



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DE ARGAMASSAS ADICIONADAS COM
BENTONITA E RESÍDUO DE VERMICULITA**

RENATA TOMAZ VIEIRA DIAS

Campina Grande - PB

2023

RENATA TOMAZ VIEIRA DIAS

**PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DE ARGAMASSAS ADICIONADAS COM
BENTONITA E RESÍDUO DE VERMICULITA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção da titulação como Doutor (a) em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto

Campina Grande - PB

2023

D541p

Dias, Renata Tomaz Vieira.

Propriedades termomecânicas de argamassas adicionadas com bentonita e resíduo de vermiculita / Renata Tomaz Vieira Dias. – Campina Grande, 2023.

95 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.

"Orientação: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto".

Referências.

1. Construções Rurais e Ambiência. 2. Comportamento Térmico. 3. Compósito Cimentício – Impermeabilidade. 4. Resíduo Mineral – Agregado Alternativo. I. Lopes Neto, José Pinheiro. II. Título.

CDU 631.2(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

RENATA TOMAZ VIEIRA DIAS

**PROPRIEDADES
TERMOMECÂNICAS DE
ARGAMASSAS ADICIONADAS
COM BENTONITA E RESÍDUO
DE VERMICULITA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 28/02/2023

José Pinheiro Lopes Neto - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFMG
Dermeval Araújo Furtado - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFMG
Jose Wallace Barbosa do Nascimento - Examinador(a) Interno(a) -
PPGEA/CTRN/UFMG
Maria Luiza Souza Resende - Examinador(a) Externo(a) - UAEP/CCT/UFMG
Vicente de Paula Teixeira Rocha - Examinador(a) Externo(a) - PU/UFMG



Documento assinado eletronicamente por **VICENTE DE PAULA TEIXEIRA ROCHA, ENGENHEIRO-AREA**, em 02/03/2023, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 02/03/2023, às 10:18,



conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **DERMEVAL ARAUJO FURTADO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 02/03/2023, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARIA LUIZA DE SOUZA REZENDE, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2023, às 18:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE PINHEIRO LOPES NETO, COORDENADOR(A) ADMINISTRATIVO(A)**, em 03/03/2023, às 09:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3143390** e o código CRC **A362D255**.

“Só vive o propósito quem suporta o processo”
(André Mansur)

DEDICO

Aos meus pais Arlindo e Gessira, pelas palavras de apoio, incentivo e amor. Ao meu irmão Breno, pela companhia e parceria. Ao meu esposo Krol, pela compreensão e suporte de todos os dias. Estes formam minha base solida e firme para seguir em frente na certeza que estariam comigo em todas as circunstâncias durante esta etapa.

AGRADECIMENTOS

Faz-se necessário agradecer nominalmente aqueles que, de forma direta ou indireta, participaram e contribuíram na elaboração desta tese. Diante disso, declaro aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Primeiramente, a Deus pela sua bondade, graça e proteção derramadas sobre minha vida, mesmo sem merecer tamanha misericórdia divina.

Ao meu orientador José Pinheiro Lopes Neto pela paciência, compreensão, ensinamento e todo o apoio dado para realização desta tese.

A todos os professores que compõem a área de Construções Rurais e Ambiente, por todo o conhecimento passado a mim durante as aulas ministradas e pelo bom convívio pelos corredores e salas de aula.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de estudos concedida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA/ UFCG, pela realização deste curso de doutorado.

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, pela disponibilização da estrutura laboratorial para executar os ensaios, juntamente com o técnico laboratorial Joselito pela ajuda durante todo o experimento e ao técnico laboratorial em eletrônica Thiago por toda gentileza e colaboração.

Aos meus pais e familiares pelo incentivo, suporte e apoio no caminho que escolhi trilhar.

Aos amigos que a pós-graduação me presenteou, com suas sugestões, empenho em ajudar nesta pesquisa, além dos bons momentos de descontração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Relevância e justificativa.....	19
1.2. Objetivos.....	19
1.2.1. Geral	19
1.2.2. Específicos.....	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1. Sustentabilidade.....	21
2.1.1. Sustentabilidade na construção civil.....	22
2.2. Conforto térmico	24
2.3. Vermiculita	26
2.3.1. Resíduos	29
2.3.2. Na composição de argamassa	30
2.4. Bentonita.....	31
2.4.1. Na composição de argamassa	33
2.5. Argamassa	35
2.5.1. Consistência/ trabalhabilidade	36
2.5.2. Retenção de água.....	36
2.5.3. Densidade de massa e teor de ar incorporado	37
2.5.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido.....	37
2.5.5. Resistência a aderência.....	37
2.5.5.1. Módulo de elasticidade.....	38
2.5.5.2. Resistência à compressão	38
2.5.5.3. Absorção de água.....	39
2.6. Caracterização térmica em argamassas	40
2.6.1. Análise de estudos térmicos em argamassas	40
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
3.1. Coleta e caracterização dos materiais	46
3.1.1. Distribuição granulométrica da bentonita e da areia natural	46
3.1.2. Aglomerante	48

3.1.3. Água	48
3.2. Estudo de interação/ produção das argamassas	48
3.2.1. Produção das argamassas.....	49
3.2.2. Índice de atividade pozolânica da bentonita e do resíduo de vermiculita	50
3.3. Caracterização das propriedades	50
3.3.1. Resistência à compressão	50
3.3.2. Resistência à tração por compressão diametral	52
3.3.3. Absorção de água por imersão.....	52
3.3.4. Absorção de água por capilaridade.....	53
3.4. Caracterização das argamassas	53
3.4.1. Fluorescência de raios-x	54
3.4.2. Difração de raios-x	54
3.4.3. Termogravimetria	54
3.5. Análise do comportamento térmico.....	54
3.5.1. Condutividade térmica do material.....	54
3.5.2. Confeção da caixa térmica I	55
3.5.3. Produção das placas de argamassa	56
3.5.4. Realização do ensaio	57
3.5.5. Cálculos	57
3.5.6. Amortecimento e atraso térmico em alvenarias	59
3.5.7. Confeção da caixa térmica II	59
3.5.8. Produção das minis paredes de alvenaria	63
3.5.9. Realização dos ensaios	65
3.5.10. Cálculos	65
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1. Ensaio de caracterização dos materiais	66
4.1.1. Distribuição granulométrica da bentonita e da areia natural	66
4.2. Ensaio das argamassas no estado endurecido	67
4.2.1. Índice de atividade pozolânica	67
4.2.2. Resistência à compressão	68
4.2.3. Eficiência do ensaio de resistência à compressão	70

