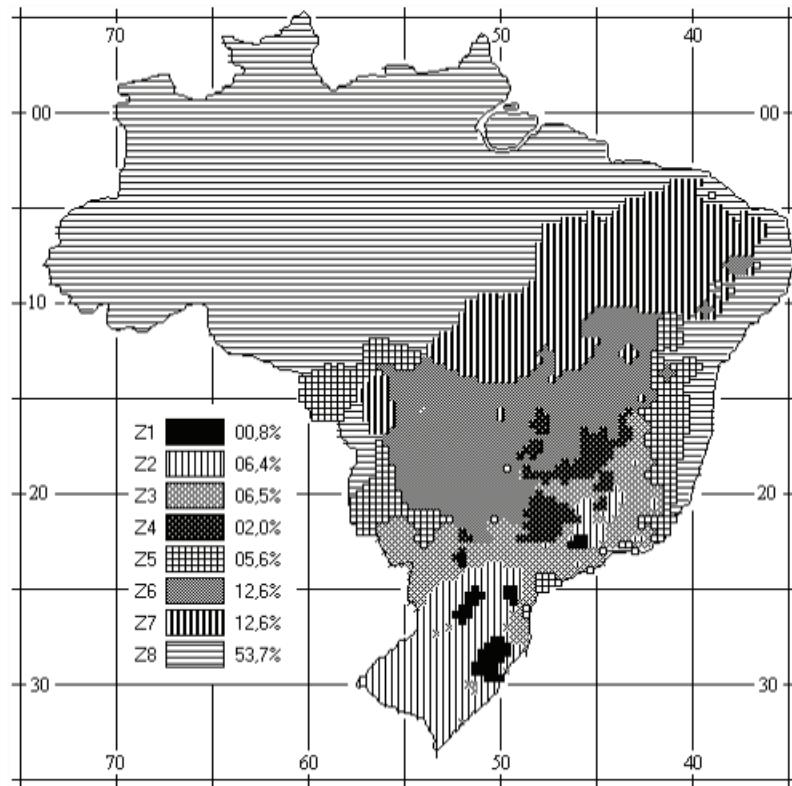
Tabela 6 - Quadro de parâmetros térmicos

		Zona bioclimática	ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
NBR 15220 (ABNT, 2005)	Transmitância térmica (W/m ² .K)		≤3,00	≤3,00	≤3,60	≤2,20	≤3,60	≤2,20	≤2,20	≤3,60
	Atraso térmico (h)		≤4,3	≤4,3	≤4,3	≥6,5	≤4,3	≥6,5	≥6,5	≤4,3
	Fator solar (%)		≤5,0	≤5,0	≤4,0	≤3,5	≤4,0	≤3,5	≤3,5	≤4,0
	Absortância solar		≤0,4	≤0,4	≤0,3	≤0,4	≤0,3	≤0,4	≤0,4	≤0,3
NBR 15575 (ABNT, 2013)	Transmitância térmica (W/m ² .K)	U≤2,50		U≤3,70 para $\alpha \leq 0,6$						
	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)			U<2,50 para $\alpha > 0,6$						
		CT≥130							-	

Fonte: Adaptado de Ferreira, Souza e Assis (2017).

O Brasil é dividido em 8 zonas bioclimáticas, que foram definidas através da análise de dados climáticos coletados entre 1931 a 1990, os quais foram classificados por meio da Carta Bioclimática de Givoni adaptada ao Brasil. A NBR 15220 - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, apresenta detalhadamente essas zonas bioclimática conforme a Figura 4.

Figura 4 – Zonas bioclimáticas brasileiras



Fonte: ABNT (2005).

2.3 CONFORTO ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES

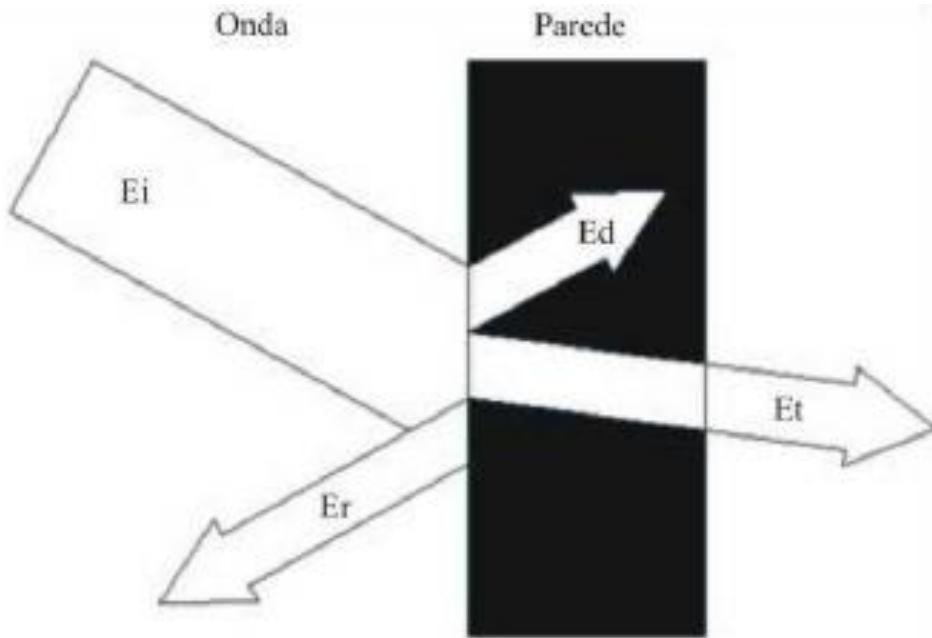
Quando tratamos do conforto acústico em edificações, há a preocupação em reduzir os problemas causados por ruídos em ambientes. A propagação da onda sonora em um ambiente aberto ou livre, não sofre a interferência de outras ondas, em contrapartida nos ambientes fechados a interferência das ondas é dada pelas superfícies como paredes, teto e piso (BISTAFA, 2006).

O isolamento acústico é a capacidade que materiais possuem de formar uma barreira, que impossibilita a passagem da onda sonora de um ambiente ao outro (CARVALHO, 2006), em outras palavras, é a maneira como o som atravessa o material.

Segundo Silva (1971), o mecanismo de transmissão correspondente à incidência de um som sobre uma construção é exemplificado pela Figura 5. Onde parte da energia incidente sobre uma parede (E_i) reflete para o interior do

ambiente (Er) e a energia restante é absorvida e dissipada (Ed), transformando-se em energia calorífica ou mecânica. Por fim, a energia remanescente atravessa a parede (Et).

Figura 5 - Esquema de transmissão, absorção e reflexão do som



Fonte: Silva (1971).

Conforme os mecanismos de transmissão do som que incidem sobre uma superfície, medem-se: o coeficiente de absorção sonora (α_1), definido pela Equação 12; o coeficiente de reflexão sonora (ρ_1) calculado pela Equação 13 e por fim; o coeficiente de transmissão sonora (τ) conforme a Equação 14 (BISTAFA, 2006).

$$\alpha_1 = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{incidente}} - I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (12)$$

$$\rho_1 = \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (14)$$

O coeficiente de absorção acústica trata de uma medida da capacidade de um material em absorver o som. O coeficiente de transmissão sonora determina a capacidade de uma parede isolar ou transmitir o som. Quanto menor for este coeficiente, maior será a capacidade de isolamento desta parede. O parâmetro que se utiliza para avaliar a isolação sonora de uma parede é a chamada perda na transmissão sonora, calculada através da Equação 15, também conhecida como a Lei de Massa (BISTAFA, 2006).

$$PT = 20 \log(f \times M) - 47,7 \quad (15)$$

Onde:

PT é a perda de transmissão (em dB);

M é a densidade de massa superficial (em kg/m²);

f a frequência do som incidente (em Hz).

Cintra (2013, p.55) destaca a importância entre a diferenciação dos conceitos de isolamento e absorção acústica:

Não se deve confundir isolamento com absorção acústica. O isolamento é a maneira como o som atravessa o material, enquanto a absorção é a capacidade do material em transformar energia sonora, que o atinge, em energia térmica e mecânica, como acontece num carpete grosso, no qual o som que chega praticamente desaparece, pois a perda de energia ocorre nos poros e fios do tapete que não consegue refletir de volta ao ambiente.

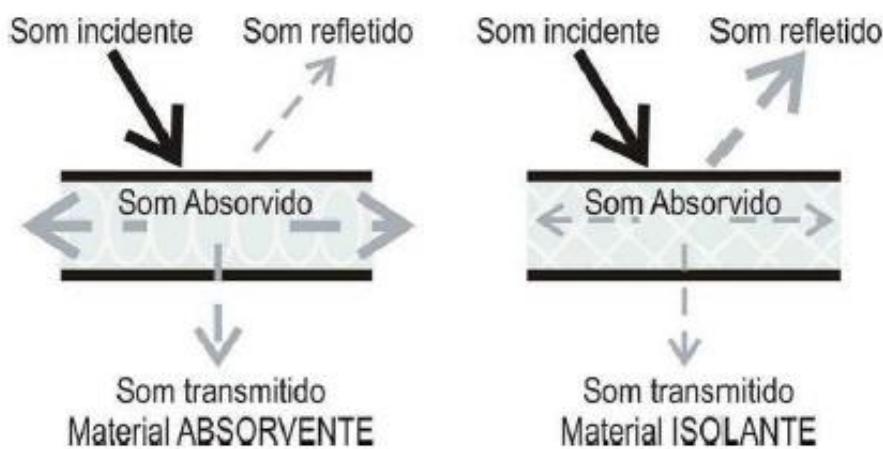
Segundo Gerges (2000), existem 4 tipos de materiais que podem ser utilizados para garantir o conforto acústico em um ambiente, sendo:

- Materiais isolantes: impedem a passagem de ruído de um ambiente ao outro, como por exemplo o tijolo maciço;
- Materiais refletores: podem ser isolantes e aumentam a reverberação interna do som, como o azulejo e a cerâmica;
- Materiais absorventes: absorvem o som, como exemplo os materiais porosos;
- Materiais difusores: refletem o som de forma difusa, sem ressonâncias.

De acordo com Carvalho (2006), na construção civil em geral os materiais que visam melhor conforto acústico são isolantes ou absorventes das

ondas sonoras. Contudo, materiais que possuem potencial de isolamento acústico praticamente não possuem poder de absorção acústica e vice-versa, conforme a Figura 6. Bistafa (2006, p.232) caracteriza como “um bom absorvente de som é o material que “respira”, ou seja, o material que permite às moléculas do ar penetrar e se movimentar em seu interior”.

Figura 6 - Material absorvente e material isolante



Fonte: Carvalho (2006).

2.4 NORMAS DE CONFORTO ACÚSTICO EM EDIFICAÇÕES

Ao tratar do isolamento acústico, a propriedade está relacionada com materiais que criam barreiras por reflexão, impedindo que o som se propague ao outro ambiente. Para isso, é necessário o emprego de materiais mais densos, como o concreto, vidro ou chumbo (SOUZA, 2006).

A NBR 12179 (ABNT, 1992) – Tratamento acústico em recintos fechados, apresenta valores na frequência de 500 Hz e expressos em decibéis, respectivos a elementos de uma edificação, conforme a Tabela 7.

A norma também apresenta valores de coeficientes de absorção acústica para materiais comumente utilizados na construção civil, os quais possuem baixa densidade e a presença de fibras ou poros (Tabela 8). Nota-se que o coeficiente de absorção varia em função da frequência, quanto mais próximo do zero significa que toda a energia incidente é refletida, logo,

ausência de absorção. Quanto mais próximo ao 1, significa absorção total de energia.

Tabela 7 - Valor de isolamento acústico em materiais

Material	Isolamento acústico em decibéis (500 Hz) (dB)
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 10 cm)	45
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 20 cm)	50
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 30 cm)	53
Alvenaria de tijolo maciço (espessura de 40 cm)	55
Alvenaria de tijolo furado (espessura de 25 cm)	10
Chapas ocas de gesso (espessura de 10 cm)	24
Compensado de madeira (espessura de 6,0 mm)	20
Compensado de madeira (espessura de 6,0 mm) duas placas com camada de ar intermediária de 10 cm	25
Concreto - laje entre pavimentos	68
Vidro de janela (espessura de 2,0 a 4,0 mm)	20 a 24
Vidro grosso (espessura de 4,0 a 6,0 mm)	26 a 32
Vidro de fundição (espessura de 4 a 6 mm) duas placas com camada de ar intermediária	36

Fonte: ABNT (1992).

A NBR 15575 – Edifícios habitacionais (unifamiliares ou multifamiliares): desempenho (ABNT, 2013) aborda na Parte 4 - Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE, requisitos e critérios para verificação do isolamento acústico entre meios internos e externos, entre unidades autônomas e entre dependências de uma unidade e áreas comuns.

Segundo a norma de desempenho, os métodos de verificação podem ser realizados através de ensaios de laboratório ou medições em campo. O método de ensaios em laboratório é prescrito pela ISO 10140-2 (ISO, 2010) onde determina-se a isolamento sonora de componentes e elementos construtivos, como paredes, janelas, portas etc. Para as medições em campo, o método é prescrito pela ISO 16283-1 (ISO, 2014) e ISO 16283-3 (ISO, 2016), respectivamente para paredes internas e fachadas, determinando então o isolamento sonoro global do sistema de vedação.

Tabela 8 - Valor de absorção acústica em materiais

Material	Espessura (cm)	Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Lã de rocha	10,0	0,42	0,66	0,73	0,74	0,76	0,79
Lã de vidro solta	10,0	0,29	0,55	0,64	0,75	0,8	0,85
Feltro	1,2	0,02	0,55	0,64	0,75	0,8	0,85
Piso de tábuas de madeira sobre vigas	-	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07
Placas de cortiça sobre concreto	0,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Carpete tipo forração	0,5	0,1	-	0,25	-	0,4	-
Tapete de lã	1,2	0,2	0,25	0,35	0,4	0,5	0,75
Concreto aparente	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Parede de alvenaria	-	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Vidro	-	0,18	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02
Cortina de algodão com dobras	-	0,07	0,31	0,49	0,81	0,61	0,54
Reboco áspero, Cal	-	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,07
Tapete 5mm sobre feltro(5mm)	1,0	0,07	0,21	0,57	0,66	0,81	0,72
Madeira compensada de 3mm a 50mm	0,3	0,25	0,34	0,18	0,1	0,1	0,05
Forro de gesso c/manta de lã de vidro	2,0	0,68	0,9	0,78	0,65	0,5	0,45
Cortina de veludo	-	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65

Fonte: ABNT (1992).

Considerando que as argamassas empregando agregados leves são materiais porosos, assim como nos estudos de Cintra (2013) e Flach (2012), as autoras determinaram o coeficiente de absorção acústica através do ensaio de tubo de impedância. Além do coeficiente de absorção, é possível obter a perda de transmissão através do mesmo ensaio.

Conforme Bistafa (2006), a Tabela 9 correlaciona os valores de perda de transmissão para diversos elementos em função da espessura e densidade de massa superficial. Nota-se que quanto maior a espessura do elemento, maior é sua perda de transmissão, logo mais isolante.

Tabela 9 - Perda de transmissão

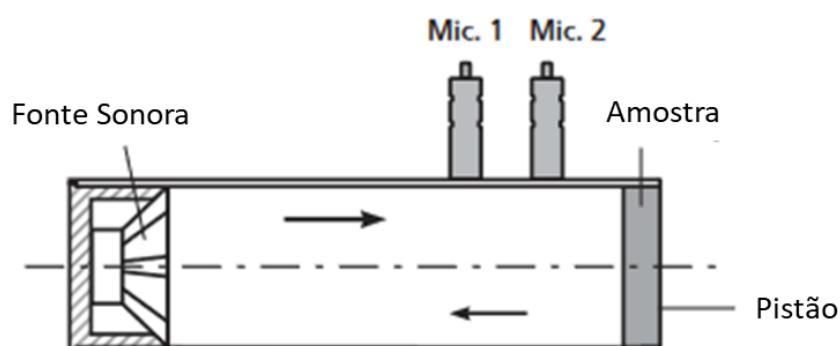
Elemento	Espessura (mm)	Densidade de massa superficial (kg/m ²)	Frequência (Hz)							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Concreto	100	230	32	37	36	45	52	59	62	63
Concreto	200	460	36	42	41	50	57	60	65	70
Concreto	300	690	37	40	45	52	59	63	67	72
Tijolos revestidos com argamassa	125	240	30	36	37	40	46	54	57	59
Tijolos revestidos com argamassa	255	480	34	41	45	48	56	65	69	72
Tijolos revestidos com argamassa	360	720	36	44	43	49	57	66	70	72

Fonte: Adaptado de Bistafa (2006).

O tubo de impedância consiste em um ensaio no qual é posicionado um alto falante na extremidade de um tubo de seção transversal, a função do alto falante é produzir as ondas acústicas. Na extremidade oposta ao alto falante, é colocado uma terminação rígida, que reduzirá ao máximo a absorção e transmissão pelas paredes. A amostra de estudo é posicionada entre o tubo e a terminação rígida (GERGES, 2000).

A Figura 7 apresenta o esquema de medição conforme o fabricante do equipamento.

Figura 7 - Medição em tubo de impedância



Fonte: Brüel & Kjaer (2019).

2.5 ARGAMASSAS

Conforme Fiorito (2009), a argamassa possui como componentes água, agregados e aglomerantes, os quais quando misturados devem garantir aderência e endurecimento. O uso de determinados aglomerantes, associados ou não, é o fator que determina qual será a destinação da argamassa. As argamassas com o uso apenas do cimento são comumente utilizadas em fundações, chapisco e revestimento de obras hidráulicas, onde é necessário que a argamassa seja o mais impermeável possível. Enquanto as argamassas à base de cal têm como característica maior plasticidade para aplicação e acabamento mais regular e costumam ser usadas em reboco, emboço e assentamento de alvenaria não estrutural. Por fim, tem-se as argamassas mistas, compostas pelo cimento e a cal, empregadas em contrapisos, no assentamento de revestimentos e assentamento de alvenarias estrutural ou de vedação.

Para Carasek (2010), as argamassas podem ser classificadas de duas maneiras, conforme as Tabelas 10 e 11. A primeira tabela é mais abrangente, pois leva em consideração sete diferentes classificações de argamassas, enquanto a Tabela 11 categoriza as argamassas comuns de acordo com a sua função. Quando destinada ao revestimento de paredes ou tetos pode ser formada por inúmeras camadas: chapisco, emboço, reboco, camada única e revestimento decorativo monocamada (RDM), conforme a Figura 8.

Em geral, as argamassas de revestimento possuem diferentes espessuras de acordo com a disposição da parede, seja ela externa, interna ou de teto, conforme as recomendações da NBR 13749 (ABNT, 2013) apresentadas na Tabela 12. Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013) o revestimento de argamassa é composto por camadas, cada uma com as suas respectivas funções e quando superpostas devem deixar o substrato apto a receber o acabamento final.

Tabela 10 - Classificação das argamassas

(continua)

Classificação das argamassas	
Função	Refratária

	Comum
Natureza do aglomerante	Aérea
	Hidráulica
Tipo do aglomerante	Cal
	Cimento
	Cimento e cal
	Gesso
	Cal e gesso
Número dos aglomerantes	Simples
	Mista
Consistência da argamassa	Seca
	Plástica
	Fluída
Plasticidade da argamassa	Pobre ou magra
	Média ou cheia
	Rica ou gorda
Densidade da argamassa	Leve
	Normal
	Pesada

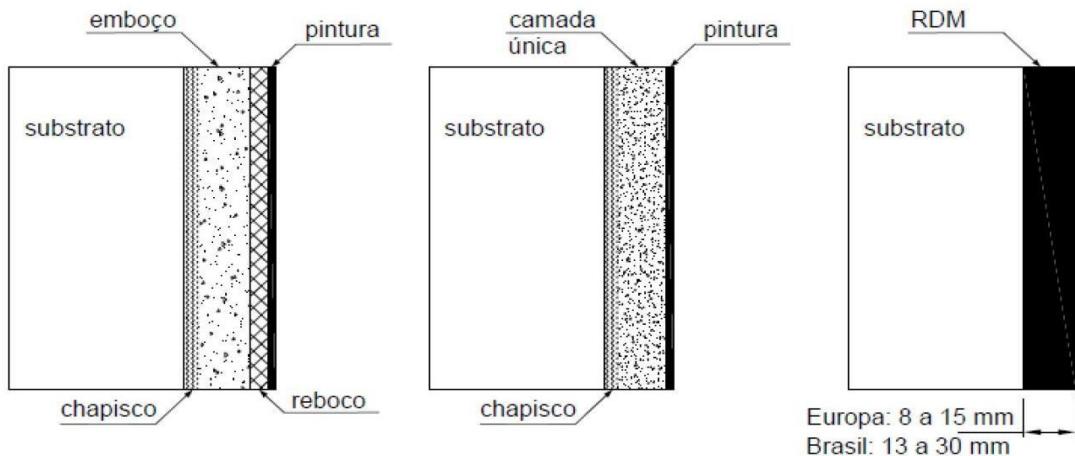
Fonte: Carasek (2010).

Tabela 11 - Tipos de argamassa em função do uso

Função	Tipo
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes / pisos)	Argamassa de rejuntamento
	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

Fonte: Carasek (2010).

Figura 8 - Argamassa para revestimento de paredes ou tetos



Fonte: Carasek (2007).

Tabela 12 - Espessura da argamassa de revestimento

Revestimento	Espessura (mm)
Parede interna	$5 \leq e \leq 20$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Teto	$e \leq 20$

Fonte: ABNT (2013).

Segundo Cintra (2013), as argamassas têm sofrido diversas modificações, com o intuito de industrializar o produto, além da inovação aplicada às técnicas construtivas. Ressalta-se que a argamassa compõe um sistema de revestimento quando associada aos elementos de vedação, representando uma parcela importante na edificação, aos quais deve garantir a satisfação do usuário final quanto ao conforto.

Além do amplo uso da argamassa para revestimentos, suas propriedades devem garantir o isolamento térmico e acústico em 30 e 50% respectivamente, estanqueidade mínima de 70% e a capacidade de sofrer desgaste superficial sem comprometer sua resistência (CARASEK, 2010).

2.5.1 Materiais constituintes

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define a argamassa como sendo uma mistura homogênea, basicamente composta por água, agregado miúdo e aglomerante, podendo conter aditivos ou não.

É composta por um ou mais aglomerantes (cimento Portland e cal), agregados inertes (areia), água ou outra adição cuja finalidade é aumentar a retenção da água durante a hidratação e, consequentemente, melhorar a trabalhabilidade da mistura; podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) (NASCIMENTO, 2015, p. 43).

2.5.1.1 Cimento

Segundo Effting (2004) o cimento tipo Portland é composto por alumina e sílica, que são encontradas em argilas e xistos, e por calcário. Sendo assim é um material bastante abundante no planeta.

O cimento Portland, assim como a cal, é um produto e origem mineral. O produto se origina da calcinação de misturas bem proporcionadas de calcário com alto teor de cálcio e baixo em magnésio, e argilas (com ou sem adições de minérios portadores de óxido de ferro). A mistura calcinada – “clínquer”, é moída com uma pequena porcentagem e gipsita (sulfato de cálcio hidratado natural), que modifica suas propriedades, resultando no produto final (GUIMARÃES, 2002, p. 250).

2.5.1.2 Cal

A NBR 7175 (ABNT, 2003) define a cal hidratada como sendo um pó obtido pela hidratação da cal virgem, formada basicamente pela mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, ou então pela mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

Segundo Schackow (2015), a utilização da cal em argamassas garante maior produtividade, pois torna a massa mais trabalhável e com maior plasticidade.

2.5.1.3 Areia

Os agregados de um modo geral são considerados inertes, pois não reagem quimicamente com a água. Entretanto, é possível identificar reações químicas na zona de transição entre o agregado e a argamassa de cimento, composta por areia e água (MORAVIA, 2007).

Segundo Faria e Palmeira (2010), os agregados são em geral granulares, sem forma ou volume definidos, cujas propriedades são compatíveis com materiais à base de cimento Portland, como o concreto e a argamassa. Podem ser classificados quanto à origem:

- Naturais: são encontrados na natureza e estão prontos para uso, sem a necessidade de algum processo de beneficiamento (areia de rio ou cava, pedregulhos);
- Britados: passam por processos de britagem, a fim de tornar o agregado adequado para o uso na construção civil;
- Artificiais: são derivados de processos industriais complexos, que visam propriedades específicas, como por exemplo a vermiculita, material com baixa massa unitária e isolante térmico;
- Reciclados: resíduos industriais cujas propriedades sejam condizentes com a aplicação junto ao cimento Portland (escória de alto forno, entulhos de construção).

