

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Thales Daniel dos Santos Fonseca

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA TERMOISOLANTE PARA
REVESTIMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA EM EDIFICAÇÕES COM USO
DE AREIA DE BRITAGEM E VERMICULITA**

Juiz de Fora

2023

Thales Daniel dos Santos Fonseca

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA TERMOISOLANTE PARA
REVESTIMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA EM EDIFICAÇÕES COM USO
DE AREIA DE BRITAGEM E VERMICULITA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Materiais e Componentes da construção Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Juiz de Fora

2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Fonseca, Thales Daniel dos Santos .

Desenvolvimento de argamassa termoisolante para revestimento de paredes de alvenaria em edificações com uso de areia de britagem e vermiculita / Thales Daniel dos Santos Fonseca. -- 2023. 96 f. : il.

Orientadora: Thaís Mayra de Oliveira

Coorientador: Pedro Kopschitz Xavier Bastos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Condutividade térmica. 2. Argamassas isolantes. 3. Desempenho térmico. 4. Sustentabilidade. 5. Edificações. I. Oliveira, Thaís Mayra de , orient. II. Bastos, Pedro Kopschitz Xavier , coorient. III. Título.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PEC)**THALES DANIEL DOS SANTOS FONSECA****Título: "DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA TERMOISOLANTE PARA REVESTIMENTO DE PAREDES DE ALVENARIA EM EDIFICAÇÕES COM USO DE AREIA DE BRITAGEM E VERMICULITA"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Materiais.

Aprovada em 19 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Pedro Kopschitz Xavier Bastos - Coorientador e Presidente da Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora
Profa. Dra. Julia Castro Mendes -- Membro Titular Interno
Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva - Membro Titular Externo
Universidade de Pernambuco

Juiz de Fora, 04/12/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Kopschitz Xavier Bastos, Professor(a)**, em 20/12/2023, às 17:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes, Professor(a)**, em 20/12/2023, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Angelo Just da Costa e Silva, Usuário Externo**, em 21/12/2023, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **1608238** e o código CRC **37F305F8**.

Criado por [3363139](#), versão 6 por [3363139](#) em 20/12/2023 15:41:41.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores Thaís Mayra de Oliveira e Pedro Kopschitz Xavier Bastos pela orientação, o compartilhamento de conhecimento, o suporte durante meu tempo de permanência no mestrado e no laboratório e, principalmente, a amizade.

À professora Julia Castro Mendes por ter contribuído com importantes conselhos e informações sobre argamassas isolantes e condutividade térmica de materiais cimentícios, imprescindíveis para a elaboração desta dissertação.

À Romilda Guiomar Inês Prata Sigeiro, técnica do laboratório de construção civil da UFJF, pelo apoio na realização de ensaios e pela companhia durante meu período de permanência no laboratório.

À Danielle Rios Garcia, Mestre em engenharia civil e egressa do PEC/UFJF, que contribuiu com sua experiência no uso do Aparato Térmico Alternativo de baixo custo – ATA, desenvolvido por ela.

Ao Yuri Ventura Pereira de Castro, colega de mestrado, pelo auxílio nas simulações computacionais de consumo energético de edificações.

À empresa Petra Agregados Ltda., de Juiz de Fora – MG, pelo empréstimo de equipamentos para a execução de ensaios em argamassas, e por ter cedido materiais para a execução da pesquisa: agregado miúdo e aditivo incorporador de ar.

À empresa Brasil Minérios, por ter fornecido a vermiculita para a pesquisa.

À empresa Saint-Gobain, pela realização de ensaios de condutividade térmica de placas em aparelho comercial, de grande valor para a presente pesquisa.

À Universidade Federal de Juiz de Fora- UFJF, pela oportunidade de realização do mestrado e por todo o suporte oferecido durante o período de permanência na instituição.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG, pela concessão de bolsa de pesquisa por período parcial durante o projeto de pesquisa, importante para a execução do estudo.

RESUMO

Em todo seu ciclo de vida, as edificações consomem energia elétrica com equipamentos de climatização de ar. A crescente preocupação mundial com o uso eficiente de recursos naturais e a crise climática implicam na adoção de políticas públicas e estratégias construtivas que tornem os edifícios mais eficientes quanto ao desempenho térmico. O presente trabalho visa desenvolver argamassas cimentícias para revestimento de paredes de baixa condutividade térmica com areia de britagem da região de Juiz de Fora - MG e vermiculita expandida. Foi estudada uma argamassa de referência de cimento e areia na proporção 1:6 em volume e três argamassas com teores de substituição do agregado miúdo por vermiculita – 10, 20 e 30% em volume –, com e sem aditivo incorporador de ar (0,035% da massa de cimento). A fim de caracterizar as argamassas produzidas foram realizados ensaios de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico, densidade e de condutividade térmica em um equipamento experimental, desenvolvido na Universidade Federal de Juiz de Fora, com resultados validados por um equipamento comercial. Por meio de simulação computacional foi avaliada a economia de energia com climatização em um *loft* em duas localidades distintas – Rio de Janeiro-RJ, de clima quente, e São Joaquim-RS, de clima frio. A argamassa V30A – 30% de vermiculita e aditivo – apresentou as maiores reduções nos valores de resistência à compressão (59%), resistência à tração (33%), condutividade térmica (61%) e módulo de elasticidade dinâmico (72%), em relação à argamassa de referência, sem vermiculita e aditivo. A economia anual de energia obtida com o uso da argamassa V30A no envelope da edificação analisada em relação à simulação com argamassa convencional foi de 3,15% para o Rio de Janeiro (zona bioclimática 8) e de 4,90% para São Joaquim (zona bioclimática 1). Conclui-se que o uso da vermiculita é eficaz para a diminuição da condutividade térmica das argamassas estudadas, porém seu uso em revestimentos deve ser combinado com outras soluções construtivas – de cobertura, por exemplo– para desempenho térmico mais importante das edificações.

Palavras-chave: Condutividade térmica; Desempenho térmico; Argamassas isolantes; Sustentabilidade; Edificações.

ABSTRACT

Throughout their life cycle, buildings consume electrical energy with air conditioning equipment. The growing global concern about the efficient use of natural resources and the climate crisis imply the adoption of public policies and construction strategies that make buildings more efficient in terms of thermal performance. The present work aims to develop cement rendering mortars with low thermal conductivity walls, composed of crushed sand from the Juiz de Fora-MG region and expanded vermiculite. A reference cement and sand mortar was studied in a 1:6 volume ratio and three mortars with replacement levels of fine aggregate with vermiculite □ 10, 20 and 30% by volume □, with and without air-entraining additive (0.035% of the cement mass). In order to characterize the mortars produced, mechanical resistance tests, water absorption by capillarity, dynamic modulus of elasticity, density and thermal conductivity were carried out in experimental equipment, developed at the Federal University of Juiz de Fora, with results validated by a commercial equipment. Using computer simulation, energy savings were evaluated with air conditioning in a loft in two different locations □ Rio de Janeiro-RJ, with a hot climate, and São Joaquim-RS, with a cold climate. The V30A mortar – 30% vermiculite and additive – showed the greatest reductions in the values of compressive strength (59%), tensile strength (33%), thermal conductivity (61%) and dynamic modulus of elasticity (72%), in relation to the reference mortar, without vermiculite and additives. The annual energy savings obtained with the use of V30A mortar in the building envelope analyzed in relation to the simulation with conventional mortar was 3.15% for Rio de Janeiro (bioclimatic zone 8) and 4.90% for São Joaquim (bioclimatic zone 1). It is concluded that the use of vermiculite is effective in reducing the thermal conductivity of the mortars studied, but its use in coatings must be combined with other construction solutions – roofing, for example – for the most important thermal performance of buildings.

Keywords: Thermal conductivity; Insulating mortars; Thermal performance; Sustainability; Buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da legislação para eficiência energética de edificações	15
Figura 2 – Relação entre INI-R e NBR 15575	22
Figura 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro	23
Figura 4 – Número de estudos sobre condutividade térmica de argamassas.....	32
Figura 5 – Britador de impacto vertical (a) e areia de britagem (b).	41
Figura 6 – Vermiculita expandida	42
Figura 7 – Ensaio de densidade no estado fresco	45
Figura 8 – Ensaio de absorção por capilaridade	46
Figura 9 – Medição da velocidade de pulso de ultrassom em barra (a) e em placas (b).	47
Figura 10 – Máquina universal de ensaios	47
Figura 11 - Princípio de funcionamento do ATA – figura ilustrativa (a) e fotografia do aparelho (b).	48
Figura 12 – Medição de massa de água no ATA.....	49
Figura 13 – Corpos de prova para ensaio de condutividade térmica - 300 x 300 x 50 (mm)	50
Figura 14 – Planta baixa da edificação de estudo.....	51
Figura 15 – Configurações de paredes estudadas.....	52
Figura 16 – Curva granulométrica da areia de britagem	55
Figura 17 – Densidade no estado fresco	56
Figura 18 – Resultados de teor de ar incorporado.....	56
Figura 19 – Densidade no estado endurecido.....	57
Figura 20 – Coeficiente de capilaridade	58
Figura 21 – Velocidade de pulso ultrassônico (placas 30 x 30 x 5 cm) e módulo de elasticidade dinâmico (cp's 4 x 4 x 16 cm).....	59
Figura 22 – Resistência à compressão	60
Figura 23 – Resistência à tração	61
Figura 24 – Condutividade térmica	62
Figura 25 - Resultados de condutividade ATA x aparelho comercial.....	63
Figura 26 – Correlação entre resultados de condutividade ATA x aparelho comercial.....	63
Figura 27 – Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e condutividade térmica...	64
Figura 28 – Transmitância térmica de paredes	64
Figura 29 – Simulação da eficiência energética na cidade do Rio de Janeiro.....	66
Figura 30 – Simulação da eficiência energética na cidade de São Joaquim.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites para aplicação do método simplificado (INI-R).....	20
Tabela 2 - Transmitância térmica de paredes externas U (W/m ² . K) para as zonas climáticas brasileiras de acordo com a NBR 15575.....	23
Tabela 3 – Transmitância térmica para paredes típicas.....	24
Tabela 4 – Caracterização de areias.	29
Tabela 5 – Planejamento experimental.....	43
Tabela 6 – Argamassas elaboradas para a pesquisa.	44
Tabela 7 - Coberturas e propriedades térmicas	53
Tabela 8 – Propriedades de elementos transparentes	53
Tabela 9 – Propriedades de esquadrias.....	53
Tabela 10 – Ocupação de áreas da unidade habitacional de referência.....	54
Tabela 11 – Padrão de uso de áreas da unidade habitacional de referência.	54
Tabela 12 – Massa unitária e massa específica real	55
Tabela 13 – Simulação de eficiência energética.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Critérios de avaliação de desempenho térmico de edificações da NBR 15575 18	
Quadro 2 – Parâmetros avaliados pela INI-R.....	21
Quadro 3 – Fontes bibliográficas e dados relevantes para a pesquisa (Continua)	36

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 - OBJETIVOS	13
1.3 - JUSTIFICATIVA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 - DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES	15
2.1.1 - Certificações, regulamentos e normas técnicas de desempenho térmico de edificações.....	16
2.2 - ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS	22
2.3 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS.....	24
2.3.1 - Resistência térmica e transmitância térmica.....	24
2.3.2 - Condutividade térmica	26
2.4 - USO DE AREIA DE BRITAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	27
2.5 - ADITIVO INCORPORADOR DE AR E ISOLAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS	30
2.6 - ARGAMASSAS ISOLANTES COM VERMICULITA.....	31
3. MEDODOLOGIA.....	41
3.1 - MATERIAIS.....	41
3.1.1 - Caracterização dos agregados	42
3.2 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	42
3.3 - ARGAMASSAS	43
3.4 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ARGAMASSAS	44
3.4.1 - Densidade no estado fresco e teor de ar incorporado.....	44
3.4.2 - Densidade no estado endurecido	45
3.4.3 - Absorção de água por capilaridade.....	46
3.4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico	46
3.4.5 - Resistência mecânica	47
3.4.6 - Condutividade térmica	47
3.5 - CÁLCULO DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE PAREDES	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55

4.2 -	CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	56
4.2.1 -	Densidade nos estados fresco e endurecido e teor de ar incorporado.....	56
4.2.1 -	Absorção de água por capilaridade.....	57
4.2.2 -	Velocidade de pulso ultrassônico e módulo de elasticidade dinâmico.....	58
4.2.3 -	Resistência mecânica.....	60
4.2.4 -	Condutividade térmica.....	62
4.3 -	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DAS PAREDES.....	64
4.4 -	DESEMPENHO ENERGÉTICO DO LOFT.....	65
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	70
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A - Densidade das argamassas no estado fresco e teor de ar incorporado.....	81
	APÊNDICE B – Densidade no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico.....	83
	APÊNDICE C - Absorção de água por capilaridade.....	85
	APÊNDICE D - Resistência mecânica.....	87
	APÊNDICE E - Condutividade térmica - ATA.....	93
	ANEXO A - Condutividade térmica medida por aparelho comercial.....	94

1. INTRODUÇÃO

1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso de edificações é uma das atividades humanas que mais consome energia no planeta, incluindo gastos com máquinas, equipamentos, iluminação, aquecimento de água, aquecimento e resfriamento dos ambientes e manutenção, entre outros. Boa parte desse consumo está ligada à necessidade de climatização, por meio de aparelhos, para manter o conforto térmico nos ambientes internos. As tendências de aumento de consumo, muito relacionadas ao aumento da população e à demanda por edificações para diferentes usos, merece, portanto, atenção por parte do setor produtivo, dos projetistas e dos pesquisadores da área.

O aumento do consumo energético causa emissão de maior quantidade de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente considerando que a matriz de energia brasileira ainda utiliza 55% de fontes não renováveis, como petróleo e gás natural (EPE, 2022).

De acordo com o *United Nations Environment Programme* - UNEP (2022), as emissões globais de GEE das edificações correspondem a 17% do total emitido no planeta, quando consideradas as emissões indiretas com o consumo de energia e aquecimento, atrás apenas do setor de transporte (25%) e do setor industrial (34%). Chen *et al.* (2023) apontam a necessidade do uso de envoltórias isolantes em conjunto com equipamentos como climatizadores de ar e de iluminação mais eficientes para obtenção de redução no consumo de energia em edificações de uso residencial.

De acordo com Martinez-Molina *et al.* (2016), a relevância do consumo eficiente de energia fez com que as principais economias mundiais – Estados Unidos, União Europeia e China – elaborassem medidas para controlar o gasto de energia em edificações. Os Estados Unidos estabeleceram normas para determinar os níveis de consumo de novas edificações, além de códigos construtivos que consideram a envoltória da edificação e seu nível geral de eficiência energética (“*Home Energy Rating System- HERS*”) (TAYLOR *et al.*, 2014).

A China possui diretrizes para o aumento da eficiência energética geral em 20% (“*The Eleventh Five-Year Plan: 2006–2010*”) e classifica a eficiência energética dos

sistemas de climatização de ar e o desempenho energético de novas edificações (KONG; LU; WU, 2012).

A união Europeia estabeleceu a estratégia “*Horizon 2020*” (“H2020”), em que os países europeus devem diminuir o consumo energético e a emissão de gases, aumentar o uso de energias renováveis e a eficiência energética em edificações, todos em 20% (CHRISTIDIS *et al*, 2024).

No Brasil, o maior consumo energético é do setor industrial (38,8%) seguido pelo uso residencial (24,9%). A matriz energética do país é composta, majoritariamente, por fontes renováveis - usinas hidrelétricas. Porém, 26,5% da energia ainda provêm das termoelétricas, que usam combustíveis não renováveis e são fortes emissoras de gases do efeito estufa (BRASIL, 2022).

O consumo energético residencial é influenciado pela envoltória da edificação, exposta diretamente à ação climática e responsável por trocas de calor com o meio, e pelo uso de equipamentos de climatização, aparelhos de alto consumo e utilizados para o conforto térmico interno (ZHANG *et al.*, 2022). De acordo com Rashidi, Esfahanib e Karimi (2018), as perdas de calor estão relacionadas, principalmente, ao formato e às características térmicas dos componentes utilizados na edificação.

Uma possível estratégia para diminuir o consumo energético das edificações é a melhoria do desempenho térmico de sua envoltória - com mais isolamento há menor necessidade de uso de climatização artificial para manter o nível de conforto térmico. A argamassa de revestimento isolante é uma solução que pode ser adotada em substituição ao revestimento convencional das edificações com esse objetivo. É comum o estudo de agregados alternativos para a melhoria das propriedades térmicas de argamassas, como rejeito de barragem de minério de ferro (MENDES *et al.*, 2020), poliestireno expandido (HORMA *et al.*, 2022), a pedra-pomes (EREN *et al.*, 2014) e a serragem (HOSNY *et al.* 2023).

Horma *et al.* (2022) obtiveram 54% de redução da condutividade térmica da argamassa com a substituição parcial do agregado convencional pelo agregado leve EPS. Mendes *et al.* (2020a) obtiveram um decréscimo de 50% na condutividade térmica com o uso de agregados oriundos de rejeito de minério de ferro. Hosny *et al.* (2023) substituíram

10% da massa de agregados convencionais por serragem em argamassas e observaram um decréscimo de 72% na condutividade térmica. Os autores mencionados recomendam o uso de agregados leves em argamassas para diminuir a condutividade térmica para o estudo da eficiência térmica de edificações.

A principal abordagem da presente pesquisa se dá em torno do desempenho térmico da argamassa de revestimento, especificamente investigando-se a condutividade térmica de argamassas cimentícias com vermiculita.

1.2 - OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver uma argamassa cimentícia termoisolante para revestimento de edificações, utilizando areia de britagem, vermiculita expandida e aditivo incorporador de ar.

Como objetivos específicos pretendem-se:

- Analisar a condutividade térmica das argamassas isolantes produzidas e a influência da incorporação de ar e de diferentes teores de vermiculita em sua composição.
- Estudar as características físicas e mecânicas das argamassas produzidas com areia de britagem, vermiculita expandida e aditivo incorporador de ar.
- Analisar o desempenho térmico das argamassas desenvolvidas, simulando sua aplicação como revestimento de paredes em uma edificação por meio de um programa computacional, a partir dos valores de condutividade encontrados.
- Dar sequência ao uso e eventual aperfeiçoamento do aparelho de medição de condutividade ATA (Aparato Térmico Alternativo) desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção da UFJF.

1.3 - JUSTIFICATIVA

Ainda não existe, no Brasil, um elevado grau de conscientização, no setor de construção civil, quanto à necessidade de se projetar e construir edifícios de melhor desempenho térmico. Em parte, talvez, por existir uma falsa ideia de que nossos recursos naturais, que permitem uma matriz energética com alta parcela de fontes renováveis, sejam inesgotáveis. Em outra medida, por não haver ainda apelo ambiental suficiente ou noção de

conexão entre as atividades produtivas da indústria da construção civil e os efeitos das mudanças climáticas que toda a sociedade, em todas as partes do mundo, já enfrenta ou enfrentará brevemente.

O setor de edificações tem muito a contribuir nesse contexto, agregando tecnologias, materiais e estratégias de projeto em favor da sustentabilidade. O presente trabalho explora potencialidades térmicas dos revestimentos de argamassa cimentícia, com uso de dois materiais disponíveis nos mercados nacional e local de Juiz de Fora - MG: a areia de britagem, ainda pouco explorada, em substituição à areia natural de rio, e a vermiculita, tradicionalmente conhecida por possibilitar isolamento térmico em compósitos de construção civil e de outras áreas.

Este trabalho apresenta como inovação científica o uso associado da areia de britagem com a vermiculita e aditivo incorporador de ar para a elaboração de uma argamassa leve com características isolantes térmicas, avaliada pela medição da condutividade térmica, e com o objetivo de ser usada para a melhoria do desempenho da envoltória de edificações.