4.2.4. Resistência à tração por compressão diametral	70
4.2.5. Absorção de água por imersão.....	72
4.2.6. Absorção de água por capilaridade.....	74
4.3. Caracterização das argamassas	75
4.3.1. Análise química por fluorescência de raios-X (FRX)	75
4.3.2. Difração de raios-X (DRX)	76
4.3.3. Termogravimetria	77
4.4. Análise do comportamento térmico.....	78
4.4.1. Coeficiente de condutividade térmica do material	78
4.4.2. Amortecimento e atraso térmico em alvenarias	82
5. CONCLUSÃO.....	84
6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
MPL	Mineradora Pedra Lavrada
PB	Paraíba
ONU	Organização das Nações Unidas
CO ₂	Dióxido de carbono
TV	Televisão
US\$	Dólar americano
°C	Grau Celsius
A	Área
mm	Milímetro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
Km	Quilometro
Kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
g/cm ²	Gramas por centímetro quadrado
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
Kj/(Kg.K)	Quilo Joule por quilograma Kelvin
MPa	Mega Pascal
W/m.K	Watts por metro Kelvin
W/m ² .K	Watts por metro quadrado Kelvin
AC0	Argamassa de referência
A60C0	Argamassa com 60% de resíduo de vermiculita e 0% de bentonita
A60C04	Argamassa com 60% de resíduo de vermiculita e 4% de bentonita
A60C08	Argamassa com 60% de resíduo de vermiculita e 8% de bentonita
A60C012	Argamassa com 60% de resíduo de vermiculita e 12% de bentonita

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 17 ODS (objetivos do milênio) criados pela Agenda 2030.	21
Figura 2. A energia que flui em um edifício típico: produzido no interior (vermelho), perdas de calor (azul) e fluxos de energia que entram do exterior (amarelo).	25
Figura 3. Porcentagem de produção de vermiculita relacionada à produção mundial total em 2015.	27
Figura 4. Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2011.	30
Figura 5. Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2013.	30
Figura 6. Maquete virtual de protótipo denominado câmara térmica.	41
Figura 7. Base experimental para análise de condutividade térmica, primeiro e segundo método, respectivamente.	42
Figura 8. Infraestrutura utilizada (espaço físico).	43
Figura 9. Vão entre as salas no laboratório do departamento de mecânica da UFPR.	43
Figura 10. Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel.	44
Figura 11. Fluxograma com etapas do experimento.	45
Figura 12. (A) Aspecto bentonita; (B) Embalagem do material disponibilizado pela empresa Bentonisa.	46
Figura 13. Aspecto físico dos materiais secos utilizados no experimento.	47
Figura 14. (a) Série de peneiras; (b) Mesa vibratória.	47
Figura 15. (a) Moldagem das argamassas nos corpos-de-prova; (b) Moldagem das argamassas finalizadas.	50
Figura 16. Equipamento para realização do ensaio de resistência à compressão.	51
Figura 17. Ensaio de absorção de água por imersão.	53
Figura 18. Ensaio de absorção de água por capilaridade.	53
Figura 19. (a) distribuição dos setores na caixa; (b) imagem ampliada do setor 1.	55
Figura 20. Moldes de madeira para confecção das placas.	56
Figura 21. Placas em processo de cura por 28 dias.	56
Figura 22. (a) caixa térmica com tampa fechada; (b) caixa térmica com tampa aberta.	60
Figura 23. Caixa térmica II com mini parede de alvenaria fazendo seu fechamento.	61
Figura 24. (a) caixa térmica II com tampa fechada; (b) caixa térmica II com tampa aberta.	61

Figura 25. Microcontrolador ESP32.....	62
Figura 26. (a) distribuição dos sensores na mini parede de alvenaria e sensor do ambiente interno da caixa térmica II; (b) caixa térmica II fechada com sensor na parte externa.	62
Figura 27. Proteção para sensores (vista externa e interna).	63
Figura 28. (a) painel de alvenaria chapiscado; (b) painel de alvenaria rebocado.....	64
Figura 29. (a) base móvel em MDF revestida com papel adesivo; (b) base móvel em MDF revestida com papel adesivo e com aplicação de película rugosa.	64
Figura 30. Resistência a compressão de argamassas em diferentes proporções.	68
Figura 31. Resistência à tração na compressão diametral de argamassas em diferentes proporções.	71
Figura 32. Absorção de água por imersão das argamassas em diferentes proporções.	72
Figura 33. Absorção de água por capilaridade das argamassas em diferentes proporções.	74
Figura 34. Difratoogramas de raios-X das argamassas obtidas.....	77
Figura 35. Curva de análise termogravimétrica das argamassas obtidas: a) A0C0, b) A60C4 e c) A60C12.	78
Figura 36. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A0C0.....	79
Figura 37. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C0.....	79
Figura 38. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C4.....	80
Figura 39. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C8.....	80
Figura 40. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C12.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Temas e metas relacionados a alguns objetivos apresentados pela Agenda 2030....	22
Tabela 2. Produção Mundial.....	28
Tabela 3. Classificação de vermiculita	28
Tabela 4. Área impactada no pátio operacional	29
Tabela 5. Produção Mundial.....	33
Tabela 6. Espessuras admissíveis para camada de revestimento de argamassa	36
Tabela 7. Traço, composição, teores de substituição e fator água aglomerante utilizados no experimento	49
Tabela 8. Coeficiente d_2	51
Tabela 9. Avaliação da eficiência do ensaio.....	52
Tabela 10. Caracterização granulométrica	66
Tabela 11. Avaliação da atividade pozolânica	67
Tabela 12. Resistência à compressão das argamassas	69
Tabela 13. Exigências mecânicas descritas na NBR 13281	69
Tabela 14. Eficiência do ensaio de resistência à compressão.....	70
Tabela 15. Resistência à tração na compressão diametral das argamassas	71
Tabela 16. Absorção de água por imersão das argamassas	73
Tabela 17. Absorção de água por capilaridade das argamassas	75
Tabela 18. Análise química por fluorescência de raios-X das argamassas	75
Tabela 19. Condutividade, resistência e transmitância térmica.....	81
Tabela 20. Amortecimento e atraso térmico das minis paredes	82

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Eficiência do ensaio	49
Equação 2. Coeficiente de variação do ensaio	50
Equação 3. Taxa de transferência de calor por condução.....	56
Equação 4. Coeficiente de condutividade térmica por condução	56
Equação 5. Taxa de transferência de calor por convecção	56
Equação 6. Amortecimento	57
Equação 7. Transmitância térmica.....	57
Equação 8. Amortecimento	63

Propriedades termomecânicas de argamassas adicionadas com bentonita e resíduo de vermiculita. Renata Tomaz Vieira Dias. 2023. Orientador: Dr. José Pinheiro Lopes Neto.