A granulometria do agregado e o fator água/cimento exercem influência na trabalhabilidade dos concretos e devem ser considerados em conjunto, pois quanto menor for a granulometria do agregado maior será a quantidade de água necessária para envolver os grãos do mesmo, formando uma película d'água responsável por uma boa trabalhabilidade. (MORAVIA *et al.*, 2006, p. 194).

Conforme Leal (2012), as características das argamassas estão relacionadas ao tipo, formato e composição da areia utilizada. A adoção de materiais com propriedades similares à da areia, possibilita soluções economicamente viáveis.

2.5.1.4 Água

A água é o material responsável pelas reações de hidratação da mistura, quando utilizada em excesso é prejudicial à resistência e em poucas quantidades pode gerar fissuras e prejudicar a aderência (LEAL, 2012).

A quantidade de água é fundamental para se ter uma boa argamassa. Quando utilizada em excesso acaba diminuindo a resistência mecânica, torna a argamassa porosa, além de aumentar a retração por secagem. E a insuficiência provoca uma mistura rígida e sem a hidratação (TRIGO, 2014).

2.5.1.5 Aditivos químicos

Os aditivos químicos são amplamente utilizados em concretos e argamassas são um produto químico cuja adição visa modificar as propriedades no estado fresco e/ou endurecimento de materiais cimentícios (HARTMANN *et al.*, 2010).

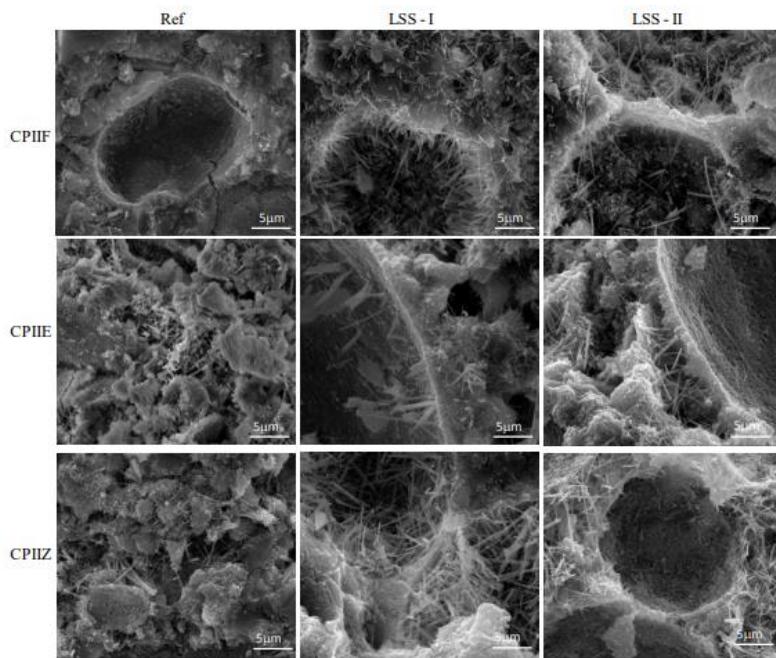
Considerando que neste trabalho o objetivo é desenvolver argamassas isolantes aplicando agregados leves em sua composição, o aditivo incorporador de ar e o aditivo superplastificante atendem as necessidades propostas nessa pesquisa.

O aditivo incorporador (IA) de segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011) possibilita a formação de um sistema de bolhas de ar microscópico, o que influencia diretamente na durabilidade do concreto ou argamassa diante da ação gelo-degelo e melhora o desempenho térmico e acústico. Além disso, proporciona à mistura maior trabalhabilidade, coesão e redução da segregação (HARTMANN *et al.*, 2010).

A introdução de bolhas de ar nas argamassas diminui o atrito entre os grãos do agregado, o que torna a ação do aditivo similar à de um lubrificante entre os grãos. Após o endurecimento do material, a formação de poros varia em função do tipo de cimento e das interações resultantes entre o aditivo, conforme a Figura 9 (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

Segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011) os aditivos superplastificantes aumentam o índice de consistência do concreto sem alterar a quantidade de água. Entretanto, pode-se reduzir cerca de 12% da água de amassamento sem modificar a consistência. No mercado da construção civil é um aditivo com ampla aceitação, quando adsorvido nas partículas de cimento, favorece a diminuição da tensão superficial da água entorno das partículas o que eleva a fluidez do conjunto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 9 - Microestrutura de pastas à base de diferentes tipos de cimento e IA's



Fonte: Romano, Cincotto e Pileggi (2018).

2.5.2 Propriedades das argamassas

A determinação de propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido é fundamental para assegurar o bom desempenho do material no decorrer da vida útil.

2.5.2.1 Propriedades no estado fresco

As principais propriedades da argamassa no estado fresco são: o índice de consistência, a retenção de água, a densidade de massa e o tempo de pega.

“Trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, em uma condição homogênea” (CARASEK, 2007, p. 875).

O conceito de trabalhabilidade apesar de simples compreensão, abrange uma série de propriedades relacionadas, conforme a Tabela 13. Conforme

Cintra (2013) essas propriedades no estado fresco interferem diretamente nas propriedades do estado endurecido.

A NBR 16541 (ABNT, 2016) recomenda adotar o índice de consistência da argamassa de $26 \pm 0,5$ cm. Silva (2008) classifica como: secas as argamassas que possuem índice de consistência inferior a 25 cm; plásticas com índice entre 26 e 30 cm; e fluídas quando o índice for superior a 36 cm.

A retenção de água apesar de ser uma propriedade mensurada no estado fresco, influencia diretamente na resistência final, na aderência e na durabilidade da argamassa. Caso ocorra a retenção de água inadequada decorrente de um substrato com alta succção ou ainda condições climáticas desfavoráveis, as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes podem ser prejudicadas (CARASEK, 2007). Segundo a ASTM C-270 (ASTM, 2007) as argamassas devem reter, no mínimo, 75% de água. A NBR 13280 (ABNT, 2005) classifica-as por classes, conforme a Tabela 14.

Tabela 13 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É a capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água.
Coesão	Refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobre e os agregados descem pelo efeito da gravidade. Argamassas de consistência fluída apresentam maior tendência à exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Carasek (2007).

Tabela 14 - Classificação conforme a retenção de água

Classe	Retenção de água (%)
U1	≤ 78
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 94
U5	91 a 97
U6	95 a 100

Fonte: ABNT (2005).

A densidade de massa, conforme Tabela 15, é uma propriedade influenciada pela massa específica dos agregados contidos e o teor de ar da argamassa. Quanto mais leve for a argamassa, maior é a facilidade de trabalho (CARASEK, 2007). A ASTM C-270 (ASTM, 2007) recomenda que o teor de ar incorporado máximo em argamassas contendo cal seja de 14%.

Tabela 15 - Densidade de massa em argamassas no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa (g/cm ³)	Principais agregados empregados
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida
Normal	2,30 ≤ A ≤ 1,40	Areia de rio e cálcaro britado
Pesada	> 2,30	Barita

Fonte: Carasek (2007).

2.5.2.2 Propriedades no estado endurecido

No estado endurecido as argamassas devem possuir resistência mecânica. De maneira simples, a resistência é definida como a capacidade de um material resistir à alguma tensão. Há uma relação inversa entre a porosidade e a resistência, quanto mais porosa a argamassa mais comprometida será a sua resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A argamassa deve possuir a capacidade de absorver pequenas deformações de maneira que não comprometa a sua durabilidade, aderência e estanqueidade (CARASEK, 2010). Segundo a ASTM C 270 (ASTM, 2007), as argamassas que contêm cal em sua composição devem apresentar resistência

média à compressão superior a 2,40 MPa. A NBR 13281 (ABNT, 2005) classifica a resistência à compressão de argamassas em classes, de P1 à P6, conforme a Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação de resistência à compressão

Classes	Resistência à compressão (em MPa)
P1	≤ 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

Fonte: ABNT (2005).

2.5.2.3 Propriedades térmicas

Para garantir o conforto térmico das argamassas é preciso estudar o comportamento térmico dos materiais, portanto é fundamental determinar a condutividade térmica e o calor específico.

“A condução térmica é o fenômeno pelo qual o calor é transportado das regiões de alta temperatura para as de baixa temperatura em uma substância” (CALLISTER, p. 535, 2007). A condutividade térmica é a propriedade que determina o quanto o material é capaz de conduzir calor, definida como a razão entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura (NEVILLE, 2011). É definida em termos da Equação 16.

$$q = -\lambda \times \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

Onde:

q é o fluxo de calor (W/m²);

λ a condutividade térmica (W/m.K);

dT/dx é o gradiente de temperatura.

A baixa condutividade térmica dos materiais isolantes é em função da quantidade de ar presente neles, o que também interfere na densidade. Quanto menor é a densidade do material, menor será a sua condutividade térmica e maior o teor de ar incorporado (CINCOTTO; SILVA; CARASEK, 1995).

A capacidade calorífica (J/mol.K) mede a habilidade de um material absorver a energia (dQ) decorrente de um processo de aumento de temperatura (dT) (CALLISTER, 2007). Em termos matemáticos é representada pela Equação 17.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (17)$$

E o calor específico (J/kg.K), é a quantidade de calor necessária para elevar em um grau a temperatura de um componente, por unidade de massa (EFFTING, 2008).

2.6 ARGAMASSAS COM POTENCIAL DE ISOLAMENTO

A argamassa utilizada no assentamento de tijolos, geralmente à base de cimento, possui elevada condutividade térmica em comparação com os tijolos, logo, as camadas de argamassa interferem no desempenho térmico de todo o conjunto (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2008). Para garantir o bom desempenho térmico de um material, é importante determinar sua condutividade térmica (GOMES *et al.*, 2018).

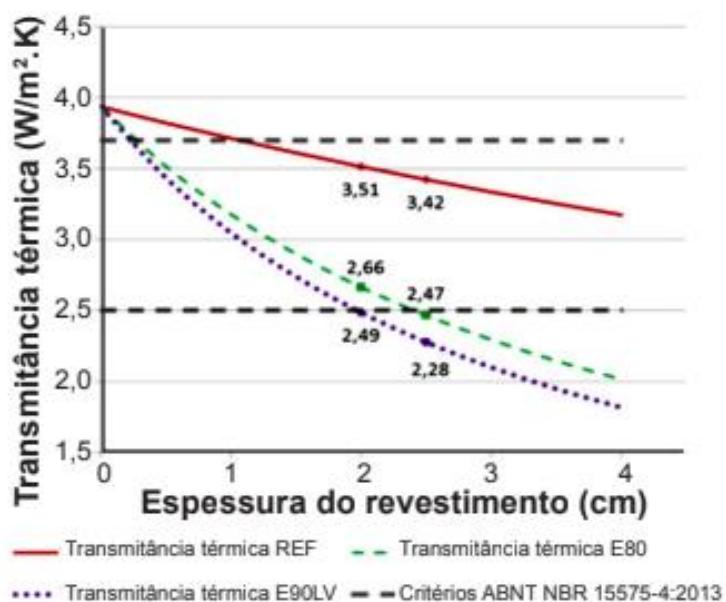
Segundo Stancato (2000), há diversos materiais com elevada porosidade bem como termoisolantes, cuja condutividade térmica é baixa, sendo viáveis ao setor da construção civil. É importante associar os materiais cimentícios a materiais que diminuam a condutividade térmica da argamassa, consequentemente aumentando a resistência térmica do sistema de vedação (SHOUKRY *et al.*, 2016).

Segundo Passos e Carasek (2018) foi possível identificar o quanto decresce a transmitância térmica do elemento em função da espessura do revestimento de argamassa (Figura 10). As autoras concluíram que para uma argamassa de referência atender as condições mais restritivas das normas

NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 15220 (ABNT, 2005), seria necessária a espessura de 9 cm de argamassa, em comparação com o sistema de isolamento estudado.

Existe uma gama de materiais com potencial de isolamento, estudos apontam a fibra da palmeira (BOUKHATTEM *et al.*, 2017), a perlita (FANG *et al.*, 2010), a sílica ativa e argila expandida (ANGELIN; LINTZ; BARBOSA, 2017), a vermiculita expandida (ARAÚJO; CÂNDIDO, 2015; CINTRA, 2013), o pó de serra (STANCATO, 2000), a fibra de bananeira (SILVA; DEMARCHI; MORALES, 2016), resíduos de EPS e da produção de placas isolantes térmicas (PASSOS; CARASEK, 2018) e a sílica aerogel (NG *et al.*, 2016; ABBAS *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2018).

Figura 10 - Transmitância térmica em função da espessura do revestimento



Fonte: Passos e Carasek (2018).

Diante desses materiais, neste trabalhado foram escolhidos três agregados para incorporar junto às argamassas, sendo eles: a vermiculita expandida, o poliestireno expandido (EPS) e a sílica aerogel, materiais detalhados a seguir.

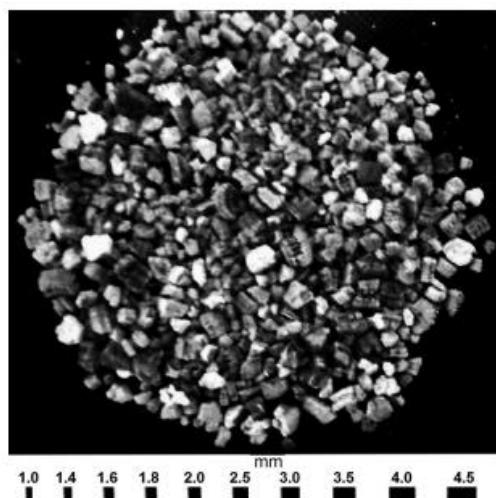
2.6.1 Vermiculita

A vermiculita (Figura 11 e 12) é obtida pelo aquecimento do mineral vermiculita, entre temperaturas de 900 e 1100°C. Quando submetido a essas elevadas temperaturas, torna-se um mineral laminar, com potencial de expansão de até 30 vezes o seu volume inicial. Considerando seu elevado ponto de fusão, é um material capaz de otimizar o comportamento térmico quando associados a elemento de vedação (SBRIGHI NETO, 2011).

A vermiculita é pertencente à família das micas e sua composição química é expressa pela fórmula: $22\text{MgO-5Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-22SiO}_2\text{-4H}_2\text{O}$ (CINTRA, 2013). Segundo Sousa (2010), a composição segue a Tabela 17.

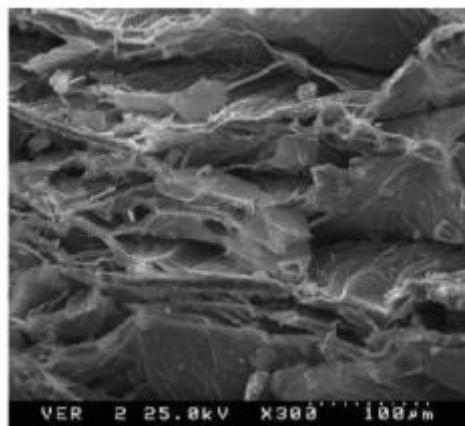
A vermiculita aplicada em argamassas leves proporciona a redução do peso estrutural, aumento na capacidade de absorção de líquidos e isolamento térmico e acústico (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014).

Figura 11 - Vermiculita



Fonte: Schackow *et al.* (2014).

Figura 12 - Microestrutura da vermiculita



Fonte: Sousa (2010).

Tabela 17 - Composição química da vermiculita

Composto	Intervalo (%)
Al_2O_3	6 a 15
SiO_2	35 a 45
Fe_2O_3	7 a 11
H_2O	6 a 12
MgO	21 a 27
Álcalis	0 a 6

Fonte: Sousa (2010).

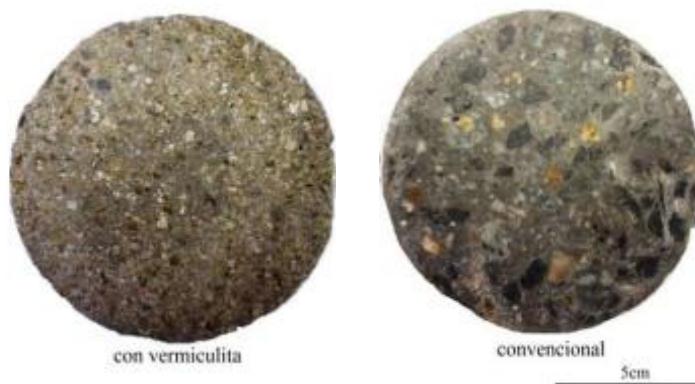
Araújo e Cândido (2015) aplicaram a vermiculita em concretos e argamassas, onde observaram uma redução de até 50% na condutividade térmica da argamassa, além da redução de 30% na massa específica quando comparada a uma argamassa convencional, com valores da ordem de 610 kg/m³.

Schackow *et al.* (2014) determinaram a condutividade térmica em concretos leves empregando a vermiculita com a variação de 55 e 65% do volume de concreto, a condutividade térmica foi de 0,50 W/m.K e 0,34 W/m.K, respectivamente demonstrando o potencial de uso da vermiculita, considerando que o concreto composto por agregados contendo quartzito, em média possui condutividade de 3,50 W/m.K (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Por conseguinte, estabelecidos os valores de condutividade térmica (0,50 W/m.K e 0,34 W/m.K) do concreto contendo vermiculita, foram

determinados os valores de transmitância térmica de uma cobertura e de uma parede, compostas pelo concreto leve em comparação com o concreto convencional (Figura 13). A transmitância térmica da cobertura obteve uma redução entre a 25,4 e 33,3%, enquanto a transmitância térmica da parede reduziu entre 30,80 e 38,8% (SCHACKOW *et al.*, 2019).

Figura 13 - Concreto leve contendo vermiculita e concreto convencional



Fonte: Schackow *et al.* (2019).

2.6.2 EPS

O poliestireno expandido, popularmente conhecido como EPS (Figura 14), ou ainda “isopor”, tem sido amplamente utilizado na construção civil e é considerado um plástico celular rígido e que possui geometrias e uso distintos (AVESANI NETO, 2008).

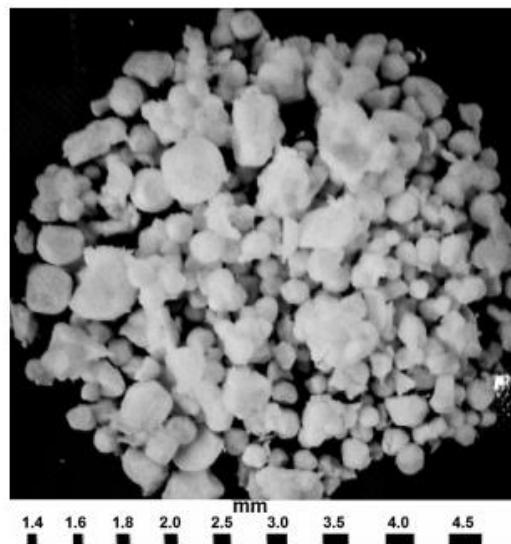
Sendo um material plástico na forma de espuma com micro-células fechadas, composto basicamente de 2% de poliestireno e 98% de vazios contendo ar, na cor branca, reciclável, não poluente, fisicamente estável, é sem dúvida um material isolante da melhor qualidade. (TESSARI, 2006, p. 28).

O EPS possui baixa condutividade térmica, cerca de 0,035W/m.K e seu uso em argamassas permite a diminuição de até 35% da condutividade térmica (PEREIRA, 2016).

A condutividade térmica em concretos leves com EPS (Figura 15), com a variação de 55 e 65% do volume de concreto determinados por Schackow *et al.* (2014), variou entre 0,56 e 0,50 W/m.K, respectivamente. Aplicando esses

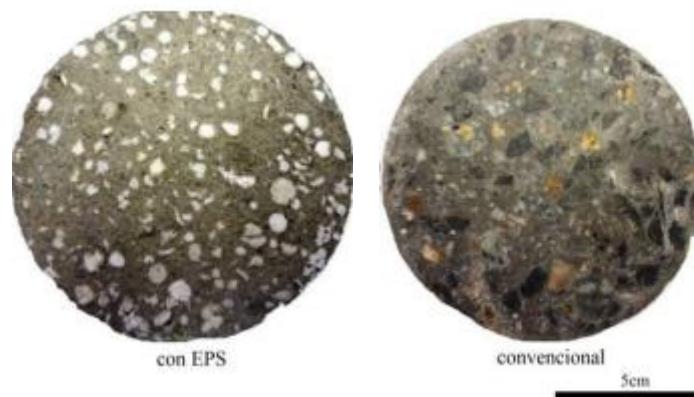
valores para os cálculos de transmitância térmica de cobertura e paredes, foi possível reduzir entre 20,9 e 23,4% a transmitância térmica da cobertura e para as paredes observou-se a redução na faixa de 27,3 e 30,8% (SCHACKOW *et al.*, 2019).

Figura 14 - Poliestireno Expandido



Fonte: Schackow *et al.* (2014).

Figura 15 - Concreto leve contendo EPS e concreto convencional

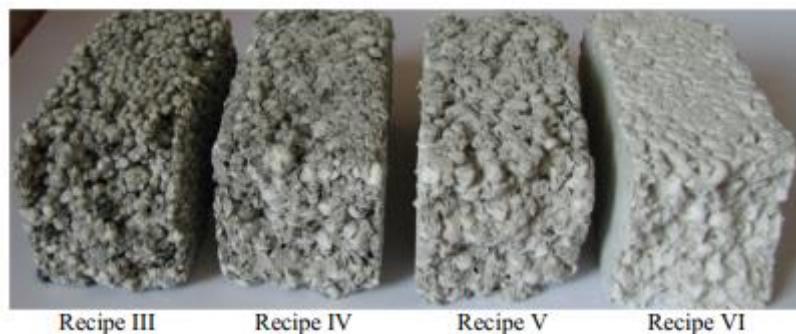


Fonte: Schackow *et al.* (2019).

Aciu *et al.* (2015) estudaram argamassas com adições de EPS, a fim de verificar a viabilidade no uso do agregado leve como substituto total do

agregado miúdo, a areia. Na Figura 16 as duas primeiras imagens (Recipe III e IV) são argamassas constituídas unicamente por cimento, EPS e água, nas últimas duas imagens (Recipe V e VI) foi adicionada a cal nas misturas. Apesar da expressiva redução na resistência à compressão quando comparado com as misturas Recipe I (argamassa convencional à base de cimento, areia e água) e Recipe II (argamassa contendo cimento, areia, EPS e água), os valores de condutividade térmica também reduziram significativamente, o que demonstra o potencial de isolamento do agregado leve (Tabela 18).

Figura 16 - Argamassas contendo EPS



Fonte: Aciu *et al.* (2015).

Tabela 18 - Resistência à compressão e condutividade térmica

Mistura	Resistência à compressão (MPa)	Condutividade térmica (W/m.K)
Recipe I	14,83	0,93
Recipe II	13,35	0,3276
Recipe III	0,29	0,06483
Recipe IV	0,22	0,06469
Recipe V	0,19	0,06524
Recipe VI	0,42	0,09914

Fonte: Adaptado de Aciu *et al.* (2015).

2.6.3 Sílica aerogel

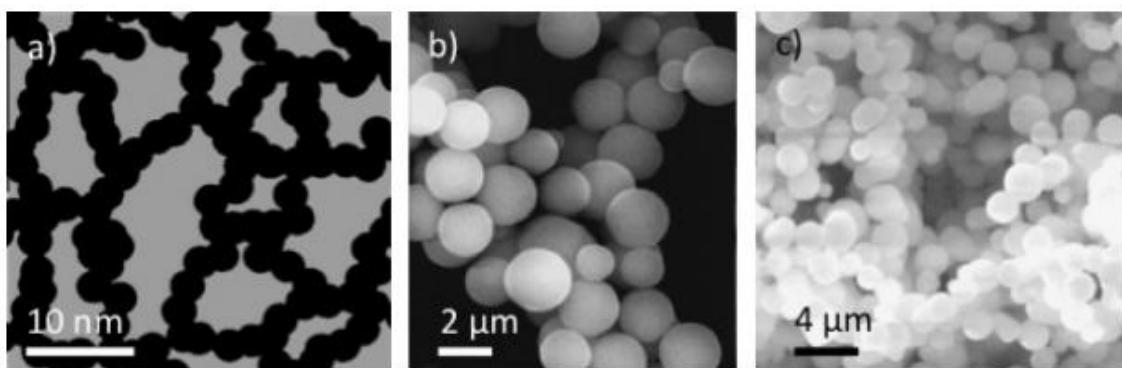
A sílica aerogel ou denominada por alguns autores como aerogel de sílica, é um material nanoestruturado, altamente poroso, ultraleve e composto

por sílica (NG *et al.*, 2016). O material possui uma densidade entre 3 e 500 kg/m³, e a condutividade térmica na faixa de 0,01 a 0,02 W/m.K (FLORES-COLEN; SOARES; BRITO, 2013). Segundo Gurav *et al.* (2010) o aerogel de sílica possui baixa condutividade térmica (cerca de 0,01 W/mK), alta porosidade (em média de 99%) e transmissão ótica em 99%.