Por meio da pesquisa bibliográfica foi identificado que as pesquisas associando a areia de britagem às argamassas isolantes são incipientes. Por exemplo, os autores Koksall *et al.* (2021) utilizaram vermiculita com cimento aluminoso; Becker, Effting e Schackow (2022) utilizaram agregados leves (vermiculita, EPS e aerogel); Gündüz; Kalkan (2019) utilizaram agregados expandidos: vermiculita, perlita, argila e vidro; Cintra *et al.* (2014) utilizaram raspas de pneu com vermiculita, mas não foi identificado o uso de areia de britagem, apenas areia natural de rio.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

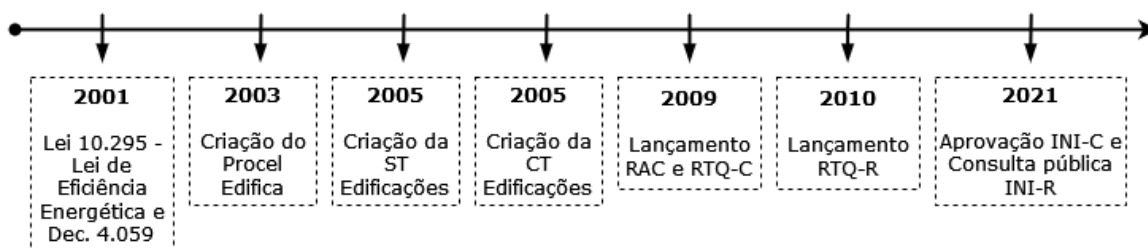
2.1 - DESEMPENHO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE EDIFICAÇÕES

De acordo com Melo e Lamberts (2018), como a envoltória dos edifícios está exposta diretamente à ação do clima, exerce papel fundamental na troca de calor entre os ambientes internos da construção e o meio externo. Por isso, a melhoria de suas características térmicas é um tema de estudo de interesse para as áreas de conforto térmico e eficiência energética, nos campos da arquitetura e da engenharia.

Conforme Lamberts, Dutra e Pereira (2017), a eficiência energética é uma característica da edificação que representa a capacidade de garantir o conforto térmico de seus usuários com o mínimo consumo de energia. Nesse sentido, devem-se buscar soluções construtivas que garantam esse tipo de desempenho, do modo mais econômico.

Devido à crescente preocupação com os impactos ambientais das atividades humanas e à ocorrência, cada vez mais frequente, de crises no setor de energia, a eficiência energética das edificações é um tema estratégico para todos os governos, em suas diversas escalas. Segundo Oliveira (2022), alguns avanços têm no Brasil ocorrido por meio de leis e políticas públicas ligadas ao consumo eficiente de energia elétrica. Destacam-se os regulamentos e legislações recentes promovidas pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), identificados na Figura 1.

Figura 1 – Evolução da legislação para eficiência energética de edificações



Fonte: Oliveira (2022)

De acordo com Oliveira (2022), destacam-se os seguintes marcos:

- i. A lei 10.295, que foi a primeira política pública voltada ao consumo racional de energia elétrica, foi criada devido a crises de fornecimento de energia no início

de 2000 e iniciou as discussões sobre metodologias de classificação de edificações.

- ii. Criação do PROCEL Edifica, um subprograma do PROCEL que visou à eficiência energética em edificações, por meio da criação e elaboração de planos e regulamentações.
- iii. Criação da secretaria Técnica de edificações, responsável pelas posteriores normatizações, a fim de discutir requisitos técnicos relacionados à classificação e etiquetas de eficiência energética de edifícios.
- iv. Publicação dos Requisitos de Avaliação da conformidade do nível de eficiência - que indica a metodologia, processo de avaliação e documentos para classificação da eficiência energética – e regulamento para edifícios comerciais (RTQ-C), que visa classificar a eficiência energética de edificações comerciais e de uso público.
- v. A secretaria técnica de edificações lança o regulamento RTQ-R a fim de classificar o nível de eficiência energética de edificações residenciais.
- vi. É estabelecida nova metodologia para a classificação de edificações, a instrução normativa INMETRO, de uso comercial e público (INI-C) e de uso residencial (INI-R), esta última estabelecida apenas em 2022.

2.1.1 - Certificações, regulamentos e normas técnicas de desempenho térmico de edificações

Existem, no Brasil, duas certificações de caráter voluntário para avaliar o desempenho ambiental, incluindo o desempenho térmico, e consumo energético de edificações residenciais: o Selo Casa Azul, da Caixa Econômica Federal, e o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), este com previsão de se tornar de caráter obrigatório em 2031 (OLIVEIRA; SOUZA; SILVA, 2017).

O Selo Casa Azul avalia o nível de sustentabilidade de edificações de interesse social ou das edificações submetidas ao financiamento pela CAIXA, banco público brasileiro. Esse selo classifica a construção em três categorias - bronze, prata e ouro - de acordo com o número de parâmetros atendidos de seis grupos: qualidade urbana, projeto e

conforto, eficiência energética, conservação de recursos materiais, gestão da água e práticas sociais. Os parâmetros térmicos relevantes relacionados à envoltória das edificações foram definidos com base nas normas ABNT NBR 15575 e 15220 (CAIXA, 2010).

O Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética para Edificações Residenciais (RTQ-R) avalia e classifica prédios residenciais, definidos na norma como unidades habitacionais (UH), de acordo com sua eficiência energética em níveis de “A” a “E”, do melhor ao pior. Um dos parâmetros avaliados é a envoltória utilizada nos ambientes de longa permanência, como quartos, salas e ambientes integrados com cozinha, e sua capacidade de manter a temperatura em um nível confortável em relação ao consumo energético dos climatizadores de ar, considerando a estação do ano e a zona bioclimática na qual a edificação está situada. As zonas bioclimáticas brasileiras são definidas na norma ABNT NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005d).

A NBR 15575 - Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2021), de caráter obrigatório, estabelece níveis de desempenho para novas edificações: **mínimo** (representa as necessidades básicas de saúde, higiene e economia), **médio** ou **superior** (níveis que aumentam o conforto do usuário e contribuem para a valorização do imóvel). A mesma norma ainda classifica as edificações de acordo com critérios que satisfaçam requisitos do usuário: segurança, habitabilidade (incluído o desempenho térmico) e sustentabilidade.

Para a avaliação da eficiência térmica de uma edificação é necessário analisar diversos fatores que envolvam não só características construtivas, principalmente de sua envoltória, como características de projeto arquitetônico e de uso, como carga térmica interna de pessoas, equipamentos. Finalmente, sua localização (zona bioclimática) e características do entorno. Segundo a NBR 15575, a avaliação do desempenho térmico pode ser realizada considerando ventilação natural ou por meio de climatizadores de ar.

Vale mencionar que a norma é limitada a edificações novas e residenciais e esse fato cria lacunas na melhoria do desempenho de energia do setor: as edificações construídas, as reformas e os *retrofits* não são contemplados, assim como as edificações

para fins comerciais e industriais, que representam uma quantidade considerável de edificações.

Conforme NBR 15575 (ABNT, 2021), há dois procedimentos de avaliação do desempenho térmico da edificação: o simplificado e por simulação computacional. O primeiro é utilizado apenas para a classificação no nível mínimo de desempenho, enquanto o de simulação é necessário para classificar nos demais níveis ou quando algum dos critérios do simplificado não for atendido. Os critérios de avaliação de cada método estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 – Critérios de avaliação de desempenho térmico de edificações da NBR 15575

Procedimento simplificado	Procedimento de simulação computacional
Transmitância térmica paredes externas	Horas de ocupação na faixa de temperatura operativa
Capacidade térmica de paredes externas	Temperatura operativa anual
Percentual de abertura de ventilação	Carga térmica total
Área de elementos transparentes	
Transmitância térmica da cobertura	

Fonte: adaptado de ABNT (2021)

O método simplificado considera as características geométricas (layout) e as propriedades térmicas da envoltória e as compara com valores definidos na norma, observando o atendimento aos critérios das vedações verticais externas (envoltória) e cobertura. Caso algum dos parâmetros da edificação não atenda aos níveis mínimos da norma de desempenho, ou caso haja intenção de classificar a edificação avaliada como desempenho superior ou intermediário, é necessário realizar a simulação computacional, por meio de dois modelos:

- i. **Modelo real:** considera o projeto da edificação, seus volumes, elementos transparentes, aberturas, sombreamento e propriedades térmicas dos elementos construtivos.
- ii. **Modelo de referência:** considera a mesma edificação, porém com características predeterminadas na norma NBR 15.575.

Ambos os modelos devem ser comparados para que o desempenho da edificação, representado pelo modelo real, seja avaliado. Observa-se que, para a comparação, devem ser utilizadas as mesmas condições de entorno e condições climáticas. As propriedades dos materiais levadas em conta são:

- i. λ - Condutividade térmica;
- ii. c - Calor específico;
- iii. ρ – Densidade;
- iv. τ – Emissividade;
- v. Absortância;
- vi. R - Resistência térmica;
- vii. U - Transmitância térmica;

A Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) (CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES, 2020) estabelece os requisitos e métodos para classificação da eficiência energética, atribuindo etiquetas conforme o nível de desempenho, variando de “A” a “D”, da mais eficiente para a menos eficiente. É aplicável a edificações em projeto ou construídas: unifamiliares, unidades habitacionais de edificações multifamiliares e as porções residenciais de edifícios de uso misto. O consumo energético, segundo a INI-R, pode ser analisado por três metodologias com complexidade crescente: prescritivo, limitado às residências unifamiliares de até 60 m²; simplificado, com limites conforme Tabela 1; e simulação, quando fora desses limites.

Tabela 1 – Limites para aplicação do método simplificado (INI-R)

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Absortância da cobertura	0,3	0,8
Absortância das paredes externas	0,3	0,8
Altura do pavimento em relação ao solo	0	50 m
Área de fachada	0	150 m ²
Área do ambiente	6 m ²	300 m ²
Capacidade térmica da cobertura	20 kJ/m ² .K	250 kJ/m ² .K
Capacidade térmica das paredes externas	30 kJ/m ² .K	290 kJ/m ² .K
Capacidade térmica do piso	50 kJ/m ² .K	200 kJ/m ² .K
Fachadas expostas ao ambiente externo	1	2 (dormitório)/ 3 (sala)
Fator de abertura para ventilação	0,5	1
Fator de vidro na fachada	0,1	0,9
Fator solar do vidro	0,22	0,87
Pé-direito	2,5 m	5,00 m
Percentual de abertura zenital	0	0
Proporção de área de fachada por área de piso	0	1,5
Sombreamento	sem veneziana	com veneziana
Projeção horizontal de marquise	0	2 m
Transmitância térmica cobertura	0,50 W/m ² .K	3,50 W/m ² .K
Transmitância térmica das paredes externas	0,50 W/m ² .K	3,65 W/m ² .K
Transmitância térmica do piso	2,00 W/m ² .K	3,00 W/m ² .K
Transmitância térmica do vidro	2,80 W/m ² .K	5,70 W/m ² .K

Fonte: Adaptado de Centro brasileiro de eficiência energética em edificações (2020)

O método prescritivo consiste em um *checklist* de cinco requisitos de envoltória e do sistema de aquecimento de água e classifica a edificação em classe C, caso todos os requisitos sejam atendidos. Para as classes A e B, que correspondem aos níveis de desempenho superior e intermediário, respectivamente, é necessária a avaliação pelos métodos mais complexos da instrução. No método simplificado, a instrução normativa compara a edificação de estudo a uma de referência, que avalia a carga térmica com base em trinta e dois parâmetros de entrada, dispostos no Quadro 2 e relacionados ao layout da edificação, aos componentes e elementos construtivos e a variáveis climáticas.

Quadro 2 – Parâmetros avaliados pela INI-R

Edificação	Climáticos
Tipo do ambiente	Temperatura média anual
Fator de vidro das fachadas	Desvio padrão da temperatura média
Áreas de fachada	Amplitude média anual
Área do ambiente	Desvio padrão da amplitude
Capacidade térmica da parede externa	
Transmitância térmica da parede externa	
Capacidade térmica da cobertura	
Transmitância térmica da cobertura	
Transmitância térmica do vidro	
Fator solar do vidro	
Tipo do piso do pavimento	
Pé direito	
Absortância solar da parede externa	
Absortância solar da cobertura	
Projeção da edificação	
Altura do pavimento	
Veneziana	
Altura da abertura	
Fator de abertura da ventilação	
Pilotis	
Exposição do piso	
Exposição da cobertura	

Fonte: Adaptado de Centro brasileiro de eficiência energética em edificações (2020)

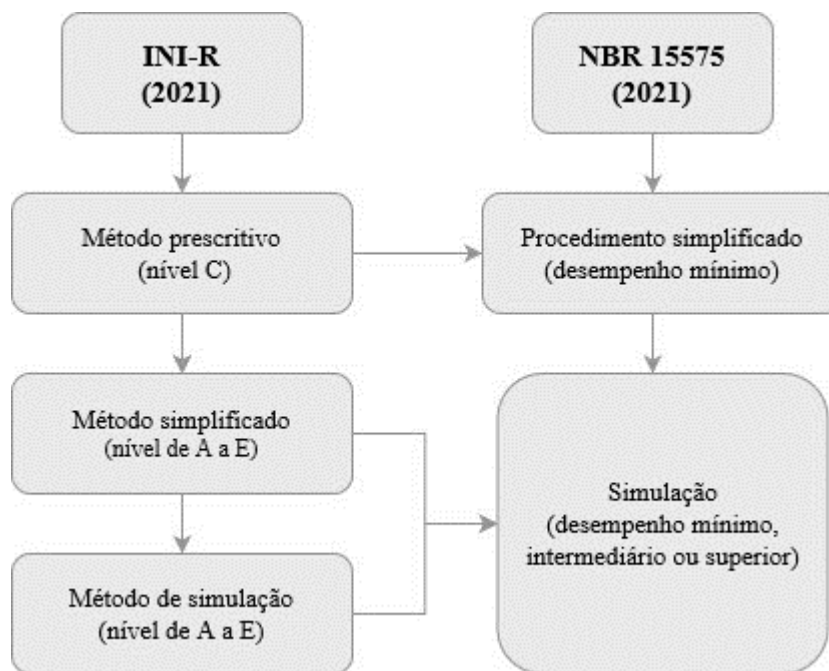
Na impossibilidade de aplicação dos métodos prescritivo e simplificado, o método de simulação deve ser aplicado para a envoltória da edificação, sendo imprescindível a capacitação técnica dos analistas para o uso de softwares de estimativa da carga térmica, como o *Energyplus*¹ ou semelhantes.

A instrução normativa avalia as características para classificação: temperatura média anual, desvio padrão da temperatura média, amplitude média anual, desvio padrão da amplitude, dentre outros parâmetros.

¹ <https://energyplus.net/>

Vale destacar que a INI-R, em seu modelo de 2021, está alinhada com o método aplicado pela NBR 15575 (2021) e utiliza o critério de zoneamento do país prescrito na NBR 15220 (2005d). A principal diferença entre elas é que a INI-R utiliza uma interface própria, em redes neurais e disponibilizado pelo PBE edifica, enquanto os demais métodos são equivalentes, conforme indicado na Figura 2.

Figura 2 – Relação entre INI-R e NBR 15575

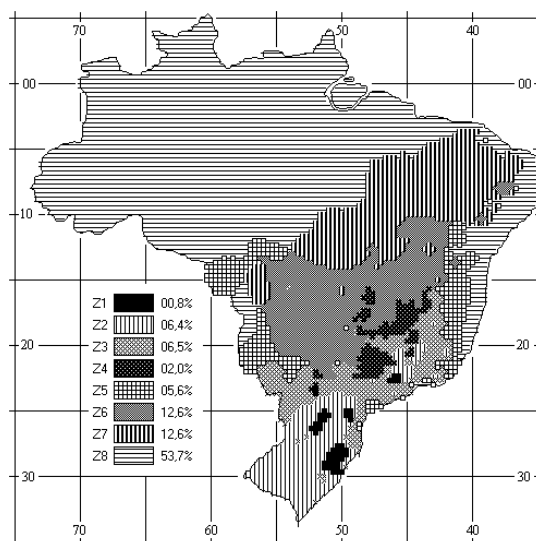


Fonte: Adaptado de Oliveira (2022)

2.2 - ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

A norma ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005d) divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas (Figura 3), com base nas médias mensais de temperaturas máximas e mínimas e de umidade relativa do ar, além de recomendar soluções técnico-construtivas para cada uma, de forma a garantir conforto mínimo para os usuários das edificações.

Figura 3 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: ABNT (2005d)

A fim de avaliar o desempenho térmico de edificações, a norma NBR 15575 determina valores máximos de transmitância térmica de paredes, conforme a Tabela 2, considerando as zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220.

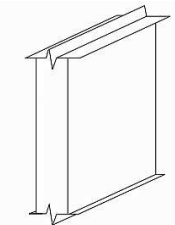
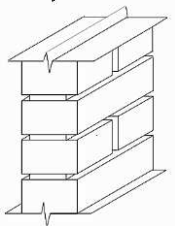
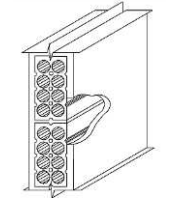
Tabela 2 - Transmitância térmica de paredes externas U ($W/m^2 \cdot K$) para as zonas climáticas brasileiras de acordo com a NBR 15575

Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$U \leq 2,5$	$\alpha a \leq 0,6$	$\alpha a > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

Fonte: ABNT (2021)

A mesma norma sugere valores de transmitância térmica de fechamentos convencionais tipicamente utilizados em edificações, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Transmitância térmica para paredes típicas

Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]
	Parede de concreto maciço Espessura total da parede: 5,0 cm	5,04
	Parede de tijolos maciços aparentes Dimensões do tijolo: 10,0 cm x 6,0 cm x 22,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura total da parede: 10,0 cm	3,70
	Parede de tijolos de 8 furos circulares, na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0 cm x 20,0 cm x 20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0 cm	2,24

Fonte: Adaptado de ABNT (2005d)

2.3 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

2.3.1 - Resistência térmica e transmitância térmica

De acordo com Souza (2016), a troca de calor entre dois meios ocorre da área de maior temperatura para a área de menor temperatura em forma de fluxo e por meio de um ou mais dos mecanismos:

- Condução - a transferência ocorre entre meios estacionários, líquidos ou sólidos.
- Convecção - a transmissão de energia ocorre entre a fonte de energia e um fluido em movimento.
- Radiação - a energia, emitida pela fonte radiante é transportada por ondas eletromagnéticas.

A resistência térmica (R) dos materiais da envoltória de uma edificação é uma propriedade que influencia as condições de troca de calor entre os ambientes interno e externo e, portanto, está diretamente ligada às condições térmicas dos ambientes. Essa

propriedade representa a capacidade da envoltória de resistir ao fluxo de calor, influenciada pelo material, espessura e densidade de cada camada. Vale destacar que quanto maior o valor de R, maior a capacidade isolante (DESOGUS; MURA; RICCIU, 2011).

Em sistemas construtivos, a resistência térmica é calculada pela relação entre a espessura de cada camada da envoltória e sua respectiva condutividade térmica (Equação 1).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

R = resistência térmica [(m².K)/W];

e = espessura da camada (m);

λ = condutividade térmica [W/(m.K)].

A resistência térmica total (R_T) de uma parede considera a resistência superficial externa e interna de cada camada de sua envoltória (Equação 2):

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

R_T = resistência térmica total [(m².K)/W];

R_{se} e R_{si} = resistências superficiais externa e interna, respectivamente [(m².K)/W];

R_t = resistência de superfície a superfície [(m².K)/W].

A transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica total (Equação 3), representa o comportamento do material em relação à transmissão de calor absorvido pela radiação solar para o ambiente interno (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2017). Permite comparar a eficiência entre diferentes envoltórias de edificações, especialmente relevante em fechamentos opacos como as alvenarias, e é a propriedade usada na norma ABNT NBR 15220 para definir os limites de uso, como mencionado na Tabela 2.

$$U = \frac{1}{R}$$

Equação 3

Onde:

U = transmitância térmica [$W/(m^2.K)$];

R_T = resistência térmica total [$(m^2.K)/W$]

2.3.2 - Condutividade térmica

A condutividade térmica (λ) é a propriedade térmica relacionada à transferência de calor por condução e representa a capacidade de um material de conduzir calor ao longo do tempo devido a uma diferença de temperatura, expressa em $W/(m.K)$ (PHILIP; FAGBENLE, 2014). De acordo com a ABNT (2005d), é a “propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1 W/m^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro”.

Kim *et al.* (2003) avaliaram sete parâmetros que poderiam influenciar a condutividade térmica de materiais cimentícios: idade, volume e fração de agregados, consumo de cimento, temperatura e umidade da amostra. Os autores concluíram que os agregados - fração, volume e adições minerais - são os fatores mais relevantes para o estudo de condutividade, enquanto a idade das argamassas pouco influenciou no resultado, exceto para idades muito baixas. Salientaram, também, que a umidade da amostra influencia no estudo da condutividade, devido à maior condutividade da água em relação ao ar dos poros.

De acordo com Khan (2002), os agregados convencionais possuem condutividade térmica entre $1,0$ e $9,0 W/(m.K)$, valor comumente maior que o da argamassa, e apresentam variação conforme sua origem mineral, devido à estrutura cristalina. Rochas provenientes de Quartzito apresentam condutividade térmica de $7,7 W/(m.K)$; de dolomita $5,5$; de calcita $3,6$ e Caulinita $2,6$ (BRIGAUD; VASSEUR, 1989).