RESUMO

Diante das mudanças climáticas, está previsto um aumento de 3°C da temperatura terrestre, até 2030, como consequência do rápido crescimento das áreas urbanas e um mal plano energético eficiente, onde edifícios têm importante contribuição para a solução, pois estes são responsáveis pelo crescimento da demanda global de energia. Neste contexto, é necessário desenvolver materiais que possam ser aplicados nessas edificações, com a função de reduzir o consumo energético por meio de propriedades térmicas melhoradas e, de preferência materiais locais que reduzam a geração de resíduos sólidos. Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade da bentonita e do resíduo de vermiculita em substituição parcial do aglomerante e agregado, respectivamente, em argamassa de revestimento. Foram preparadas argamassas em diferentes teores de substituição (0, 4, 8 e 12% para bentonita e 60% para resíduo de vermiculita) que se correlacionam, para melhor avaliação comparativa, além da argamassa de referência. As argamassas foram analisadas no estado endurecido por meio de ensaios de caracterizações físicas e mecânicas (resistência à compressão, tração por compressão diametral e absorção de água por imersão e capilaridade), aos 28 dias de cura. A análise microestrutural foi realizada por meio de ensaios de difração, fluorescência de raios-X e termogravimetria. O comportamento térmico, foi avaliado determinando-se a condutividade, resistência e transmitância térmica do material. A argamassa A60C4 apresentou melhores resultados de resistência à compressão e tração por compressão diametral, com acréscimos de 5,45% e 78,15%, respectivamente, em relação a argamassa de referência. Maior absorção de água por imersão e capilaridade nas argamassas que continham resíduo de vermiculita e bentonita. Nas propriedades térmicas, os melhores resultados também se apresentaram na argamassa A60C4, com 33,3% de melhoria na condutividade, 57,14% na resistência e 32,25% na transmitância. Os resultados possibilitaram concluir que a argamassa A60C4 se apresentou como um bom isolante térmico podendo promover um melhor conforto térmico aos usuários no interior das edificações revestidas pelo mesmo.

PALAVRAS-CHAVE: Agregado alternativo, resíduo mineral, compósito cimentício, impermeabilidade, comportamento térmico.

Thermomechanical properties of mortars added with bentonite and vermiculite residue. Renata Tomaz Vieira Dias. 2023. Advisor: Dr. José Pinheiro Lopes Neto.

ABSTRACT

In the face of climate change, an increase of 3°C in terrestrial temperature is expected by 2030, as a result of the rapid growth of urban areas and a poorly efficient energy plan, where buildings have important contribution to the solution, as they are responsible by the growth of global energy demand. In this context, it is necessary to develop materials that can be applied in these buildings, with the function of reducing energy consumption through improved thermal properties and preferably local materials that reduce the generation of solid waste. This work aimed to analyze the viability of bentonite and vermiculite residue in partial replacement of binder and aggregate, respectively, in coating mortar. Mortars were prepared in different substitution contents (0, 4, 8 and 12% for bentonite and 60% for vermiculite residue) that correlate, for better comparative evaluation, in addition to the reference mortar. The mortars were monitored in the resisted state by means of physical and mechanical characterization tests (resistance to compression, traction by diametral compression and water absorption by immersion and capillarity), after 28 days of curing. The microstructural analysis was performed using diffraction, X-ray fluorescence and thermogravimetry assays. The thermal behavior was evaluated by determining the conductivity, resistance and thermal transmittance of the material. The A60C4 mortar showed better results in terms of resistance to tensile strength and diametral traction, with increases of 5.45% and 78.15%, respectively, in relation to the reference mortar. Greater water absorption by immersion and capillarity in mortars containing vermiculite and bentonite residue. In thermal properties, the best results were also shown in the A60C4 mortar, with 33.3% improvement in conductivity, 57.14% in resistance and 32.25% in transmittance. The results made it possible to conclude that the A60C4 mortar was a good thermal insulator, allowing better thermal comfort for users inside the buildings coated with it.

KEY-WORDS: Alternative aggregate, mineral residue, cement composite, impermeability, thermal behavior.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, juntamente com a rápida urbanização e expansão da economia aumentaram a geração de resíduos sólidos em todo o mundo, gerando preocupações pelos prejuízos à saúde humana, recursos naturais e ecossistemas. Uma alternativa para reduzir esses impactos ambientais negativos é promover a sustentabilidade, principalmente no setor da construção civil o qual consome grande quantidade de energia e recursos naturais.

A ONU propôs uma estratégia para gerar um mundo mais sustentável até 2030, por meio da Agenda 2030 que contém 17 objetivos e 169 metas, dentre as quais se destacam o aumento da urbanização sustentável, incentivar empresas a adotar práticas sustentáveis, uso eficiente dos recursos naturais, redução da geração de resíduos sólidos, conscientizar a população da problemática (mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce) quanto a mudança do clima.

Em buscas de alternativas que atendam aos objetivos do Agenda 2030, materiais podem ser a solução, a exemplo do resíduo de vermiculita oriundo do processo de beneficiamento do minério vermiculita, que no Estado da Paraíba ocupa o 2º lugar do ranking com 12,8% da produção nacional (2017), mas infelizmente, este processo causa um expressivo impacto ambiental para seu entorno, devido ao descarte incorreto do material que não tem valor comercial, sendo uma alternativa para aplicação em novos materiais de construção que reduzam o consumo de recursos naturais, gerando reciclagem/reuso do material descartado, que promovam melhorias nas propriedades térmicas. A bentonita é um mineral de grande abundância na Paraíba, e sua produção representa mais de 70% da produção nacional, cujo fator positivo é o aproveitamento completo do material extraído, além contribuir para melhorias nas propriedades mecânicas das argamassas.

Diante disso, o presente estudo objetiva desenvolver um material de construção sustentável, mais especificamente argamassa de revestimento contendo bentonita e resíduos de vermiculita, com propriedades mecânicas e térmicas melhoradas a fim de gerar mais conforto térmico através da redução de temperatura nos ambientes internos das edificações.

1.1. Relevância e justificativa

Diante de estudos anteriores, a utilização de resíduos de vermiculita na produção de materiais de construção alternativo para construção civil, pode representar uma alternativa positiva nos aspectos de resistência mecânica e capacidade térmica, garantindo uma maior durabilidade dos materiais aplicados e melhor conforto térmico. A bentonita aliada ao resíduo de vermiculita tende a contribuir para que esses resultados se tornem mais ainda mais expressivos.

A importância deste estudo é justificada pelo desenvolvimento de um material alternativo que venha a apresentar capacidades térmicas melhoradas como sendo um caminho para contribuição positiva para o meio ambiente, promovendo redução de consumo de energia, especialmente nas regiões de temperaturas elevadas, além de contribuir com o meio ambiente por utilizar um resíduo mineral sem aplicação que é descartado de forma indevida.

As habitações e instalações precisam cada vez mais de elementos que melhorem o conforto térmico dentro dessas construções, prezando sempre pelo bem estar dos moradores, funcionários e animais que habitam/ transitam nestes espaços. O material estudado está relacionado com a aplicação de argamassa de revestimento, contendo resíduo de vermiculita e bentonita nas edificações que possa contribuir para melhoria nas propriedades de isolamento térmico. Tal hipótese assegura a importância do seu desenvolvimento e justifica a realização desta pesquisa.

1.2. Objetivos

1.2.1. Geral

Por este trabalho pretende-se desenvolver uma argamassa sustentável com propriedades termomecânicas melhoradas pela adição de resíduo de vermiculita e bentonita.