A estrutura interna da sílica aerogel é reticulada de cadeias de partículas de SiO₂, com uma elevada quantidade de poros cheios de ar, com tamanhos inferiores a 100 nanômetros, dependendo do método de pureza e fabricação do material (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2011). O produto é obtido através do método de secagem supercrítica, processo que necessita de elevadas temperaturas e pressão (GAO *et al.*, 2014). A Figura 17 apresenta a estrutura da sílica aerogel.

O aerogel é feito a partir de precursores de alcóxido de silício, que consequentemente eleva o preço final do material (ABBAS *et al.*, 2019). Estudos de Gao *et al.* (2014) verificaram que o custo de aerogel varia entre 40 e 160 euros/kg, enquanto o cimento (0,1 a 0,2 euros/kg) e a areia (0,02 a 0,05 euros/kg).

Figura 17 - a) Estrutura da sílica aerogel, b) e c) SEM da estrutura da sílica aerogel

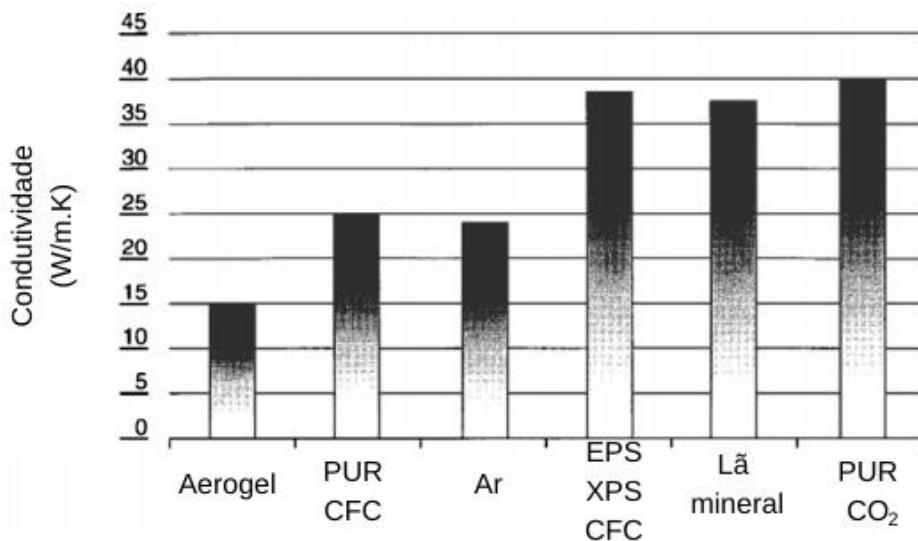


Fonte: Hanus (2013).

A Figura 18 demonstra a comparação da condutividade térmica do aerogel de sílica com outros materiais de isolamento, como a espuma de poliuretano (PUR) por CFC, ar, poliestireno expandido (EPS), poliestireno extrudido (XPS), lã mineral e a espuma de poliuretano por CO₂.

Considerando os elevados custos, estudos demonstram o potencial de aerogel de sílica derivada da casca do arroz, em que o aerogel é sintetizado a partir da casca de arroz, que substitui o alcóxido de silício (ABBAS *et al.*, 2019). O resíduo proveniente de minas de ouro também demonstrou bons resultados para a obtenção do aerogel (MERMER *et al.*, 2017).

Figura 18 - Comparativo entre a condutividade de materiais



Fonte: Adaptado de Hanus (2013).

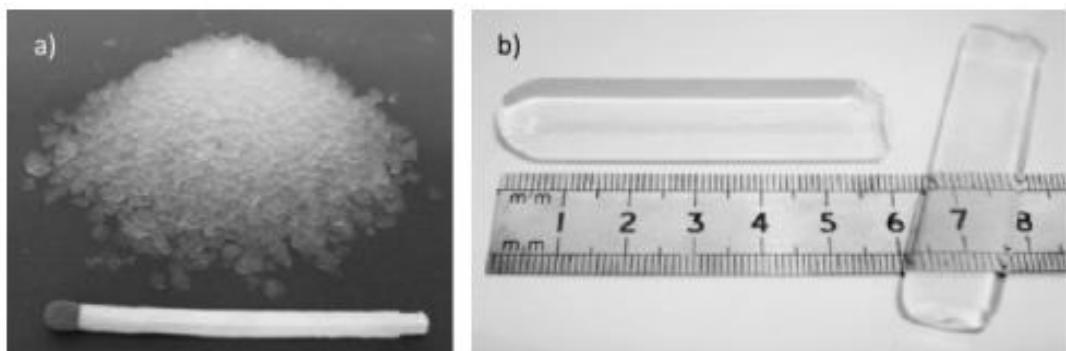
A condutividade térmica para os materiais cimentícios compostos por aerogéis de sílica obtiveram uma expressiva redução de valores. A argamassa contendo aerogel de sílica derivada da casca do arroz obteve 0,301 W/m.K de condutividade térmica (ABBAS *et al.*, 2019). Do material proveniente das minas de ouro, a condutividade ficou entre 0,150 W/m.K (MERMER *et al.*, 2017). Para Flores-Colen, Soares e Brito (2013) mensurou-se valores de $0,025 \pm 0,002$ W/m.K. Enquanto a associação da sílica aerogel e o EPS proporcionou a condutividade entre 0,029 e 0,056 W/m.K (GOMES *et al.*, 2018).

“Ao aplicar os nanomateriais às argamassas de revestimento, verifica-se uma melhoria do seu comportamento mecânico, físico, térmico e acústico, assim como de manutenção das propriedades estéticas e resistência à água.” (PEREIRA, 2016, p. 10).

Diante das diversas propriedades, a sílica aerogel é considerada um material multifuncional quando aplicada a materiais de construção (ABBAS *et al.*, 2019). No mercado há também a sílica aerogel monolítica, porém o material

apresenta um custo ainda maior em comparação com a sílica aerogel em grânulos (Figura 19), devido à complexidade dos processos de produção. Entretanto, sua aplicação em estruturas garante elevada performance de isolamento e translucidez ao ambiente, como no Sculpture Building and Gallery - Yale University, em Connecticut nos Estados Unidos, como representado na Figura 20, onde foi executada a fachada com vidros triplos e um painel interno composto por sílica aerogel (BAETENS; JELLE; GUSTAVSEN, 2011).

Figura 19 - Comparação entre a) grânulos de sílica aerogel e b) sílica aerogel monolítica



Fonte: Hanus (2013).

Figura 20 - Parede de cortina em Yale University

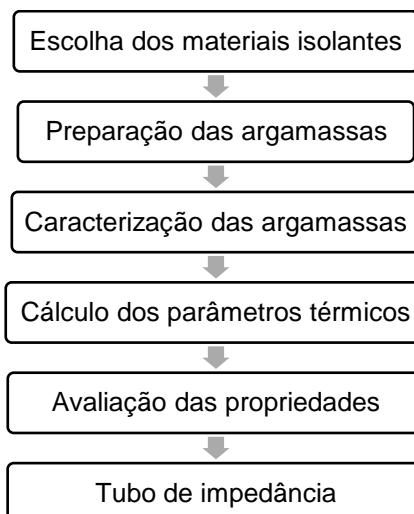


Fonte: Baetens *et al.* (2011).

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na parte experimental para a elaboração das argamassas isolantes segue o fluxograma representado pela Figura 21, o qual apresenta de maneira simplificada as etapas da pesquisa. No decorrer deste capítulo as etapas são descritas de forma mais detalhada.

Figura 21 - Fluxograma representativo do procedimento experimental

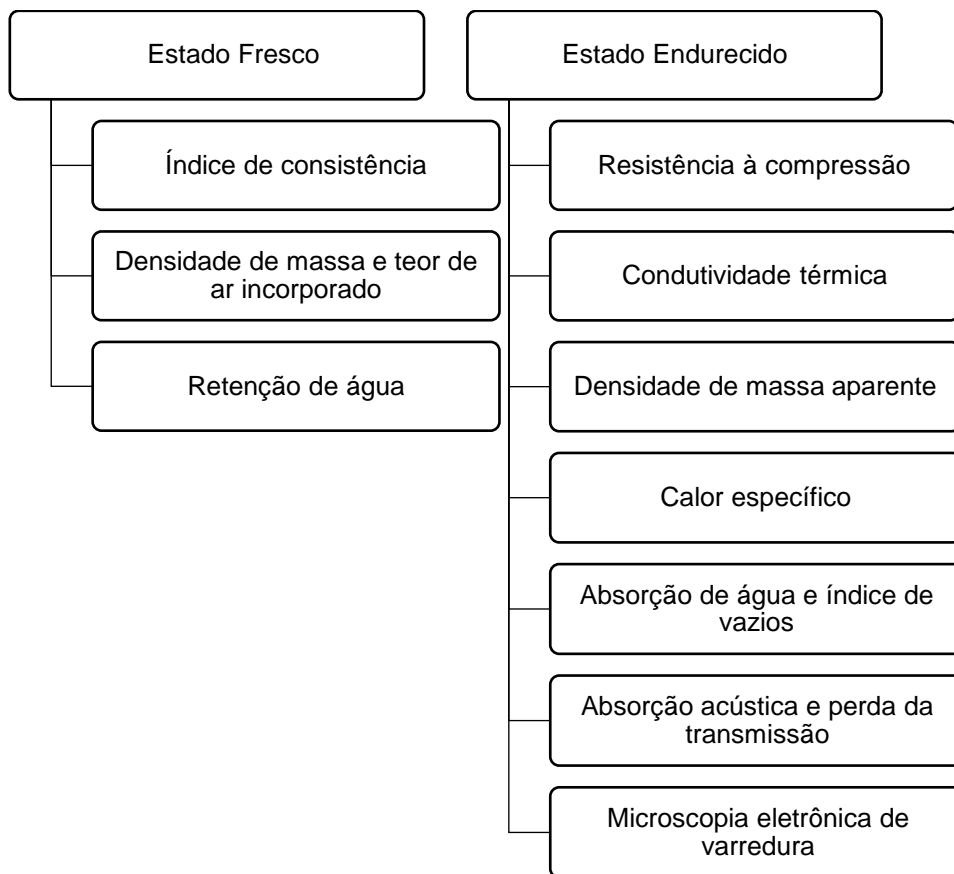


Fonte: A autora (2020).

Os ensaios tanto de caracterização dos materiais quanto das argamassas foram realizados no Laboratório de Materiais da Construção Civil e no Laboratório da Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville. Foram escolhidos três materiais que apresentassem potencial de isolamento térmico quando incorporados como substitutos parciais ao agregado miúdo em argamassas destinadas ao revestimento de edificações: o poliestireno expandido (EPS), a vermiculita e a sílica aerogel.

Com o objetivo de avaliar o comportamento das argamassas no estado fresco/endurecido e demais objetivos propostos neste trabalho, os ensaios de caracterização estão descritos pelo fluxograma da Figura 22.

Figura 22 - Fluxograma das etapas de caracterização das argamassas



Fonte: A autora (2020).

Foram elaboradas 9 misturas de argamassas. A argamassa de referência (AREF) foi confeccionada na proporção de 1: 1,25: 5,0 (cimento: cal: areia), em volume, com fator água/cimento (W/C) de 1,65. A partir da mistura de referência, foi realizada a substituição parcial em volume do agregado miúdo pelos agregados isolantes, vermiculita e poliestireno expandido em 10%, 15% e 20%. Com a sílica aerogel a substituição do agregado miúdo foi de 40%, denominado ASA40 e a mistura ASA60 é caracterizada como uma otimização da mistura contendo 40% de sílica aerogel, onde 20% do agregado miúdo foi substituído por 60% do agregado isolante. As argamassas foram executadas em laboratório conforme a NBR 16541 (ABNT, 2016). As misturas foram denominadas pela inicial do agregado, seguida pelo valor de substituição, sendo AV10, AV15 e AV20 as argamassas contendo vermiculita com substituições de 10%, 15% e 20%, respectivamente e igualmente para as demais misturas executadas.

A Tabela 19 apresenta os componentes e as quantidades de materiais utilizados para cada mistura de argamassa.

Tabela 19 - Composição das argamassas

Mistura	Proporção dos Materiais (em gramas)*								
	A (g)	C (g)	CH (g)	W (g)	V (ml)	E (ml)	SA (ml)	IA (g)	SP (g)
AREF	1979,0	285,0	247,0	382,0	-	-	-	2,85	4,27
AV10	1780,6	285,0	247,0	332,0	132,0	-	-	2,85	4,27
AV15	1680,7	285,0	247,0	332,0	198,0	-	-	2,85	4,27
AV20	1582,7	285,0	247,0	332,0	263,8	-	-	2,85	4,27
AE10	1780,6	285,0	247,0	382,0	-	132,0	-	2,85	4,27
AE15	1680,7	285,0	247,0	382,0	-	198,0	-	2,85	4,27
AE20	1582,7	285,0	247,0	382,0	-	263,8	-	2,85	4,27
ASA40	1186,4	285,0	247,0	457,0	-	-	527,6	2,85	4,27
ASA60	1582,7	285,0	247,0	532,0	-	-	790,0	2,85	4,27

Legenda: A – areia; C – Cimento; CH – Cal; W – Água (water); V – vermiculita, EPS – poliestireno expandido; SA – sílica aerogel; IA – Aditivo Incorporador de Ar; SP – Aditivo Superplastificante.

*Composição para preparar 2,5 litros de argamassa

Fonte: A autora (2020).

3.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a confecção da argamassa de referência foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP II Z-32, cal hidratada, água, areia e os aditivos químicos: incorporador de ar e superplastificante. Para as argamassas isolantes, além destes materiais, foram utilizados como substitutos parciais ao agregado miúdo a vermiculita, o poliestireno expandido (EPS) e a sílica aerogel.

3.1.1 Cimento

Foi utilizado o cimento VOTORAN CP II Z-32 da marca Votorantim, cuja principal adição mineral é a pozolana e suas propriedades atendem desde estruturas de concreto até argamassas de revestimento e assentamento. Este tipo de cimento apresenta tamanho de partículas menor que 41 μm e possui, em sua composição, de 6 a 15% de pozolana. É um cimento largamente utilizado na construção civil por apresentar diversas possibilidades de aplicação, onde não é exigida nenhuma propriedade especial da argamassa ou do concreto (VOTORANTIM, 2018). A Tabela 20 apresenta as características do cimento Portland quanto à finura, tempo de pega e resistência à compressão.

Tabela 20 - Características do Cimento Portland CP II Z -32

Finura	Tempo de pega (h)		Resistência à compressão (MPa)	
Resíduo na peneira 75mm	Início	Término	3 dias	28 dias
≤ 12	≥ 1	≤ 10	≥ 10	≥ 32

Fonte: Votorantim (2018).

3.1.2 Cal

Foi utilizada a cal hidratada do tipo CH-III, por ser um produto comumente utilizado na construção civil.

A cal do tipo CH-III é constituída basicamente por uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 13% (CAL CEM, 2016).

3.1.3 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária local, com pH entre 6,3 e 6,8, segundo a Companhia Águas de Joinville.

3.1.4 Areia

Foi utilizada a areia fina de rio (quartzo) como agregado miúdo, com módulo de finura de 1,41, massa específica de 2,60g/cm³ e a dimensão máxima dos grãos de 2,4 mm. A massa específica foi obtida por meio dos procedimentos definidos na NBR NM 52 (ABNT, 2009). A determinação da composição granulométrica foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.1.5 Aditivos

O aditivo químico superplastificante utilizado para dispersão do material aglomerante é composto por policarboxilatos e de coloração amarelada. Segundo o laudo técnico da amostra, o aditivo apresentou densidade de 1,08 g/ml e pH de 6,0. E o aditivo incorporador de ar, de cor amarelada a castanho claro, apresentou conforme laudo técnico do fabricante, densidade de 1,00 g/ml e pH de 10,44.

3.1.6 Vermiculita

A vermiculita expandida (Figura 23) é proveniente da empresa Brasil Minérios, com diversas aplicações de uso, considerada um material leve, inerte, não tóxico e isento de bactérias, fungos e outras espécies de origem orgânica. Pode ser utilizada isoladamente ou incorporada a outros elementos e substâncias para isolamento termoacústico na construção civil. Associada ao cimento e a aditivos químicos possibilita a formação de argamassas de reboco termoacústico (BRASIL MINÉRIOS, 2019). Segundo a empresa fabricante, a condutividade da vermiculita é de 0,070 W/m.K a 23°C e densidade 80kg/m³.

Figura 23 - Vermiculita



Fonte: A autora (2020).

3.1.7 EPS

O poliestireno expandido, (Figura 24) foi comprado na empresa Styroville do município de Joinville, Santa Catarina. Segundo o fabricante são flocos de isopor reciclado e triturado, com aplicação na construção civil em concretos e argamassas leves, possui densidade de 30kg/m³ e a condutividade térmica de 0,035 W/m.K a 23°C.

Figura 24 - Poliestireno Expandido

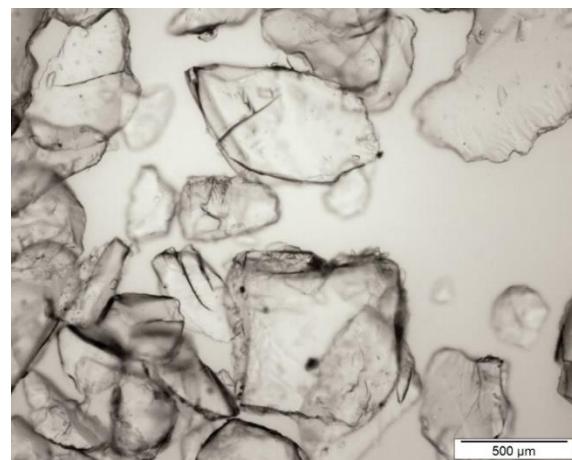


Fonte: A autora (2020).

3.1.8 Sílica aerogel

A sílica aerogel (Figuras 25 e 26) é vendida comercialmente como: ENOVA Aerogel Particles IC3110, fabricada pela empresa CABOT Corporation. Segundo o fabricante é uma sílica amorfa sintética modificada, cujo tamanho das partículas são entre 0,1 e 0,7mm, com densidade de 120 a 150kg/m³ e condutividade térmica de 0,012 W/m.K a 25ºC.

Figura 25 - Microscopia ótica dos grânulos de sílica aerogel



Fonte: A autora (2020).

Figura 26 - Grânulos de sílica aerogel



Fonte: Cabot Corporation (2020).

3.2 SELEÇÃO DAS ARGAMASSAS

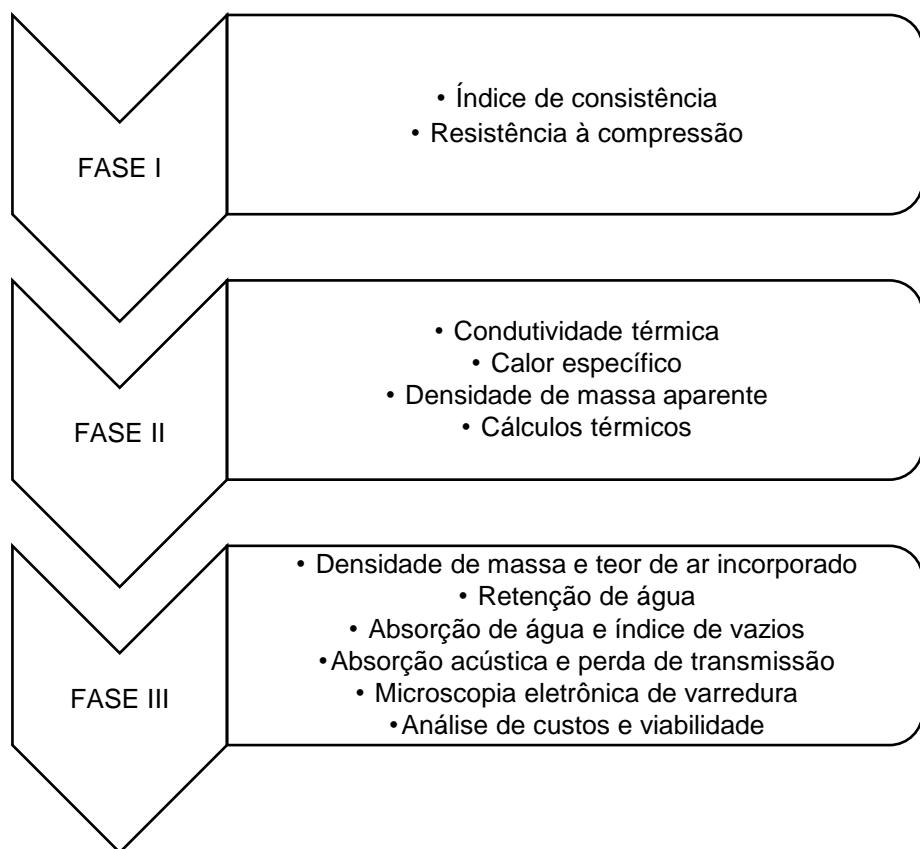
O processo de seleção das argamassas foi dividido em três fases. O fluxograma da Figura 27 apresenta a ordem de realização dos ensaios. A quantidade de corpos de prova para atender cada ensaio foi determinada conforme exigências das normas técnicas.

Na fase I, foram realizados os ensaios de índice de consistência e resistência à compressão para as 9 misturas de argamassas. Os melhores resultados obtidos nesses ensaios determinaram as argamassas selecionadas para a próxima fase.

Na fase II, foram realizados os ensaios de condutividade térmica, calor específico, densidade de massa aparente e os cálculos dos parâmetros térmicos. A partir da observação destes resultados, foi escolhida uma argamassa contendo cada um dos agregados, juntamente com a argamassa de referência, para a seguinte fase.

Na fase III, apenas com três argamassas isolantes selecionadas e a argamassa de referência, foram executados os demais ensaios propostos na pesquisa para atingir os objetivos.

Figura 27 - Processo de seleção das argamassas



Fonte: A autora (2020).

3.3 PREPARO DAS ARGAMASSAS

A execução da argamassa em laboratório foi realizada de acordo com a NBR 16541 (ABNT, 2016) com o uso do misturador mecânico

Inicialmente foram pesados todos os materiais anidros (agregado miúdo e cimento), de modo que não extrapolasse 2,5kg de massa, por conseguinte, foi determinada a massa de água. A massa anidra foi depositada dentro da cuba do misturador, que em seguida foi ligado em velocidade baixa e adicionado 75% da massa de água na mistura, nos 10 segundos iniciais, até completar 30 segundos desde o acionamento inicial do misturador. Alterou-se a velocidade para alta, por mais 60 segundos. Após esse tempo, o misturador foi desligado e realizou-se a raspagem da superfície interna e da pá, em um período de 90 segundos. Acionou-se novamente o misturador por mais 60

segundos, de modo que nos primeiros 10 segundos fossem adicionados os 25% restantes da água.

A NBR 13279 (ABNT, 2005) apresenta os procedimentos para a moldagem das amostras prismáticas. Com o molde acoplado à mesa de consistência, introduziu-se em cada compartimento do molde uma porção de argamassa, com o auxílio do lado maior do nivelador de camadas, espalhou-se a argamassa a fim de formar uma camada uniforme, em seguida foram executadas 30 quedas na mesa de adensamento. Novamente colocou-se mais uma quantidade de argamassa, desta vez com o uso do lado menor do nivelador de camadas e foram aplicadas 30 quedas na mesa de adensamento.

3.4 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

A seguir são apresentados os ensaios de caracterização realizados nas argamassas no estado fresco: índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água.