A substituição dos agregados convencionais por agregados alternativos com menor condutividade contribui com a produção de argamassa termoisolante. Outro fator relevante para a diminuição da condutividade térmica das misturas cimentícias (valor médio de $\lambda =$

1,7 W/m. K) é a incorporação de ar ($\lambda = 0,025$ W/ (m.K) presente nos poros dos agregados menos densos (ADESINA, 2021).

De acordo com Asadi *et al.* (2018), medição da condutividade de materiais cimentícios pode ser do tipo estacionário ou transiente e seu valor pode apresentar diferenças conforme o método utilizado. O método transiente é o mais utilizado, devido a sua maior praticidade (menor tempo de ensaio e não é necessário secar as amostras em estufa), apesar de ser menos preciso em relação ao método estacionário.

O método estacionário se baseia na transferência de calor constante, com temperatura fixa ao longo do tempo. Consiste na medição do fluxo de calor em uma amostra com espessura conhecida e utiliza a lei de Fourier unidirecional para o cálculo da condutividade, que descreve a transferência de calor por condução (SILVA, 2017). O método transiente é dinâmico e considera o efeito de variação da energia causada pela variação de temperatura proporcionada por uma fonte de calor (GOMES *et al.*, 2018).

2.4 - USO DE AREIA DE BRITAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A extração de areia natural causa diversos tipos de impactos ambientais, como a destruição da mata ciliar, remoção de cobertura vegetal sobre o solo, alteração do bioma e dos cursos dos rios e poluição das águas e do ar devido ao uso de combustíveis fósseis no processo de extração (DE ARAÚJO *et al.*, 2019).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração – ANM - (2020, *apud* RAMADON, 2021), aproximadamente 77 milhões de toneladas de areia são extraídas anualmente de forma legal no território brasileiro, enquanto Ramadon (2021) estima uma geração ilegal de 137 milhões de toneladas ao ano, sem qualquer tipo de fiscalização ou controle ambiental.

Com o objetivo de diminuir o consumo e a extração de areia natural, estudos são realizados com materiais alternativos para o uso em construção civil, especialmente para a produção de concretos e argamassas, como raspas de borracha (LI; LONG; KHAYAT, 2023); plásticos (XIONG *et al.*, 2023); pó de pedras ornamentais, resíduos de construção (KHERRAF *et al.*, 2022); cinzas vegetais (AZHAR *et al.*, 2022); escória de alto forno (LEE; CHOI, 2023) e areia de britagem (TOKARSKI *et al.*, 2018). Resíduos são os materiais com maior apelo ambiental, porém podem possuir impurezas, composição e

disponibilidade variável, enquanto a areia de britagem, apesar de não ser isenta de impactos, é um produto cuja extração segue requisitos legais e ambientais.

A areia de britagem possui pouca variação granulométrica entre diferentes lotes de uma mesma jazida, devido ao processo mecanizado de britagem, possui grãos angulares, irregulares e com superfície áspera, que propicia aderência do agregado com a pasta de cimento, porém diminui a trabalhabilidade dos materiais cimentícios (KAZMIERCZAK; ROSA; ARNOLD, 2016). A areia natural proveniente da dragagem de rio possui grãos arredondados, porém pode conter impurezas como material orgânico ou argila (CORDEIRO; ALVARENGA; ROCHA, 2016).

A areia natural pode ser substituída parcial ou totalmente por areia de britagem em argamassas, porém seu uso causa mudanças em propriedades no estado fresco e endurecido devido a suas características físicas. Diógenes e Cabral (2023) identificaram maior ocorrência de fissuras em argamassas com alto teor de areia de britagem e atribuiu esse comportamento à maior quantidade de finos. O mesmo autor indica que o teor de finos deve ser controlado para usos acima de 25%.

A curva granulométrica da areia de britagem tende a ter menor quantidade de vazios entre os grãos quando comparada à areia natural, devido ao efeito de preenchimento gerado por sua alta quantidade de finos. Esta característica contribui com uma maior massa específica, massa unitária e compacidade. Tokarski (2017) realizou estudo das características físicas dos dois tipos de areias, conforme Tabela 4. Em seu estudo, o autor aponta que a densidade das argamassas produzidas com 80% de areia de britagem é maior que a as produzidas com areia natural e atribui esse comportamento às maiores massa específica e massa unitária do agregado.

Tabela 4 – Caracterização de areias.

Propriedades	Areia natural	Areia de britagem
Absorção de água (%)	0,75	2,95
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,25	2,73
Massa específica (g/cm ³)	2,26	2,99
Massa unitária do agregado seco (kg/dm ³)	1,61	1,77
Índice de volume de vazios (%)	28,43	34,75
Umidade superficial (%)	5,39	8,4

Fonte: Adaptado de Tokarski (2017)

A resistência mecânica tende a ser maior em argamassas com areia de britagem, influenciada pela sua maior densidade, tanto no estado fresco quanto no endurecido. Os finos da areia de britagem preenchem os vazios da argamassa, formando uma microestrutura mais densa com a pasta de cimento. Tokarski *et al.* (2018) obtiveram resistência à compressão simples 47% maior devido ao uso de 80% da areia de britagem, comparando-se à argamassa com areia natural.

A maior quantidade de finos pode ocasionar também alterações na trabalhabilidade, que exigem ações compensatórias para manter o índice de consistência, como o uso de aditivos químicos ou maior relação água/cimento.

A absorção de água e, conseqüentemente, o coeficiente de capilaridade das argamassas, tende a aumentar de forma diretamente proporcional ao aumento do uso de areia de britagem, por conta da maior quantidade de material pulverulento presente na granulometria do material. Em seu estudo, Erba (2022) obteve um coeficiente de capilaridade 89% maior para a argamassa com uso total de areia de britagem em comparação à argamassa com uso total de areia natural.

Ainda de acordo com Erba (2022), a condutividade térmica não sofre variação considerável com o aumento do teor de areia de britagem nas argamassas - foi encontrada uma diminuição de 7% entre no valor dessa propriedade em argamassa com uso total de areia de britagem em relação à argamassa de referência com areia natural.

2.5 - ADITIVO INCORPORADOR DE AR E ISOLAMENTO TÉRMICO DE ARGAMASSAS

As bolhas de ar são formadas na argamassa durante a mistura dos componentes, já que a agitação transfere o ar da superfície dos materiais para o interior da matriz cimentícia e pela colisão dos agregados entre si. As bolhas naturalmente criadas na mistura são instáveis e com tendência de se dissipar para o meio (POWERS, 1968).

O aditivo incorporador de ar age nas argamassas como um lubrificante entre as partículas, devido a uma maior separação entre os agregados, que melhora a trabalhabilidade e a ligação na interface da pasta cimento com os agregados. A maior quantidade de bolhas também reduz a exsudação no estado fresco, enquanto no estado endurecido melhora as propriedades térmicas e acústicas, apesar de diminuir a resistência mecânica e aumentar sua permeabilidade (ROMANO, 2013; DU; FOLLIARD, 2005).

O incorporador de ar reage com a fase líquida da argamassa, formando uma película na interface entre a água e o ar e reduz a tensão superficial, dificultando o coalescimento das bolhas por colisão, assim como a liberação do ar da pasta recém-formada para o meio. Por isso, o aditivo ajuda a estabilizar as bolhas criadas normalmente na argamassa e, como resultado, o sistema de poros apresenta tamanho e distribuição homogêneos (MENDES, 2016).

Os incorporadores de ar podem ser do tipo iônico, anfótero, catiônico ou aniônico. Os aniônicos são os aditivos mais comuns, devido ao seu baixo custo, que se decompõem em um ânion anfifílico (polar) e em um cátion metálico ou de amônio e seus compostos químicos também são utilizados na produção de sabões e detergentes. Utilizam, normalmente, em suas formulações, os grupos polares de carboxilatos, sulfatos, sulfonatos e fosfatos e como contra íons, o sódio ou cálcio, para usos com solubilidade maior em água, e o amônio ou o cálcio, para usos com solubilidade maior em óleos (ROMANO, 2013).

De acordo com Mendes *et al* (2019), o uso de incorporador de ar proporciona a diminuição da condutividade térmica e, conseqüentemente, melhor isolamento térmico, devido ao aumento da porosidade da argamassa e à baixa condutividade do ar introduzido na matriz cimentícia. Os autores encontraram redução de 4,08% e 40,82% para os usos de

0,05% e 0,5%, respectivamente, de aditivo incorporador de ar, em relação à argamassa de referência. Zhang, Chen e Yu (2019) recomendam o uso de incorporador de ar em argamassas isolantes, pois observaram redução de 4,89%, 20,26% e 36,25% para os teores de aditivo de 0,05%, 0,10% e 0,15%, respectivamente, em relação à referência.

Dong *et al* (2014) também observaram diminuição da condutividade térmica das argamassas contendo incorporador de ar, porém recomendam o uso limitado do aditivo, devido ao seu efeito desvantajoso para resistência mecânica e a absorção de água, consequências do aumento da porosidade da matriz. Os autores fizeram incorporação de aditivo de 0% a 1,5% e obtiveram resultados satisfatórios para a resistência mecânica, redução da condutividade térmica em 30% e redução da densidade da argamassa em 25% com o uso de 0,2% de aditivo.

2.6 - ARGAMASSAS ISOLANTES COM VERMICULITA

Os materiais de construção convencionais podem não possuir condutividade térmica adequada para garantir um bom desempenho térmico das edificações e proporcionar conforto aos seus usuários. Assim, procura-se desenvolver alternativas que passam pela combinação de características especiais, variações na espessura e combinação de camadas formadas por mais de um material.

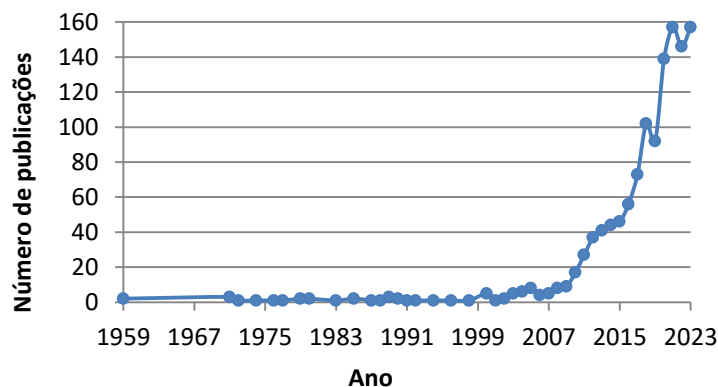
De acordo com Mendes *et al.* (2022), apesar de a condutividade térmica ser a característica mais visada em estudos de argamassas isolantes, há outras características relevantes para a melhoria do desempenho térmico de revestimentos: a espessura, que diminui a transmitância térmica e aumenta a capacitância térmica, e o calor específico da argamassa. Os autores também apontam que a zona bioclimática, o layout da edificação e o cronograma de uso do climatizador de ar são imprescindíveis para a correta análise de eficiência térmica do envelope. Sugerem, ainda, que argamassas isolantes sejam associadas a outras medidas passivas de resfriamento relacionadas à edificação para um melhor desempenho térmico.

Foi realizado, para o presente trabalho, um levantamento bibliográfico na base *Scopus*² utilizando os termos “*thermal conductivity*” AND “*mortar*”, cujo resultado

² <https://www.scopus.com/home.uri>

permitiu notar que o estudo da condutividade térmica de argamassas é relativamente recente, ganhando destaque a partir de 2008, e que há uma tendência de crescimento do interesse nesse tema, conforme Figura 4.

Figura 4 – Número de estudos sobre condutividade térmica de argamassas



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Um dos principais fatores que influenciam a condutividade térmica da matriz cimentícia de argamassas é a sua densidade, variável conforme o volume, massa específica e tipo dos agregados usados (KIM *et al.*, 2003).

Os agregados leves constituem uma dessas alternativas e podem ser utilizados em substituição à areia natural na camada de revestimento de paredes com argamassas cimentícias (BECKER; EFFTING; SCHACKOW, 2022). Os agregados leves não estruturais como vermiculita, perlita e poliestireno expandido conferem boas propriedades isolantes quando incorporados em argamassas, devido à estrutura altamente porosa e sua baixa densidade (MO *et al.*, 2018).

A vermiculita é um mineral natural, formado a partir da hidratação e transformação de micas de origem magnésiana ou magnesioferrita (biotita e flogopita) e sofre expansão de volume quando submetida a altas temperaturas (RASHAD, 2016). Em sua forma expandida é um isolante eficiente de calor e apresenta densidade de 80 a 120 kg/m³, variando de acordo com a origem do material natural, sua qualidade, granulometria e método de aquecimento. A condutividade térmica é de 0,04 a 0,12 W/(m.K), o que a torna interessante para componentes isolantes (SUVOROV; SKURIKHIN, 2003). Além disso, é um material inerte, durável, não libera contaminantes ao meio e pode ser empregada em

temperaturas entre -240 a 1100°C - possui alto ponto de fusão (1240 a 1430 °C) (KOKSAL *et al.*, 2021).

A vermiculita tem baixa densidade e alto isolamento acústico, térmico e elétrico. É inodora, inelével, não prejudicial à saúde, possui alta absorção, pode absorver até cinco vezes sua massa em água. O Brasil é detentor de 14% da reserva mineral mundial e em 2017, 82% da extração mundial de vermiculita concentrou-se em quatro países: África do sul (38%), Estados Unidos (22,4%), Brasil (12,8%), Zimbábue (8,9%) (ANM, 2018).

Guilherme, Cabral e Souza (2020) estudaram a influência da vermiculita em propriedades mecânicas das argamassas e constataram que é uma incorporação que, apesar de reduzir a resistência à compressão (em 21% para 25% de uso de vermiculita e em 26% para os teores de 35 e 45% de vermiculita), não afeta essa propriedade de forma a restringir seu uso. Os autores atribuem a diminuição de resistência à maior porosidade do agregado, que diminui a densidade da argamassa no estado fresco e endurecido.

Becker, Effting e Schackow (2022) estudaram a incorporação de agregados leves (vermiculita, EPS e aerogel) em argamassas e seus efeitos na condutividade e em propriedades físicas. Os autores utilizaram as taxas de substituição de 10 e 15% da massa de areia por vermiculita, que geraram diminuição da condutividade de 45 e 48%, respectivamente, e com redução de resistência à compressão de 25% para ambas.

Koksal *et al.* (2021) estudaram o desempenho térmico de argamassas leves de cimento Portland e de cimento aluminoso a diferentes temperaturas, com a adição de vermiculita em diferentes teores de substituição da areia, em volume. Encontraram valores de condutividade que vão de 1,85 W/m. K (sem vermiculita) a 0,69 W/m. K, com 45% de vermiculita em relação ao total de agregados, em volume. Neste estudo, a adição de vermiculita na argamassa gerou redução do valor da condutividade térmica e de resistência mecânica, comportamento explicado pela diminuição da densidade das argamassas e pela menor massa específica do agregado.

Os agregados leves possuem densidade abaixo de 1,12 g/cm³ (ABNT, 1995). São classificados em naturais (exemplos: diatomita, pedra-pomes, cinzas vulcânicas e tufos) e artificiais, aqueles transformados a partir de materiais naturais, ou resíduos de processos

industriais (argila, vermiculita e perlita expandidas, cinzas volantes e escória de alto-forno) (NEVILLE, 2015).

Para avaliar tendências de comportamento e propriedades físicas avaliadas de argamassas com o uso de vermiculita, assim como para identificar outros materiais utilizados em conjunto com este agregado leve, foi realizada uma nova pesquisa bibliográfica na plataforma *Scopus* com a seguinte estrutura: i) Definição do protocolo de pesquisa; ii) Análise dos artigos encontrados; iii) Síntese das informações relevantes, iv) Compilação dos dados. Os novos termos de busca adotados, mais diretamente relacionados à presente pesquisa, foram: “*mortar*” AND (“*thermal conductivity*” OR “*thermal insulation*”) AND “*vermiculite*”, a fim de obter os artigos com estudos de argamassas de revestimento que utilizem a vermiculita em substituição à areia e que avaliem o desempenho térmico do revestimento por meio da condutividade térmica. Foram analisados os títulos, palavras-chave, resumos e conclusões dos artigos encontrados para avaliar se estavam de acordo com o tema da presente pesquisa. Optou-se por analisar apenas os artigos em inglês. O período não foi restringido, pois o estudo do desempenho térmico de envoltórias por meio de sua condutividade é relativamente recente. Foram encontrados trinta artigos com as palavras de interesse. Desses, foram excluídos dezenove artigos: oito não estudam argamassas de revestimento para envoltória de edificações; seis abordam materiais de mudança de fase (PCM) ou geopolímeros, revestimentos que atuam de forma diferente das argamassas isolantes; dois não utilizam vermiculita como agregado; dois não estudam a condutividade térmica e um não utiliza cimento Portland. Dos artigos analisados, foram extraídos os ensaios executados, teor de substituição, condutividade térmica obtida, resistência à compressão, componentes utilizados nas argamassas, traço e aplicação do revestimento de estudo. O Quadro 3 apresenta os artigos selecionados e os principais dados extraídos de interesse do presente trabalho.

Vários autores observaram uma relação inversamente proporcional entre o aumento de teor de agregado leve, em especial a vermiculita, com a diminuição da resistência mecânica e com a densidade, enquanto uma relação diretamente proporcional é estabelecida com a condutividade térmica, absorção por capilaridade e porosidade (KOKSAL *et al.*, 2023; BECKER; EFFTING; SCHACKOW, 2022; PALOMAR; BARLUENGA; PUENTES, 2015).

Os autores Palomar, Barluenga e Puentes (2015); Becker, Effting e Schackow (2022) e Gündüz e Kalkan (2019) estudaram, além das propriedades térmicas das argamassas isolantes, suas propriedades acústicas, já que ambas as características estão relacionadas com o conforto interno dos usuários da edificação.

Gündüz e Kalkan (2019) afirmam que o uso de agregados expandidos é eficaz na elaboração de argamassas isolantes e diminui sua densidade. Palomar, Barluenga e Puentes (2015) concluíram que o tipo de agregado e sua estrutura de poros são características mais relevantes para o desempenho térmico e acústico das argamassas do que a proporção de uso. Becker, Effting e Schackow (2022) descrevem que o uso de agregados leves, entre eles a vermiculita, contribui para a diminuição da espessura mínima do revestimento que atende a NBR 15575 e que 15% de vermiculita ainda atende a resistência à compressão mínima para revestimentos (2,4 MPa).

A análise das propriedades físicas das argamassas isolantes produzidas foi feita, pela maioria dos autores, em temperatura ambiente. Porém, Koksall *et al.* (2021) e Koksall *et al.* (2023) estudaram também o comportamento a altas temperaturas, sob a justificativa de a vermiculita proporcionar resistência ao calor, característica ligada à durabilidade das edificações.

Os estudos analisados adotam argamassas com uma consistência fixa e, conseqüentemente, com a relação água/cimento variável, com exceção do estudo de Koksall, Gencil e Kaya (2015).