1.2.2. Específicos

Os objetivos específicos compreendem:

- Determinar a propriedade física de composição granulométrica (areia e bentonita) e índice de atividade pozolânica (resíduo de vermiculita e bentonita);

- Caracterizar as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção por imersão e absorção por capilaridade, em cada uma das proporções;
- Determinar caracterizações para diagnósticos da composição química, análise mineralógica e análise térmica, na argamassa de referência e melhores resultados dos ensaios anteriores;
- Determinar a condutividade, resistência e transmitância térmica das argamassas em cada uma das proporções;
- Determinar atraso e amortecimento térmico do material em cada uma das proporções.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Sustentabilidade

A sustentabilidade é uma forma de conscientizar a população sobre a importância da preservação do meio ambiente, desenvolvendo um processo de produção eficiente com responsabilidade ambiental. Autores ainda complementam fazendo associação da sustentabilidade com o meio empresarial, que pode ser entendido como um processo o qual as empresas estão buscando implantar com o intuito de suprir suas necessidades financeiras, contribuindo para um desenvolvimento saudável do meio ambiente, sendo justificado pelo aumento dos problemas ambientais gerados pelo crescimento desordenado nas últimas décadas e por consumidores que ficaram mais conscientes da importância da defesa do meio ambiente e cada vez mais buscam por produtos e serviços de empresas sustentáveis (RIBEIRO et al., 2016).

Ribeiro et al. (2016), complementam que a sustentabilidade empresarial não são atitudes superficiais que visam apenas o marketing, aproveitando a chamada “onda ambiental”, devem apresentar resultados significativos para o meio ambiente e a sociedade como um todo

A ONU tem um plano de ação para todas as pessoas e o planeta que foi coletivamente criado para colocar o mundo em um caminho mais sustentável e resiliente até 2030. A Agenda 2030 consiste em uma declaração, em um quadro de resultados (17 ODS - objetivos do milênio e suas 169 metas), onde os 17 Objetivos (Figura 1) mesclam, de forma equilibrada, as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. São como uma lista de tarefas a serem cumpridas pelos governos, a sociedade civil, o setor privado e todos cidadãos na jornada coletiva para um 2030 sustentável (PLATAFORMA AGENDA 2030, 2020).



Figura 1. 17 ODS (objetivos do milênio) criados pela Agenda 2030.

Fonte: Plataforma Agenda 2030 (2020).

Dos 17 objetivos propostos pela ONU, o 11º, 12º e 13º tratam sobre: cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção responsáveis; e ação contra a mudança global do clima, respectivamente. A Tabela 1, expõe temas relacionados aos objetivos e algumas das metas, ambos apresentados pela ONU.

Tabela 1. Temas e metas relacionados a alguns objetivos apresentados pela Agenda 2030

Objetivo	Temas relacionados	Algumas metas do objetivo
11.º (Cidades e comunidades sustentáveis)	Urbanização: mobilidades, gestão de resíduos sólidos e saneamento	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, aumentar a urbanização sustentável, e a capacidade para o planejamento de gestão sustentável; - Apoiar relações econômicas, sociais e ambientais entre áreas urbanas; - Apoiar países menos desenvolvidos para construções sustentáveis, utilizando materiais locais
12.º (Consumo e produção responsáveis)	Promoção da eficiência do uso de recursos energéticos e naturais, da infraestrutura sustentável e do acesso a serviços básicos	<ul style="list-style-type: none"> - Até 2030, alcançar gestão sustentável e uso eficientes dos recursos naturais; - Reduzir a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso; - Incentivar empresas a adotar práticas sustentáveis e integrar informações de sustentabilidade em seus relatórios; - Promover práticas de compras públicas sustentáveis
13.º (Ação contra a mudança global do clima)	Frente a mudança do clima, o aumento da temperatura terrestre está projetada a aumentar mais de 3°C	<ul style="list-style-type: none"> - Integrar medidas de mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamento nacionais; - Aumentar conscientização, capacidade humana e institucionais obre mitigação global do clima, adaptação, redução de impacto, e alerta precoce à mudança do clima

2.1.1. Sustentabilidade na construção civil

O crescimento populacional, a economia em expansão e a rápida urbanização aceleraram bastante a geração de resíduos sólidos em todo o mundo. A geração global anual de resíduos sólidos chegou recentemente a 17 bilhões de toneladas e deve atingir 27 bilhões de toneladas até 2050 (LAURENT et al., 2014).

Tang et al. (2020), reforçam que essa questão é preocupante para as nações, municípios e indivíduos, pois pode causar danos significativos à saúde humana, recursos naturais e ecossistemas. Portanto, o conceito de adoção de estratégias e tecnologias verdes para a sustentabilidade ambiental tem sido cada vez mais reconhecido e incluído nos últimos anos. Mais notavelmente, o conceito tradicional, no qual os resíduos são considerados poluição, tem mudado progressivamente para a nova perspectiva de que os resíduos são tratados como um recurso. Sem dúvida, isso pode ajudar as sociedades a se tornarem mais sustentáveis. Os autores, explicam ainda que a energia gerada em certos processos térmicos de resíduos pode reduzir os serviços de geração de energia por meio de tecnologias convencionais. Da mesma forma, a reutilização ou reciclagem de certos resíduos sólidos, como metal, plástico e papel, pode conservar a fonte dos materiais virgens correspondentes.

O cimento é um exemplo de material de construção que pode ser substituído por outros materiais ou até mesmo resíduos, pois como explicam Fernandes et al. (2018), o cimento durante seu processo de fabricação libera dióxido de carbono (CO₂), o que acarreta diversos fatores negativos que são ocasionados pelo ramo da indústria cimenteira, dentre eles, o impacto gerado ao ambiente, além da alta emissão de carbono e das elevadas temperaturas (no momento que as matérias primas são levadas ao forno) que impacta no consumo da energia global devido à queima.

Apesar de existir dificuldades em conciliar a necessidade de crescimento econômico acelerado com a sustentabilidade, esses dilemas são significativos nos países em desenvolvimento (HOSSEINI et al., 2018). Autores complementam que, esses projetos de construção em países em desenvolvimento têm impactos profundos na sustentabilidade (BANIHASHEMI et al., 2017), reforçando ainda mais a importância de associar sustentabilidade a construção civil.

Araújo et al. (2020), reforçam que há uma necessidade iminente de estudos destinados a anular as lacunas existentes, inclusive nos países em desenvolvimento, dada a demanda reprimida por construção de edifícios nesses países que possam ter sérios impactos ambientais. Esses impactos são evidentes na necessidade global de conservação, uma vez que, os impactos ambientais vão além das fronteiras geográficas da área afetada, levando ao desequilíbrio global. Por fim, é importante que em futuras metodologias de pesquisa que considerem uma análise prévia dos aspectos ambientais em todo o ciclo de vida dos edifícios seja desenvolvida.

2.2. Conforto térmico

Seto et al. (2012) e UN DESA (2014) afirmam que, um dos indicadores mais importantes do desenvolvimento tecnológico, econômico e físico nos países desenvolvidos e em desenvolvimento é o fornecimento e o uso de energia. O rápido aumento no uso de energia nas áreas urbanas, que consomem mais energia, durante o aumento da urbanização não pode ser ignorado. Com o atual aumento nas taxas de população e urbanização, estima-se que as áreas urbanas globais aumentem três vezes em relação ao início do século XX, e dois terços da população global viverão em áreas urbanas até 2050. UN-HABITAT (2020) ainda reforça que além disso, as áreas urbanas representam três quartos do uso global de energia primária e aproximadamente 60% das emissões globais de gases de efeito estufa.