3.4.1 Índice de consistência

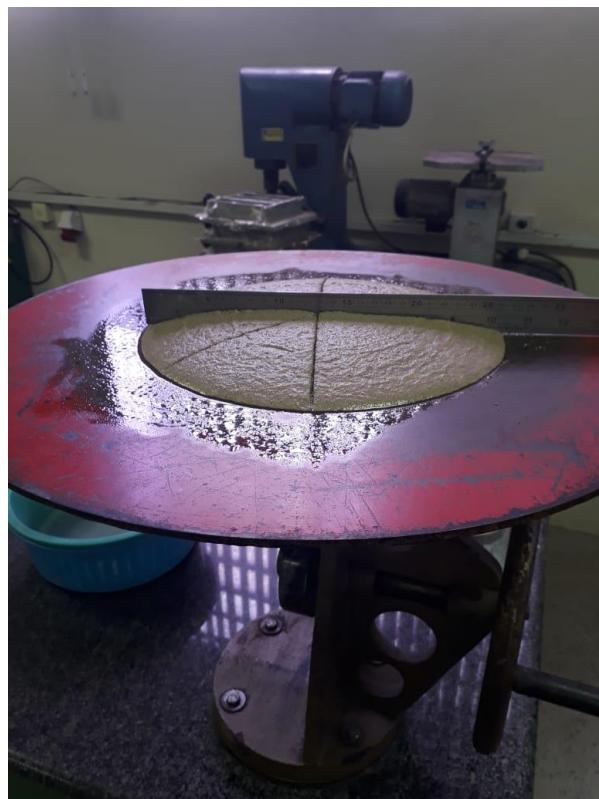
O ensaio do índice de consistência, também conhecido como ensaio de abatimento ou *flow table* (Figura 28), foi determinado pela NBR 13276 (ABNT, 2016).

Iniciou-se o preenchimento do molde tronco-cônico com a argamassa fresca sobre a mesa de consistência, de modo centralizado. Preencheu-se o molde com três camadas de alturas aproximadamente iguais, com a aplicação de 15 golpes para a primeira camada, 10 golpes para a segunda, e 5 golpes para a terceira camada, com o soquete metálico, de modo que os golpes fossem distribuídos uniformemente. Em seguida, foi realizado o rasamento da argamassa, que consiste em passar a régua metálica com movimentos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície. Retirou-se o molde tronco-cônico verticalmente e acionou-se a manivela da mesa de consistência em movimento de sobe-desce por 30 vezes em 30 segundos, de maneira uniforme. Por

consequente, após a última queda fez-se a medição do diâmetro médio em três pontos diferentes do espalhamento.

O índice de consistência da argamassa sobre a mesa foi determinado pela média das três medidas de diâmetro do espalhamento.

Figura 28 - Argamassa sobre a mesa de consistência



Fonte: A autora (2020).

3.4.2 Densidade de massa e teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado e a densidade de massa da argamassa no estado fresco são determinados pela NBR 13278 (ABNT, 2005).

Após a confecção da argamassa, são colocadas dentro do cilindro calibrado, 3 camadas de argamassa de alturas aproximadamente iguais e em cada camada são aplicados 20 golpes ao longo do seu perímetro. Posteriormente após três quedas do recipiente, a uma altura aproximada de três centímetros, a superfície é rasada com o auxílio da espátula. Assim, a massa específica da argamassa é determinada através da Equação 19.

$$d = \frac{(mc - mv)}{vt} \times 1000 \quad (19)$$

Onde:

d é a densidade de massa da argamassa (kg/m^3);

mc é a massa do recipiente contendo a argamassa de ensaio (g);

mv é a massa do recipiente vazio (g);

vt é o volume do recipiente (cm^3).

O teor de ar incorporado na argamassa (A) é determinado pela Equação 20 e expresso em porcentagem.

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{dt}\right) \quad (20)$$

Sendo:

d o valor da massa específica da argamassa (g/cm^3);

dt a densidade de massa teórica da argamassa sem vazios (g/cm^3).

A densidade de massa teórica (dt) é calculada através da Equação 21.

$$dt = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\rho_i}} \quad (21)$$

m_i é a massa seca de cada componente da argamassa mais a massa da água (g);

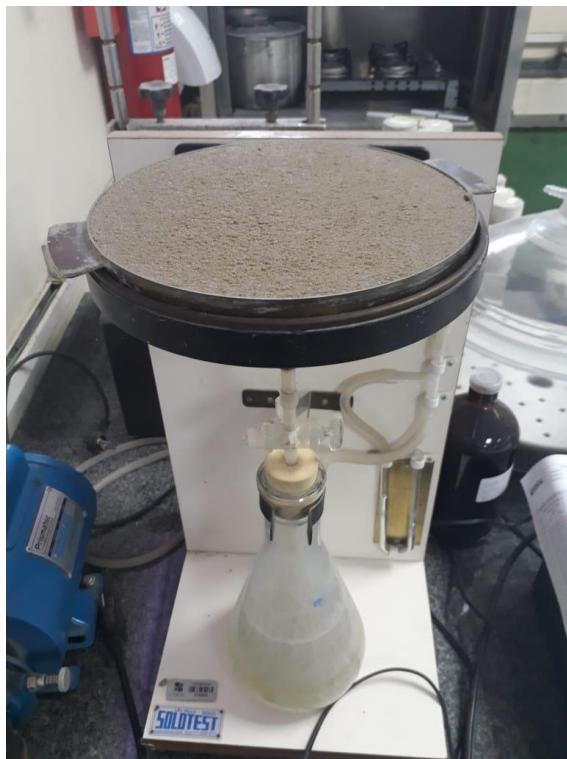
ρ_i é a massa específica de cada componente da argamassa (g/cm^3).

3.4.3 Retenção de água

A retenção de água da argamassa é determinada pela NBR 13277 (ABNT, 2005), este ensaio consiste em retirar a água da argamassa por meio de sucção de uma bomba de vácuo em um funil de filtragem, funil de Buchner apresentado na Figura 29.

Após o preparo da argamassa, o prato é colocado sobre o funil, a fim de garantir estanqueidade entre eles, e o papel filtro é umedecido, posicionando-o sobre o fundo do prato. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo é acionada aplicando uma sucção de 51 mm de mercúrio. Em seguida, a torneira é aberta por 90 segundos, para ser retirado o excesso de água do papel-filtro. Após este tempo, a torneira é fechada novamente e pesa-se o conjunto funil/papel filtro na balança (mv). Preenche-se o prato com argamassa e são executados 16 golpes com soquete junto à borda e 21 golpes em pontos distribuídos na parte central. Retira-se o excesso de argamassa do prato com o auxílio da régua metálica, em movimentos do centro para a borda do prato, com posterior pesagem da argamassa rasada na balança (ma). A torneira novamente é aberta, para aplicar na amostra a sucção correspondente à 51mm de mercúrio durante 15 minutos, após este período, fecha-se novamente a torneira, removendo o prato do funil e finalmente, obtendo-se o peso do conjunto na balança (ms).

Figura 29 - Funil de Buchner



Fonte: A autora (2020).

A retenção de água foi determinada através da Equação 22, sendo o resultado expresso em porcentagem.

$$Ra = \left(1 - \frac{ma - ms}{AF \times (ma - mv)} \right) \times 100 \quad (22)$$

Considerando:

ma a massa do conjunto com argamassa (g);

ms a massa do conjunto após a sucção (g);

mv a massa do conjunto vazio (g) e AF o fator água/argamassa fresca.

O fator água/argamassa fresca (AF) foi calculado pela Equação 23.

$$AF = \frac{mw}{m + mw} \quad (23)$$

Sendo:

mw é a massa total de água acrescentada à mistura (g);

m a soma dos materiais dos componentes da argamassa (g).

3.5 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência à compressão, condutividade térmica, calor específico, densidade de massa aparente, absorção de água e índice de vazios, absorção acústica, perda de transmissão e microscopia.

3.5.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é determinado de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005) por meio de uma prensa hidráulica modelo PC 220 I da marca Emic.

Os corpos de prova foram posicionados no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, de forma que a face rasada não permanecesse em contato com o dispositivo de apoio ou de carga (Figura 30).

Aplicou-se uma carga de (500 ± 50) N/s até a ruptura do corpo de prova. Sendo a resistência à compressão calculada através da Equação 24.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (24)$$

Onde:

R_c é a resistência à compressão (MPa);

F_c : carga máxima aplicada (N).

Figura 30 - Corpo de prova na prensa hidráulica



Fonte: A autora (2020).

3.5.2 Condutividade térmica

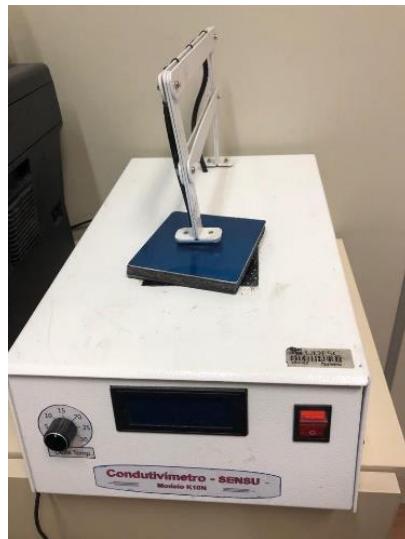
Para determinar a condutividade térmica foi utilizado o condutivímetro sensu modelo K10N, conforme Figura 31. Este equipamento é baseado nas normas ISO 8301 (ISO, 1991) e C518 (ASTM, 2017). A Lei de Fourier

estabelece a relação entre a taxa de fluxo de calor (q) e a condutividade térmica (k) de um corpo com espessura (L) submetido a uma diferença de temperatura (T₂-T₁) e pode ser obtida pela Equação 25.

$$q = k \times \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (25)$$

O fluxo de calor pode ser medido nas duas superfícies da amostra, e dessa forma a condutividade é determinada pela média simples desses fluxos. Onde q₁ e q₂ são as taxas de fluxo de calor medidos por transdutores de fluxo de calor (W/m²).

Figura 31 - Condutímetro



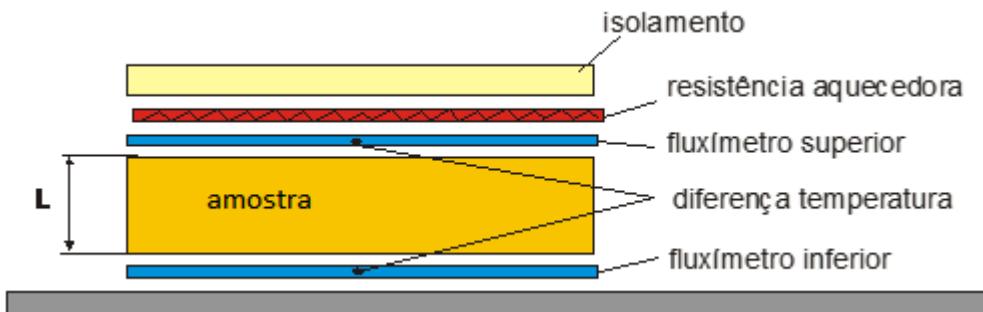
Fonte: A autora (2020).

A Figura 32 apresenta o modo de medição da condutividade térmica.

As amostras de materiais para o ensaio da condutividade térmica possuem dimensões de 10x10cm e espessura de 2,5cm. A condutividade térmica pode ser determinada por meio da Equação 26.

$$K = k \times \frac{\frac{q_1 + q_2}{2} \times L}{\Delta T} \quad (26)$$

Figura 32 - Esquema para medição da condutividade térmica



Fonte: Effting (2008).

3.5.3 Densidade de massa aparente

A determinação da densidade de massa aparente, segue a NBR 13280 (ABNT, 2005). As dimensões de três corpos de prova após os 28 dias de idade foram medidas e as suas massas foram registradas (em gramas).

O volume do corpo de prova é determinado pela Equação 27 como sendo:

$$V = l \times h \times c \quad (27)$$

Onde l , h e c , são as medidas de largura, altura e comprimento em centímetros, respectivamente.

A densidade de massa (g/cm^3) foi calculada pela Equação 28:

$$\rho = \frac{m}{V} \times 1000 \quad (28)$$

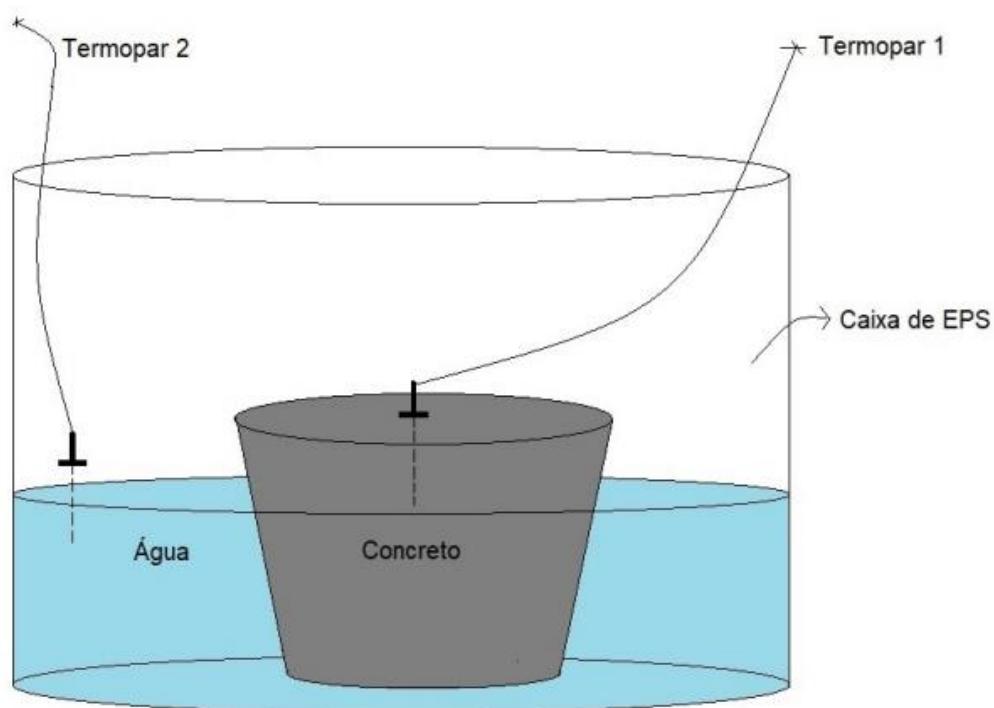
Onde m é a massa do corpo de prova (g) e V o volume determinado anteriormente (cm^3).

3.5.4 Calor específico

Para determinar o calor específico das argamassas em estudo, o ensaio baseou-se nos estudos de Cifuentes (2020).

Utilizou-se o calorímetro que cria condições semi-adiabáticas para o sistema e amostras de massas conhecidas das argamassas e água. A água usada manteve-se em temperatura ambiente controlada, em torno de 23°C, enquanto a argamassa foi previamente aquecida em estufa por 2 horas. A medição das temperaturas foi monitorada através de termopares, segundo a ilustração (Figura 33).

Figura 33 - Esquema de medição de temperatura utilizando termopares



Fonte: Cifuentes (2020).

A argamassa depois de aquecida foi colocada em contato com a água. Considerando a diferença de temperatura inicial entre a água e a argamassa, ocorreu uma diferença no fluxo de calor entre os materiais. Como o calorímetro cria condições adiabáticas, assumiu-se que grande parte da energia liberada pela argamassa foi absorvida pela água. Quando a água e a argamassa atingiram temperaturas próximas, concluiu-se que o sistema estava em equilíbrio térmico e não houve mais troca de calor entre ambos, processo físico conhecido como a lei zero da termodinâmica, "Quando dois corpos estão em equilíbrio térmico, suas temperaturas são iguais e vice-versa" (HALLIDAY,

RESNICK E WALKER, 2009, p. 184). Portanto a soma do calor absorvido pela água (Q_{H20}) e o calor liberado pela argamassa (Q_C) é igual a zero (Equação 29).

$$Q_{H20} + Q_C = 0 \quad (29)$$

A quantidade de calor absorvida ou liberada por um corpo submetido as mudanças de temperatura, sem que haja mudança de estado físico, de acordo com Halliday, Resnick e Walker (2009) é dada pela Equação 30.

$$Q = m \times cp \times (T_f - T_i) \quad (30)$$

Onde:

Q é a quantidade de calor m é a massa, cp é o calor específico, T_f é a temperatura final e T_i é a temperatura inicial do corpo.

Substituindo nas equações, tem-se que o calor específico da argamassa (c_{pa}) é determinado conforme a Equação 31.

$$c_{pa} = \frac{-[m \times cp(T_f - T_i)]_{H20}}{[m \times (T_f - T_i)]_a} \quad (31)$$

3.5.5 Absorção de água e índice de vazios

A determinação da absorção de água foi definida conforme especificado em norma, NBR 9778 (ABNT, 2005), foram necessários dois corpos de prova para cada traço de argamassa.

Inicialmente, a amostra deve ser colocada na estufa, durante 72 horas, à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, e então, a massa da amostra na condição seca é determinada.

Em seguida, a amostra foi imersa em água, em temperatura ambiente $23 \pm 2^\circ\text{C}$, também durante 72 horas, para atingir a condição saturada. Completada essa etapa, a mostra foi levada à ebulação por um período de 5 horas. Após, deixou-se a água esfriar e foi registrada a massa com a balança hidrostática.

Ao final, o corpo de prova foi retirado da água, seco com um pano úmido, e então sua massa saturada foi determinada.

O cálculo da absorção de água é definido pela Equação 32, o índice de vazios pela Equação 33 e a massa real através da Equação 34.

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad (32)$$

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad (33)$$

$$\rho_r = \frac{ms}{ms - mi} \quad (34)$$

Onde:

A é a absorção (g/cm^3);

$msat$ é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

ms é a massa da amostra seca em estufa;

mi é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (balança hidrostática);

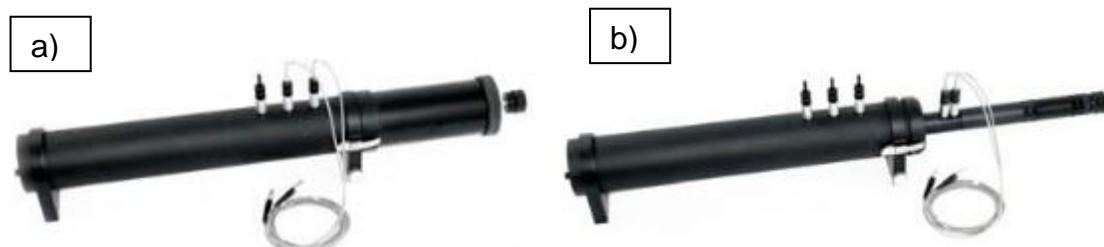
ρ_r é a massa específica real.

3.5.6 Absorção acústica

Diante da pesquisa realizada por Silva (2018) e Cintra (2013), realizou-se a medição da absorção sonora e perda da transmissão através do tubo de impedância Brüel & Kjaer Type 4206. As medições e os cálculos seguem a norma ASTM E1050-10.

Foram realizadas duas medições, uma com amostra de diâmetro de 100 mm para a faixa de frequências de 50 Hz – 1.600 Hz (Figura 34a), e outra com a amostra de diâmetro de 29 mm para a faixa de frequências de 500 Hz – 6.400 Hz (Figura 34b).

Figura 34 - a) Tubo de impedância para amostras de Ø100mm, b) Tubo de impedância para amostras de Ø29mm

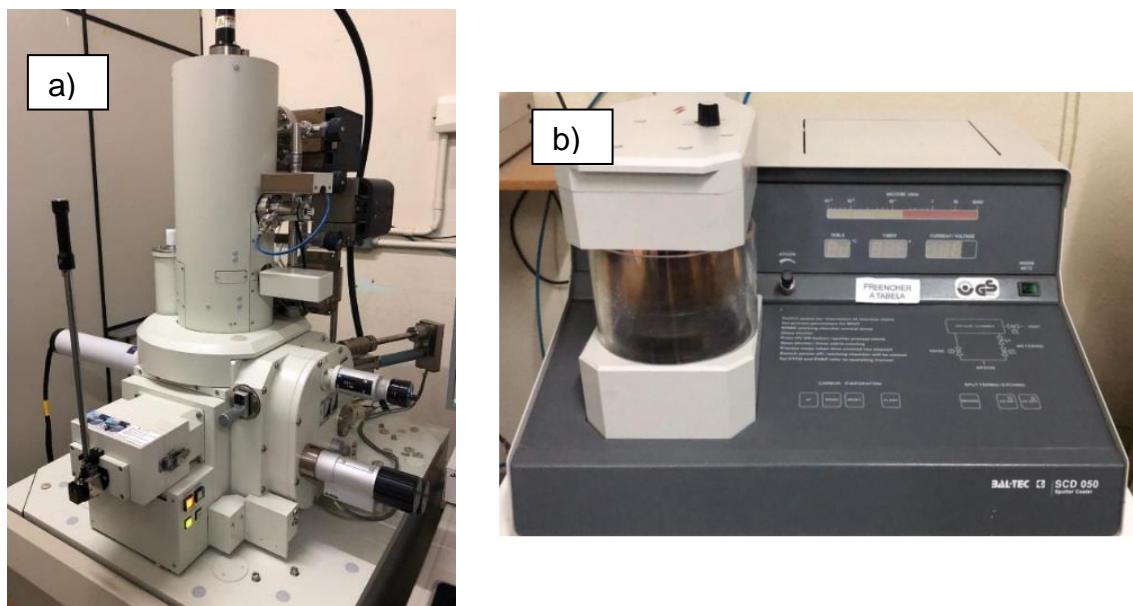


Fonte: Brüel & Kjaer (2019).

3.5.7 Análise de microscopia

Para a análise por microscopia foi utilizado o microscópio eletrônico que produz imagens de elétrons secundários (*Secondary Electron*), da marca JEOL, modelo JSM 6701F (Figura 35a). Para o recobrimento das amostras com ouro, foi utilizada uma metalizadora, marca Bal-Tec, modelo SCD 050 (Figura 35b)

Figura 35 - a) Microscópio eletrônico, b) Metalizadora



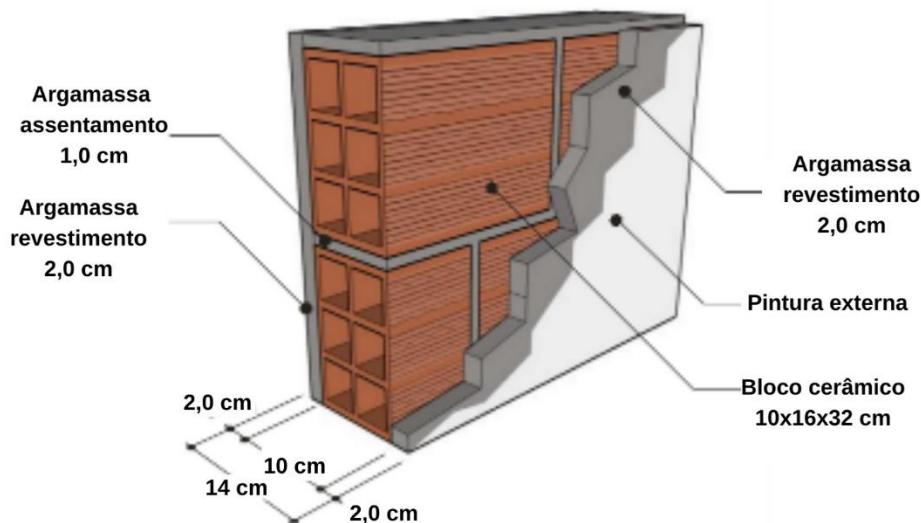
Fonte: A autora (2020).

3.6 CÁLCULOS DOS PARÂMETROS TÉRMICOS

Foram realizados os cálculos de transmitância térmica (U), capacidade térmica (CT), atraso térmico (φ) e o fator de ganho solar (FSo) conforme a norma de desempenho térmico, a NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

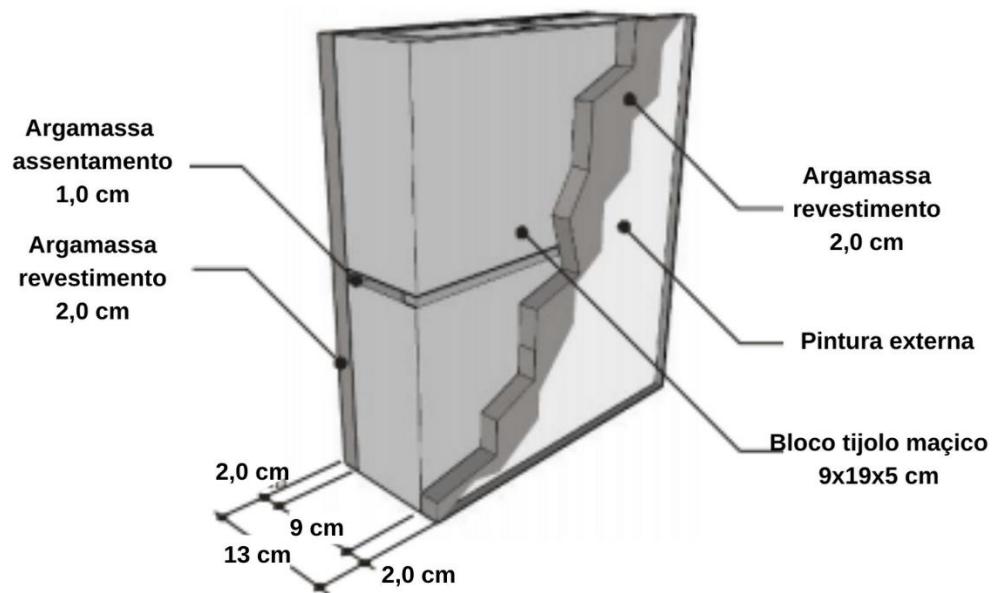
Sendo assim, esses parâmetros foram determinados para um sistema de vedação em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces, com dimensão de 10 x 16 x 32 cm alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces (Figura 36). Também para o sistema de tijolos maciços, com dimensão de 9 x 19 x 5 cm, rebocados em ambas as faces (Figura 37).