Quadro 3 – Fontes bibliográficas e dados relevantes para a pesquisa (Continua)

Referência	Materiais	Propriedades avaliadas	Objetivo	Proporções		Teor de vermiculita (%)	λ [W/(m K)]	Resistência à compressão
				Cimento:cal :agregados (massa)				
Cintra <i>et al.</i> (2014)	Raspas de pneu Vermiculita	Condutividade Densidade Resistência à compressão	Isolante térmica	Cimento:cal :agregados (massa)	1:0,8:2,08 1:0,75:3,1	77 55	0,383 0,349	1,36 1,25
Koksal; Gencel; Kaya (2015)	Sílica ativa Vermiculita	Condutividade Densidade Resistência mecânica Velocidade de pulso	Isolante térmica	Cimento:vermiculita	1:4 1:6 1:8	100	0,6 0,42 0,25	12,5 8,8 7,3
Palomar; Barluenga; Puentes (2015)	Agregados com graduação descontínua, agregados leves (vermiculita, perlita e argila expandida e fibras (celulose e polipropileno)	Condutividade Densidade Resistência mecânica Velocidade de pulso Absorção de água Aderência Porosidade	Isolante térmica e acústica	Cimento:cal : areia	1:1:6	25 50	0,267 0,204	5,0 3,0
Senff <i>et al.</i> (2016)	SAP (<i>super absorbent particles</i>) Vermiculita nanopartículas de TiO ₂	Condutividade Densidade Resistência mecânica Absorção de água Adsorção de água Atividade fotocatalítica	Isolante térmica Controle de umidade Redução de poluição do ar	Cimento:cal :areia	1:1:3	5 10 15	0,37 0,29 0,25	-
Gündüz; Kalkan (2019)	Agregados expandidos: Vermiculita / perlita / argila / vidro	Condutividade Densidade Resistência à compressão Calor específico	Isolante térmica e acústica		1:1,25	24	0,104	0,96
Al-Awsh <i>et al.</i> (2020)	Vermiculita Perlita Raspas de borracha	Condutividade Modelo matemático Análise de custos	Proposição de envoltória sustentável (bloco e argamassa)		1:3	5 10 15	0,383	-

Quadro 3 – Fontes bibliográficas e dados relevantes para a pesquisa (Conclusão)

Referência	Materiais	Propriedades avaliadas	Objetivo	Proporções		Teor de vermiculita (%)	λ [W/(m K)]	Resistência à compressão
Koksal; Mutluay; Gencil (2020)	Vermiculita EPS	Condutividade Densidade Resistência mecânica Absorção de água Porosidade Microestrutura	Isolante térmica	cimento: vermiculita +EPS	1:3 1:4 1:5 1:6 1:7	100	0,39 0,25 0,18 0,18 0,12	2,2 2,0 2,10 1,80 1,30
Koksal <i>et al.</i> (2021)	Vermiculita e cimento aluminoso/ cimento portland	Condutividade Resistência mecânica Absorção de água Velocidade de Pulso Porosidade Microestrutura	Isolante térmica e resistente ao fogo	cimento: agregado	1:3 1:4 1:5 1:6	15 30 45	1,16 0,82 0,689	29,20 20,60 13,90
Becker; Efftig; Schackow (2022)	Silica aerogel EPS Vermiculita expandida	Condutividade Densidade Calor específico Retenção de água Absorção de água Microestrutura Resistência térmica Ar incorporado Porosidade Acústica	Isolante térmica e acústica	cimento:cal: areia	1: 1,25: 5	10 15 20	0,63 0,59	2,6 2,5 1,55
Koksal <i>et al.</i> (2023)	Pó de vermiculita e cimento portland/ cimento aluminoso	Condutividade Densidade Resistência mecânica Absorção de água Velocidade de Pulso Porosidade Microestrutura	Isolante térmica e resistente ao fogo	cimento: vermiculita	1:3 1:4 1:5 1:6	100	0,242 0,213 0,171 0,096	3,14 2,16 1,72 1,54

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Lima Filho *et al.* (2014) estudaram argamassas com incorporação de perlita ou vermiculita e apontaram que a perlita possui um comportamento ideal para o uso como agregado leve em argamassas de revestimento, devido à sua baixa condutividade térmica (0,04 W/m. K). Porém, afirmam que é um mineral escasso no Brasil e apontam a vermiculita (0,06 W/m. K) como uma boa alternativa ao seu uso, com disponibilidade maior.

Costa *et al.* (2020) avaliaram a influência de diatomita e vermiculita nos PCM e, para isso, produziram argamassas com vermiculita, diatomita e uma combinação de ambas. Os autores apontam que a diatomita apresentou a maior condutividade térmica (1,25) entre os minerais estudados, enquanto a vermiculita apresentou o menor valor (1,05 W/m. K), por possuir uma estrutura lamelar com ar incorporado e maior porosidade.

Palomar, Barluenga e Puentes (2015) estudaram o uso de agregados leves na composição de argamassas de revestimento para melhorar suas propriedades térmicas e acústicas utilizando perlita, argila expandida ou vermiculita, em conjunto com fibras curtas de celulose ou de polipropileno. Os autores encontraram os menores valores de condutividade para as argamassas com 50% de perlita ($\lambda = 0,175$), 15% de fibra de celulose ($\lambda = 0,190$) e 50% de vermiculita ($\lambda = 0,204$), reduções consideráveis quando comparadas à argamassa de referência ($\lambda = 0,306$).

Cintra *et al.* (2014) estudaram argamassa contendo vermiculita e raspas de borracha com adições de sílica ativa e de aditivo plastificante. Os autores identificaram uma tendência de diminuição da resistência mecânica com o aumento do teor de vermiculita e atribuíram esse comportamento a: baixa resistência dos agregados leves, baixa aderência dos agregados com a pasta de cimento e absorção de água disponível para hidratação do cimento pela vermiculita. Para compensar esse comportamento, aumentou-se o consumo de cimento e cal das argamassas, que resultou em aumento da carbonatação e da densificação da microestrutura das argamassas, levando ao aumento da condutividade térmica.

Gündüz e Kalkan (2019) apontam que o uso de agregados com alto calor específico, capacidade de receber mais calor para aumentar sua temperatura, contribui com a diminuição da condutividade e por isso, estudaram agregados expandidos: argila,

vermiculita, perlita e vidro. Os autores usaram aditivo plastificante, cal e carbonato de cálcio (CaCO_3) e encontraram argamassas com condutividade térmica de 0,095 (perlita); 0,104 (vermiculita); 0,119 (vidro) e 0,161 (argila) e com densidade de 425, 487, 574, 772 kg/m^3 , respectivamente, indicando uma relação direta entre essas propriedades.

Koksal, Mutluay e Gencel (2020) afirmam que a densidade e porosidade dos agregados são características-chave para a diminuição da condutividade das argamassas e por isso, utilizaram o EPS (*Expanded Polystyrene*), um agregado leve, e a vermiculita, um agregado leve e poroso, para desenvolver argamassas isolantes. Os autores concluíram que as argamassas com vermiculita apresentaram absorção por capilaridade maior, por causa de sua estrutura porosa. Nesse estudo foi encontrado um aumento da capilaridade com o aumento do volume do agregado poroso nas argamassas.

Becker, Effting e Shackow (2022) estudaram a condutividade térmica de argamassas contendo agregados leves, a fim de melhorar o desempenho térmico das envoltórias de edificações. Avaliaram o uso de poliestireno expandido (EPS), aerogel de sílica ou vermiculita na argamassa nas taxas de 10, 15 e 20%, em massa, em conjunto com aditivo incorporador de ar (1,0%) e superplastificante (1,5%) e encontraram menor condutividade térmica para o aerogel, seguido pelo EPS e pela vermiculita. Os autores atribuíram as condutividades obtidas ao menor tamanho de partícula do aerogel, e à condutividade térmica do EPS (0,035) e da vermiculita (0,070).

Al-Awsh *et al.* (2020) estudaram argamassas isolantes para revestimento e assentamento contendo vermiculita, perlita ou raspas de borracha, nos teores de 5%, 10% e 15%, com o objetivo de propor, em conjunto com blocos isolantes, uma envoltória mais eficiente que os modelos convencionais. Concluíram que a envoltória mais eficiente foi aquela que combinava bloco isolante de escória vulcânica e argamassa com 15% de vermiculita, que proporcionou aumento de 13% da resistência ao calor.

Senff *et al.* (2016) utilizaram a combinação de vermiculita, polímeros superabsorventes-SAP e nano partículas de TiO_2 para o estudo de uma argamassa com múltiplas funções: isolante térmica, ajuste de umidade interna e redutora de poluentes no ar. Encontraram valores de resistência à flexão de 3,7; 1,0 e 0,5 MPa para as argamassas com 0, 10 e 15% de vermiculita, respectivamente, e recomendaram o uso máximo de 10%

de vermiculita para manter a resistência em, no mínimo, 1 MPa, valor que ainda proporciona dureza e coesão adequadas para uso.

Koksal, Gencel e Kaya (2015) estudaram argamassa com vermiculita e adição de sílica ativa e seu comportamento às temperaturas de 300, 600 e 900°C. A sílica ativa apresentou pouca influência na condutividade térmica das misturas, porém diminuiu sua consistência e porosidade e aumentou a densidade e a resistência, devido ao preenchimento dos poros pelas partículas finas. Concluíram que o teor de vermiculita é o aspecto de maior influência na condutividade térmica e que a argamassa com vermiculita possui bom desempenho a até 900 graus.

Koksal *et al.* (2021) estudaram argamassas com três teores de vermiculita (15, 30 e 45% em relação à massa total do agregado) e dois tipos de cimento (Portland e aluminoso) e o comportamento às temperaturas de 300, 600 e 900°C. Os autores encontraram aumento de resistência a 300°C para a associação de cimento aluminoso e vermiculita nos teores de substituição e atribuíram esse comportamento à estrutura porosa das argamassas que favorece reações químicas nessas temperaturas.

Koksal *et al.* (2023) estudaram a resistência ao calor, em várias temperaturas (20, 300, 600, 900 e 1100 °C), de argamassas com 100% de substituição da areia por pó de vermiculita, em quatro proporções diferentes e com dois tipos de cimento - Portland e aluminoso. Os autores encontraram redução de resistência à compressão em todas as argamassas a 1.100 °C em relação à argamassa de referência, porém identificaram que as argamassas com cimento aluminoso apresentaram redução menor quando comparadas às argamassas com cimento Portland. Nesse mesmo estudo, observaram que a associação de vermiculita com cimento aluminoso produziu argamassa com resistência ao calor devido às propriedades refratárias de ambos os materiais. Recomendaram o uso de vermiculita em argamassas para proteção contra o calor e para o isolamento térmico, pois este agregado levou à diminuição da condutividade térmica nas argamassas confeccionadas com os dois tipos de cimento.

3. MEDODOLOGIA

3.1 - MATERIAIS

Para desenvolver as argamassas do presente estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Cimento Portland CP II-E 32;
- Areia de britagem, obtida em empresa mineradora de Juiz de Fora – MG, produzida pelo processo de cominuição de rocha gnaisse em britador de impacto vertical (Figura 5);
- Vermiculita expandida (Figura 6), fornecida por empresa mineradora do estado de Goiás;
- Aditivo incorporador de ar em pó;
- Água potável da concessionária de Juiz de Fora - MG;

A areia de britagem adotada para a pesquisa é produzida em Juiz de Fora – MG e comercializada na região desde 2003. A empresa fornecedora de agregados afirma fornecer agregados com granulometria semelhante entre lotes, pela forma mecanizada de trituração da rocha britada e com controle de qualidade durante o processo de produção.

Figura 5 – Britador de impacto vertical (a) e areia de britagem (b).



(a)



(b)

Fonte: Do autor (2023)

Figura 6 – Vermiculita expandida



Fonte: Do autor (2023)

Foi utilizado o aditivo incorporador de ar AGNIQUE SLS 2490 CC, um tensoativo aniônico, com propriedades umectantes, emulsionantes e solúvel em água, utilizado, dentre outras aplicações, como incorporador de ar em concretos ou argamassas. Adotou-se, no presente trabalho, o teor de 0,035% de aditivo em relação à massa de cimento, quantidade recomendada pela fornecedora de areia de britagem da região para argamassas com o seu agregado.

3.1.1 - Caracterização dos agregados

A granulometria dos agregados foi obtida por meio das peneiras de série normal, conforme NBR 17054 (2022b), enquanto o teor de finos foi determinado por lavagem, de acordo com a NBR 16973 (2021).

A massa específica real foi determinada por meio de frasco de Chapman, de acordo com a NBR 16916 (2021). A massa unitária foi determinada por meio de um recipiente com volume determinado e preenchido com agregado miúdo seco, conforme a NBR 16916 (2021).

3.2 - PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A Tabela 5 mostra o planejamento experimental elaborado para os ensaios de capilaridade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência mecânica e de condutividade

térmica da pesquisa, com o formato e o número de corpos de prova para cada ensaio e a idade de sua realização.

Tabela 5 – Planejamento experimental.

Propriedade estudada	Normas ABNT	Formato do corpo de prova (mm)	Número de corpos de prova	Idade de ensaio (dias)
Densidade (estado endurecido)	13280:2005	40 x 40 x 160	3	28
Absorção por capilaridade	15259:2005	40 x 40 x 160	3	28
Velocidade de pulso ultrassônico / Módulo de elasticidade dinâmico	15630:2008	300 x 300 x 50 40 x 40 x 160	3	28
Resistência mecânica	13279:2005	40 x 40 x 160	6	28
Condutividade térmica	-	300 x 300 x 50	2	28

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.3 - ARGAMASSAS

A argamassa de cimento e areia de britagem de composição 1:6 (cimento: areia de britagem, em volume), foi adotada como composição de referência, por ser comumente utilizada na região para revestimento de edificações. A areia de britagem foi substituída por vermiculita, em volume, nos teores 10, 20 e 30%. Foi formado, portanto, para o estudo, um conjunto de sete argamassas: uma de referência, três com adição de vermiculita e três com as mesmas proporções de vermiculita mais aditivo incorporador de ar. Com base nos valores de massa unitária dos materiais, as composições foram transformadas e expressas em proporções de massa (Tabela 6). A quantidade de água de cada argamassa foi obtida a partir de sua consistência, conforme (ABNT, 2016), fixando-se o diâmetro de espalhamento de 260 ± 5 mm. Optou-se por trabalhar com a vermiculita seca nas misturas, embora a presença deste material represente um potencial de perda de consistência da argamassa fresca logo após a mistura, em virtude de sua alta absorção de água.

Tabela 6 – Argamassas elaboradas para a pesquisa.

Argamassa	Cimento (kg)	Vermiculita (kg)	Areia de britagem (kg)	Relação água/cimento (kg)	Porcentagem de água na mistura (%)	Aditivo incorporador de ar (% da massa de cimento)
Ref (1:6)	1	-	8,30	1,53	19,4	-
V10	1	0,09	7,47	1,61	18,8	-
V20	1	0,19	6,64	1,61	20,6	-
V30	1	0,28	5,81	1,60	22,6	-
V10A	1	0,09	7,47	1,61	18,8	0,035
V20A	1	0,19	6,64	1,61	20,6	0,035
V30A	1	0,28	5,81	1,60	22,6	0,035

V10 - argamassa com 10% de vermiculita em substituição ao agregado miúdo, em volume.

V20 - argamassa com 20% de vermiculita em substituição ao agregado miúdo, em volume.

V30 - argamassa com 30% de vermiculita em substituição ao agregado miúdo, em volume.

V10A - argamassa com 10% de vermiculita e aditivo incorporador de ar.

V20A - argamassa com 20% de vermiculita e aditivo incorporador de ar.

V30A - argamassa com 30% de vermiculita e aditivo incorporador de ar.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As argamassas foram produzidas em uma argamassadeira convencional de laboratório, de cinco litros. O procedimento de mistura consistiu em uma fase de 60 segundos na velocidade baixa, pausa para remoção do material agarrado nas bordas internas do recipiente e na pá misturadora, seguida por mais uma fase de mistura de 60 segundos na velocidade baixa.

3.4 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ARGAMASSAS

3.4.1 - Densidade no estado fresco e teor de ar incorporado

A densidade no estado fresco e o teor de ar incorporado foram determinados de acordo com a norma ABNT NBR 13278 (ABNT, 2005a). Foram preenchidos recipientes plásticos com argamassa no estado fresco e, em seguida, determinou-se a massa de argamassa em balança de precisão de 0,01 g (Figura 7). O teor de ar incorporado foi calculado por meio da Equação 4.

Figura 7 – Ensaio de densidade no estado fresco



Fonte: Do autor (2023)

$$A = 100 \left(1 - \frac{d}{\frac{m_s + m_{\text{água}}}{\gamma_s + m_{\text{água}}}} \right) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A = teor de ar incorporado na argamassa (%);

d = densidade de massa da argamassa (g/cm³);

m_s = massa de argamassa anidra (g);

m_{água} = massa de água da argamassa fresca (g)

γ_s = massa específica da argamassa anidra (kg/dm³);

3.4.2 - Densidade no estado endurecido

A densidade no estado endurecido foi avaliada conforme NBR 13280 (ABNT, 2005c) e consiste na aferição da massa dos corpos de prova de 4 x 4 x 16 (cm) em balança de precisão de 0,01 g e a propriedade foi calculada por meio da Equação 5:

$$At = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

M = massa do corpo de prova (g);

V = volume do corpo de prova (cm³);

3.4.3 - Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi medida com base na NBR 15259 (2005e). Os corpos de prova prismáticos foram secos em estufa a temperatura de 60°C por 48 horas e após secos foram colocados no sentido longitudinal em uma lâmina de água de 5 mm (Figura 8). As massas dos corpos de prova foram aferidas antes de ocorrer absorção de água ($t=0$), após 10 e 90 minutos de absorção de água e o coeficiente de absorção foi calculado pela Equação 6:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

A_t = absorção de água por capilaridade (%);

m_t = massa do corpo de prova no tempo t , de 10 min ou 90 min (g);

m_0 = massa inicial do corpo de prova;

Figura 8 – Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Do autor (2023)

3.4.4 - Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado por meio da velocidade de pulso ultrassônico, conforme NBR 15630 (2009), utilizando-se um equipamento do tipo PROCEQ PUNDIT LAB (+), com transdutores que geram pulsos de frequência de 54 kHz. A velocidade de pulso foi medida no sentido longitudinal e no centro do corpo de prova, para os corpos de prova no formato 4 x 4 x 16 (cm). Nos ensaios realizados em placas, os transdutores foram posicionados no centro das superfícies de maior área, com o pulso

atravessando sua espessura, conforme Figura 9. Para realização dos ensaios, as amostras foram secas em estufa a 60°C por 48h, para evitar influência da umidade interna das argamassas nos resultados. Gel para ultrassom sem sal foi usado como pasta condutiva.

Figura 9 – Medição da velocidade de pulso de ultrassom em barra (a) e em placas (b).



Fonte: Do autor (2023)

3.4.5 - Resistência mecânica

A resistência mecânica foi avaliada em uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca EMIC e modelo DL20000MF (Figura 10) com células de carga de 200 kN e 20 kN, para ensaio de compressão simples e para tração por flexão, respectivamente. O rompimento foi realizado por procedimento padrão de acordo com a Norma NBR 13279 (ABNT, 2005b).

Figura 10 – Máquina universal de ensaios



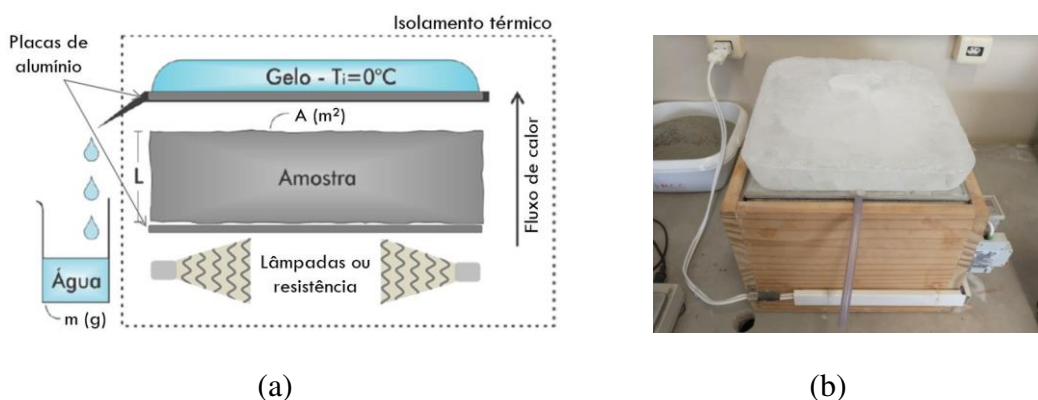
Fonte: Do autor (2023)

3.4.6 - Condutividade térmica

A determinação da condutividade térmica foi realizada pelo método proposto por Garcia (2021) no Aparato Técnico Alternativo (ATA), desenvolvido no Laboratório de

Materiais de Construção Civil da UFJF, em sua dissertação de mestrado. O equipamento é composto por uma caixa de madeira que contém uma fonte de calor (resistência elétrica) para criação de um fluxo através de uma placa de argamassa contida entre duas placas de alumínio, conforme esquema na Figura 11. Sobre o conjunto de placas de alumínio e argamassa é colocada uma placa de gelo.

Figura 11 - Princípio de funcionamento do ATA – figura ilustrativa (a) e fotografia do aparelho (b).



Fonte: Garcia (2021)

O equipamento de baixo custo funciona com base no regime permanente de transferência de calor, com o cálculo da condutividade térmica por meio da equação adaptada da lei de Fourier unidirecional (Equação 7).

$$\lambda = \frac{\Delta Q \cdot L}{\Delta t \cdot A \cdot \Delta T} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

λ = Condutividade térmica [W/(m.K)];

ΔQ = Massa de água medida (g) x calor latente de fusão da água (333 J/g), em J;

Δt = Tempo de medição da massa de água (120'');

L = Espessura do corpo de prova (0,05 m);

A = Área da superfície do corpo de prova (0,09 m²);

ΔT = Diferença de temperatura entre a fonte de calor (40 °C) e o gelo (0 °C), em K.

As amostras foram secas em estufa na temperatura de 60°C por 48 horas, para que a umidade interna dos corpos de prova fosse eliminada sem interferir na microestrutura das

argamassas. A condutividade foi determinada com base na média de duas amostras de cada argamassa produzida.