A crescente demanda por resfriamento de espaço, especialmente em períodos de pico de demanda de eletricidade, é pressão excessiva sobre o envelhecimento da infraestrutura elétrica em muitos países, além de aumentar as emissões de gases de efeito estufa em locais onde essa infraestrutura é predominantemente baseada em combustíveis fósseis. As emissões globais de dióxido de carbono atribuíveis ao resfriamento do espaço aumentaram três vezes desde 1990 atingindo 1.130 milhões de toneladas em 2016 (IEA, 2018).

Mangan et al. (2020) justificam que, o rápido crescimento das áreas urbanas, bem como o fracasso em estabelecer um plano energético eficiente, levou a um aumento nos problemas energéticos e ambientais. O objetivo da arquitetura e do planejamento urbano em termos de problemas energéticos e ambientais é atender as demandas das pessoas, protegendo a natureza e o meio ambiente.

Consequentemente, os edifícios são extremamente importantes em termos de eficiência energética, pois são responsáveis por 32% do consumo global de energia e um quarto das emissões de CO₂ induzidas pelo homem (IEA, 2020).

O conforto térmico é geralmente definido como aquela condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico (ANSI/ASHRAE, 2017), e a provisão de conforto em ambientes fechados é um objetivo fundamental dos arquitetos, engenheiros e profissionais do setor de edifícios aliados (DEAR et al., 2020).

Lewandowski e Lewandowska-Iwaniak (2014) explicam que, para as condições humanas em determinado ambiente sejam confortáveis, independentemente da estação do ano, a temperatura interior da edificação precisa ser mantida em um determinado nível, ajustada de acordo com os gostos dos habitantes, em média de 15 a 25°C. Na Figura 2 pode-se observar o equilíbrio de fontes e tipos de energia em um ambiente. Os fluxos de energia que atingem a

edificação de fora (energia solar e terrestre) são marcados em amarelo. Os fluxos e as fontes de energia térmica produzidos dentro do edifício são demonstrados em vermelho, estes são principalmente fluxos do sistema de aquecimento, mas também são geradas por eletrodomésticos (exemplo de ferros, aspiradores, máquinas de lavar roupa, secadores, aparelhos de TV, fogões e seus habitantes). A corrente de energia perdida do edifício está em azul. As porcentagens apresentadas são os valores médios. Dependendo dos tipos de materiais de construção e técnicas de construção, essas perdas percentuais de energia podem ser diferentes das que são demonstradas na ilustração

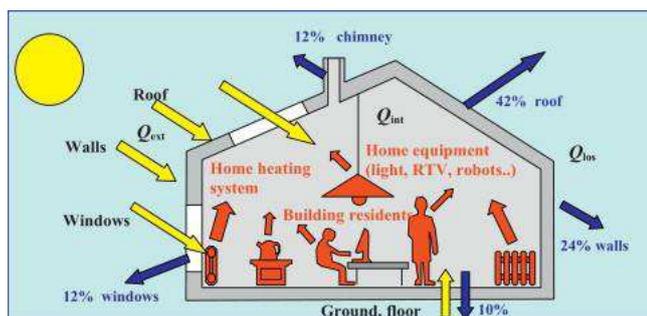


Figura 2. A energia que flui em um edifício típico: produzido no interior (vermelho), perdas de calor (azul) e fluxos de energia que entram do exterior (amarelo).

Fonte: Lewandowski e Lewandowska-Iwaniak (2014).

Atualmente, uma das principais preocupações mundiais do setor da construção civil é a redução de consumo energético nas edificações. Para isso, é necessária a tomada de algumas medidas, como foco em estratégias para diminuir o uso de ar-condicionado e/ou aquecedor nas edificações. Tais medidas garantem não só um ambiente mais sustentável, mas também um espaço com conforto térmico para o usuário. Logo, é possível associar diretamente a economia de energia com o desempenho térmico do edifício (ROQUE et al., 2021).

Embora toda a estrutura influencie no conforto e no desempenho termoenergético, o impacto da envoltória não deve ser minorado, já que, globalmente, cerca de 50% da energia total consumida nos edifícios é influenciada por esses elementos (CHANG et al., 2020).

Cunha et al. (2016), sugerem argamassas com incorporação de materiais, que têm a capacidade de reduzir as variações de temperatura, para revestimento interno podem ser vistas como uma chave para resolver ou minimizar o consumo energético massivo relacionado aos edifícios. Podendo assim, trazer benefícios sociais que estão diretamente ligados ao aumento do conforto térmico. O aspecto ambiental diz respeito à redução do esgotamento de combustíveis fósseis relacionados com a diminuição do uso de equipamentos de ar

condicionado. Os benefícios econômicos estão relacionados com a redução do consumo de energia e o tempo de espera para as horas de menor demanda.

Torres et al. (2020) ainda complementam que, as argamassas fornecem proteção a elementos construtivos e contribuem significativamente para o conforto térmico e acústico do ambiente interno. Considerando os requisitos técnicos e ecológicos das indústrias de argamassas, é fundamental o uso de mais matérias-primas recicladas ou naturais e produtos com menor impacto ambiental.

2.3. Vermiculita

Vermiculita é o nome dado a um grupo de minerais laminares hidratados que são alumínio-ferro-magnésio silicatos, assemelhando-se a mica na aparência, e que estão amplamente disponíveis no planeta, sendo o Brasil um de seus maiores produtores. Sua excelente resistência térmica, peso leve e capacidade de captação de água constituem uma vantagem em muitas aplicações industriais e ambientais (FERBA GROUP, 2019).

A vermiculita $[(Mg, Fe_{+2}, Al)_3 (Al, Si)_4 O_{10}(OH)_2 4H_2O]$, é um mineral do grupo das micas, com diversas propriedades físicas e químicas que a tornam de amplo uso na indústria e agricultura. É um mineral hidratado, produto da alteração de micas, mais comumente da biotita. Têm sua gênese por intemperismo, em zonas de falhas ou por alteração hidrotermal em baixa temperatura (acima de 350°C, a vermiculita é instável) de piroxenitos, peridotitos, dunitos, carbonatitos e anfibolitos (PAULA, 2018).

Os espaços vazios criados entre as lamelas de vermiculita, durante a sua expansão térmica, são como pequenos bolsões de ar, os quais conferem ao material uma excepcional capacidade de isolamento. As maiores vantagens desse produto para construção civil são o peso reduzido, além das propriedades de isolamento térmico e acústico, proporcionando conforto térmico e diminuição de ruídos entre pavimentos (NTC BRASIL, 2016).