Figura 36 - Alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces



Fonte: Adaptado de INMETRO (2013).

Figura 37 - Alvenaria de tijolos maciços rebocados em ambas as faces



Fonte: Adaptado de INMETRO (2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes aos ensaios e análises apresentadas na metodologia. Conforme o processo de seleção das argamassas, os resultados e discussões foram divididos em função das fases de pesquisa.

A Tabela 21 demonstra a quantidade e dimensões dos corpos de prova ensaiados conforme cada fase da pesquisa.

Tabela 21 - Quantidade de corpos de prova para cada ensaio no estado endurecido e suas respectivas fases

Fase	Ensaio	Quantidade de corpos de prova	Dimensões dos corpos de prova
FASE I	Resistência à compressão	4	4 x 4 x 16 cm
	Condutividade térmica	3	10 x 10 x 2,5 cm
FASE II	Densidade de massa	3	4 x 4 x 16 cm
	Calor específico	2	4 x 4 x 16 cm
FASE III	Absorção de água	2	4 x 4 x 16 cm
	Absorção acústica e perda de transmissão	3	Ø100 mm e Ø29 mm

Fonte: A autora (2020).

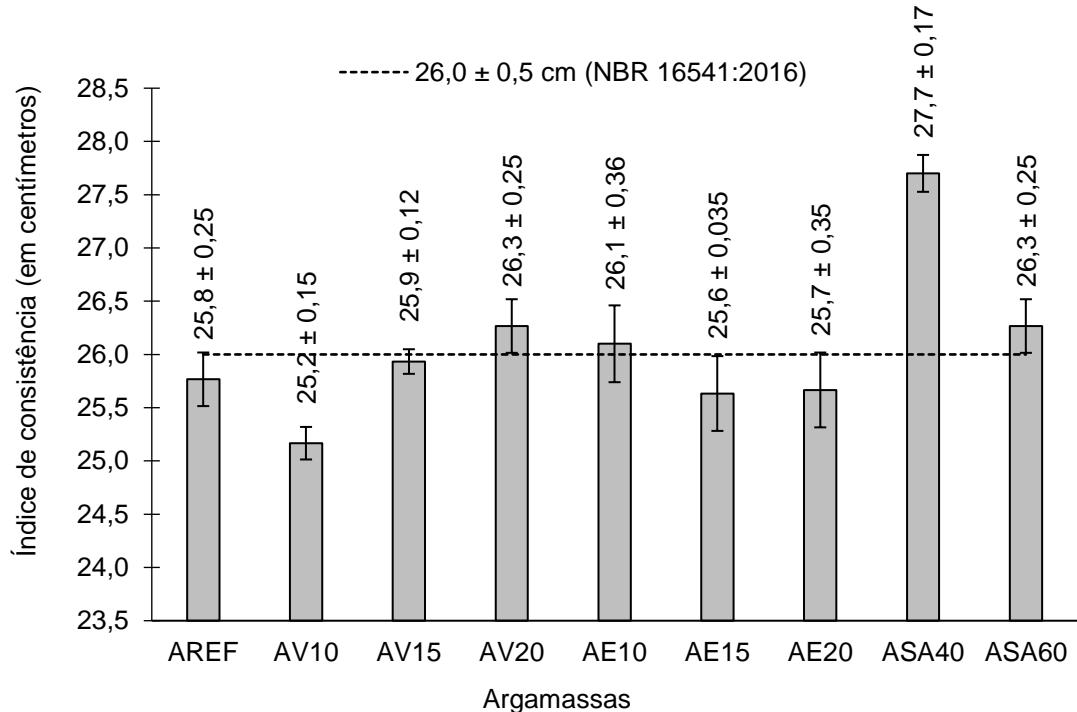
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES – FASE I

A fase I deste trabalho consistiu na medição do índice de consistência no estado fresco e a resistência à compressão das 9 misturas de argamassas.

4.1.1 Índice de consistência

Os resultados obtidos das medidas do índice de consistência das argamassas contendo os agregados isolantes e da argamassa de referência estão apresentados na Figura 38.

Figura 38 - Índice de consistência



Fonte: A autora (2020).

Analizando os resultados, em geral as argamassas mantiveram as médias próximas ao recomendado pela NBR 16541 (ABNT, 2016), cujo diâmetro de espalhamento deve estar entre $26 \pm 0,5$ cm.

É possível verificar que a consistência da argamassa contendo a vermiculita aumenta em função da porcentagem de substituição, fator este possivelmente influenciado pela submersão do material em água 24 horas antes do uso, de modo a garantir sua expansão por completo. Estudos de Cintra, Paiva e Baldo (2014) confirmaram que quanto maior a quantidade de vermiculita na composição, maior o índice de consistência da argamassa.

Na argamassa contendo o EPS a consistência diminuiu em função do aumento de porcentagem de substituição, o que pode ser explicado pelo

processo inverso da vermiculita. É possível que o EPS tenha absorvido a água de amassamento, tornando a argamassa um pouco mais seca. O decréscimo do índice de consistência condiz também com os estudos de Passos e Carasek (2018).

Segundo Flores-Colen, Brito e Soares (2013) a trabalhabilidade das argamassas com sílica aerogel depende muito do aerogel que é utilizado, em função de características específicas do fabricante. Neste caso, pode-se observar que a mistura ASA40 obteve maior média de consistência e acima do recomendado por norma, o que corrobora com o esperado, considerando que o agregado miúdo foi reduzido em 40% do seu volume em comparação com a mistura ASA60 que teve substituição de apenas 20% do agregado miúdo.

4.1.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas foi medida aos 28 dias, a Figura 39 apresenta as médias para esta propriedade. Diante dos valores encontrados, nota-se a redução da resistência em função do aumento de porcentagem de substituição pelo agregado leve.

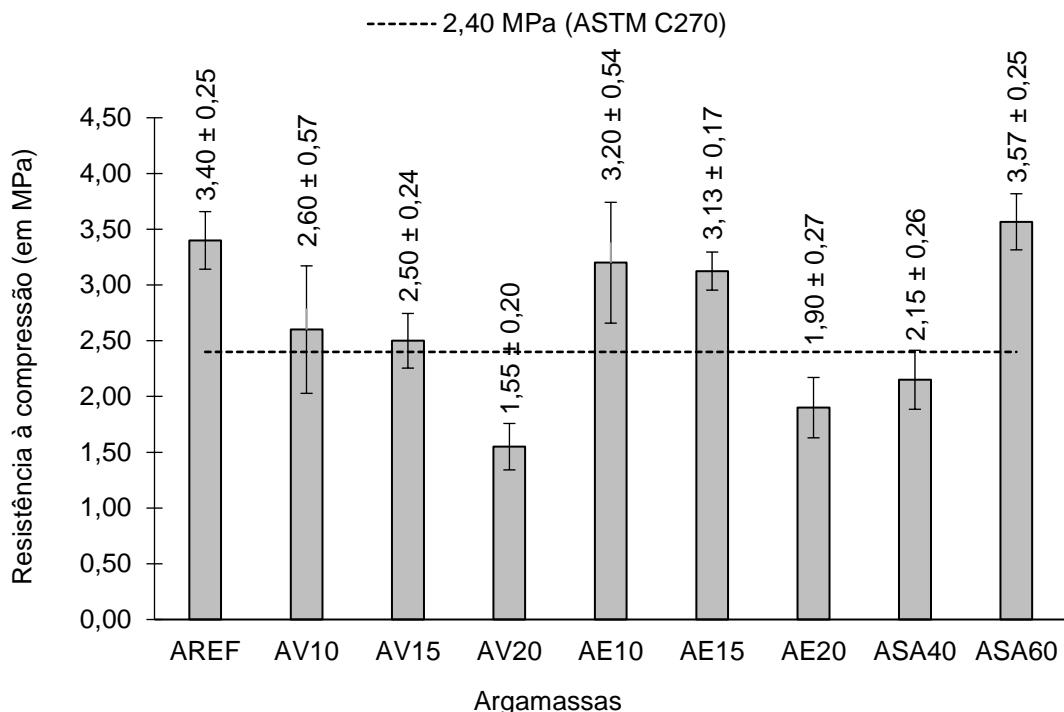
Apesar da redução da propriedade mecânica, as misturas com vermiculita e EPS com porcentagens de substituição de 10% e 15% cumprem o requisito da C270 (ASTM, 2007), cuja resistência à compressão aos 28 dias deve ser superior a 2,40 MPa. Entretanto a substituição de 20%, em ambas as argamassas, reduziu significativamente a resistência.

Quanto à argamassa ASA40 pode-se concluir que a diminuição da resistência à compressão deve-se ao fato da substituição de 40% do volume por agregado miúdo, o qual apesar de ser inerte, influenciou na resistência à compressão final da argamassa. Enquanto a mistura ASA60, atendeu ao pré-requisito por norma, logo a substituição de apenas 20% do volume do agregado miúdo não interferiu na resistência da argamassa, porém o acréscimo de 60% de sílica aerogel contribuiu para a resistência final.

Conforme as classificações da NBR 13281 (ABNT, 2005), apresentadas na Tabela 16, as misturas AV10, AV15, AE20 e ASA40 são da classe P2, cuja resistência à compressão fica entre 1,5 e 3,0 MPa. As argamassas AREF,

AE10, AE15 e ASA60 classificam-se como P3 (2,5 a 4,5 MPa) e como classe P1 somente a mistura AV20, cuja propriedade é inferior à 2,0 MPa.

Figura 39 - Resistência à compressão



Fonte: A autora (2020).

A fim de verificar o quanto essa variabilidade de valores de resistência é influenciada pela adição dos agregados, efetuou-se uma análise estatística de variância (ANOVA), com um nível de significância (α) de 10%, conforme a Tabela 21.

Como p -valor $< \alpha$ ($6,72 \times 10^{-9} < 0,10$) comprova-se a diferença entre as médias das resistências à compressão. A proporção da variabilidade (R^2) foi de 0,7929, ou seja, indica que os fatores e seus efeitos representam 79,29% da variabilidade das medidas. A magnitude das diferenças entre as médias foi avaliada por meio de um teste de comparação múltipla, o teste de Tukey (Tabela 22). Esse teste é necessário quando existe diferença significativa entre as médias, pois complementa a análise de variância comparando o resultado de todos os pares de médias. Considerando um nível de significância de 10%, p -valor $< \alpha$ (p -valor $< 0,10$), para as argamassas AE10, AE15 e ASA60 em

comparação com a AREF, as médias não possuem diferenças significativas, pois p-valor > 0,10. Para as demais análises as médias são consideradas significativamente distintas, p-valor < 0,10.

Tabela 22 - Análise de variância da resistência à compressão

	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F_0	p-valor
Agregados	16,000	8	2,000	17,75	6,72E-09
Erro	3,042	27	0,1127		
Total	19,042	35			

Fonte: A autora (2020).

Tabela 23 - Teste de Tukey

	Centro	Limite inferior	Limite superior	p-valor
AREF-AV10	-0,800	-1,598	-0,001	0,049
AREF-AV15	-0,900	-1,698	-0,101	0,018
AREF-AV20	-1,850	-2,648	-1,051	0,000
AREF-AE10	0,225	-0,573	1,023	0,987
AREF-AE15	0,225	-0,573	1,023	0,987
AREF-AE20	1,500	0,701	2,298	0,000
AREF-ASA40	-1,250	-2,048	0,451	0,000
AREF-ASA60	0,167	-0,631	0,966	0,998

Fonte: A autora (2020).

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES – FASE II

A partir dos resultados da fase I, foram selecionadas 6 argamassas para a fase II, onde determinou-se a condutividade térmica, a densidade de massa aparente e o calor específico no estado endurecido. Por fim, foram realizados os cálculos dos parâmetros térmicos: transmitância, capacidade, atraso térmico e fator solar, conforme o Anexo C da NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

As argamassas escolhidas foram: AE10, AE15, AV10, AV15, ASA60 e a argamassa de referência (AREF). O principal fator de escolha foi a resistência

à compressão. De acordo com a ASTM C 270 (ASTM, 2007) as argamassas à base de cal devem possuir resistência à compressão superior a 2,40 MPa, portanto, as misturas que obtiveram média inferior a este limite, foram desconsideradas nessa fase.

4.2.1 Condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico

A Tabela 24 apresenta os valores de condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico das argamassas avaliadas.

Tabela 24 - Densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico

Misturas	Densidade de massa aparente (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/(kg.K))
AREF	1546,88	1,15 ± 0,03	0,79
AV10	1363,93	0,63 ± 0,02	1,26
AV15	1311,20	0,59 ± 0,01	1,55
AE10	1401,69	0,78 ± 0,03	1,72
AE15	1356,12	0,54 ± 0,03	1,97
ASA60	1450,20	0,46 ± 0,03	1,00

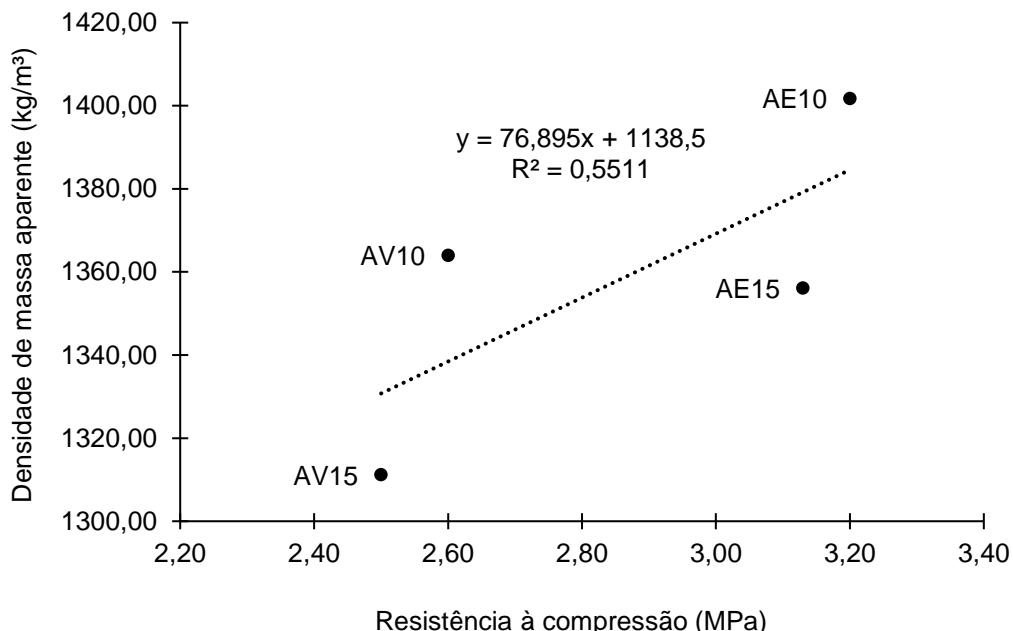
Fonte: A autora (2020).

A incorporação dos agregados leves em substituição à areia reduziu os valores da densidade de massa aparente em comparação com a argamassa AREF, o que confirma com os resultados apresentados nos estudos de Passos e Carasek (2018) e Cintra (2013). Analisando a argamassa ASA60, nota-se que a redução na densidade foi menos expressiva comparada com as demais, fato esse possivelmente influenciado por conta do tamanho das partículas de EPS e vermiculita serem maiores que os grânulos de sílica aerogel, o que leva a maior formação de vazios, consequentemente reduzindo a densidade de massa.

Quando se analisa a resistência à compressão e a densidade de massa aparente das argamassas com vermiculita e EPS (Figura 40), observa-se que a

redução na densidade de massa aparente reflete diretamente na diminuição da resistência à compressão.

Figura 40 - Resistência à compressão versus densidade de massa aparente (vermiculita e EPS)



Fonte: A autora (2020).

Ao examinar o valor encontrado para a condutividade térmica da argamassa de referência (AREF) de 1,15 W/m.K, o resultado encontrado condiz com o parâmetro determinado conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), que cita a condutividade térmica de 1,15 W/m.K para argamassas comuns, conforme apresenta a Tabela 2.

Comprovou-se que uso dos agregados permitiu a redução da condutividade térmica. Percebe-se que a argamassa AE10 obteve a redução menos expressiva comparada aos demais agregados, enquanto a argamassa com a sílica aerogel (ASA60) apresentou o maior potencial de redução da condutividade térmica, exatos 60% em comparação com a argamassa AREF, fato este comprovado devido ao menor valor de condutividade térmica da sílica aerogel comparada aos demais materiais. Enquanto a condutividade da sílica aerogel é de 0,012 W/m.K, a da vermiculita e do EPS são superiores, 0,070 W/m.K e 0,035 W/m.K respectivamente.

Os resultados da condutividade térmica das misturas AV10 e AV15 corroboram com os estudos de Araújo e Cândido (2015), no qual os autores obtiveram uma redução de até 50% desta propriedade, dado que este estudo permitiu a redução em até 48,7%, com a mistura AV15. E segundo estudos de Pereira (2016) o EPS reduz em até 35% a condutividade, entretanto a mistura AE15 possibilitou uma redução mais expressiva, cerca de 53%. Contudo, na pesquisa realizada pelo autor, as misturas das argamassas possuíam diferentes composições, assim como o EPS utilizado nesta pesquisa.

Nota-se que com o aumento do volume de EPS na argamassa, a condutividade térmica reduziu 30,8% comparando as misturas AE10 e AE15, porém com a vermiculita esse acréscimo no volume não foi significativo na medição da condutividade térmica, pois a redução do parâmetro foi de apenas 6,3% comparando as misturas AV10 e AV15, fator esse possivelmente influenciado pela condutividade do material, tendo em vista que a vermiculita (0,070 W/m.K) possui o dobro da condutividade térmica comparada ao EPS (0,035 W/m.K).

Por fim, a última propriedade térmica analisada foi o calor específico, no qual pode-se observar diante dos resultados encontrados, que as argamassas contendo a vermiculita e o EPS apresentaram comportamento semelhante, onde a adição dos agregados possibilitou que o calor específico aumentasse. Logo, essa elevação significa que é preciso uma maior quantidade de calor para elevar a temperatura da argamassa. A mistura AREF obteve o menor valor de calor específico e a argamassa ASA60 possui exatamente o mesmo calor específico, igual a 1,00 kJ/(kg.K), conforme especificado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e apresentado na Tabela 2.

4.2.2 Parâmetros térmicos

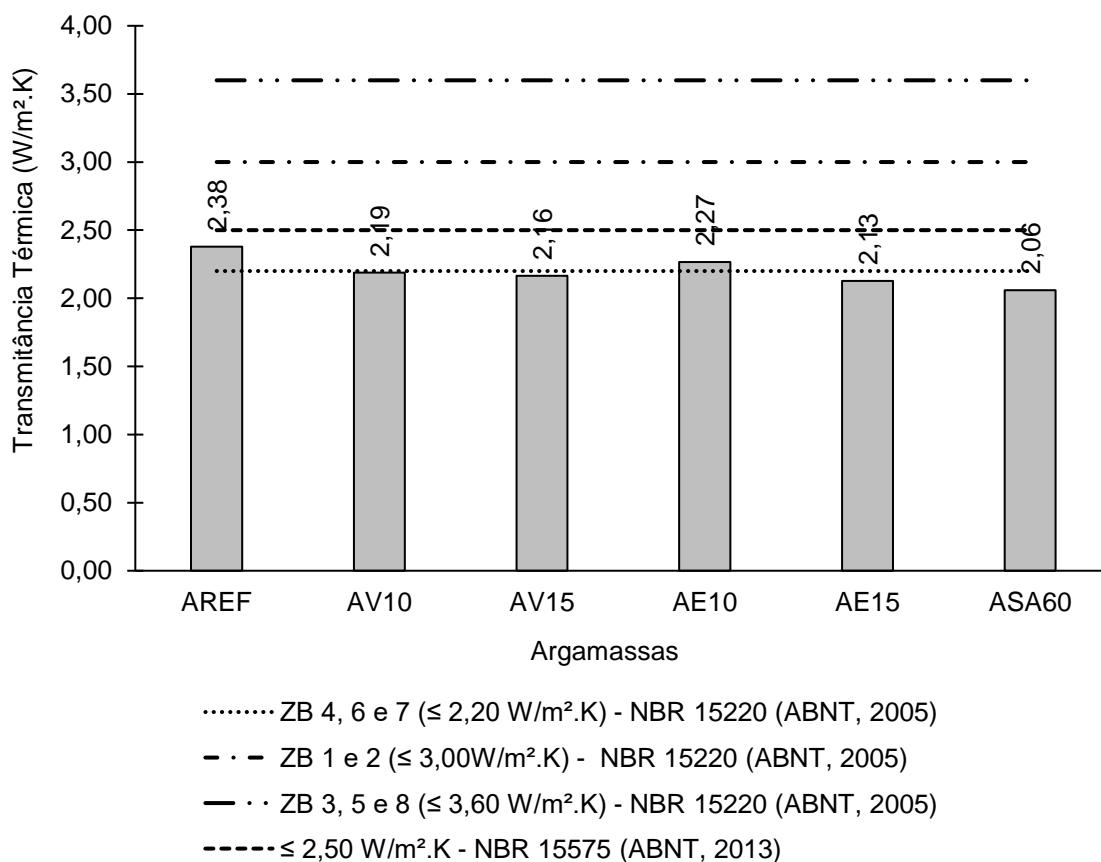
Foram realizados os cálculos dos parâmetros térmicos: capacidade térmica, transmitância térmica, atraso térmico e fator solar de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005), com o objetivo de verificar se os mesmos atendem aos pré-requisitos apresentados pela Tabela 7.

Os parâmetros foram determinados para um sistema de vedação em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces e

para uma parede de tijolos maciços rebocados em ambas as faces, conforme o Anexo C da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), com argamassas de reboco externo e interno, em espessura de 2,0 cm e pintura das paredes em cores claras, cuja absorção é inferior a 0,6.

A Figura 41 apresenta os resultados de transmitância térmica para o sistema de vedação em alvenaria de tijolos cerâmicos.

Figura 41 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados em ambas as faces



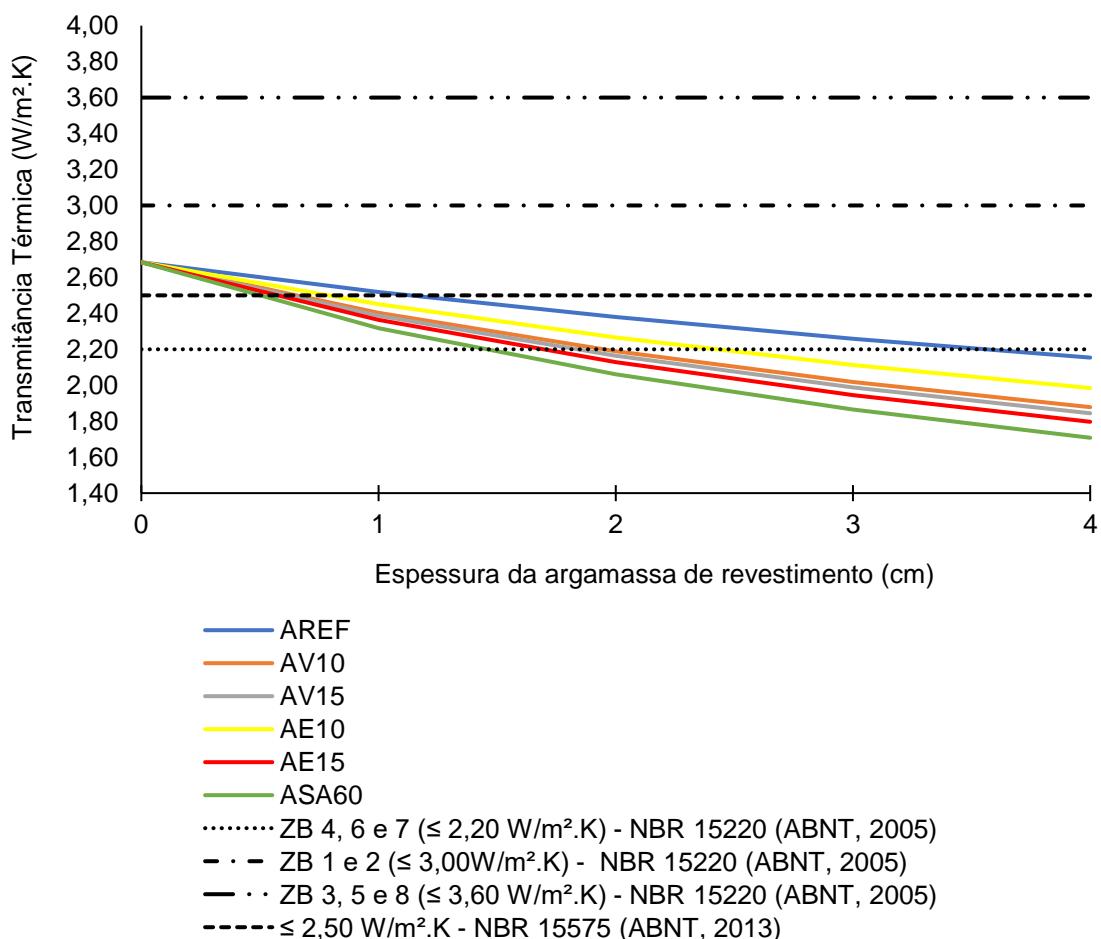
Fonte: A autora (2020).