O procedimento de uso do ATA, ilustrado na Figura 12, proposto pela autora do protótipo, consiste em:

- i. Determinar as dimensões e pesar a amostra de argamassa;
- ii. Posicionar a amostra de argamassa no interior da caixa;
- iii. Posicionar a placa fria sobre superfície da amostra;
- iv. Posicionar a placa de gelo sobre a placa fria;
- v. Acionar o ATA com o controlador programado em 40 °C;
- vi. Realizar a primeira leitura da massa de água escoada do sistema após o período de 30 minutos (com tempo de coleta de água de 2 minutos);
- vii. Realizar leituras a cada 15 minutos (com tempo de coleta também de 2 minutos) até o sistema atingir o regime permanente;

Figura 12 – Medição de massa de água no ATA



Fonte: Do autor (2023)

Vale destacar que Garcia (2021) adaptou a metodologia partir da NBR 15220 (ABNT, 2005d), considerado três medições sucessivas sem variação individual acima de 5% como critério para determinação do regime permanente de fluxo de calor.

Foram produzidas três placas de 300 x 300 x 50 mm para cada argamassa para os ensaios de condutividade. As amostras foram desmoldadas após 24 horas da moldagem e mantidas em ambiente de laboratório (temperatura 24 ± 2 °C e umidade relativa do ar

média de 80% durante o período das moldagens) por 28 dias. A Figura 13 apresenta um conjunto de corpos de prova do estudo.

Figura 13 – Corpos de prova para ensaio de condutividade térmica - 300 x 300 x 50 (mm).



Fonte: Do autor (2023)

Para ratificar os resultados obtidos por meio do ATA, três argamassas foram submetidas a ensaio de condutividade térmica em equipamento comercial de medição da marca NETZSCH e do tipo HFM (*Heat Flow Meter*): a argamassa de referência (Ref 1:6), a argamassa com 30% de vermiculita (V30) e a mesma argamassa com uso de aditivo (V30A).

3.5 - CÁLCULO DE TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE PAREDES

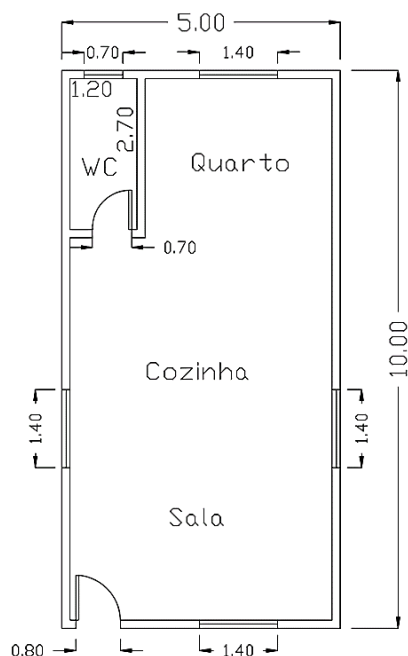
A condutividade térmica das argamassas isolantes produzidas foi usada para realização do cálculo da transmitância térmica (U) de todas as configurações de paredes possíveis, combinando-se as argamassas estudadas, sua aplicação como camada interna, externa ou dos dois lados das paredes de bloco cerâmico, de acordo com critérios da NBR 15220:2 (ABNT, 2022a). Análise de eficiência energética

Para avaliar a contribuição da redução da condutividade térmica do revestimento na eficiência energética da edificação, foi realizada uma simulação no software TRNSYS 17, com base no procedimento simplificado da NBR 15575 (2021).

Foi adotada, para estudo, uma edificação unifamiliar com uma disposição integrada (*loft*), caracterizada por apenas uma área de permanência prolongada (APP) de uso misto – sala integrada com cozinha e dormitório – e um ambiente transitório – banheiro – que

representa 6,5% da área total. O modelo possui cinco metros de largura por 10 metros de comprimento e três metros de altura (Figura 14).

Figura 14 – Planta baixa da edificação de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A edificação possui área total de abertura de ventilação de 6,72 m² (16% da área de piso), dividida em quatro janelas de 1,40 m de largura por 1,20 m de altura, de forma que haja ventilação cruzada no interior da edificação, em atendimento ao critério de aberturas mínimas da norma ABNT NBR 15575.

A transmitância e a capacidade térmicas das paredes foram calculadas por meio de planilha eletrônica, de acordo com as diretrizes da norma NBR 15220:2 (ABNT, 2022), enquanto as propriedades das coberturas adotadas foram obtidas do Anexo V do catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros do INMETRO (INMETRO, 2012).

Para a simulação computacional foram adotados os seguintes materiais para a configuração das paredes da envoltória do loft:

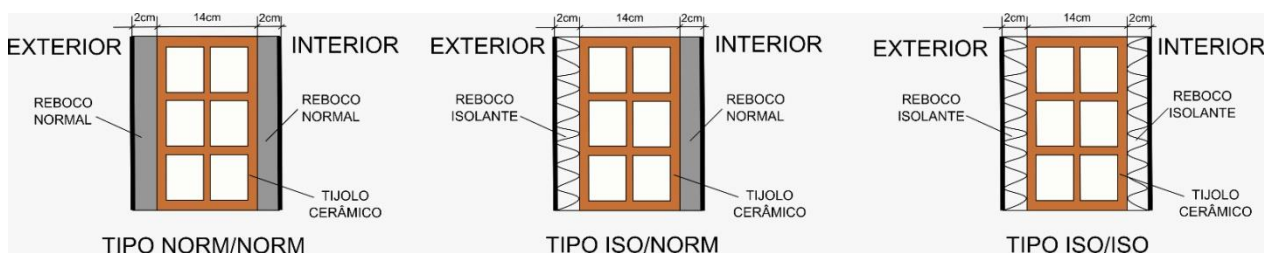
- Bloco cerâmico de vedação com seis furos (29 x 19 x 14 cm), comumente empregado na construção civil;

- Argamassa cimentícia de revestimento: a) argamassa de referência 1:6, com condutividade térmica 1,03 W/(m.K) e densidade 1,95 kg/dm³; b) argamassa isolante V30 com condutividade térmica 0,49 W/(m.K) e densidade 1,68 kg/dm³ e argamassa isolante V30A com condutividade térmica 0,40 W/(m.K) e densidade 1,42 kg/dm³.

Foram feitas as seguintes combinações de soluções construtivas para paredes, considerando a espessura do revestimento de 2,0 cm (Figura 15):

- a) revestimento de parede com argamassa convencional interna e externamente, denominada "NORM-NORM";
- b) revestimento de parede com argamassa isolante na superfície externa e convencional na interna - "ISO-NORM";
- c) revestimento de parede com argamassa isolante interna e externamente - "ISO-ISO".

Figura 15 – Configurações de paredes estudadas.

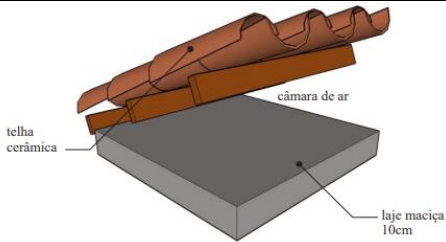
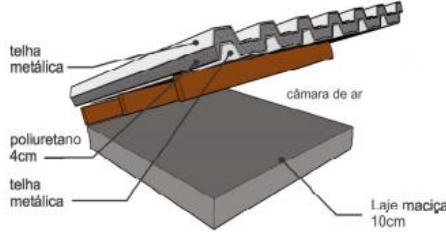


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Essas combinações geraram, com as argamassas isolantes estudadas, doze possibilidades diferentes, além daquela com argamassa de referência, não isolante, nos dois lados das paredes.

A Tabela 7 apresenta as características e as propriedades térmicas de dois tipos de cobertura adotados, considerando os valores de absorvância de 0,5 e 0,15 para as telhas cerâmica e metálica, respectivamente, conforme Dornelles (2021).

Tabela 7 - Coberturas e propriedades térmicas

Tipo	Cobertura	Descrição	U W/(m ² .K)	Ct kJ/(m ² .K)
NÃO ISOLANTE		Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica	2,05	238
ISOLANTE		Laje maciça (10 cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,1 cm Poliuretano 4,0cm	0,55	230

Fonte: INMETRO (2012)

Optou-se por analisar duas localidades com climas distintos: São Joaquim - SC (ZB 1, cidade de clima preponderantemente frio) e Rio de Janeiro – RJ (ZB 8, cidade de clima preponderantemente quente), que são classificados pela planilha PBE Edifica da PROCEL, como: temperatura abaixo de 25° (intervalo 1) e acima de 27° (intervalo 3), respectivamente.

A norma também estabelece características dos elementos transparentes (Tabela 8) e das esquadrias (Tabela 9) para o modelo de referência, parâmetros inseridos no programa computacional.

Tabela 8 – Propriedades de elementos transparentes

Elemento	Fator Solar	Transmitância térmica W/(m ² .K)	Percentual de elementos transparentes (%)
Elementos transparentes	0,87	5,70	17

Fonte: ABNT (2021)

Tabela 9 – Propriedades de esquadrias

Elemento	Condutividade térmica W/(m.K)	Absortância à radiação solar	Emissividade de onda longa	Largura dos perfis da esquadria (mm)
Perfis das esquadrias	56,00	0,58	0,90	50,00

Fonte: ABNT (2021)

Para a estimativa das cargas térmicas geradas no uso da edificação, foram utilizados os dados de ocupação (Tabela 10) e de uso da edificação (Tabela 11) sugeridos pela norma ABNT NBR 15575:2021 para a unidade de referência.

Tabela 10 – Ocupação de áreas da unidade habitacional de referência.

Horário	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: ABNT (2021)

Tabela 11 – Padrão de uso de áreas da unidade habitacional de referência.

Ambiente	Período de uso	Atividade realizada	Calor produzido por unidade de área de superfície corporal (W/m²)	Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m² de área de superfície corporal (W)	Fração radiante
Dormitório	00:00 – 07:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
	22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	
Sala	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30
Uso misto	00:00 – 07:59	Dormindo ou descansando	45	81	0,30
	22:00 – 23:59	Dormindo ou descansando	45	81	
	14:00 – 21:59	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30

Fonte: ABNT (2021)

A norma NBR 15575:2021 considera a carga térmica total da unidade habitacional (CgTTUH) como o somatório da carga térmica de refrigeração (CgTRUH) e da carga térmica de aquecimento (CgTAUH) de cada APP. Como o modelo de unidade habitacional estudado possui apenas um APP, portanto, sua carga térmica total é a carga obtida para esta área.

Para o cálculo da carga CgTT_{UH} foi considerado que o climatizador de ar entraria em operação se a temperatura interna dos ambientes estivesse fora da faixa de conforto para os usuários da edificação: entre 18° C e 26° C.

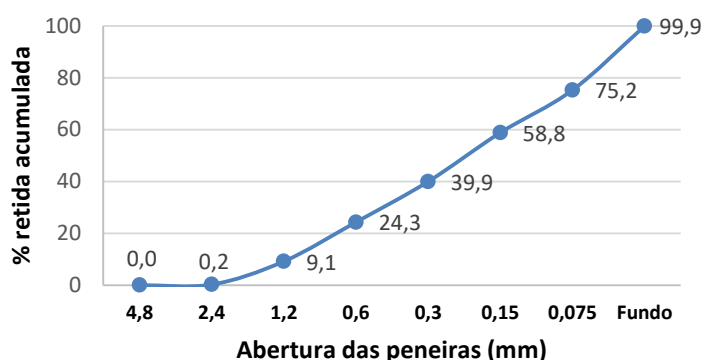
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados em laboratório e dos cálculos realizados. Para cada propriedade das argamassas estudadas é apresentado o valor médio dos corpos de prova. Os resultados individuais são apresentados nos Apêndices de “A” a “F” da presente dissertação.

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A areia de britagem apresentou 25,8% de teor de finos menores que 0,075 mm por lavagem. A seguir apresentam-se os resultados dos ensaios de granulometria e teor de finos da areia de britagem, assim como os valores de massa unitária e massa específica real dos materiais secos (Figura 16 e Tabela 12).

Figura 16 – Curva granulométrica da areia de britagem



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 12 – Massa unitária e massa específica real

Material	Massa unitária (kg/dm ³)	Massa específica real (kg/dm ³)
Areia natural	1,38	2,62
Areia de britagem	1,53	2,70
Cimento	1,01	2,99 ¹
Vermiculita	0,17	2,20 ²

¹ Informado pelo fabricante; ² SILVA *et al*, 2015

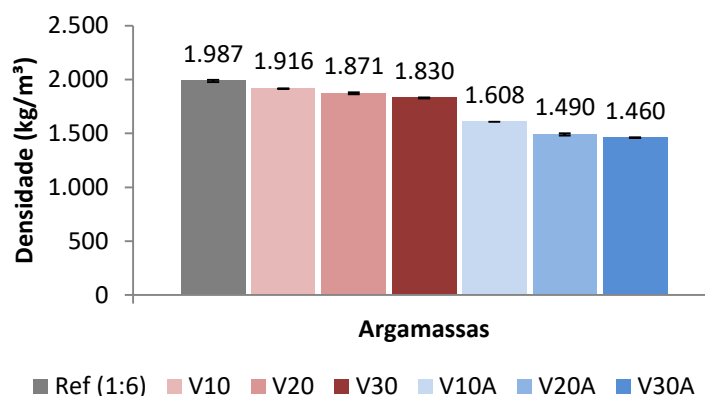
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

4.2.1 - Densidades no estado fresco e endurecido e teor de ar incorporado

A Figura 17 mostra o resultado dos ensaios de densidade das argamassas no estado fresco. Como esperado, há uma diminuição do valor dessa propriedade com o aumento do teor de vermiculita em substituição à areia, que pode ser explicada por sua massa específica real menor que a da areia (SILVA *et al*, 2015). A tendência de redução ocorreu nos dois grupos de argamassas, sem aditivo e com aditivo. No primeiro, a redução máxima de densidade foi de 8% em relação à argamassa de referência e, no segundo, de 26,5%.

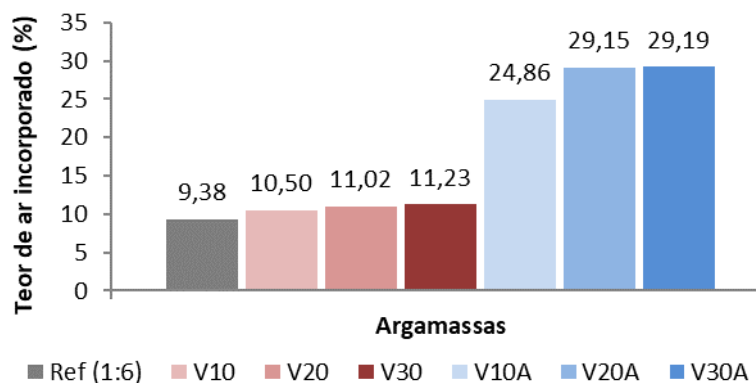
Figura 17 – Densidade no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os resultados do ensaio de teor de ar incorporado encontram-se na Figura 18.

Figura 18 – Resultados de teor de ar incorporado.

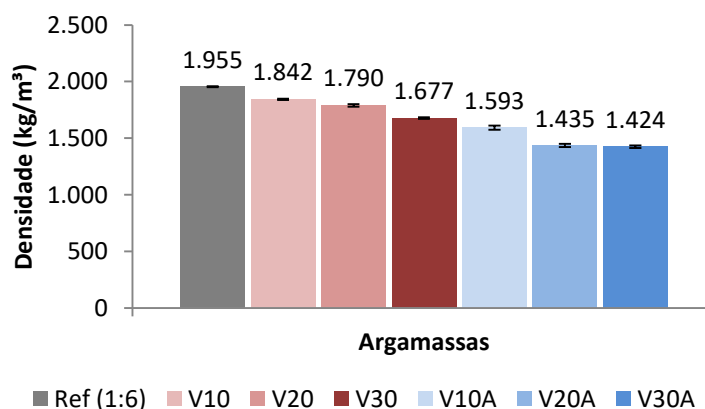


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A presença de vermiculita na composição das argamassas e o aumento do teor desse material provocou aumento do teor de ar incorporado. Comparando-se os dois grupos, pode-se observar que o efeito do uso de aditivo sobressaiu-se e fez o teor de ar incorporado se apresentar com valores um pouco maiores que o dobro daqueles das argamassas sem aditivo. Esses resultados estão condizentes e explicam aqueles encontrados para a densidade das argamassas no estado fresco, anteriormente mostrados (Figura 17).

A Figura 19 apresenta os resultados do ensaio de densidade das argamassas no estado endurecido. Nota-se a mesma tendência da densidade no estado fresco: diminuição da densidade com a inclusão de vermiculita na mistura e com o aumento do teor desse material em substituição à areia. O efeito do uso do aditivo ocorreu da mesma forma como foi observado nos resultados de densidade no estado fresco. Nas argamassas apenas com adição de vermiculita, a maior redução foi de 14% (argamassa V30) em relação à argamassa de referência. Com uso de aditivo, a maior redução foi de 27% (argamassa V30A).

Figura 19 – Densidade no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2.1 - Absorção de água por capilaridade

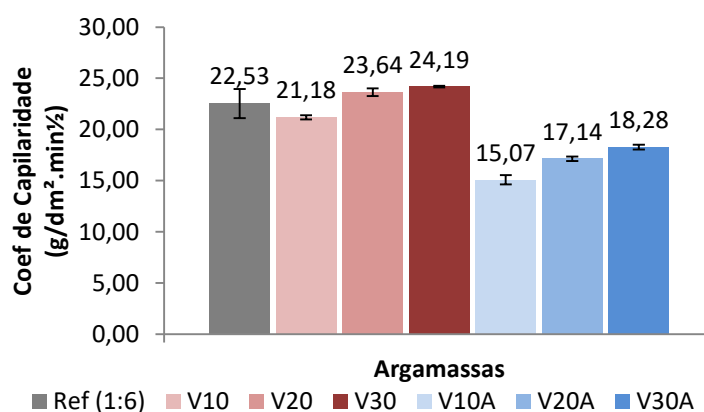
Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade das argamassas são mostrados na Figura 20.

É possível notar que a adição de vermiculita causou aumento do coeficiente de capilaridade em ambos os grupos (sem e com aditivo), justificado pelo aumento da

porosidade da argamassa, diretamente relacionado ao teor de ar incorporado das misturas (Figura 18). No entanto, cada argamassa com uso de aditivo apresentou absorção menor do que a argamassa correspondente do outro grupo. Acredita-se em dois fenômenos para explicar essa ocorrência: o principal, as macrobolhas do sistema de poros impedem a ascensão de água por capilaridade e, o secundário, as bolhas estabilizadas pelo aditivo formaram um sistema de poros distribuídos e predominantemente isolados (MENDES *et al.*, 2019).

Esta hipótese, se confirmada por meio de ensaio específico (porosimetria por intrusão de mercúrio, por exemplo), seria benéfica em revestimentos de paredes de pavimento térreo, onde é comum ocorrer umidade por ascensão capilar de água proveniente do solo.

Figura 20 – Coeficiente de capilaridade

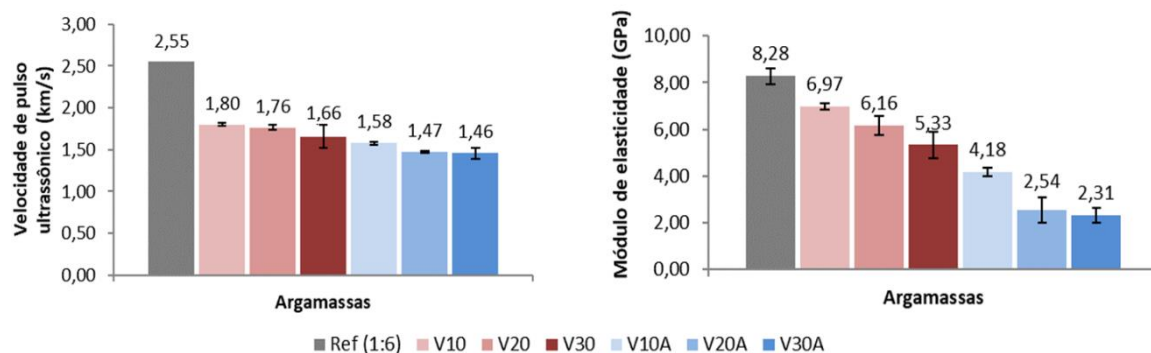


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.2.2 - Velocidade de pulso ultrassônico e módulo de elasticidade dinâmico

A Figura 21 apresenta os resultados de velocidade de pulso ultrassônico e de módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 21 – Velocidade de pulso ultrassônico (placas 30 x 30 x 5 cm) e módulo de elasticidade dinâmico (cp's 4 x 4 x 16 cm).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A velocidade do pulso ultrassônico apresenta tendência de decréscimo da condutividade térmica com adição de vermiculita e aditivo incorporador de ar. A argamassa de referência, a mais densa dentre as estudadas, apresentou a maior velocidade de pulso, enquanto a argamassa mais porosa (V30A) apresentou a menor velocidade. De acordo com Popovics, Rose e Popovics (1990), a velocidade de pulso ultrassônico está relacionada com a refração e reflexão das ondas ultrassônicas quando interagem com as interfaces da argamassa - ar, agregados e produtos de hidratação do cimento. O sistema de poros distribuídos causado pelo aditivo e a vermiculita contribuem para o aumento de interfaces, logo, ocorre o aumento do tempo necessário para a onda atravessar o material, justificando a diminuição da velocidade de pulso ultrassônico.