Paula (2018), complementa que quando expandida, o produto resultante apresenta baixa densidade e alta capacidade de isolamento térmico, acústico e elétrico. Não se decompõe ou deteriora, sendo inodoro, não prejudicial à saúde e também lubrificante, bem como pode absorver normalmente até cinco vezes seu peso em água. Essas propriedades lhe dão uma extraordinária condição de uso nos campos agricultura e horticultura, 32%; agregados leve para concreto (incluindo pré-misturas de cimento, concreto e gesso), 24%; isolamento, 9%; e outros, 35% (SIMMONS, 2022).

A vermiculita apresenta diversas formas de utilização, dentre elas pode ser utilizada como material de isolamento na construção, agregados leves, placas resistentes ao fogo, molduras, formas refratárias, transportador inerte na alimentação animal, aditivo em revestimentos de fricção, material de embalagem leve, aditivo para mídia crescente e melhorador de solo para horticultura e isolamento externo da parede podendo absorver a umidade (DUPRÉ MINERALS, 2019).

Aplicações inovadoras continuam surgindo, incluindo o uso de vermiculita para combater a poluição do ar e absorver água nas minas, substituindo zeólitos em colunas de troca iônica, purificando águas residuais e contendo ou removendo resíduos nucleares (SIMMONS, 2022).

Os principais países que representaram aproximadamente 97,5% da produção mundial de vermiculita são a África do Sul, Estados Unidos, Brasil, Zimbábue, Bulgária e Índia, dados estes interpretados graficamente por Rashad (2016) através da Figura 3.

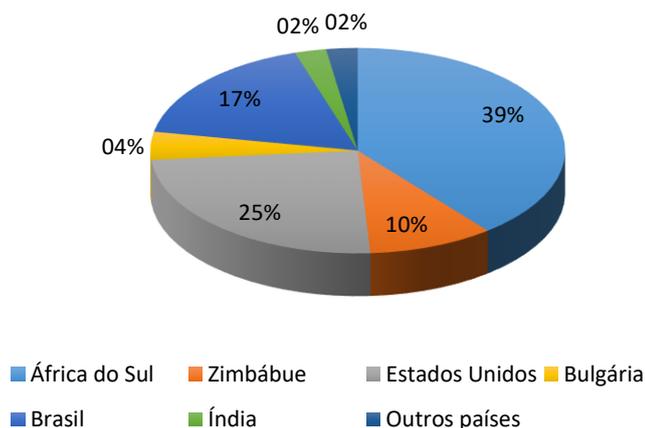


Figura 3. Porcentagem de produção de vermiculita relacionada à produção mundial total em 2015.

Fonte: Rashad (2016).

Em 2017, os Estados de Goiás (90,7%), Paraíba (4,9%) e Pernambuco (4,4%), foram responsáveis pela produção de 57 mil t de vermiculita beneficiada. A produção decresceu cerca de 20% em relação ao ano anterior, isso devido a segunda maior produtora no País, localizada no Estado da Paraíba, registrar uma queda na produção. O processo de extração da substância no país é executado a céu aberto, parcial ou totalmente mecanizado, ocorrendo uma sazonalidade de maior produção nos meses secos (PAULA, 2018).

Conforme Simmons (2022), em 2021 foram produzidas mais de 390 mil t de vermiculita no mundo, representando um acréscimo 10 mil t na produção anterior. No Brasil a produção para o mesmo ano foi em torno de 60 mil t, pouco mais de 15% da produção mundial (Tabela 2).

Tabela 2. Produção Mundial

Discriminação	Produção (t)			
	Países	2020	2021	(%)
Estados Unidos da América		100.000	100.000	25,64
África do Sul		150.000	140.000	35,90
Brasil		50.000	60.000	15,38
Zimbábue		29.000	30.000	7,69
Uganda		9.000	10.000	2,56
Índia		2.000	2.000	0,51
Rússia		29.000	30.000	7,69
Outros países		11.000	18.000	4,63
Total		380.000	390.000	100,0

Fonte: Simmons/USGS-Mineral Commodity Summaries (2021/2022).

Em relação a classificação do padrão internacional da vermiculita, a Tabela 3 segue os parâmetros da empresa FERBA GROUP, que explora minerais, dentre eles a vermiculita, na região de Tbilisi, na Geórgia e Baku, no Azerbaijão.

Tabela 3. Classificação de vermiculita

Tamanho do grão	Densidade	Designação A	Designação B
(mm)	(Kg/ m³)		
< 16	56 a 72	-	Premium
< 8	64 a 85	1	Grande
< 4	72 a 90	2	Médio
< 2	75 a 112	3	Fino
< 1	80 a 144	4	Superfino
< 0,5	90 a 160	5	Micron

Fonte: FERBA GROUP (2019).

Para a empresa não é de valor econômico extrair a vermiculita de forma micro fina, devido à falta de comércio, sendo então esse material descartado, contendo ainda bastante minério (ALENCAR et al., 2015).

Segundo Simmons (2022), a produção de grau mais fino supera o consumo há vários anos, com o Brasil e o Estados Unidos continuam a ser os principais produtores. Os produtores continuarão a investigar formas de aumentar o uso dos graus mais finos em produtos existentes e como substituto da vermiculita mais grossa, continuando a desenvolver novos e aplicações inovadoras.

2.3.1. Resíduos

Em diagnóstico do espaço-temporal de áreas impactadas por uma empresa de mineração, localizada na cidade de Santa Luzia-PB quanto a extração de vermiculita, pesquisadores apresentam que o rejeito gerado pela mineradora é em grande quantidade e a empresa gera a partir da sua produção diária 3% de rejeito, o qual é acumulado de forma incorreta no pátio da empresa (ALENCAR et al., 2015).

Na Tabela 4, observam-se esses valores de forma mais evidente, onde é descrito o volume do rejeito calculado.

Tabela 4. Área impactada no pátio operacional

Ano	Área (m²)	Volume (m³)	Porcentagem (%) da área contaminada no pátio
2011	14.010,57	56.042,28	8
2013	68.978,43	215.913,72	35

Fonte: Alencar et al. (2015).

Os autores ainda apresentam, mediante imagens registradas por satélites, o avanço da área impactada proveniente do aumento do rejeito de vermiculita, durante os anos de 2011 e 2013, apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.



Figura 4. Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2011.

Fonte: Alencar et al. (2015).



Figura 5. Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2013.

Fonte: Alencar et al. (2015).

2.3.2. Na composição de argamassa

No processo de beneficiamento da vermiculita é gerado um resíduo fino para o qual atualmente ainda não foi desenvolvida uma aplicação que possibilite a utilização em larga escala. Uma alternativa que vem sendo estudada é a associação com cimento Portland em composições de argamassas e concretos, em função da composição química do resíduo: elevada

quantidade de alumínio, silício e magnésio, que podem apresentar interações com o ligante (ROJAS-RAMÍREZ et al., 2019).

Rojas-Ramírez et al. (2019), avaliaram unicamente o impacto do uso do resíduo de vermiculita nas propriedades no estado endurecido das argamassas cimentícias, as composições foram misturadas utilizando-se a mesma relação água/sólidos, independente das alterações na consistência. Os teores de substituição foram variados de 5 a 20% e as propriedades no estado endurecido foram avaliadas a partir de ensaios de Arquimedes, resistência à tração na compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico e permeabilidade ao ar. Os resultados indicaram que até o teor de 10% de substituição não houve alterações estatisticamente significativas nos produtos.