Conforme determina a NBR 15220 (ABNT, 2005) observa-se que para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3, 5 e 8 os valores de transmitância atendem os requisitos da norma, pois todos são inferiores aos seus respectivos limites. Assim como ao critério da NBR 15575 (ABNT, 2013) cuja transmitância deve ser inferior à 2,50 W/m².K e considerando a absorção inferior a 0,6, todas as misturas atendem ao requisito mínimo. Entretanto para as zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 nota-se que as misturas AREF e AE10 extrapolam o limite determinado

pela norma e as demais misturas também estão bem próximas ao limite de transmitância térmica de 2,20 W/m².K.

Considerando o não atendimento para estas duas misturas ou a proximidade ao limite de transmitância térmica pelas zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 estabelecido pela NBR 15220 (ABNT, 2005), avaliou-se a influência da espessura do revestimento (de 0 à 4 cm) na propriedade, conforme apresenta a Figura 42.

Figura 42 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos em função da espessura da argamassa de revestimento



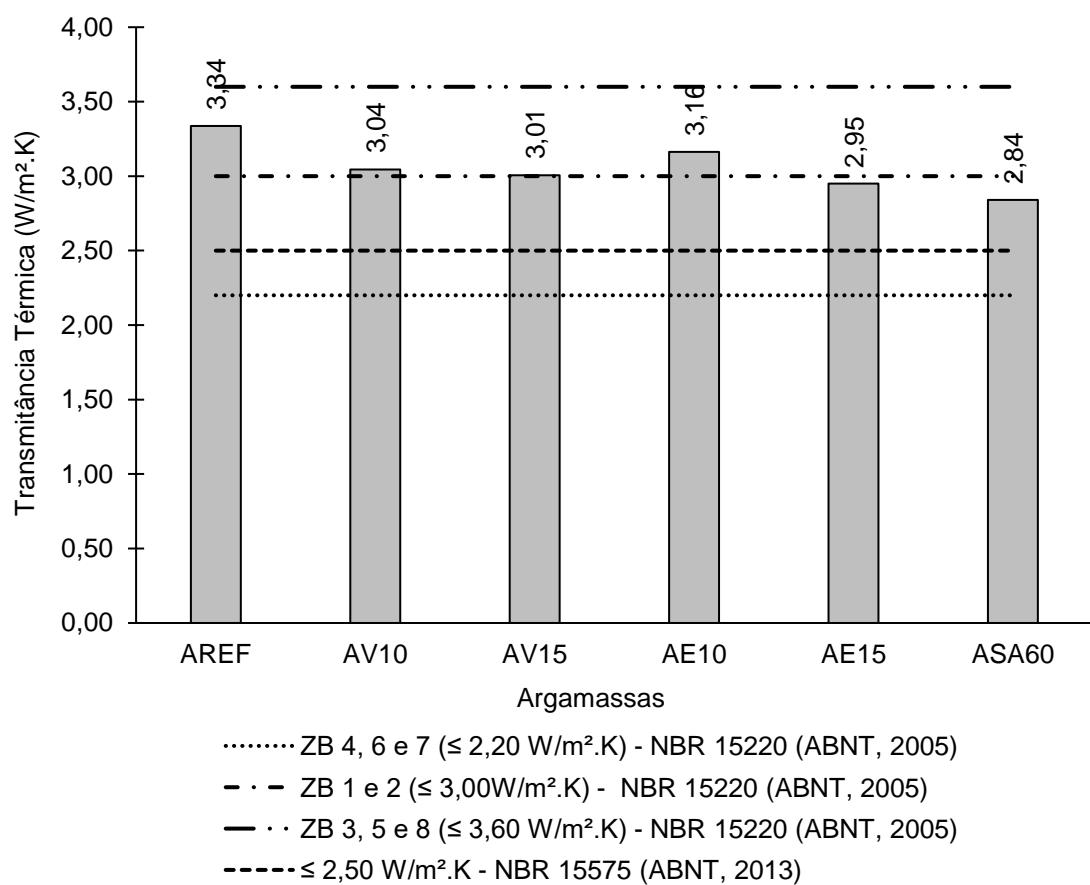
Fonte: A autora (2020).

A partir do gráfico é possível notar que a incorporação dos agregados nas argamassas e aumento na espessura da argamassa de revestimento beneficia o atendimento do critério mais restritivo da norma. A argamassa AREF necessita de uma espessura superior a 3,5 cm para atender a norma, já a AE10 reduz em até 1,0 cm a espessura comparada à de referência. Em

contrapartida a argamassa ASA60 atende ao exigido com espessura próxima a 1,4 cm.

A Figura 43 apresenta os resultados de transmitância térmica para o sistema de vedação em alvenaria de tijolos maciços. Neste caso nenhuma argamassa atendeu ao critério mínimo de $2,50 \text{ W/m}^2\text{.K}$ estabelecido pela NBR 15575 (ABNT, 2013), assim como nas zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 determinados pela NBR 15220 (ABNT, 2005) cujo limite é ainda inferior. Para as zonas 3, 5 e 8 todas as argamassas são aptas a atender a norma, porém nas zonas 4, 6 e 7 somente as argamassas AE15 e ASA60 atendem ao valor de transmitância térmica estipulado pela norma.

Figura 43 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos maciços rebocados em ambas as faces



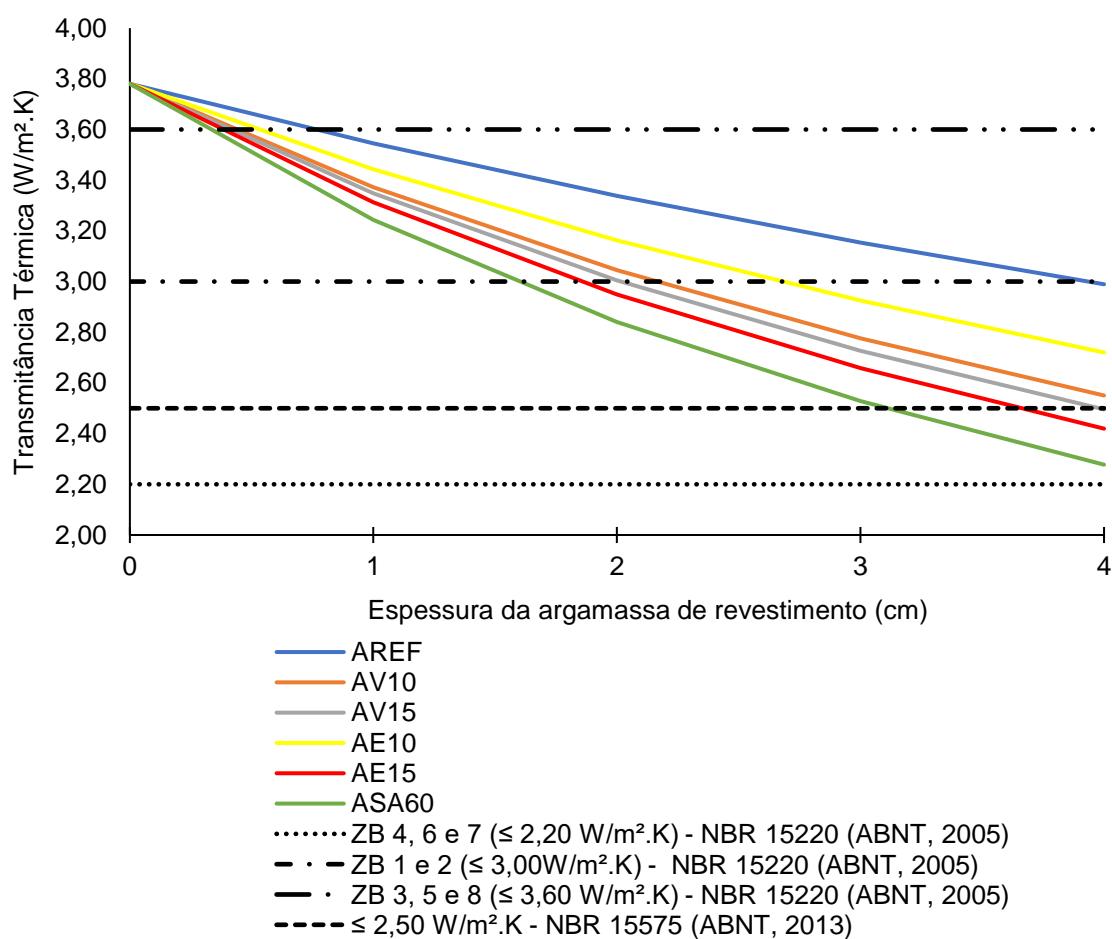
Fonte: A autora (2020).

Tendo em vista que as argamassas obtiveram os valores de transmitância térmica que atendessem somente aos critérios das zonas bioclimáticas 3, 5 e 8 da NBR 15220 (ABNT, 2005), avaliou-se a influência da

espessura do revestimento (de 0 à 4 cm) nesta propriedade, conforme apresenta a Figura 44.

Para as zonas bioclimáticas 1 e 2 cuja transmitância deve ser inferior à 3,00 W/m².K, as argamassas com até 4,0 cm de espessura atenderam a esse critério. De modo semelhante ao sistema de tijolos cerâmicos, a argamassa ASA60 com uma espessura de aproximadamente 1,7 cm atende a norma, já a argamassa AREF necessita de uma espessura de 4,0 cm para aprovação.

Figura 44 - Transmitância térmica em alvenaria de tijolos maciços em função da espessura da argamassa de revestimento



Fonte: A autora (2020).

O critério mais exigente da NBR 15220 (ABNT, 2005), no qual a transmitância deve ser inferior à 2,20 W/m².K nas zonas bioclimáticas 4, 6 e 7, não é atendido por nenhuma argamassa com espessura de até 4 cm. A mistura que atenderia a esse critério com a menor espessura seria a argamassa

ASA60 com 4,3 cm de espessura. Enquanto a argamassa AREF necessitaria de uma espessura de aproximadamente 10,5 cm.

Por fim, analisando a condição prescrita pela NBR 15575 (ABNT, 2013), as argamassas ASA60, AE15 e AV15, com espessuras entre 3 cm e 4 cm, atendem ao exigido pela norma.

A NBR 15220 (ABNT, 2005) ainda determina limites para o atraso térmico, fator solar e capacidade térmica nos sistemas de alvenaria de tijolos cerâmicos e maciços. A Tabela 25 apresenta os valores encontrados para essas propriedades.

Tabela 25 - Atraso térmico, fator solar e capacidade térmica para os sistemas de alvenaria de tijolos cerâmicos e maciços

Misturas	Alvenaria de tijolos cerâmicos			Alvenaria de tijolos maciços		
	Atraso Térmico (h)	Fator Solar (%)	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)	Atraso Térmico (h)	Fator Solar (%)	Capacidade térmica (kJ/m ² .K)
AREF	3,33	2,86	127,09	6,81	2,63	189,91
AV10	3,85	2,63	148,26	3,64	3,65	210,01
AV15	4,05	2,60	161,98	3,79	3,61	222,66
AE10	3,92	2,72	177,78	3,66	3,80	237,89
AE15	4,39	2,55	188,22	4,06	3,54	247,89
ASA60	4,00	2,47	136,87	3,84	3,41	198,76

Fonte: A autora (2020).

A norma determina que para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3, 5, e 8, o atraso térmico deve ser inferior a 4,30 horas; critério este não atendido apenas pela argamassa AE15 aplicada na alvenaria de tijolos cerâmicos. E para as zonas bioclimáticas 4, 6 e 7 o atraso térmico deve ser superior a 6,50h, onde nota-se que somente a argamassa AREF aplicada a alvenaria de tijolos maciços atendeu a este critério.

Quanto ao fator solar, os limites estabelecidos para as zonas bioclimáticas 1 e 2 é que a propriedade seja inferior a 5,00% e para as zonas 3, 5 e 8 seja menor que 4,00%. Diante disso, todas argamassas também atenderam ao estipulado. A maior exigência é para a zonas bioclimáticas 4, 6 e

7 ($\leq 3,50\%$), o sistema de tijolos cerâmicos atendeu ao critério em todas as argamassas, porém para a alvenaria em tijolos maciços somente as argamassas AREF e ASA60 possuem fator solar inferior a 3,50%.

O último parâmetro térmico analisado é a capacidade térmica, na qual a NBR 15575 (ABNT, 2013) estipula que a mesma deve ser superior à 130 $\text{kJ/m}^2\text{.K}$ para todas as zonas bioclimáticas, exceto a zona 8, a qual não determina critério mínimo. Somente a argamassa AREF aplicada à alvenaria de tijolos cerâmicos não atendeu a este parâmetro mínimo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE III

Considerando todos os ensaios e cálculos dos parâmetros térmicos determinados na fase II, foram selecionadas as argamassas AV15, AE15 e ASA60, as quais obtiveram melhor desempenho térmico nas propriedades analisadas, além da argamassa de referência (AREF).

A fase III abrange os ensaios complementares para as propriedades no estado fresco, como a retenção de água, densidade de massa e o teor de ar incorporado. No estado endurecido determinou-se a absorção de água e o índice de vazios, além da análise de imagens através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a mensuração da absorção acústica das argamassas, através do tubo de impedância. Por fim, fez-se uma análise de custos com o intuito de mensurar os valores em relação ao metro quadrado e a variação de espessura do revestimento em argamassa, visando atender aos parâmetros mínimos das normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR15220 (ABNT, 2005).

4.3.1 Retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado

A Tabela 26 apresenta os resultados encontrados para as propriedades no estado fresco.

Analizando a retenção de água, todas as argamassas obtiveram elevadas porcentagens, conforme a NBR 13280 (ABNT, 2005) apresentam alta capacidade de retenção de água, devido aos seus valores superiores a 90%. Segundo Cintra (2013), essa condição favorece o tempo de uso da argamassa

pois as reações de hidratação e carbonatação ocorrem lentamente, refletindo na melhora da resistência mecânica do material.

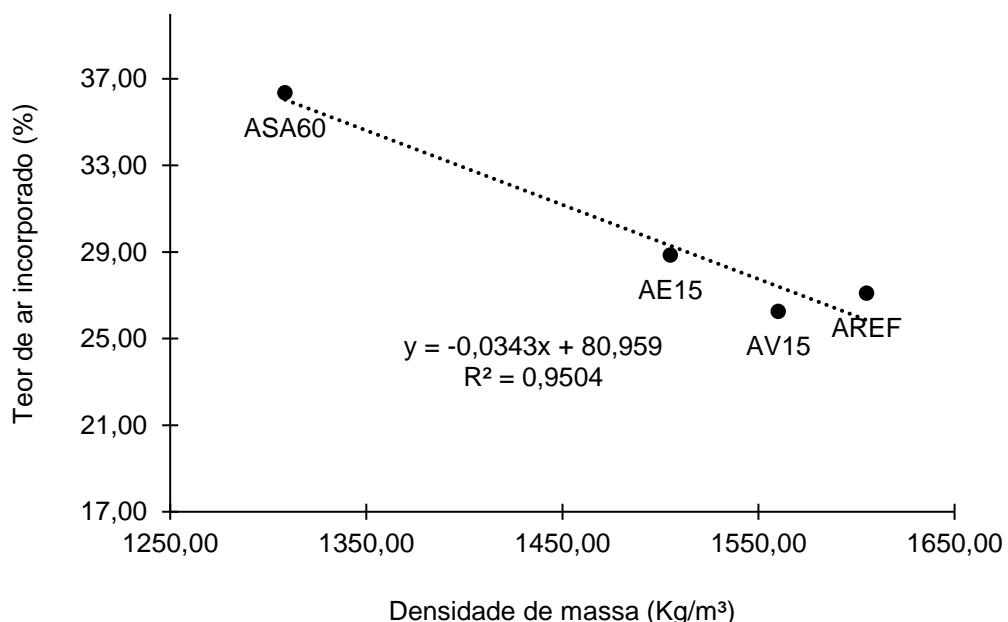
Tabela 26 - Retenção de água, densidade de massa e teor de ar incorporado

Misturas	Retenção de água (%)	Densidade de massa (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
AREF	97,92	1605,18	27,11
AV15	98,48	1560,13	26,26
AE15	96,34	1505,07	28,86
ASA60	96,63	1308,60	36,35

Fonte: A autora (2020).

Quanto à densidade de massa, a redução da propriedade também é observada no estado fresco (CINTRA, 2013 e PASSOS; CARASEK 2018) devido à substituição do agregado miúdo por agregados leves. A Figura 45 ilustra a relação existente entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado. Nota-se a relação inversamente proporcional entre as propriedades, quanto maior o teor de ar incorporado menor é a densidade de massa no estado fresco, o mesmo foi comprovado por Cintra (2013).

Figura 45 - Relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado

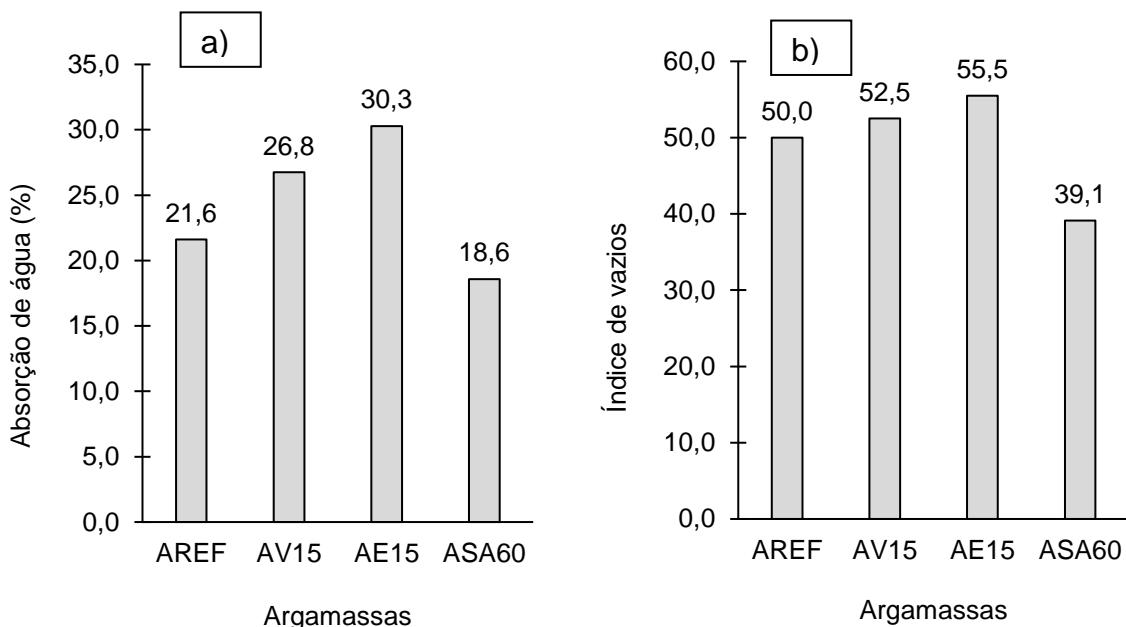


Fonte: A autora (2020).

4.3.2 Absorção de água e índice de vazios

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água e índice de vazios estão dispostos nas Figuras 46a e 46b, respectivamente.

Figura 46 - a) Absorção de água, b) índice de vazios



Fonte: A autora (2020).

Nota-se nas argamassas AV15 e AE15 que o uso dos agregados eleva a absorção de água do material, em comparação à argamassa de referência, assim como o índice de vazios, devido a maior capacidade de absorção de água por parte dos agregados, o que infelizmente pode reduzir a vida útil do material, pois está mais suscetível à entrada de agentes deterioradores.

Cabe salientar que a argamassa com a sílica aerogel obteve uma menor porcentagem de absorção de água, comparada as demais, o que pode colaborar para uma maior durabilidade do material.

A Tabela 27 indica os valores encontrados para a massa específica real, como era esperado, a argamassa AREF obteve a maior massa específica em comparação às outras misturas que contêm os agregados leves e isolantes.

Tabela 27 - Massa específica real (em g/cm³)

AREF	AV15	AE15	ASA60
2,31	1,96	1,83	2,10

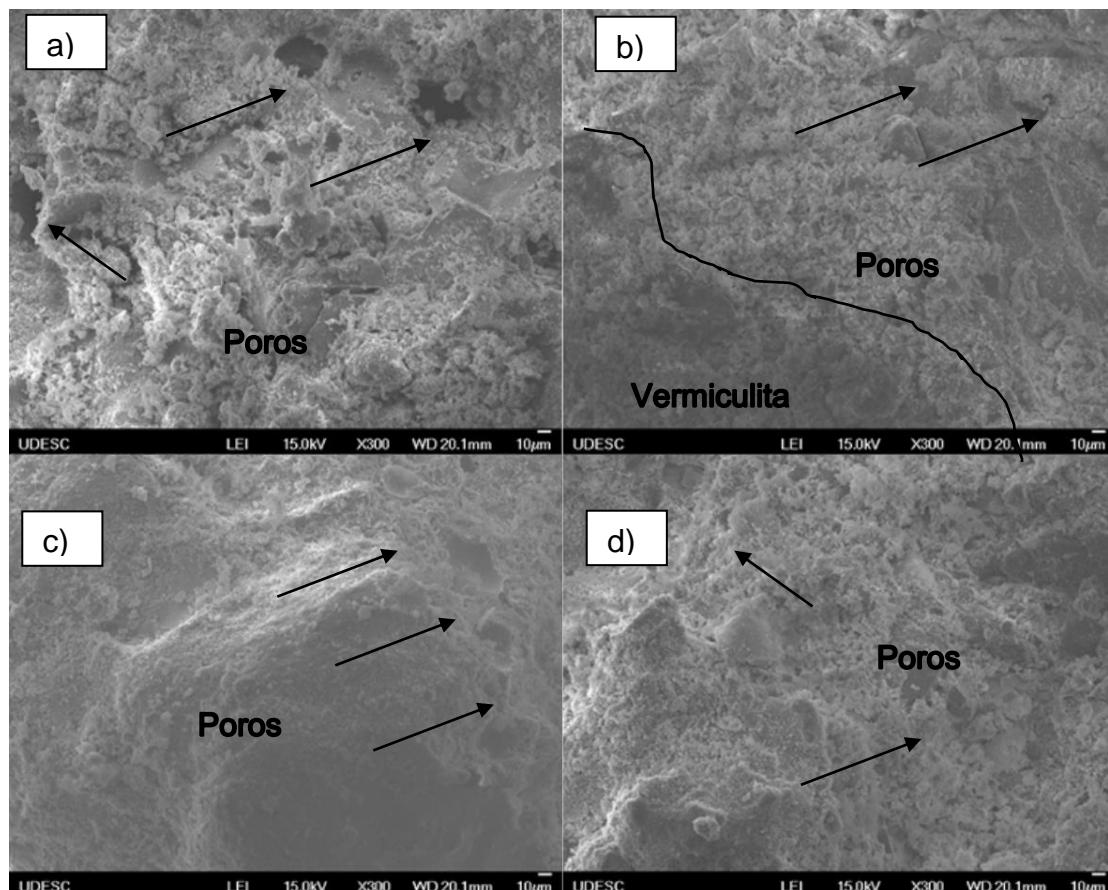
Fonte: A autora (2020).

4.3.3 Microscopia

A microestrutura das argamassas selecionadas foi obtida por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) com a ampliação de 300 vezes, conforme as Figuras 47a, 47b, 47c e 47d.

Nota-se pelas ampliações a presença de poros nas argamassas, em média os poros medem cerca de 20 µm. Destaca-se também na Figura 46b a presença do grânulo de vermiculita na amostra.