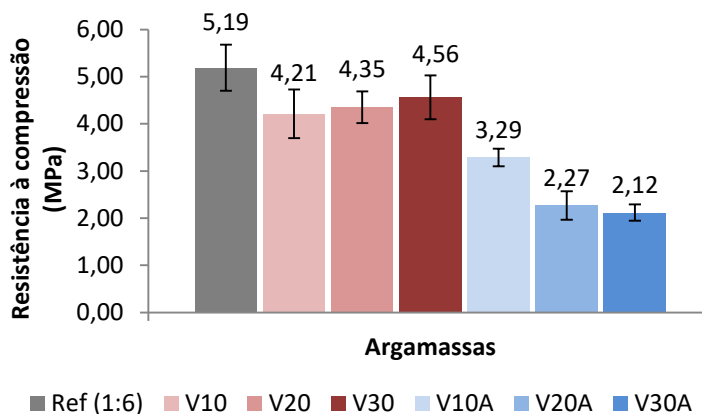
Os resultados de módulo dinâmico, calculados a partir da velocidade do pulso, indicam a relação direta entre as duas grandezas, como esperado. O valor do módulo diminuiu com o aumento do teor de vermiculita em substituição à areia nos dois grupos estudados, sem e com aditivo incorporador de ar. Comparando-se os dois grupos, cada argamassa com aditivo na mistura apresentou valor menor de módulo em relação à sua correspondente sem incorporação de ar. Esses resultados estão em conformidade com os valores de densidade das argamassas endurecidas encontrados, já que o valor do módulo é diretamente proporcional ao valor desta propriedade. Uma vez que a velocidade do pulso diminuiu em meios mais porosos, as argamassas com adição de vermiculita e aditivo incorporador de ar apresentaram menores valores de módulo dinâmico.

Os resultados das argamassas do grupo com aditivo incorporador de ar são cerca de duas vezes menores do que aqueles obtidos para as argamassas correspondentes do grupo sem aditivo. Em relação à argamassa de referência, as maiores reduções dos valores de módulo em cada grupo estudado foram de 35,6 % para a argamassa V30 e de 72,1 % para a argamassa V30A. Pensando-se na ocorrência de fissuração em revestimentos com argamassas cimentícias muito rígidas em fachadas, a diminuição do valor de módulo dinâmico de elasticidade com adição de vermiculita e aditivo incorporador de ar é um resultado interessante, principalmente para os pavimentos superiores de edifícios altos, sujeitos a esforços de vento e deformações por conta de variações higrotérmicas.

4.2.3 - Resistência mecânica

A Figura 22 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Figura 22 – Resistência à compressão



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

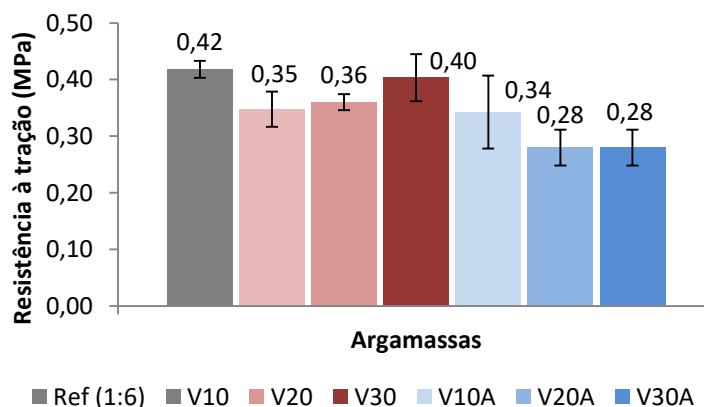
Nota-se que a argamassa de referência, a de menor relação água/cimento, conforme a Tabela 6, apresenta a maior resistência à compressão. Para as demais seis argamassas, o valor de relação a/c adotado para as misturas, em função da trabalhabilidade, foi praticamente igual, variando entre 1,60 e 1,61 para todas elas. A maior redução de resistência à compressão do grupo de argamassas sem aditivo, em relação à argamassa de referência foi de 19% para a argamassa V10 e de 59% para argamassa V30A, do grupo das

argamassas com aditivo. No entanto, observam-se tendências distintas entre as argamassas de ambos os grupos.

No grupo de argamassas sem aditivo identifica-se aumento da resistência à compressão com o aumento do teor de vermiculita: 8% entre as V10 e V30. Acredita-se que a alta absorção de água pelos grãos de vermiculita cause o efeito de fornecer a umidade retida, aos poucos, para a hidratação do cimento. No grupo de argamassa com aditivo, embora esse fenômeno também possa ocorrer, a tendência de diminuição de resistência com aumento do teor de aditivo, uma diminuição de 36% entre as argamassas V30A e V10A, ocorre pela alta porosidade conferida pelos vazios da matriz cimentícia com incorporação de ar.

Os menores valores de resistência à tração (Figura 23) foram encontrados também nas argamassas V10 e V30A. Nota-se que a resistência à tração seguiu a mesma tendência da resistência à compressão, devido à ocorrência dos mesmos fatores. Houve aumento de 14% da resistência entre as argamassas V10 e V30 e redução diminuição de 15% entre as argamassas V30A e V10A.

Figura 23 – Resistência à tração



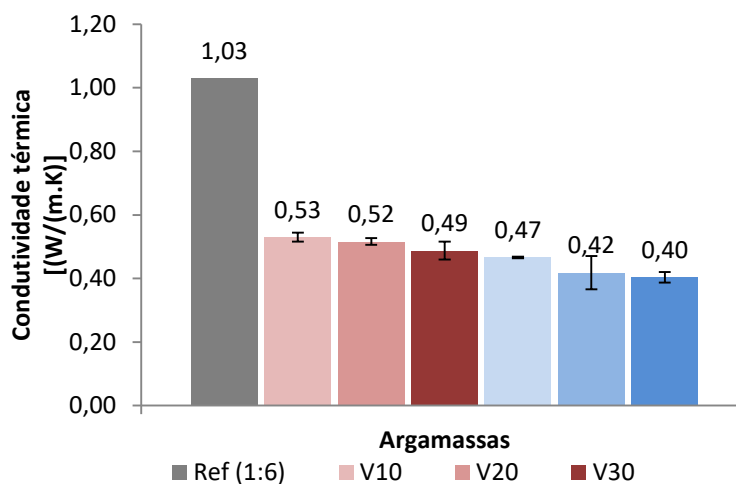
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Vale observar que, de acordo com as barras de erros mostradas nos gráficos, é possível considerar que alguns valores de resistência mecânica encontrados são estatisticamente iguais, por causa dos valores máximos e mínimos possíveis.

4.2.4 - Condutividade térmica

Os resultados de condutividade térmica são apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Condutividade térmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

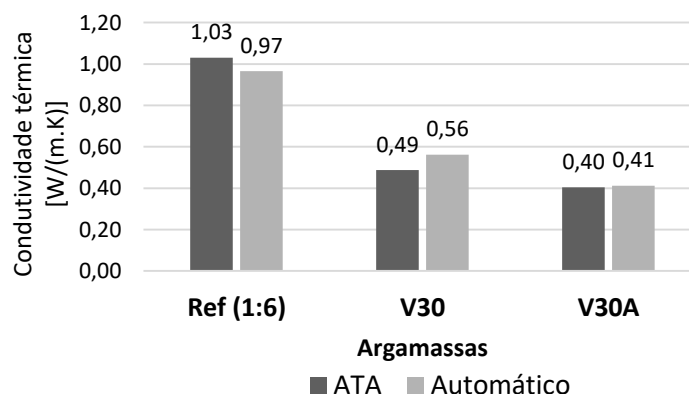
Como previsto, a vermiculita funciona como material isolante térmico, devido ao aprisionamento de ar em seu interior, e confere esta propriedade às argamassas produzidas. Observa-se que a menor adição de vermiculita (argamassa V10) já proporciona 51% de redução da condutividade térmica em comparação com a argamassa de referência, sem vermiculita. Os demais incrementos de vermiculita contribuíram apenas com 1,9% e 5,8% de redução do valor de condutividade para as argamassas V20 e V30, respectivamente, quando comparadas à argamassa V10.

O grupo das argamassas com incorporação de ar seguiu a mesma tendência de diminuição da condutividade das argamassas com aumento do teor de aditivo. Comparando cada argamassa desse grupo com sua correspondente do grupo sem aditivo, os valores de condutividade tiveram redução de 11,3%, 19,2% e 18,4% para as argamassas V10A, V20A e V30A, respectivamente. Desse modo, é possível depreender que houve um efeito sinérgico entre as adições de vermiculita e aditivo.

Na Figura 25 apresentam-se os resultados de condutividade térmica obtidos para três argamassas (Ref., V30 e V30A) em um aparelho comercial, juntamente com os resultados das mesmas argamassas no ATA. Era de se esperar uma pequena diferença entre

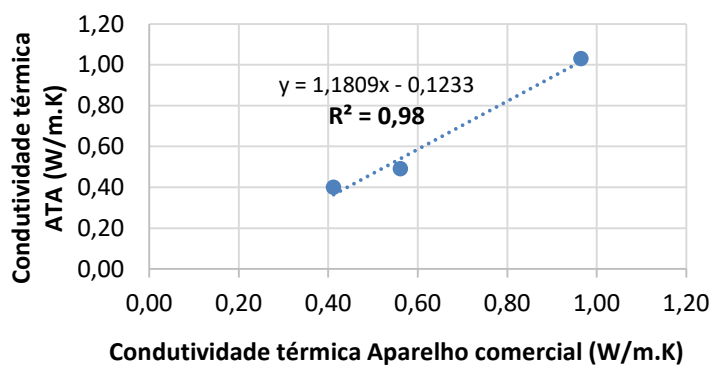
eles, ligada a procedimentos do ensaio, de preparação e temperatura das amostras, entre outros. A diferença muito pequena permitiu observar uma excelente correlação entre os dois ensaios (Figura 26), o que indica o bom funcionamento do ATA para as argamassas estudadas.

Figura 25 - Resultados de condutividade ATA x aparelho comercial



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 26 – Correlação entre resultados de condutividade ATA x aparelho comercial



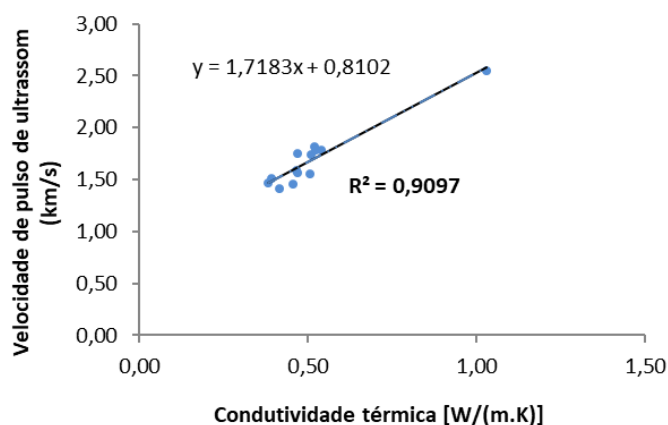
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A Figura 27 apresenta a correlação entre a condutividade térmica medida nas placas de argamassa e a velocidade de pulso ultrassônico obtida nos mesmos corpos de prova.

Mendes *et al* (2020b) estudaram argamassas de cimento Portland com agregados naturais, com agregados derivados de resíduos e com o uso de incorporador de ar e encontraram uma correlação alta entre a condutividade térmica e a velocidade de pulso de ultrassom ($R^2 > 0,9$) e indicaram que argamassas com maior porosidade apresentam menor

velocidade de pulso. Esta relação, ratificada no presente trabalho (Figura 27) enseja uma previsão da condutividade térmica, uma característica nem sempre fácil de ser medida, por meio da velocidade de pulso, uma característica de fácil medição em laboratório.

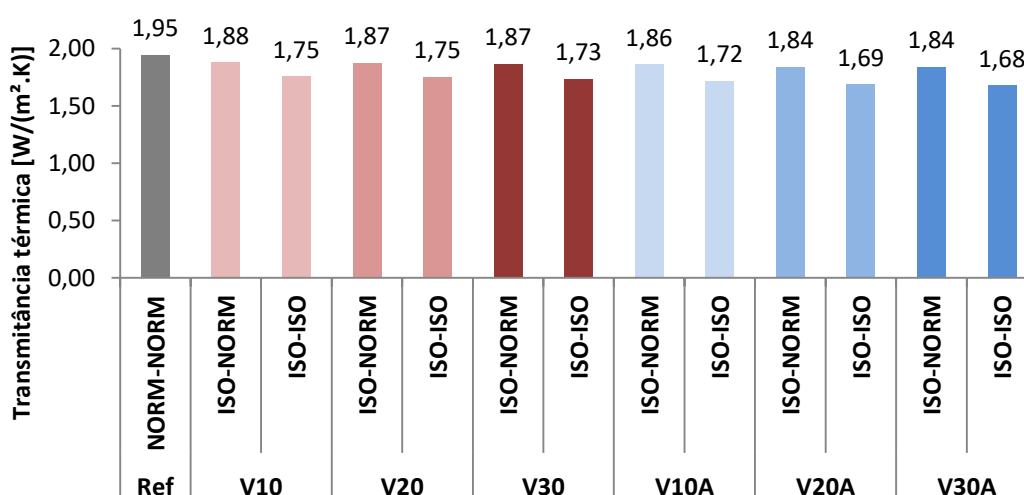
Figura 27 – Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e condutividade térmica



4.3 - TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DAS PAREDES

A Figura 28 apresenta os resultados dos cálculos realizados para obtenção da transmitância térmica das possíveis combinações de soluções construtivas de paredes com as argamassas estudadas, considerando-se paredes de bloco cerâmico de seis furos e 14 cm de espessura, com camadas de argamassa de 2 cm de espessura em ambos os lados.

Figura 28 – Transmitância térmica de paredes



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

É possível observar que, em relação à parede NORM-NORM, sem uso de argamassa isolante, a simples troca da argamassa de referência por uma camada isolante no lado externo da parede (ISO-NORM) resulta em redução do valor de U, como esperado, para todas as argamassas estudadas. Essa redução é maior com uso de argamassa isolante em ambos os lados da parede (ISO-ISO) - para este caso, a redução de U em relação aos casos NORM-NORM e ISO-NORM foi de cerca de 9% e 13%, respectivamente, para todas as argamassas.

Comparando-se as mesmas configurações de paredes, mudando-se apenas o tipo de argamassa isolante, não foi possível detectar, nos resultados de transmitância térmica, grande influência da redução de condutividade térmica com o uso de vermiculita e aditivo incorporador de ar, para os valores estudados.

Vale lembrar que, entre todas as indicações de U para paredes de acordo as zonas bioclimáticas brasileiras, o menor valor é 2,5 w/m².K (Tabela 2). Portanto, se todos os valores calculados para as configurações de paredes estudadas são inferiores a esse valor, mesmo para aquela com camadas não isolantes (NORM-NORM), todas atenderiam às exigências normativas quanto à transmitância térmica. Acredita-se que a adoção da lajota cerâmica tenha contribuído de forma determinante para este quadro e que o papel do revestimento seria eventualmente mais importante com blocos de outros materiais.

4.4 - DESEMPENHO ENERGÉTICO DO LOFT

A Tabela 13 apresenta os resultados da simulação de consumo de energia anual com ar condicionado para manter a temperatura interna do *loft* estudado entre 18°C e 26°C. As configurações com argamassa de referência não isolante nos revestimentos interno e externo das paredes foram as que representaram maior consumo de energia anual, como esperado, em comparação com aquelas em que a simulação foi feita com argamassa isolante, para os dois tipos de cobertura e as duas localidades estudadas. Ressalta-se que esta observação é válida tanto para revestimento com argamassa isolante em apenas um lado da parede quanto para os dois lados.

Tabela 13 – Simulação de eficiência energética

Cobertura	Cidade	Consumo anual de energia (kWh)				
		Revestimento com argamassa normal	Revestimento com argamassa isolante			
		NORM/NORM	NORM/V30	NORM/V30A	V30/V30	V30A/V30A
Isolante ¹	Rio de Janeiro	6.765	6.705	6.676	6.621	6.552
	São Joaquim	2.021	1.970	1.959	1.925	1.922
Não-isolante ²	Rio de Janeiro	9.306	9.263	9.242	9.194	9.137
	São Joaquim	3.172	3.127	3.119	3.102	3.117

¹Cobertura Isolante: U= 0,55 e CT=230

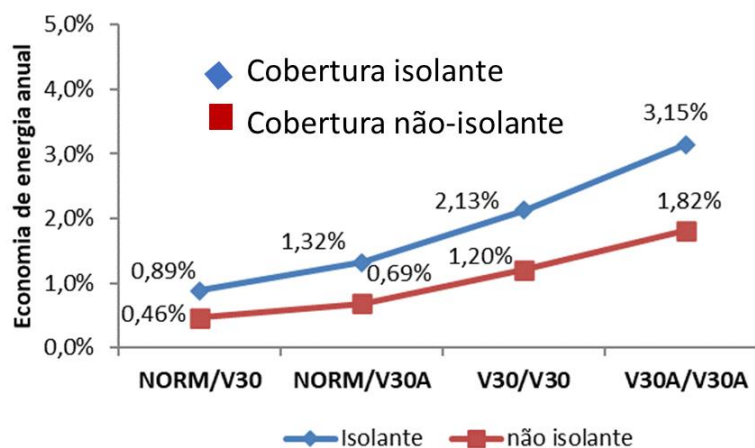
²Cobertura não isolante: U=2,05 e CT= 238

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Foi possível constatar, também, que o consumo anual de energia com ar condicionado para a localidade de clima frio, São Joaquim, é cerca de três vezes menor que o consumo para a cidade de clima quente, Rio de Janeiro, em todas as combinações de cobertura e argamassa analisadas.

A Figura 29 apresenta a redução do consumo energético obtido, em porcentagem, para a cidade do Rio de Janeiro, comparando-se as soluções com argamassa isolante com a situação de referência, cujos valores de consumo anual foram de 6.765 kWh e 9.306 kWh para a cobertura isolante e não isolante, respectivamente.

Figura 29 – Simulação da eficiência energética na cidade do **Rio de Janeiro**.



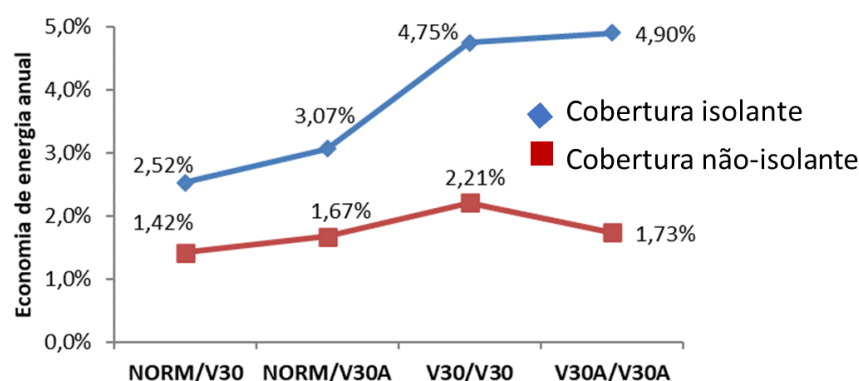
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Como esperado, foi encontrada uma tendência de maior economia de energia com o incremento dos seguintes fatores, na seguinte sequência crescente, para os dois tipos de

cobertura: a) presença de argamassa com vermiculita em um dos lados da parede (NORM/V30); b) uso de aditivo incorporador de ar (NORM/V30A); c) uso de argamassa isolante nos dois lados da parede (V30/V30); d) uso de argamassa com vermiculita e aditivo nos dois lados da parede. As maiores diferenças em relação ao caso de referência foram encontradas para a configuração do *loft* com cobertura isolante. O caso de maior economia representa 3,15% a menos de energia anual gasta com ar condicionado.

A Figura 30 apresenta a redução do consumo energético obtido, em porcentagem, para a cidade de São Joaquim, comparando-se as soluções com argamassa isolante com a situação de referência, cujos valores de consumo anual foram de 2.021 kWh e 3.172 kWh para a cobertura isolante e não isolante, respectivamente.

Figura 30 – Simulação da eficiência energética na cidade de **São Joaquim**.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As mesmas observações feitas para a cidade de clima quente valem para a cidade de São Joaquim. No entanto, o caso de maior economia de energia atingiu o valor de 4,90% para a solução construtiva com argamassa isolante e aditivo em ambos os lados da parede e cobertura isolante, em relação à configuração de referência.