Dias (2018), diante da problemática referente a quantidade de resíduos gerados e depositados inadequadamente, estudou a viabilidade do uso do resíduo de vermiculita em substituição a porção de areia fina natural na elaboração de argamassas de revestimento, objetivando a possibilidade de gerar propriedades melhoradas. No estudo, argamassas foram analisadas em diferentes proporções variadas de 0 a 100% e avaliadas no estado endurecido (resistência à compressão, resistência à tração e absorção) e diante do melhor resultado encontrado, foram confeccionadas placas para testes de desempenho térmico. A caracterização do resíduo de vermiculita mostrou uma grande quantidade de finos e características semelhantes as argilas, proporcionando assim melhor coesão entre os elementos o que promoveu melhoria nas suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas em até 60% quando comparada a argamassa de referência, sem adição do resíduo.

2.4. Bentonita

Segundo Oliveira (2018), bentonitas são argilominerais pertencentes ao grupo esmectita. São classificadas em função de sua capacidade física de inchamento quando se adiciona água. A bentonita sódica possui elevada capacidade de inchamento enquanto a bentonita cálcica possui menor ou nenhuma capacidade de expansão. As bentonitas sódicas/cálcicas, denominadas mistas, incham de forma moderada e formam géis de menor volume do que as bentonitas sódicas.

Atualmente, a bentonita é amplamente utilizada para melhorar o desempenho de argamassas de cimento. Bentonita é um tipo de mineral de argila hidratada que consiste principalmente em montmorilonita. Sua composição química inclui principalmente sílica, alumina e água (MENG et al., 2019). Com base no tipo e na proporção dos íons intercalares da

montmorilonita, as bentonitas podem ser divididas em bentonita de cálcio, bentonita de sódio e bentonita de magnésio (SEGAD et al., 2010; FERNANDEZ et al., 2009).

Ata et al. (2015) explicam que, tradicionalmente a bentonita têm sido utilizada na engenharia à prova d'água, especialmente em algumas obras subterrâneas e também em forros de argila geossintético que podem ser usados como barreiras hidráulicas em aterros para evitar a contaminação das águas subterrâneas pela disposição de resíduos.

Como a bentonita possui excelentes propriedades de aumentar seu volume em contato com água e por ser considerada não tóxica e inofensiva, ela pode ser utilizada na composição de argamassas (ANDREJKOVICOVÁ et al., 2015).

O mercado consumidor de bentonita moída seca tem como principais destinações de uso os setores de fabricação de produtos químicos (graxas e lubrificantes) e fabricação de produtos cerâmicos (pisos e revestimentos). Já para bentonita ativada, foi direcionada para os usos pelotização de minério de ferro, fundição e ração animal (OLIVEIRA, 2018).

A bentonita também pode ser introduzida a materiais de construção, como por exemplo o concreto. Estudos de Fadaie et al. (2019) e Amlashi et al. (2019) explicam que, essa adição pode ser utilizada em barragens de reservatório e geram um concreto com alta plasticidade e baixa permeabilidade.

A bentonita é exportada dos Estados Unidos para servir como absorventes de resíduos de animais de estimação, lama de perfuração, ligas de areia de fundição e pelotização de minério de ferro, sendo o Canadá, Japão e México os principais destinos (WILLETT, 2020).

Segundo dados do Mineral Commodity Summaries – 2020 (USGS), a produção mundial estimada de bentonita em 2021 foi de 18.000 t, representando uma redução de pouca mais de 1% do valor encontrado no ano de 2020. Relação semelhante ocorreu no Brasil, onde houve uma pequena redução, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Produção Mundial

Discriminação	Produção (t)			
	Países	2020	2021	(%)
China		2.500.000	2.500.000	13,89
Estados Unidos da América		4.240.000	4.300.000	23,89
Turquia		1.500.000	1.700.000	9,45
Grécia		1.300.000	1.300.000	7,22
Índia		3.500.000	3.500.000	19,44
Brasil		217.000	200.000	1,11
Alemanha		360.000	350.000	1,94
Outros países		4.583.000	4.150.000	23,06
Total		18.200.000	18.000.000	100,00

Fonte: Simmons (2022).

A abundância das reservas mundiais de bentonita nos principais países produtores é tamanha que suas estimativas não são dimensionadas. Já as reservas medidas de bentonita no Brasil foram de, aproximadamente, 54,1 Mt, com as participações estaduais: Paraíba (49,8%), São Paulo (33,6%) e Bahia (15,3%) (OLIVEIRA, 2018).

Em 2017, a produção bruta interna de bentonita foi de 616.929 t. A extração concentra-se no Estado da Paraíba com 459.000 t, ou seja 74,4% da produção nacional. Essa produção beneficiada, se divide entre moída seca e ativada, onde juntas totalizaram 310.685 t em 2017, desses 271.154 t foram de bentonita ativada e 39.531 t moída seca (OLIVEIRA, 2018).

2.4.1. Na composição de argamassa

Avaliando a impermeabilidade de argamassa com introdução de bentonita, Hosseini et al. (2017) usaram diferentes doses de montmorilonita inorgânica (bentonita de sódio) na mistura da argamassa de cimento, e o inchaço da bentonita ocorreu quando a água penetrou na matriz da argamassa, bloqueando o caminho de penetração da água e gerando melhorias significativas de impermeabilidade. Os ensaios utilizados para tais resultados foram a microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por dispersão de energia.

Yang et al. (2019), também avaliaram os efeitos da bentonita na estrutura dos poros e na permeabilidade do cimento em argamassas e os resultados dos testes mostraram que a adição de 8% de bentonita promoveu um aumento significativo de 61,48% para resistência à

compressão, 42,09% para resistência à flexão e 76,47% quanto a impermeabilidade. Os autores justificam esse comportamento ao refinamento da estrutura porosa do material que se manifesta principalmente por uma diminuição nos poros capilares grandes e um aumento nos poros capilares pequenos, além de seu formato de agulha que cresce na superfície ou na borda da bentonita, resultando em um caminho de penetração mais tortuoso para melhorar o desempenho da barreira da argamassa de cimento. Além disso, o diâmetro crítico dos poros diminuiu 67,3% quando foram incorporados 8% da bentonita. Com isso, a porosidade reduzida e o diâmetro crítico dos poros contribuíram para a melhoria da resistência à compressão e resistência à flexão, em comparação com a amostra de referência.

Man et al. (2019), investigaram as características microestruturais de argamassas de cimento com adição de argila bentonita. Os resultados indicaram que o incremento consecutivo da quantidade de bentonita em até 20% garantia melhorias significativas. Os teores de 10 e 15% melhoraram muito a densidade, porosidade, resistência à permeabilidade à água, resistência à compressão e desempenho de resistência à flexão do que a argamassa de referência. Foram utilizadas análises da microestrutura por DRX, MEV e espectroscopia no infravermelho e os autores perceberam que a adição de bentonita atuou preenchendo os poros e melhorando as propriedades da argamassa.