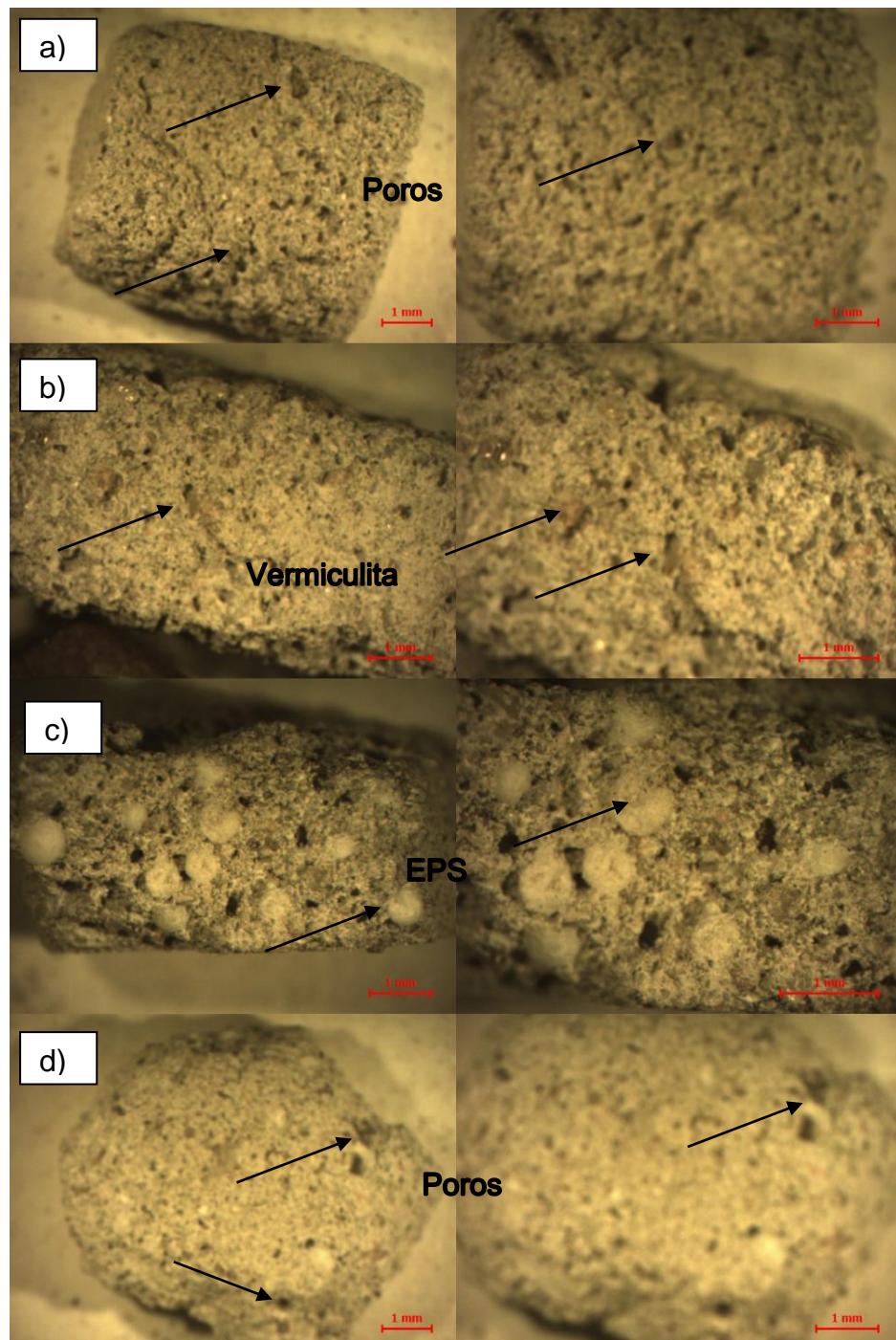
Figura 47 - MEV argamassa a) AREF, b) AV15, c) AE15, d) ASA60



Fonte: A autora (2020).

Com o intuito de identificar a interação entre os agregados e a matriz cimentícia na formação dos poros, foram capturadas imagens no microscópio ótico (Figura 48).

Figura 48 – Microscopia ótica das argamassas a) AREF, b) AV15, c) AE15, d) ASA60



Fonte: A autora (2020).

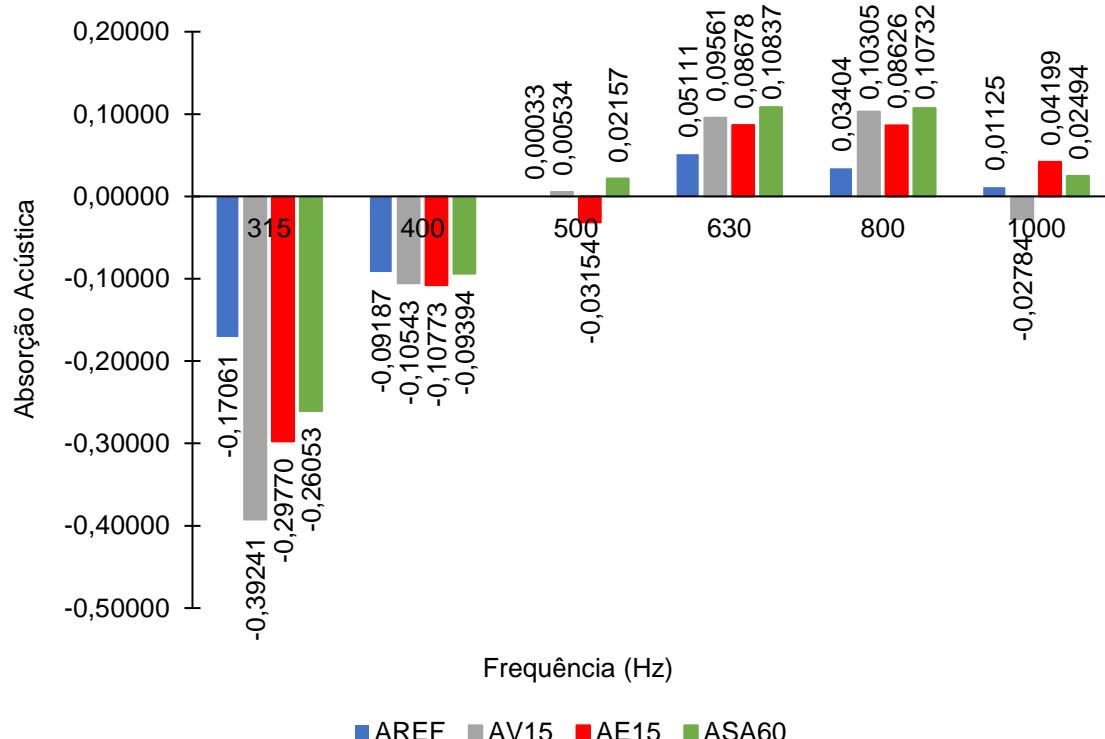
Nas argamassas com vermiculita e EPS, os agregados foram identificados facilmente no microscópio ótico, conforme a indicação nas imagens, a vermiculita em um tom de marrom e o EPS na cor branca. Na argamassa AE15 é notável a elevada presença de poros. Na argamassa ASA60 devido à transparência dos grânulos de sílica aerogel, não foi possível identificá-los, apenas notou-se a presença dos poros, assim como a argamassa AREF.

4.3.4 Absorção acústica e perda de transmissão

A absorção acústica e a perda de transmissão foram determinadas através do tubo de impedância, conforme descrito na metodologia.

A Figura 49 apresenta os resultados de absorção acústica das argamassas. Conforme os estudos de Cintra (2013), analisou-se os valores para a faixa de bandas de terço de oitava, frequência entre 315 Hz e 1000 Hz, pois neste intervalo notam-se os sons ambientais mais comuns.

Figura 49 – Coeficiente de absorção acústica



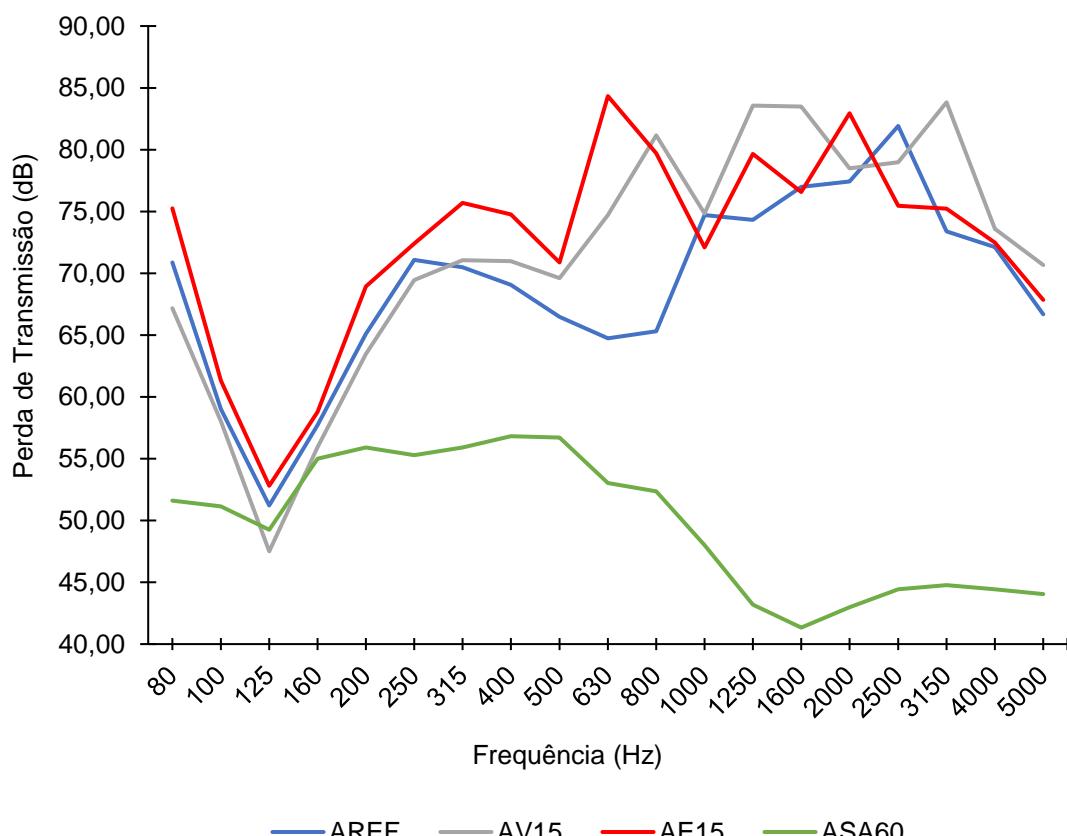
Fonte: A autora (2020).

Para as duas primeiras frequências os valores em todas as argamassas foram negativos, assim como para a frequência de 500 Hz para a argamassa AE15 e na frequência de 1000 Hz para a mistura AV15, o que não condiz com os valores positivos esperados. Devido à argamassa ser um material poroso e frágil, houve dificuldade em manter o formato ideal do material, o que levou à baixa cilindricidade das amostras de argamassa, que precisaram ser ajustadas com massa de modelar para o encaixe exato no tubo impedância. Apesar das tentativas, ainda assim os resultados obtidos ficaram expostos a ruídos, por conta dos vazamentos nas amostras.

De acordo com Salvo *et al.* (2005), é um obstáculo obter-se o coeficiente de absorção sonora exato, pois está relacionado à forma com que o corpo de prova é colocado no instrumento, assim como o ângulo de incidência sonora.

Quanto à perda de transmissão, os resultados são apresentados na Figura 50.

Figura 50 - Perda de transmissão (80 – 500 Hz)



Fonte: A autora (2020).

De acordo com a Lei da Massa, quanto maior a perda de transmissão, maior a capacidade de isolamento do material. Sendo assim, na faixa de frequências de 80 Hz e 630 Hz a argamassa AE15 possui melhor desempenho comparada com as demais. Entre as frequências de 630 Hz e 1600 Hz os maiores valores de perda de transmissão são da argamassa AV15 e por fim, nas frequências mais altas os desempenhos entre as argamassas oscilam com o aumento da frequência. Com relação à argamassa ASA60 seu desempenho é inferior em todas as frequências, o que a torna a argamassa com menos condições de isolamento acústico.

Avaliando os valores de perda de transmissão encontrados através do tubo de impedância e os valores de elementos determinados por Bistafa (2006), conforme apresentados na Tabela 9, nota-se que as argamassas AREF, AV15 e AE15 possuem valores superiores de perda de transmissão, em todas as frequências, logo apresentam maior isolamento acústico em comparação com o concreto em espessuras distintas e os tijolos revestidos com argamassa com espessuras variáveis.

Para a argamassa ASA60, nas frequências de 125 Hz, 250 Hz e 500 Hz, a perda de transmissão é superior em comparação com todos os elementos, o que garante maior isolamento acústico. Para a frequência de 1000 Hz, a argamassa ASA60 é mais isolante apenas quando comparada com o tijolo revestido com argamassa em espessura de 125 mm, nos demais elementos a argamassa é menos isolante, assim como nas frequências de 2000 Hz e 4000 Hz.

Tabela 28 - Perda de transmissão (125 – 4000 Hz)

Misturas	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
AREF	51,22	71,07	66,47	74,70	77,42	72,11
AV15	47,51	69,44	69,62	74,84	78,50	73,60
AE15	52,81	72,41	70,87	72,09	82,95	72,48
ASA60	49,26	55,29	56,72	48,00	42,97	44,42

Fonte: A autora (2020).

4.3.5 Análise de custo e viabilidade

Foi realizado um levantamento de custos diretos das argamassas com o intuito de verificar as diferenças em valores entre os agregados isolantes. Utilizou-se a tabela referencial de preços do SINAPI (2020), cuja última atualização foi realizada em agosto de 2020, para os valores da areia fina, cimento CP Z-32 e a cal hidratada. A valor da água foi baseado na taxa mínima cobrada pela companhia de água do município e os agregados (vermiculita, EPS e sílica aerogel) conforme os valores de venda fornecidos pelos seus respectivos fabricantes, como apresentados na Tabela 29. Cabe ressaltar que a sílica aerogel é comercializada em dólar, portanto foi considerado o câmbio do dia no ano de 2020 (US\$ 1,00 equivalente a R\$ 5,60).

Tabela 29 - Custo dos agregados

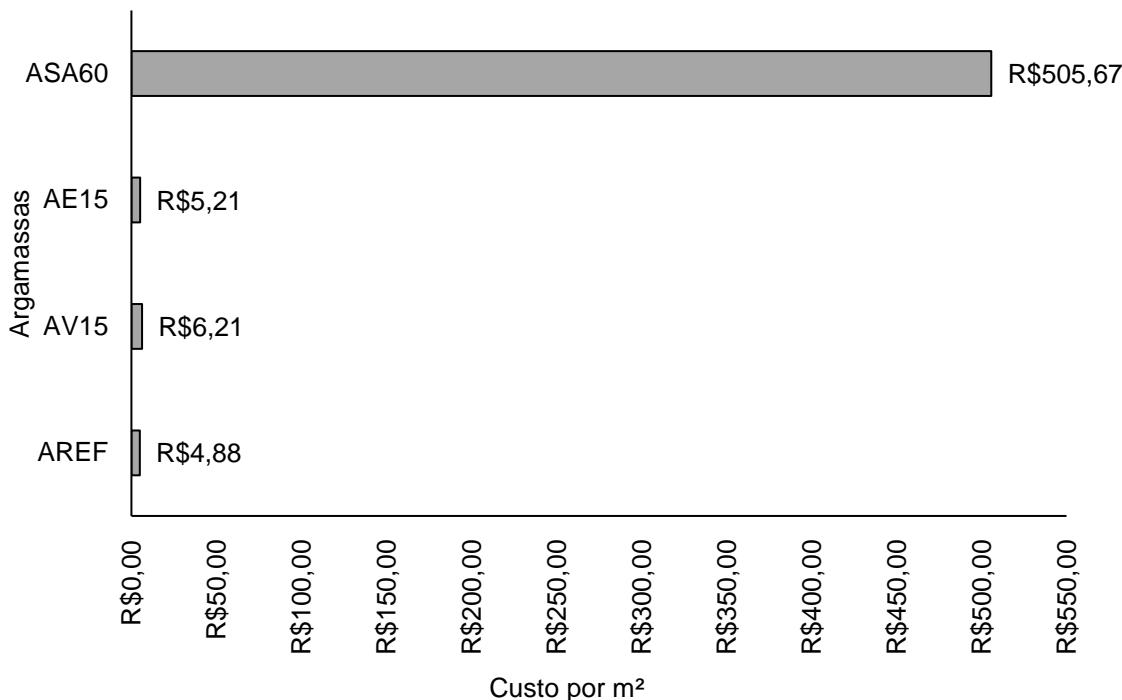
Agregado	Quantidade	Valor	Valor por litro
Vermiculita	100 litros	R\$ 52,90	R\$ 0,5290
Poliestireno Expandido (EPS)	200 litros	R\$ 33,70	R\$ 0,1685
Sílica Aerogel	1,0 kg	US\$ 80,00	R\$ 67,8700

Fonte: A autora (2020).

Diante desses valores, determinou-se o custo para a produção da argamassa, em uma área de 1,0 m x 1,0 m e uma espessura em reboco de revestimento de 2,0 cm, como apresentado na Figura 51.

Nota-se uma grande diferença entre o custo da argamassa ASA60 em comparação com as demais. Considerando o elevado custo da sílica aerogel, condição também destacada por Gao *et al.* (2014) e por ser um material cujo preço de venda é em dólar, torna o custo final da argamassa extremamente elevado. Comparando o seu custo com a argamassa AREF, fica 103,6 vezes mais caro.

Figura 51 - Custo para 1m² de argamassa com 2,0cm de espessura



Fonte: A autora (2020).

Considerando as análises da transmitância térmica em alvenarias de tijolos cerâmicos e maciços em função da espessura das argamassas de revestimento, conforme apresentado anteriormente nas Figuras 42 e 44, foram determinadas as espessuras mínimas das argamassas de revestimento para cada sistema de alvenaria, apresentadas nas Figuras 52 e 54, objetivando atender ao critério mais exigente entre as normas vigentes no país. Além dessa avaliação, foi determinado o custo relativo à argamassa e sua respectiva espessura de acabamento, vide Figuras 53 e 55.

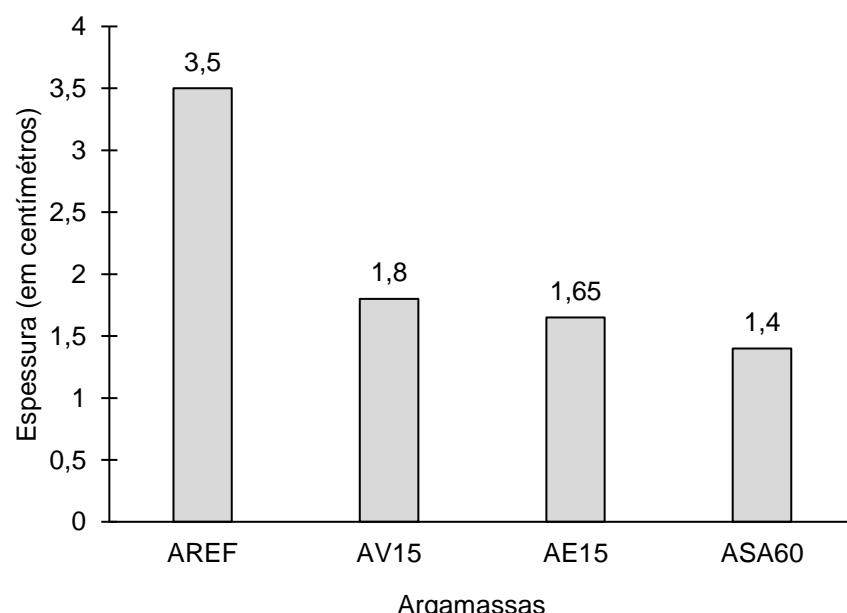
Avaliando a argamassa com a sílica aerogel (ASA60) aplicada à vedação de tijolos cerâmicos em comparação a AREF, sua espessura diminui em cerca de 60%, entretanto o custo fica cerca de 41,3 vezes mais caro. O custo de aplicar a argamassa ASA60 em uma parede de 1,0 m x 1,0 m com a espessura de 1,4 cm seria equivalente a rebocar uma parede de 3,0 m x 13,6 m e espessura de 3,5cm com a argamassa AREF.

Quanto às argamassas com vermiculita e EPS, nota-se uma pequena diferença entre suas espessuras, cerca de 8,3%. Quanto ao custo, a

argamassa AV15 é 1,30 vezes mais cara em comparação à AE15. Entretanto ambas as argamassas comprovam as vantagens de uso em comparação com a argamassa AREF, tanto na diminuição da espessura quanto no custo final. A redução na espessura fica entre 48,6% para a mistura AV15 e 52,8% para a argamassa com o EPS. O custo também reduz significativamente, a argamassa AE15 é praticamente 2,0 vezes menor e a AV15 é 1,53 vezes mais econômica que a AREF.

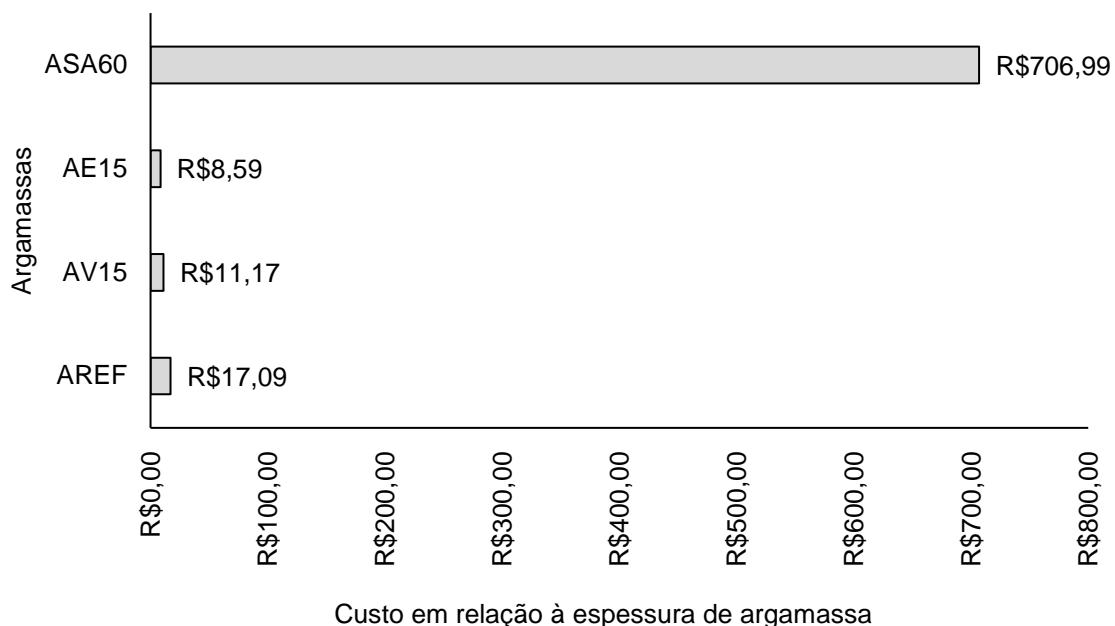
De acordo com a NBR 13749 (ABNT, 2013), as argamassas destinadas ao revestimento externo devem possuir espessura entre 2,0 e 3,0 cm e internas a espessura entre 0,5 e 2,0 cm. Considerando o sistema de alvenaria em tijolos cerâmicos, todas as argamassas, exceto a AREF, atendem ao critério no revestimento interno. Quando aplicada ao revestimento externo, as espessuras mínimas não atendem ao estipulado por essa norma, porém a execução delas em 2,0 cm de espessura favorece a redução dos parâmetros térmicos. Em contrapartida, as espessuras mínimas das argamassas aplicadas à alvenaria de tijolos maciços não atendem às exigências da NBR 13749 (ABNT, 2013), pois a espessura mínima, como exemplo na argamassa ASA60, é de 4,3 cm e todas as demais possuem espessura ainda superior.