Deve-se destacar que a simulação computacional apontou que o uso de aditivo incorporador melhorou os resultados, principalmente, quando esses revestimentos com características isolantes foram considerados nos dois lados das paredes. Finalmente, observou-se que a cobertura da edificação com características isolantes potencializou a melhoria do seu desempenho de energia.

Em resumo, o uso de vermiculita nas argamassas estudadas e nas configurações construtivas adotadas indicou potencial de economia de energia, porém com valores baixos nas duas localidades analisadas. Vale mencionar que quando se fixa uma determinada tipologia de edificação no estudo, essa condição é restritiva, ou seja, não representa uma condição genérica. Além disso, é importante ressaltar que o desempenho energético de uma edificação é influenciado não só pelas características térmicas de sua envoltória, mas por outros fatores relacionados ao projeto arquitetônico – ventilação cruzada, aberturas e sua orientação – equipamentos elétricos utilizados, uso de energia solar, climatizadores mais ou menos eficientes e hábitos dos usuários da edificação – configuração da temperatura interna condizente com o conforto aceitável para a região e menor uso de equipamentos elétricos.

Outro aspecto importante a ser considerado é que as características térmicas de uma parede podem funcionar de modo muito particular para cada caso. Por exemplo, em uma parede que recebe muita incidência solar no verão no período da tarde, a característica de isolamento pode ser fundamental para o conforto de um usuário que deveria permanecer naquele cômodo durante aquele período.

Deve-se ressaltar, também, que qualquer economia de energia obtida por características da envoltória de uma edificação é trazida de forma perene, isto é, enquanto durar sua vida útil. Essa vantagem poderá perdurar por décadas durante o uso da edificação, independentemente de fatores humanos.

O trabalho procurou inovar através do uso da areia de britagem produzida e comercializada na região de Juiz de Fora-MG. A areia de britagem representa uma solução tecnológica alternativa em relação à areia natural de rio, cada vez mais escassa em áreas próximas a centros urbanos altamente consumidores desse recurso para obras. Além disso, oferece ao setor da construção civil a possibilidade de trabalhar com impacto ambiental controlado, em lugar dos drásticos impactos em leitos de rios e das altas emissões de gases do efeito estufa ligadas ao transporte da areia natural, entre outros problemas. As características granulométricas desse tipo de agregado dependem da natureza da rocha, dos tipos de equipamentos empregados na trituração e da energia de cominuição da rocha, relacionada à velocidade de rotação do equipamento. Além disso, as pedreiras costumam separar tipos de produtos – areias fina, média e grossa – por peneiramento, mais um fator

de variação de características do agregado de uma região ou de uma empresa para outra. Particularmente, a areia fina empregada na presente pesquisa possui alto teor de material fino ($< 0,075$ mm), o que confere características peculiares positivas às argamassas cimentícias com ela produzidas, como trabalhabilidade, compacidade e resistência mecânica. Foram produzidos, portanto, resultados de referência quanto ao comportamento térmico de argamassas produzidas com essa areia, especificamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância do setor de construção civil dentre todos os ramos de atividades humanas no consumo de energia elétrica, na emissão de gases do efeito estufa e no uso de recursos naturais em todos tem exigido cada vez mais pesquisas na área de materiais de construção voltadas para o desempenho térmico da envoltória das edificações.

Na presente pesquisa buscou-se trabalhar com melhorias desse sistema usando-se, na composição de argamassas cimentícias de revestimento de paredes de alvenaria, um agregado local, a areia de britagem da região de Juiz de Fora – MG, e a vermiculita expandida, muito usada em compósitos cimentícios isolantes e de fácil obtenção no mercado brasileiro. Também foi estudado o uso de aditivo incorporador de ar, bastante presente na tecnologia de concretos e argamassas e de reconhecidos efeitos benéficos na trabalhabilidade das misturas, como elemento cuja presença nas argamassas teria bom potencial para incrementar suas propriedades isolantes.

A adição de vermiculita e o uso de incorporador de ar trouxeram, como esperado, redução de valores de resistência mecânica que, no entanto, permaneceram em faixas que não acarretariam prejuízos de desempenho, em se tratando de camada de revestimento. A redução de valores de módulo de elasticidade, também esperada, pode ser avaliada como um aspecto positivo, mas que merece interpretação de acordo com cada caso de aplicação em obras, uma vez que a norma brasileira de requisitos de argamassa de revestimento traz, atualmente, faixas de valores para alturas diferentes dos edifícios – para pavimentos mais altos recomendam-se valores menores de módulo.

Os ensaios de condutividade térmica realizados no aparelho ATA, desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção da UFJF, mostraram, a partir da adição de vermiculita, diminuição dos valores dessa propriedade em cerca de 50% do valor encontrado para a argamassa de referência não isolante. Alguns desses resultados foram confirmados por realização de ensaios em um aparelho comercial.

Como mencionado anteriormente na presente dissertação, outros autores afirmam que a condutividade térmica da camada de revestimento de paredes deve ser combinada com diferentes fatores e estratégias construtivas para produzir melhores efeitos no desempenho térmico de edificações. Foram realizadas, portanto, simulações

computacionais para avaliar o desempenho energético de um *loft* de 50 m² de área construída, combinando-se a aplicação teórica de revestimentos de paredes de blocos cerâmicos com as argamassas de características térmicas obtidas nos ensaios, variando o tipo de cobertura – isolante e não isolante. Foi avaliado o consumo de energia anual com uso de aparelho de ar condicionado em uma cidade de clima quente (Rio de Janeiro- RJ) e em uma de clima frio (São Joaquim – SC), considerando-se manter a construção em uma faixa de temperatura entre 18 °C e 25 °C. Os resultados mostraram maior economia de energia com as argamassas mais isolantes nos dois lados das paredes para edificação com cobertura isolante. A maior economia anual encontrada foi de 3,15% para o Rio de Janeiro (ZB 8) e de 4,90% para São Joaquim (ZB 1). Conclui-se, portanto, que, para os casos estudados, apenas a diminuição de condutividade térmica de argamassas não é capaz de melhorar o desempenho térmico da edificação de forma importante, em termos de economia de energia. Vale destacar, no entanto, que toda economia de energia obtida por características da envoltória de uma edificação acontece de forma perene, isto é, durante toda a sua vida útil. Esse ganho ambiental poderá perdurar, portanto, por décadas.

A área de materiais de construção é mais uma a contribuir em estudos de desempenho térmico de edificações de abordagem multidisciplinar, que combinem diferentes soluções construtivas com estratégias de projeto arquitetônico em favor da sustentabilidade, todas somadas a fatores humanos de uso e comportamento que interferem no resultado ao longo de toda a vida útil das construções.

Para avanços em trabalhos futuros similares nessa área, sugere-se investigar compósitos mais isolantes para revestimento, com condutividade térmica da ordem de 0,2 W/(m.K). Para a caracterização física das argamassas, sugere-se a complementação com o estudo de outras propriedades, como durabilidade e resistência de aderência. Para as simulações computacionais, incrementar outros fatores na envoltória das edificações, como adoção de vidros isolantes, variação de tipos de blocos de alvenaria, variação do *layout* da edificação, além de estudos com cômodos contíguos e para outras zonas bioclimáticas e, finalmente, considerar outras características térmicas das argamassas. Sugere-se, para a área de projeto, considerar a combinação de estratégias de ventilação cruzada, ventilação seletiva, aberturas e sombreamento, entre outras.

Por fim, vale lembrar que todo consumo de energia pode ser traduzido em emissões de gases do efeito estufa e que a orientação dos maiores especialistas do planeta no tema é no sentido de reduzi-las. “Nosso mundo precisa de ação climática em todas as frentes – tudo, em todos os lugares, ao mesmo tempo” (Antonio Guterres, secretário-geral das Nações Unidas, por ocasião da divulgação de relatório síntese do IPCC, Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU, do seu atual ciclo de avaliações sobre o aquecimento global, em março de 2023).

REFERÊNCIAS

ADESINA, A. Overview of the influence of waste materials on the thermal conductivity of cementitious composites. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, p. 100046, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Vermiculita Sumário Mineral 2018**. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/vermiculita_sm_2018 . (Acessado em 11 março 2023).

AL-AWSH, W. A. *et al.* Experimental and numerical investigation on innovative masonry walls for industrial and residential buildings. **Applied Energy**, v. 276, p. 115496, 2020.

ASADI, I. *et al.* Thermal conductivity of concrete—A review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81-93, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT 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. ABNT, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro. ABNT, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido Rio de Janeiro. ABNT, 2005c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15220-2**: Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo. Rio de Janeiro. ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15220-3**: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. ABNT, 2005d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro. ABNT, 2005e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575-1:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Brasil. ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575- 4:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Brasil. ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15575- 5:** Edificações habitacionais — Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas. Brasil, ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15630:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro. ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro. ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. ABNT, 2021d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro. ABNT, 2022b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NM 35:** Agregados leves para concreto estrutural – Especificação. Rio de Janeiro. ABNT, 1995.

AZHAR, N. A. S. M. *et al.* Effect of low inclusion of palm oil fuel ash (POFA) as a partially sand replacement to the performance of mortar. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 7, n. 1, p. 41, 2022.

BECKER, P. F. B.; EFFTING, C.; SCHACKOW, A. Lightweight thermal insulating coating mortars with aerogel, EPS, and vermiculite for energy conservation in buildings. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104283, 2022.

BRASIL, Ministério de Minas e energia e Empresa de pesquisa energética. **BALANÇO ENERGÉTICO:** Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2022.

BRIGAUD, F; VASSEUR, G. Mineralogy, porosity and fluid control on thermal conductivity of sedimentary rocks. **Geophysical Journal International**, v. 98, n. 3, p. 525-542, 1989.

CAIXA. Selo Azul. Boas **Práticas para Habitação mais sustentável**. São Paulo: Páginas e Letras Editora e Gráfica. 2010.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Florianópolis: PROCEL. 2020.

CHEN, Y. *et al.* Impacts of climate change and building energy efficiency improvement on city-scale building energy consumption. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107646, 2023.

CHRISTIDIS, P. *et al.* Research and innovation paving the way for climate neutrality in urban transport: Analysis of 362 cities on their journey to zero emissions. **Transport Policy**, 2024.

CINTRA, C. L. D. *et al.* Masonry light weight mortars containing vermiculite and rubber crumbs of recycled tires. **Interceram - International Ceramic Review**, v. 63, p. 40-43, 2014.

CORDEIRO, G. C.; ALVARENGA, L. M. S. C.; ROCHA, C. A. A. Rheological and mechanical properties of concrete containing crushed granite fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p.766–773, 2016.

COSTA, J. A. C. *et al.* Microstructural design and thermal characterization of composite diatomite-vermiculite paraffin-based form-stable PCM for cementitious mortars. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117167, 2020.

DE ARAÚJO, E. S. *et al.* A atividade de mineração de areia e impactos ambientais no rio Acre. **UÁQUIRI-Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre**, v. 1, n. 1, 2019.

DESOGUS, G.; MURA, S.; RICCIU, R. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2613-2620, 2011.

DIÓGENES, A. G.; CABRAL, A. E. B. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM AREIA DE BRITAGEM DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, 12, 2017. Anais. São Paulo: SBTA, 2017. Disponível em: <https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/580>. Acesso em: 27 jul. 2023.

DONG, X. *et al.* Effects of aggregate gradation and polymer modifiers on properties of cement-EPS/vitrified microsphere mortar. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 255-260, 2014.

DORNELLES, K. A. **Biblioteca de absorção de telhas: base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios.** . Universidade de São Paulo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, 2021. DOI: Disponível em: www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/571 . Acesso em 26 julho. 2023.

DU, L; FOLLIARD, K. J. Mechanisms of air entrainment in concrete. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 8, p. 1463-1471, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço energético nacional (BEN) 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro, EPE, 2022.

ERBA, L. A. **Influência da substituição parcial de areia natural por areia de britagem em argamassas de revestimento: características, propriedades e condutividade térmica.** 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGARQ), Faculdade de Arquitetura Artes Comunicação e Design, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, [S. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/217727>. Acesso em: 26 jul. 2023.

EREN, Ö. *et al.* Experimental Study on Engineering and Thermal Properties of Mortar and Plaster Produced With Pumice Aggregate. **Journal of Testing and Evaluation**, v.43, n 6, 2014.

GARCIA, D. R. **Desenvolvimento de aparato térmico alternativo de baixo custo para medição da condutividade térmica de materiais de construção isolantes.** 2021. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PEC), Faculdade de engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, [S. l.], 2021. DOI <https://doi.org/10.34019/ufjf/di/2021/00406>. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/13879>. Acesso em: 26 jul. 2023

GOMES, M. G. *et al.* Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 696-705, 2018.

GUILHERME, D. D. P.; CABRAL, K. C.; SOUZA, W. R. M. Study of the use of expanded vermiculite in the mechanical properties of light mortars. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

GÜNDÜZ, L; KALKAN, Ş. O. A technical evaluation on the determination of thermal comfort parametric properties of different originated expanded and exfoliated aggregates. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, p. 1-4, 2019.

HORMA, O. *et al.* A. Thermal performance study of a cement-based mortar incorporating EPS beads. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, p. 98. 2022.

HOSNY, W. M. *et al.* Enhancing the Thermal Insulation Behavior of Cement Mortar Using Waste Additives. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 66, n. 10, p. 415-422, 2023.

INSTITUTO DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Requisitos Técnicos da Qualidade para o nível de Eficiência Energética Edificações – RTQ-R. **Portaria n° 18, 16 jan.** 2012.

KAZMIERCZAK, C. S.; ROSA, M.; ARNOLD, D. C. M. Influência da adição de fíler de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 7–19, 2016.

KHAN, M. I. Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. **Building and Environment**, v. 37, n. 6, p. 607-614, 2002.

KHERRAF, L. *et al.* Comparative study on the performance of sand-based mortars from marble, floor tile and cinder block waste. **Journal of Building Engineering**, v. 45, p. 103433, 2022.

KIM, K. *et al.* An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 3, p. 363-371, 2003.

KOKSAL, F.; GENCEL, O.; KAYA, M. Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 88, p. 175-187, 2015.

KOKSAL, F.; MUTLUAY, E.; GENCEL, O. Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117789, 2020.

KOKSAL, F. *et al.* The effects of cement type and expanded vermiculite powder on the thermo-mechanical characteristics and durability of lightweight mortars at high temperature and RSM modelling. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p.709, 2021.

KOKSAL, F. *et al.* Insulating and fire-resistance performance of calcium aluminate cement based lightweight mortars. **Construction and Building Materials**, v. 362, p. 129759, 2023.

KONG, X; LU, S; WU, Y. A review of building energy efficiency in China during “Eleventh Five-Year Plan” period. **Energy policy**, v. 41, p. 624-635, 2012.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**, Rio de Janeiro: ELETROBRÁS/PROCEL, 2017.

LEE, J.; CHOI, S. Effect of replacement ratio of ferronickel slag aggregate on characteristics of cementitious mortars at different curing temperatures. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01882, 2023.

LI, H.; LONG, W; KHAYAT, K. H. Efficient recycling of waste rubber in a sustainable fiber-reinforced mortar and its damping and energy dissipation capacity. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, p. 104963, 2023.

LIMA FILHO, M. R. F. *et al.* Supercritical Carbonation of Lightweight Aggregate Containing Mortar: Thermal Behavior. **Key Engineering Materials**, v. 600, p. 345-356, 2014.

MARTÍNEZ-MOLINA, A. *et al.* Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 61, p. 70-85, 2016.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de metamodelos para a avaliação do nível de eficiência energética da envoltória em edificações residenciais**. In: Congresso Sudamericano de Simulación de Edificios, 5, 2018. Valparaiso (Chile): IBPSA LATAM, 2018. Libro de Artículos. Disponível em: <http://www.ibpsa.org.br/misc/documentos/proceedingsIBPSALatam/036.pdf>. Acesso em 12 março. 2023.

MENDES, J. C. *et al.* Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 22, p. 1569-1586, 2020a.

MENDES, J. C. *et al.* Correlation between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity of cement-based composites. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 39, p. 1-10, 2020b.

MENDES, V. F. *et al.* **Sensitivity analysis of coating mortars according to their specific heat, specific gravity, thermal conductivity, and thickness in contribution to the global thermal performance of buildings**. Sustainable Materials and Technologies, v. 31, 2022.

MENDES, J. C. **Viabilidade técnica do uso de linear alquil benzeno sulfonato de sódio como aditivo incorporador de ar para matrizes cimentícias**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MENDES, J. C. *et al.* Macroporous mortars for laying and coating. **Revista de la Construcción [online]**, v.18, n.1, p.29-41, 2019.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª Edição. Porto Alegre: Editora Bookman, 2015.

OLIVEIRA, N. S. **Automatização da análise do desempenho termo energético das envoltórias de edificações residenciais a partir da integração BIM-VPL**. 2022. 231 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

OLIVEIRA, R. D.; DE SOUZA, R. V. G.; DA SILVA, R. M. Issues to be improved on the thermal performance standards for sustainable buildings consolidation: an overview of Brazil. **Energy Procedia**, v. 111, p. 71-80, 2017.

PALOMAR, I.; BARLUENGA, G.; PUENTES, J. Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 306-314, 2015.

PHILIP, P.; FAGBENLE, L. Design of Lee’s disc electrical method for determining thermal conductivity of a poor conductor in the form of a flat disc. **International Journal of Innovation and Scientific Research** .2014.

POPOVICS, S; ROSE, J. L.; POPOVICS, J. S. The behaviour of ultrasonic pulses in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 20, n. 2, p. 259-270, 1990.

POWERS, T. **The Properties of Fresh Concrete**. New York: John Wiley & Sons, 1968.

RAMADON, L. F. F. Extração ilegal de areia: o faturamento no Brasil e no mundo. **Revista Brasileira de Ciências Policiais**, v. 12, n. 6, p. 281-313, 2021.

RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material—A short guide for Civil Engineer. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 53-62, 2016.

RASHIDI, S; ESFAHANI, J. A.; KARIMI, N. Porous materials in building energy technologies—A review of the applications, modelling and experiments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 229-247, 2018.

ROMANO, R. C. O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi:10.11606/T.3.2013.tde-27122013-113747. Acesso em 31 julho. 2023.

SENF, L. *et al.* Assessment of the single and combined effect of superabsorbent particles and porogenic agents in nanotitania-containing mortars. **Energy and Buildings**, v. 127, p. 980-990, 2016.

SILVA, A. C. *et al.* TESTES DE SEDIMENTAÇÃO COM FINOS DE VERMICULITA. **HOLOS**, v. 5, p. 44-51, 2015.

SILVA, F. S. B. **Condutibilidade térmica de argamassas térmicas com EPS e aerogel de sílica**. Lisboa: Dissertação - Instituto Técnico Superior de Lisboa, 2017.

SOUZA, J. A. **Transferência de calor**. São Paulo: Editora Pearson, 2016.

SUVOROV, S. A.; SKURIKHIN, V. V. Vermiculite—a promising material for high-temperature heat insulators. **Refractories and industrial ceramics**, v. 44, n. 3, p. 186-193, 2003.

TAYLOR, N. W. *et al.* Evaluating ten years of energy performance of HERS-rated homes in Alachua County, Florida. **Energy Efficiency**, v. 7, p. 729-741, 2014.

TOKARSKI, R. B. **Comportamento da areia de britagem de rocha calcária na argamassa de revestimento**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil, Universidade tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

TOKARSKI, R. B. *et al.* Behavior of fresh-laid mortars composed of crushed limestone sand and natural sand. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 23, 2018.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Emissions Gap Report 2022: The Closing Window—Climate Crisis Calls for Rapid Transformation of Societies**. Nairobi. 2022.

XIONG, B. *et al.* Mortar with Substituted Recycled PET Powder: Experimental Characterization and Data-Driven Strength Predictive Models. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 35, n. 9, p. 04023312, 2023.

ZHANG, J; CHEN, B; YU, F. Preparation of EPS-based thermal insulation mortar with improved thermal and mechanical properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 9, p. 04019183, 2019.

ZHANG, Y. *et al.* Thermally adaptive walls for buildings applications: A state of the art review. **Energy and Buildings**, p. 112314, 2022.