Figura 52 - Espessura mínima da argamassa de revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos cerâmicos



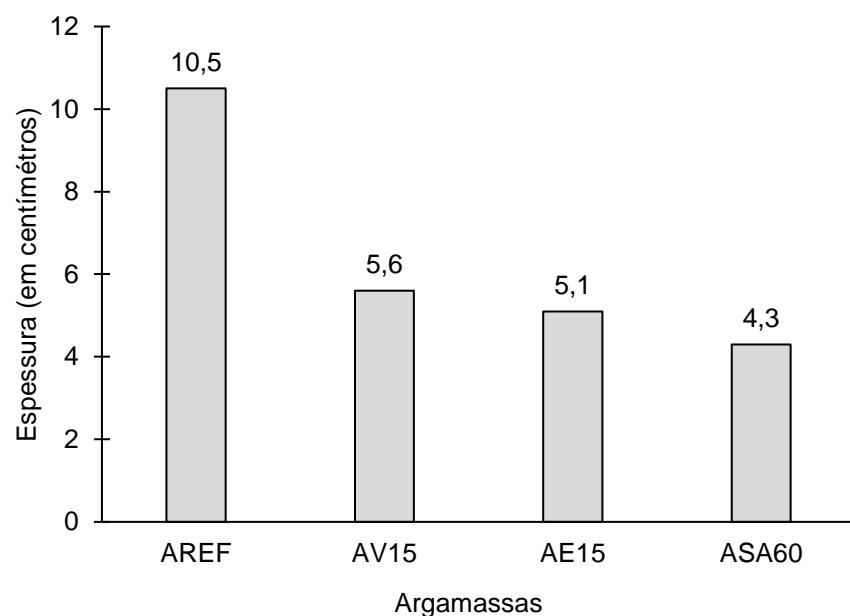
Fonte: A autora (2020).

Figura 53 - Custo das argamassas em relação à espessura mínima do revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos cerâmicos



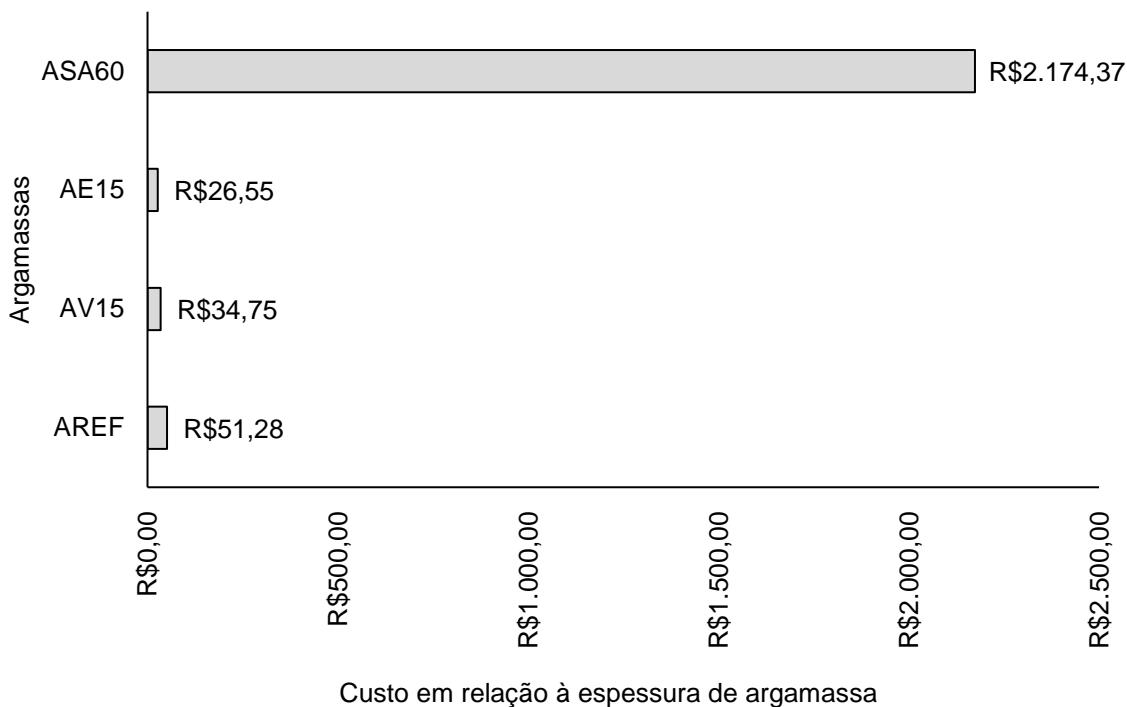
Fonte: A autora (2020).

Figura 54 - Espessura mínima da argamassa de revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos maciços



Fonte: A autora (2020).

Figura 55 - Custo das argamassas em relação à espessura mínima do revestimento interno e externo aplicada à alvenaria de tijolos maciços



Fonte: A autora (2020).

Por fim, analisando as argamassas de revestimento aplicadas à alvenaria de tijolos maciços observa-se que a argamassa ASA60 tem a espessura 59% menor que a argamassa de referência, entretanto seu custo é 42,4 vezes maior. A nível de comparação, o custo de aplicar a argamassa ASA60 em uma parede de 1,0 m x 1,0 m com a espessura de 4,3 cm equivale a rebocar uma parede de 3,0 m x 14,1 m e espessura de 10,5 cm com a argamassa AREF.

As argamassas AV15 e AE15 possuem uma diferença de 0,5 cm em espessura, o que representa cerca de 8,9%. Quanto ao custo, a argamassa AV15 é 1,30 vezes mais cara em comparação à AE15. Em comparação com a argamassa AREF, a espessura das misturas AV15 e AE15 são 46,6% e 51,4% menores, respectivamente e o custo também reduz, a argamassa AV15 é 1,85 vezes mais econômica e a AE15, 1,47 vezes. Assim como para o sistema de alvenaria de tijolos cerâmicos, comprova-se também as vantagens quanto à custo e espessura entre as misturas AE15 e AV15 em comparação com a AREF.

CONCLUSÕES

A substituição parcial do agregado miúdo pela vermiculita, EPS e a sílica aerogel demonstraram resultados promissores quanto ao desempenho termoacústico das argamassas destinadas ao revestimento de edificações.

Avaliando as propriedades no estado fresco, o uso dos agregados leves, ainda que em diferentes porcentagens de substituição, apresentam resultados compatíveis com o exigido por norma referente ao índice de consistência. A densidade de massa reduz à medida que o teor de ar incorporado se eleva e os altos índices de retenção de água favorecem o uso das argamassas por um maior período.

No estado endurecido, em relação à resistência à compressão, as misturas AV20 e AE20 obtiveram um decréscimo significativo nesta propriedade, enquanto as demais argamassas, apesar da redução na resistência, atenderam ao critério mínimo de 2,40 MPa, conforme a C-270 (ASTM, 2007). A absorção de água e o índice de vazios para as argamassas AV15 e AE15 aumentaram em comparação com a argamassa AREF. Em contrapartida a mistura ASA60 apresentou os menores valor de absorção e índice de vazios.

A condutividade térmica de todas as argamassas com os agregados isolantes foi menor comparada com a argamassa de referência. Observou-se que, quanto menor a condutividade térmica do agregado menor foi a condutividade da argamassa. E a redução mais expressiva para esta propriedade foi com o uso da sílica aerogel, que reduziu em até 60% a condutividade de argamassa. O calor específico aumentou conforme a maior porcentagem de substituição, para as argamassas com vermiculita e EPS.

Comparando o desempenho das argamassas conforme as propriedades das normas, NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013), para o sistema de alvenaria de tijolos cerâmicos a argamassa ASA60 atende ao critério mais restritivo com apenas 1,5 cm de espessura enquanto a argamassa AREF necessita de 3,5 cm de espessura para atender ao mesmo critério. Em termos de custos, rebocar uma área de 1,0 m² com a argamassa ASA60 tem o mesmo valor que rebocar uma área de 40,8 m² com a mistura de referência. Já para o sistema de alvenaria de tijolos maciços a argamassa de referência

necessita de uma espessura de 10,5 cm enquanto a ASA60 apenas 4,3 cm, para satisfazer as exigências estipuladas por norma. Comparando o custo, tem-se uma parede de 1,0 m² rebocada com sílica aerogel (ASA60) *versus* uma parede 42,3 m² com a argamassa AREF. Diante do elevado custo da argamassa com sílica aerogel, notou-se que as argamassas AV15 e AE15 demonstraram vantagens comparando a espessura e o custo para satisfazer os critérios normativos, tornando-se uma alternativa viável em substituição à argamassa de referência.

Diante dos resultados encontrados utilizando o tubo de impedância, verificou-se a dificuldade de determinar a absorção acústica da argamassa, devido à sensibilidade das amostras e do ensaio. Contudo, avaliando a perda de transmissão, a argamassa AE15 obteve o melhor desempenho para o isolamento acústico em comparação com as demais, enquanto a argamassa contendo a sílica aerogel teve o desempenho menos favorável nesta propriedade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar novos materiais com potencial para o isolamento térmico e acústico;

Estudar a porosidade como fator de influência nas propriedades térmicas e acústicas;

Verificar a perda de transmissão sonora das argamassas aplicadas aos sistemas de alvenaria através da câmara reverberante.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, N.; HAMMAD, R. K.; BAN, G.; KIM, H. R.; LEE, H. K. Silica aerogel derived from rice husk: an aggregate replacer for lightweight and thermally insulating cement-based composites. **Construction and Buildings Materials.** [S.I.], v. 195, p.312-322, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.227>>. Acesso em: 20 ago. 2019.
- ACIU, C.; MANEA, D. L.; MOLNAR, L. M.; JUMATE, E. Recycling of polystyrene waste in the composition of ecological mortars. **Procedia Technology.** v. 19, p. 498 – 505, 2015.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.; GOLDEMBERG, J. O desafio da sustentabilidade na construção civil. São Paulo: Blucher, 2011. v. 5.
- AKANKALI, F.; ALIBABA, H. Analysis on the termal transmittance/ conductance of building elements (roof, wall and floor) based on the diferente building materials used in Famagusta. **International Journal of Civil and Structural Engineering Research.** v. 6, p. 99-108, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330205048_ANALYSIS_ON_THE_THERMAL_TRANSMITTANCE_CONDUCTANCE_OF_BUILDING_ELEMENTS_ROOF_WALL_AND_FLOOR_BASED_ON_THE_DIFFERENT_BUILDING_MATERIALS_USED_IN_FAMAGUSTA>. Acesso em: 29 mai. 2019.
- AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. **Applied Thermal Engineering.** [S.I.], v. 29, p. 1123-1130, jun. 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431108002615>>. Acesso em: 29 ago. 2018.
- AL-SANEA, S. A.; ZEDAN, M. F.; AL-HUSSAIN, S. N. Effect of masonry material and surface absorptivity on critical thermal mass in insulated building walls. **Applied Energy**, v.102, p.1063-1070, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.016>>. Acesso em: 29 ago. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-270:** Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2007.
- _____. **C518:** Standard Test Method for Steady-state Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. United States, 2017.
- ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; BARBOSA, L. A. G. Uso da argila expandida e sílica ativa no melhoramento dos desempenhos mecânicos, físicos e térmicos de concretos leves estruturais. **Revista Matéria.** Rio de Janeiro, v. 22, ago. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762017000500432&script=sci_abstract&tlang=pt>. Acesso em: 17 set. 2018.
- ARAÚJO, D. de L.; CÂNDIDO, É. da S. Painel pré-moldado de argamassa armada com vermiculita expandida e reforçado com fibras de vidro. **Revista**

Eletrônica de Engenharia Civil. [S.I.], v. 10, n.3, set. 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/reec/article/view/35244>>. Acesso em: 3 set. 2018.

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

_____. **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7175:** Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13529:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575:** Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 16541:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASTE, N.; LEONFORTE, F.; MANFREN, M.; MAZZON, M. Thermal inertia and efficiency – Parametric simulation assesment on a calibrated case study.

Applied Energy. v. 145, p. 111-123, 2015. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.084>. Acesso em: 16 set. 2019.

AVESANI NETO, J. O. **Caracterização do comportamento geotécnico do EPS através de ensaios mecânicos e hidráulicos.** 2008. 228 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnica) – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2008. Disponível em:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-24062008-101540/pt-br.php>. Acesso em: 16 set. 2018.

BAETENS R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings.** v. 43, p. 761–769, 2011. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810004329?via%3Dihub>. Acesso em: 4 jun. 2019.

BISTAFÁ, Sylvio R. Acústica aplicada ao controle do ruído. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2006.

BOGO, A. J. Reflexões críticas quanto as limitações do texto das normas brasileiras de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575. **Revista Holos.** v.7, p. 290-298, 2016. Disponível em:
<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4389>. Acesso em: 01 set. 2019.

BOUMHAOUT, M.; BOUKHATTEM, L.; HAMDI, H.; BENHAMOU, B.; NOUH, F. A. Thermomechanical characterization of a bio-composite building material: Mortar reinforced with date palm fibers mesh. **Construction and Building Material.** v. 135, p. 241–250, 2017. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.217>. Acesso em: 3 mai 2019.

CAL CEM. Cal hidratada CH III. Disponível em: <www.calcem.com.br> Acesso em 14 jun. 2019.

CALLISTER, W. V. **Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução.** 7 ed. São Paulo: Editora LTC, 2007.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 893-941.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e**

Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 886-938.

CARNEIRO, L. F. C. G. Resistência a altas temperaturas de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase (PCM). 2013. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Minho, 2013. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/30854>>. Acesso em: 20 out. 2018.

CARVALHO, R. P. Acústica arquitetônica. Brasília/DF: Thesaurus, 2006.

CATAI, R.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. In: 17 CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006.

CIFUENTES, G. A. Desempenho termomecânico de concreto massa com alto teor de cinza volante. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2020.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. Argamassa de revestimento: Características, propriedades e métodos de ensaio. Boletim 68. IPT, São Paulo, 1995.

CINTRA, C. L. C. Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada. 2013. 182 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/718?show=full>>. Acesso em 10 set. 2018.

CINTRA, C. L. C.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus - Propriedades relevantes. **Revista Cerâmica.** São Paulo, v. 60, n.353, p.69-76, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132014000100010&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 5 set. 2018.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: um conforto ambiental. Revan: Rio de Janeiro/RJ, 2003.

COMIRAN, S. Conforto e desempenho térmico em hospitais: estudo de caso na área de internação do Hospital Universitário de Santa Maria/RS. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental). Santa Maria. 2014. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_arquivos/20/TDE2015-03-12T094222Z-6039/Publico/COMIRAN,%20SHEILA.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2019.

EFFTING, C. Mecânica da fratura aplicada aos materiais dureis e frágeis. 2004. 247 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) –

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <http://www.tede.udesc.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5>. Acesso em: 16 ago. 2018.

EFFTING, C. **Desenvolvimento de revestimentos cerâmicos confortáveis termicamente.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/91069>>. Acesso em: 17 set. 2018.

FANG, P.; MUKHOPADHYAYA, P.; KUMARAN, K.; SHI, C. Sorption and Thermal Properties of Insulating Mortars with Expanded and Vitrified Small Ball. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 39, n.2, p.210-218, 2010. Disponível em: <https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/TESTEVAL/PAGES/JTE102678.htm>. Acesso em: 01 jun. 2019.

FARIA, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, Instituto Brasil do Concreto, 2010, v.1, p. 483-526.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. de; ASSIS, E. S. de. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 183- 200, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000100131>>. Acesso em: 15 jun. 2019.

FERREIRA NETO, M. F. Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais. 2009, 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

FIORITO, A. J.S.I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução**. São Paulo: Pini, 2009.

FLACH, F. **Investigação do potencial de absorção acústica de compósitos de argamassas com materiais reciclados**. 2012, 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012. Disponível em: <<http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/4190?locale-attribute=es>>. Acesso em: 16 ago. 2019.

FLORES-COLEN, I.; SOARES, A.; BRITO, J. de. A nanotecnologia aplicada às argamassas de revestimento. **Revista Internacional Construlink**. [S.I.] v. 11, n.34, out. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280878532_A_Nanotecnologia_Aplicada_as_Argamassas_de_Revestimento>. Acesso em: 20 out. 2018.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GAO, T.; JELLE, B.P.; GUSTAVSEN, A.; JACOBSEN, S., Aerogel-incorporated concrete: an experimental study, **Construction and Buildings Materials**. [S.I.], v. 52, p.130-136, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.100>>. Acesso em: 20 jul. 2019.

GERGES, S. Ruído: Fundamentos e controle. 3 ed. Florianópolis: NR Editora, 2000.

GOMES, M. G.; FLORES-COLEN, I.; SILVA, F. da, PEDROSO, M. Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. **Construction and Buildings Materials**. [S.I.], v. 172, p.696-705, mai. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818306615?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia**. 2.ed. São Paulo: Pini, 2002, p. 238-307.

GURAV, J. L.; JUNG, I., PARK, H., KANG, E. S., NADARGI, D. Y. Silica Aerogel: Synthesis and Applications. **Journal of Nanomaterials**. [S.I.], v. 2010, jun. 2010. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jnm/2010/409310/>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da física**. 8. ed. São Paulo: LTC, 2009. Volume 2 - Gravitação, ondas e termodinâmica.

HANUS, M.; HARRIS, A. T. Nanotechnology innovations for the construction Industry. **Progress in Materials Science**. v. 58, p. 1056–1102, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.04.001>>. Acesso em: 23 ago. 2019.

HARTAMANN, C.; JEKNAVORIAN, A.; SILVA, D.; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. v.1, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 347-380.

INMETRO. Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros. 2013. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/AnexoVRAC_CatalogoPropriedadesTermicas%20v03SET2013.pdf>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8301**: Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus. Genebra, 1991.

_____. **ISO 10140-2**: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Façade sound insulation. Genebra, 2010.

- _____. **ISO 16283-1: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 1: Airborne sound insulation.** Genebra, 2014.
- _____. **ISO 16283-3: Acoustics — Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements — Part 3: Façade sound insulation.** Genebra, 2016.
- KARLSSON, J.; WADSÖ, L.; ÖBERG, M. A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures. **Energy and Buildings.** v. 60, p. 146-151, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.017>>. Acesso em: 4 ago. 2019.
- LAMBERTS, R.; XAIVER, A. A.; GOULART, S. VECCHI, R. Notas de aula: Conforto E Stress Térmico. 2016. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila%20Conforto%20T%C3%A9rmico_2016.pdf>. Acesso em: 3 mai. 2019.
- LAMBERTS, R. et al. Casa Eficiente - Bioclimatologia e Desempenho Térmico. Florianópolis : UFSC/LabEEE; 2010. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_W_EB.pdf. Acesso em: 15 ago. 2019.
- LEAL, M. M. R. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado.** 2012. 215f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, 2012. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/3954/1/Desenvolvimento%20argamassas%20revestimento%20com%20comportamento%20termico%20melhora do_M%C3%A1rcio%20Leal.pdf>. Acesso em: 5 set. 2018.
- LOPES, R. K. **Relações e influências da aplicação da acústica no processo de projeto de arquitetura contemporânea.** 2010. 233f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/258534/1/Lopes_RenataKintschner_M.pdf>.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2^a ed. Editora IBRACON, São Paulo, 2014.
- MERMER, N. K.; YILMAZ, M. S.; OZDEMIR, O. D.; PISKIN, M. B. The synthesis of silica-based aerogel from gold mine waste for thermal insulation. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.** v. 129, p. 1807–1812, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6371-8>>. Acesso em: 5 mai. 2019.
- MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; GUMIERI, A. G.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Revista Cerâmica.** São Paulo. v.52,

n.322, p. 193-199, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132006000200012&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 9 ago. 2018.

MORAVIA, W. G. Influência de parâmetros microestruturais na durabilidade do concreto leve produzido com argila expandida. 2007. 187f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/MAPO-7RENKT>>. Acesso em: 29 set. 2018.

MORSY, M. S.; AGLAN, H. A. Development and characterization of nanostructured-perlite-cementitious surface compounds. **Journal of Materials Science.** [S.I.], v. 42, p. 10188-10195, set. 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/226786566_Development_and_characterization_of_nanostructured-perlite-cementitious_surface_compounds>. Acesso em: 16 out. 2018.

NARAYAN, P. K.; SMYTH, R.; PRASAD, A. Electricity consumption in G7 countries: A panel cointegration analysis of residential demand elasticities. **Energy Policy**, Vol .35, pp.4485–4494, 2007.

NASCIMENTO, M. R. O uso de argamassa de assentamento como preenchimento de alvenaria estrutural cerâmica. 2015. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/156758>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

NAYAK, J. K.; PRAJAPATI, J. A. Handbook on energy conscious buildings. Indian Institute of Technology, Bombay and Solar Energy Centre, Ministry of Non-conventional Energy Sources, Government of India. Pilot Edition: May 2006. Disponível em: <https://kupdf.net/download/handbook-on-energy-consciousbuildings_599fc070dc0d60ef3618496d_pdf>. Acesso em: 3 ago. 2019.

NEVILLE, A. M. Properties of concrete. 5. ed. Harlow: Pearson, 2011.

NG, S.; JELLE, B.P.; ZHEN, Y.; WALLEVIK, O. Effect of storage and curing conditions at elevated temperatures on aerogel-incorporated mortar samples based on UHPC recipe. **Construction and Building Materials.** v. 106, p. 640-649, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.162>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. **Revista Cerâmica.** v.64, p.577-588. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643722391>>. Acesso em: 13 mar. 2019.

PEREIRA, M. A. M. da C. **Caracterização experimental de argamassas térmicas a temperaturas elevadas**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Técnico Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997256851/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

PINTO, C. F. **Em busca de uma arquitetura sustentável: o uso de fontes alternativas de energia**. 2009. 224f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-10092013-101553/pt-br.php>>. Acesso em: 20 ago. 2019.

ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 289-308, abr./jun. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000200255>>. Acesso em: 4 ago. 2019.

SALVO, R. V. MAIRINK, M. T. F. OLIVEIRA, E. C. TEODORO, E. B. Construção de um tubo de impedância. In: 15º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFU. **Anais...** Uberlândia 2005.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1 ed. v.1, São Paulo: IBRACON, 2011. p. 233-260.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C.; FOLGUERAS, M. V.; GÜTHS, S.; MENDES, G. A. Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. **Construction and Buildings Materials**. [S.I.], v. 57, p.190-197, fev. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400141X>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SCHACKOW, A.; EFFTING, C., HACKENBERG, A. M.; BORTOT, A. B. R.; FERRARI, A. K.; OLIVEIRA, V. B. Analysis of the thermal transmittance of walls and roofs for constructions using lightweight concrete with vermiculite and EPS. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencia Ambientales**, v.12, p.65-80, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.1.61226>>. Acesso em: 14 jun. 2019.

SCHACKOW, A. **Efeito das características pozolânicas de rejeitos de tijolos nas propriedades de argamassas**. 2015. 290 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <<http://tede.udesc.br/handle/tede/454>>. Acesso em: 15 out. 2018.

SHOUKRY, H.; KOTKATA, M. F.; ABO-EL-ENEIN, S. A.; MORSY, M. S.; SHEBL, S. S. Thermo-physical properties of nanostructured lightweight fiber

reinforced cementitious composites. **Construction and Buildings Materials.** [S.I.], v. 102, p.167-174. 2016. Disponível em: <https://ac-els-cdn.ez74.periodicos.capes.gov.br/S0950061815306097/1-s2.0-S0950061815306097-main.pdf?_tid=c7615815-46da-4de2-aa22-72834f92e7b6&acdnat=1540950144_bcd6bdae2d503d8678dfec2ba0915455>. Acesso em: 20 out. 2018.

SILVA, A. S. R. da. Argamassas: conceito, tipos e funções. Salvador: Universidade Federal da Bahia Escola Politécnica, 2008.

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

SILVA, D.; DEMARCHI, C. A; MORALES, G. Aplicabilidade de placas de fibra de bananeira na absorção sonora e isolamento acústico. Anais... **XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído**, 2016. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/30158302-Aplicabilidade-de-placas-de-fibra-de-bananeira-na-absorcao-sonora-e-isolamento-acustico-1.html>>. Acesso em: 17 fev. 2019.

SILVA, D. W. **Caracterização inversa vibroacústica de materiais porosos em tubo de impedância.** 2018, 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. Disponível em: <<http://sistemabu.udesc.br/pergamenweb/vinculos/000053/00005388.pdf>>. Acesso em: 8 mai. 2019.

SOUZA, L. C. L. Bê-a-ba da acústica arquitetônica: ouvindo a Arquitetura. São Carlos: EduFSCAR,2006.

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve.** 2000. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000. Disponível em: <http://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_5c0464df5f2f28344499b72474d03037>. Acesso em: 16 ago. 2018.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil.** 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88811/234096.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2018.

TRIGO, T. M. P. da M. dos S. **Caracterização e avaliação de argamassas de reboco e camada de base com ligante PC e CSA.** 2014. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Técnico Lisboa, Lisboa, 2014. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113702000/dissertacao%20tiago%20trigo%2065298.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2018.

VOTORANTIM. Cimentos. Disponível em:
<<https://www.votorantimcimentos.com.br/>>. Acesso em: 20 ago 2019.