APÊNDICE A - Densidade das argamassas no estado fresco e teor de ar incorporado

Densidade de argamassa no estado fresco - R0

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,7415	0,000375	1.979,39
2	0,7452	0,000374	1.993,79
Média	0,7434	0,000374	1.986,58

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V10

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,7171	0,000375	1.914,26
2	0,7165	0,000374	1.917,01
Média	0,7168	0,000374	1.915,63

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V20

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,6987	0,000375	1.865,14
2	0,7017	0,000374	1.877,41
Média	0,7002	0,000374	1.871,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V30

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,6844	0,000375	1.826,97
2	0,6852	0,000374	1.833,26
Média	0,6848	0,000374	1.830,11

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V10A

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,6025	0,000375	1.608,34
2	0,6011	0,000374	1.608,25
Média	0,6018	0,000374	1.608,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V20A

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,5554	0,000375	1.482,61
2	0,5597	0,000374	1.497,49
Média	0,5576	0,000374	1.490,04

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Densidade de argamassa no estado fresco - V30A

Corpo de prova	Massa de argamassa (kg)	Volume do recipiente (m ³)	Densidade (kg/m ³)
1	0,5474	0,000375	1.461,25
2	0,5451	0,000374	1.458,42
Média	0,5463	0,000374	1.459,84

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Cálculo de teor de ar incorporado nas argamassas

Traço (volume)	Massa de cimento (g)	Massa de vermiculita (g)	Massa de areia (g)	Massa de água (g)	Densidade (kg/m ³)	Densidade teórica (kg/m ³)	Teor de ar (%)
Ref (1:6)	1.000,00	0,00	8.295,65	1.532,57	1.986,58	2.199,74	9,69
V10	1.000,00	93,91	7.466,09	1.608,86	1.915,63	2.147,95	10,82
V20	1.000,00	187,83	6.636,52	1.606,57	1.871,27	2.111,06	11,36
V30	1.000,00	281,74	5.806,96	1.602,86	1.830,11	2.069,86	11,58
V10a	1.000,00	93,91	7.466,09	1.608,86	1.608,30	2.147,95	25,12
V20a	1.000,00	187,83	6.636,52	1.606,57	1.490,04	2.111,06	29,42
V30a	1.000,00	281,74	5.806,96	1.602,86	1.459,84	2.069,86	29,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE B – Densidade no estado endurecido e módulo de elasticidade dinâmico

Ref (1:6)

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (µs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m³)	Coefficiente de Poisson	Ed (GPa)
1	499,60	75,30	160	2,12	1.951,56	0,20	7,93
2	501,20	72,40	160	2,21	1.957,81	0,20	8,61
3	500,30	73,70	160	2,17	1.954,30	0,20	8,29
Média					1.955	Média	8,28

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V10

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (µs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m³)	Coefficiente de. Poisson	Ed (GPa)
1	469,90	78,80	160	2,03	1.835,55	0,20	6,81
2	472,20	77,40	160	2,07	1.844,53	0,20	7,09
3	472,50	77,90	160	2,05	1.845,70	0,20	7,01
Média					1.842	Média	6,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V20

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (µs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Dens. (kg/m³)	Coefficiente de. Poisson	Ed (GPa)
1	460,80	84,60	160	1,89	1.800,00	0,20	5,79
2	455,20	81,90	160	1,95	1.778,13	0,20	6,11
3	458,90	79,30	160	2,02	1.792,58	0,20	6,57
Média					1.790	Média	6,16

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V30

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (µs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m³)	Coefficiente de. Poisson	Ed (GPa)
1	427,50	82,20	160	1,95	1.669,92	0,20	5,69
2	428,90	90,70	160	1,76	1.675,39	0,20	4,69
3	431,20	83,20	160	1,92	1.684,38	0,20	5,61
Média					1.677	Média	5,33

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V10A

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (μs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m^3)	Coefficiente de Poisson	Ed (GPa)
1	403,00	91,50	160	1,75	1.574,22	0,20	4,33
2	418,40	93,40	160	1,71	1594,69	0,20	4,32
3	412,30	96,50	160	1,66	1.610,55	0,20	3,98
Média					1.593	Média	4,21

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V20A

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (μs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m^3)	Coefficiente de Poisson	Ed (GPa)
1	368,80	102,30	160	1,56	1.440,63	0,20	3,17
2	363,30	119,10	160	1,34	1.419,14	0,20	2,31
3	370,20	124,60	160	1,28	1.446,09	0,20	2,15
Média					1.435	Média	2,54

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V30A

Corpo de prova	Massa (g)	Leitura (μs)	Distância (mm)	Velocidade (km/s)	Densidade (kg/m^3)	Coefficiente de Poisson	Ed (GPa)
1	365,58	125,50	160	1,27	1.428,05	0,20	2,09
2	366,70	122,70	160	1,30	1.432,42	0,20	2,19
3	361,62	110,70	160	1,45	1.412,58	0,20	2,66
Média					1.424	Média	2,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE C - Absorção de água por capilaridade

Ref (1:6)

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	502,200	516,20	539,40	23,20	0,88	2,33
Cp 2	504,800	518,60	539,50	20,90	0,86	2,17
Cp 3	500,900	516,30	539,80	23,50	0,96	2,43
Média	502,633	517,03	539,57	22,53	0,90	2,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V10

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	463,890	475,39	496,78	21,39	0,72	2,06
Cp 2	465,360	478,30	499,30	21,00	0,81	2,12
Cp 3	465,610	478,66	499,80	21,14	0,82	2,14
Média	464,953	477,45	498,63	21,18	0,78	2,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V20

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	456,500	468,70	491,92	23,22	0,76	2,21
Cp 2	453,800	467,60	491,40	23,80	0,86	2,35
Cp 3	451,100	463,90	487,80	23,90	0,80	2,29
Média	453,800	466,73	490,37	23,64	0,81	2,29

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V30

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	420,210	434,45	458,54	24,09	0,89	2,40
Cp 2	420,580	434,44	458,66	24,22	0,87	2,38
Cp 3	423,800	437,92	462,17	24,25	0,88	2,40
Média	421,530	435,60	459,79	24,19	0,88	2,39

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V10A

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	402,060	411,95	426,50	14,55	0,62	1,53
Cp 2	417,430	427,18	442,56	15,38	0,61	1,57
Cp 3	414,640	425,66	440,94	15,28	0,69	1,64
Média	411,377	421,60	436,67	15,07	0,64	1,58

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V20A

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	366,410	377,47	394,68	17,21	0,69	1,77
Cp 2	361,580	371,98	388,87	16,89	0,65	1,71
Cp 3	370,160	380,92	398,24	17,32	0,67	1,76
Média	366,050	376,79	393,93	17,14	0,67	1,74

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

V30A

Corpo de prova	Massa inicial (g)	Massa 10 min (g)	Massa 90 min (g)	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	Absorção 10 min (g/cm ²)	Absorção 90 min (g/cm ²)
Cp 1	361,940	373,46	391,65	18,19	0,72	1,86
Cp 2	363,000	374,45	392,99	18,54	0,72	1,87
Cp 3	358,110	368,65	386,75	18,10	0,66	1,79
Média	361,017	372,19	390,46	18,28	0,70	1,84

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE D - Resistência mecânica

Resistência à tração por flexão - Ref (1:6)

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,65	0,41	0,52
2	0,64	0,4	0,36
3	0,7	0,44	0,25
4	0,66	0,42	0,61
5	0,68	0,42	0,62
Média	0,67	0,42	0,47
Desvio padrão	0,02	0,01	0,16
Coef. de variação	3,62%	3,55%	34,34%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V10

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,56	0,35	0,44
2	0,50	0,32	0,54
3	0,63	0,39	1,14
4	0,53	0,33	0,61
Média	0,56	0,35	0,68
Desvio padrão	0,06	0,13	0,22
Coef. de variação	10,03%	3,55%	34,34%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V20

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,57	0,36	0,30
2	0,54	0,34	0,61
3	0,57	0,36	0,81
4	0,61	0,38	0,83
5	0,57	0,36	0,39
Média	0,57	0,36	0,59
Desvio padrão	0,04	0,03	0,33
Coef. de variação	7,39%	8,41%	61,74%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V30

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,60	0,37	0,78
2	0,63	0,39	0,66
3	0,73	0,45	0,56
Média	0,65	0,40	0,67
Desvio padrão	0,04	0,03	0,14
Coef. de variação	5,27%	5,28%	21,37%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V10A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,41	0,26	1,61
2	0,64	0,40	0,73
3	0,67	0,42	0,59
4	0,47	0,30	0,52
5	0,41	0,25	0,58
Média	0,52	0,33	0,81
Desvio padrão	0,13	0,08	0,51
Coef. de variação	24,45%	23,69%	62,77%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V20A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,47	0,29	0,58
2	0,44	0,28	0,60
3	0,43	0,27	0,66
Média	0,45	0,28	0,61
Desvio padrão	0,02	0,01	0,05
Coef. de variação	4,91%	4,69%	9,08%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à tração por flexão - V30A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1	0,39	0,24	0,78
2	0,49	0,30	0,76
3	0,49	0,31	1,08
4	0,44	0,27	0,88
Média	0,45	0,28	0,88
Desvio padrão	0,05	0,03	0,15
Coef. de variação	10,58%	11,29%	16,73%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - Ref (1:6)

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1b	9,01	5,63	1,57
2a	8,5	5,32	1,6
2b	8,99	5,62	1,76
3a	8,48	5,3	1,88
3b	8,29	5,18	1,87
4a	9,05	5,66	1,95
4b	9,1	5,69	1,55
5a	7,96	4,97	1,68
5b	7,63	4,77	1,38
6a	7,25	4,53	1,72
6b	7,05	4,41	1,68
Média	8,30	5,19	1,69
Desvio padrão	0,74	0,46	0,17
Coef. de variação	8,92%	8,93%	9,88%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V10

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1a	7,07	4,42	1,17
1b	6,90	4,31	1,20
2a	7,45	4,66	1,34
2b	7,52	4,70	1,50
3a	7,61	4,75	1,86
4a	7,36	4,60	1,37
4b	7,27	4,54	1,38
5a	5,91	3,70	1,11
5b	5,93	3,70	1,15
6a	5,63	3,52	1,78
6b	5,51	3,44	1,89
Média	6,74	4,21	1,43
Desvio padrão	0,82	0,51	0,29
Coef. de variação	12,19%	12,19%	20,23%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V20

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1a	6,92	4,32	1,05
1b	6,96	4,35	1,31
2a	6,94	4,34	1,05
2b	7,25	4,53	1,16
3a	7,30	4,56	0,86
3b	7,61	4,76	1,00
4a	7,36	4,60	0,86
4b	7,42	4,64	0,95
5a	6,84	4,28	1,50
5b	7,09	4,43	1,48
6a	5,96	3,73	1,37
6b	5,88	3,68	1,39
Média	6,96	4,35	1,17
Desvio padrão	0,54	0,34	0,24
Coef. de variação	7,74%	7,71%	20,23%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V30

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
1a	8,18	5,11	1,56
1b	8,12	5,08	1,73
2a	8,12	5,08	1,67
2b	8,24	5,15	1,62
3a	7,11	4,45	2,18
3b	7,01	4,38	1,78
4a	7,39	4,62	0,92
4b	6,73	4,20	0,98
5a	6,84	4,28	1,26
5b	7,39	4,62	1,31
6a	6,31	3,94	1,75
6b	6,13	3,83	1,42
Média	7,30	4,56	1,52
Desvio padrão	0,74	0,46	0,36
Coef. de variação	10,14%	10,17%	23,61%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V10A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
2a	5,30	3,31	1,27
2b	5,61	3,50	0,99
3a	5,08	3,17	1,71
3b	5,39	3,37	1,63
4a	4,77	2,98	0,87
4b	5,45	3,40	0,92
Média	5,27	3,29	1,23
Desvio padrão	0,30	0,19	0,37
Coef. de variação	5,69%	5,66%	29,84%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V20A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
2a	4,11	2,57	1,62
2b	4,41	2,76	1,66
3a	3,95	2,47	1,00
3b	4,38	2,74	0,99
4a	3,20	2,00	1,47
4b	3,31	2,07	1,46
5a	3,05	1,91	1,54
5b	3,11	1,94	1,25
6a	3,13	1,95	1,10
6b	3,68	2,30	1,27
Média	3,63	2,27	1,34
Desvio padrão	0,54	0,34	0,25
Coef. de variação	14,94%	15,01%	18,68%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Resistência à compressão - V30A

Corpo de prova	Força (kN)	Tensão (MPa)	Deformação (mm)
2b	3,15	1,97	1,55
3a	3,30	2,06	1,44
3b	3,18	1,98	1,55
4a	3,59	2,24	1,04
4b	3,87	2,42	0,83
5a	3,56	2,22	1,35
5b	3,63	2,27	1,63
6a	3,25	2,03	1,18
6b	3,02	1,88	1,07
Média	3,39	2,12	1,29
Desvio padrão	0,28	0,18	0,28
Coef. de variação	8,22%	8,31%	21,38%

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

APÊNDICE E - Condutividade térmica - ATA

Resultados de medição da condutividade térmica através do ATA

Corpo de prova	Ref (1:6)	V10	V20	V30	V10A	V20A	V30A
1	1,04	0,54	0,51	0,51	0,47	0,46	0,39
2	1,02	0,52	0,52	0,47	0,46	0,38	0,42
Média	1,03	0,53	0,52	0,49	0,47	0,42	0,40
Desvio padrão	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,05	0,02
Coef. de variação (%)	1,38	2,67	2,05	5,77	0,59	12,53	4,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Correlação entre velocidade de pulso ultrassônico e condutividade térmica

Argamassas	Condutividade térmica (W/(m.k))	Velocidade de pulso de ultrassom (km/s)
	X	Y
R0	1,03	2,55
V10	0,54	1,79
	0,52	1,82
V20	0,51	1,74
	0,52	1,79
V30	0,51	1,56
	0,47	1,75
V10A	0,47	1,57
	0,46	1,59
V20A	0,46	1,46
	0,38	1,47
V30A	0,39	1,51
	0,42	1,41

ANEXO A - Condutividade térmica medida por aparelho comercial

ARGAMASSA DE REFERÊNCIA 1:6

Thermal Conductivity Test



Basic Info

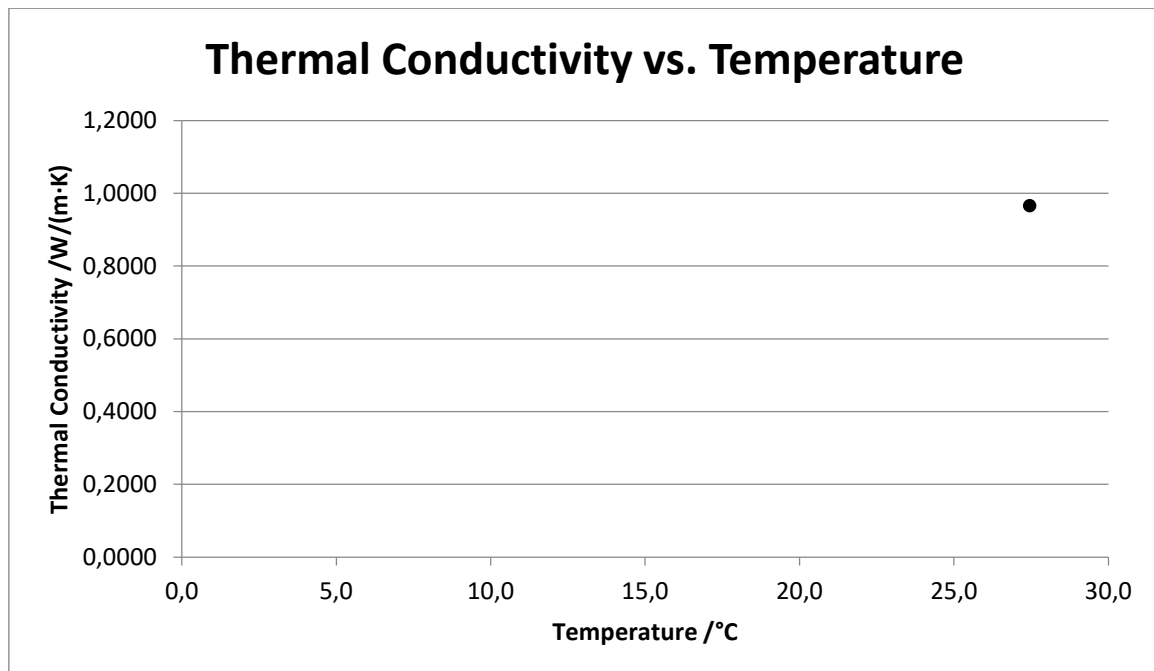
Project 206.023.681
Operator MGM
Laboratory NGB_FINAL_FC
File REF_1__20230706_1347.ngb-sh1
Date 06/07/2023 13:47:51
Serial Number 0730A1215

Sample Info

Sample Id 08DB7E279782FD96
Sample Name REF 1
Material Bloco cimentíceo
Density 1891,882 kg/m³
Mass 8700,0 g
Thickness 5,110 cm (measured)
Dimensions 30,0 cm × 30,0 cm

Measurement Results

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m ² ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss	Load Pressure kPa
1	27,5	11,1	0,96492	0,05299	217,8	01:59:42	3,7



Thermal Conductivity Test



Basic Info

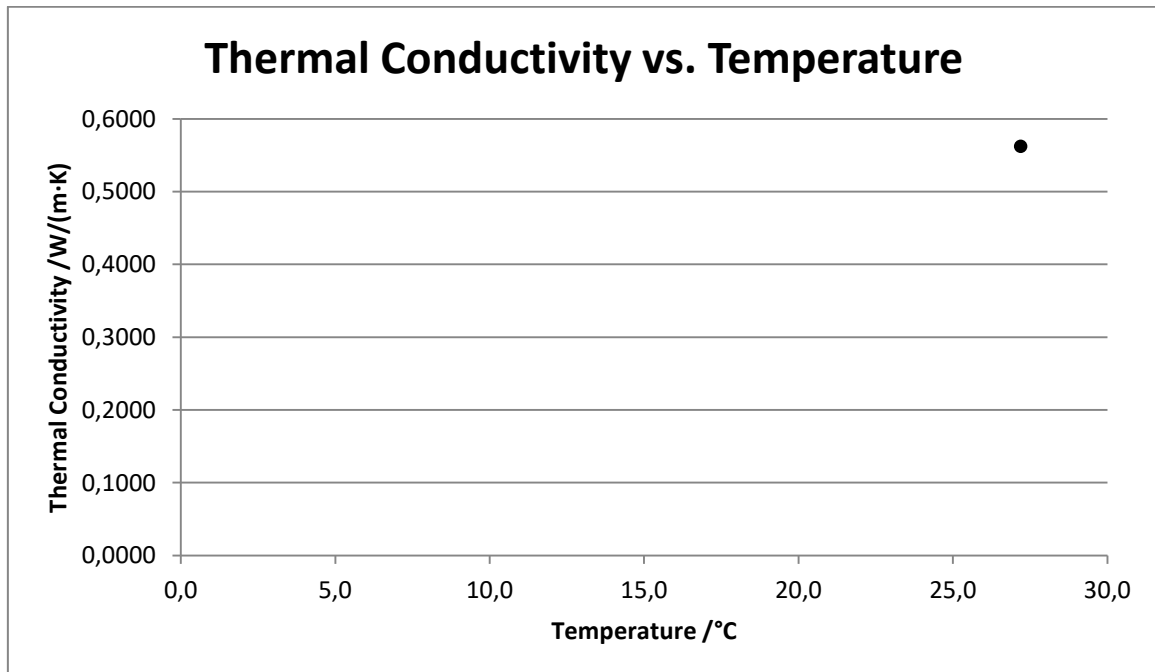
Project 206.023.681
 Operator MGM
 Laboratory NGB_FINAL_FC
 File V3_II__20230710_1219.ngb-sh1
 Date 10/07/2023 12:19:42
 Serial Number 0730A1215

Sample Info

Sample Id 08DB813FF0392309
 Sample Name V3 II
 Material Bloco cimentíceo
 Density 1708,537 kg/m³
 Mass 7900,0 g
 Thickness 5,137 cm (measured)
 Dimensions 30,0 cm × 30,0 cm

Measurement Results

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m ² ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss	Load Pressure kPa
1	27,2	12,3	0,56233	0,09134	239,6	03:28:01	0,4



Thermal Conductivity Test



Basic Info

Project 206.023.681
 Operator MGM
 Laboratory NGB_FINAL_FC
 File V3_III__20230711_1106.ngb-sh1
 Date 11/07/2023 11:06:36
 Serial Number 0730A1215

Sample Info

Sample Id 08DB81FEE51425A8
 Sample Name V3 III
 Material Bloco cimentíceo
 Density 1285,285 kg/m³
 Mass 5900,0 g
 Thickness 5,100 cm (measured)
 Dimensions 30,0 cm × 30,0 cm

Measurement Results

	Mean Temp. °C	Delta Temp. K	Thermal Conductivity W/(m·K)	Thermal Resistance (m ² ·K)/W	Temp. Gradient K/m	Duration hh:mm:ss	Load Pressure kPa
1	27,2	14,6	0,41165	0,12389	287,0	02:21:09	1,3