Mengliang et al. (2020), em um estudo sobre a influência de vários tipos de bentonitas (sódio, cálcio e magnésio), nas propriedades mecânicas e impermeabilidade de argamassas de cimento, em diferentes proporções (0, 2, 4, 6, 8 e 10%) de substituição da massa de cimento, foi possível concluir que os três tipos de bentonita proporcionaram uma melhora significativa no desempenho da argamassa e com o aumento do teor de bentonita, esse efeito é cada vez mais evidente. Na argamassa com 10% de teor de substituição a bentonita-sódio a melhoria na resistência à compressão, resistência à flexão e permeabilidade com atingiu 77,5, 54,5 e 115,7%, respectivamente. Quando utilizada a bentonita-cálcio as melhoras foram de 62,2, 47,9 e 101,9% e bentonita-magnésio 71,6, 52,2 e 137,3%. Com isso, fica notório o potencial de melhoria quanto as propriedades que interferem na durabilidade das argamassas de cimento.

Mengliang et al. (2020), justificam o bom resultado nas propriedades de impermeabilização e resistência das argamassas que contem bentonita principalmente ao volume e estrutura do material poroso. Explicam que, quanto mais bentonita é adicionada mais reduz a quantidade de poros da argamassa e como também ocorre refinamento na estrutura desses. Também identificaram, a partir da análise de microestrutura, que o refinamento dos poros é devido a atividade pozolânica promovida pela adição de 10% de bentonita.

A argamassa de cimento é feita misturando agregado fino e água em uma proporção específica, resultando em um material compósito heterogêneo e poroso. No entanto, a estrutura porosa da argamassa de cimento pode causar vazamentos nos edifícios, e a migração de água na estrutura porosa pode introduzir íons nocivos, como CO₂, Cl e SO₄²⁻, que podem causar danos químicos à estrutura (LOCHE et al., 2005; YOO et al., 2011). A solução é reduzir esse comportamento quanto a permeabilidade da argamassa de cimento e autores propõem a introdução de bentonita, que apresenta propriedades de impermeabilidade (MENGLIANG et al., 2020).

Quanto a trabalhabilidade, Mengliang et al. (2020) avaliaram os efeitos de diferentes tipos de bentonita e foi possível observar que a consistência e a fluidez da argamassa diminuíram com a quantidade crescente de bentonita, os autores justificam esse comportamento pela absorção de água pela bentonita.

2.5. Argamassa

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define como argamassa, uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria. Podendo ser empregada no assentamento e/ou revestimento (ABNT, 2013).

Com o objetivo de regularizar, proteger e uniformizar as superfícies, as argamassas de revestimento podem ser definidas como um revestimento de múltiplas camadas, capaz de recobrir a superfície de concreto ou alvenaria, ao mesmo tempo em que cria um substrato adequado para receber o acabamento final (SOUZA, 2018).

No procedimento tradicional, o revestimento argamassado é composto de, no mínimo três camadas, chapisco, emboço e reboco, com as seguintes funções: o chapisco é a camada de preparo da base, elemento de ligação entre a base e o substrato, garantindo uma melhor aderência, devido a sua superfície rugosa; já o emboço é a camada de regularização, propiciando uma camada homogênea para receber outras camadas e o reboco, camada final que pode ou não receber outra camada decorativa (SANTOS, 2019).

A NBR 13749 (ABNT, 2013) especifica quais as espessuras que devem ser executadas para revestimento de argamassa externo e interno de paredes e tetos, conforme Tabela 6.

Tabela 6. Espessuras admissíveis para camada de revestimento de argamassa

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

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013).

Pczieczek (2017) relata em seu trabalho, que vários fatores são determinantes no resultado final de uma argamassa. A autora comenta que a qualidade no estado fresco é determinada pela consistência, trabalhabilidade, plasticidade, retenção de água, massa específica e teor de ar incorporado.

2.5.1. Consistência/ trabalhabilidade

Liu et al. (2020), observaram no estado fresco da argamassa, em estudo sobre argamassa contendo areia reciclada de blocos de concreto aerados em diferentes granulometrias, que a argamassa com areia fina reciclada (0,15-0,3mm) de reposição mostrou que a condição de trabalho havia sido nitidamente reduzida, ilustrando que a partícula mais fina tende a absorver a água mais rapidamente no estágio inicial devido ao aumento da área superficial.

2.5.2. Retenção de água

A retenção de água é a capacidade de uma argamassa de liberar demoradamente a água empregada na sua preparação para o meio ambiente ou para substratos porosos. Com isso, quanto maior a quantidade de água empregada na preparação de uma argamassa, maior o volume de água a ser evaporado, gerando sempre retração por maior que seja a capacidade de uma mistura em reter água (RECENA, 2012).

Em pesquisas e estudos de argamassa, com substituição de agregado, é possível constatar que os traços compostos com agregado reciclado em substituição ao agregado natural nas argamassas, apresentaram valores de retenção de água superiores aos dos traços naturais (FONTES et al., 2013; SANTAMARÍA-VICARIO et al., 2015).

2.5.3. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Em estudo sobre argamassas produzidas com rejeitos de minério de ferro, Fontes et al. (2016) constataram um aumento da densidade de massa a partir do aumento do teor de substituição do agregado em relação a argamassa de referência. O que pode ser justificado, pois o resíduo utilizado possui uma quantidade maior de finos do que o agregado natural promovendo assim uma melhor junção dos grãos.

Em relação ao teor de ar incorporado, os mesmos autores, explicam que a capacidade de incorporação de ar apresenta valores menores em relação a argamassa de referência, e que esse comportamento pode ser justificado devido à granulometria (finura) do resíduo e conseqüentemente melhor união dos grãos, que o agregado natural.

Fabro et al. (2022), realizou um ensaio com duas argamassas de fabricantes diferentes, os pesquisadores concluíram que a densidade de massa aparente está diretamente relacionada com a quantidade de vazios da argamassa, eles justificam que uma quantidade maior de vazios no interior da argamassa que dificulta a passagem da onda ultrassônica que se propaga melhor em matéria sólida, resultando em uma menor densidade.

2.5.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido

De acordo com Pcziecsek (2017), para que uma argamassa no estado endurecido desempenhe um bom papel durante toda a sua vida útil, é importante verificar se atende os seguintes fatores: retração, resistência à aderência, resistência à compressão, módulo de elasticidade e durabilidade ao ataque de sulfatos.

2.5.5. Resistência a aderência

Vaz e Carasek (2019), encontraram uma relação quanto a resistência a aderência e os teores de cimentos utilizados, e explicam tal feito através do estudo de Carasek em 1997, que encontrou resistências de aderência para revestimentos com argamassa industrializada com valores intermediários ao de duas mistas e uma simples; a explicação foi que em altos teores de cimento (em uma mista e na simples) a aderência foi maior, ou seja, onde esse teor foi baixo, a resistência foi menor.

Outra relação, expressada por Vaz e Carasek (2019), é do ponto de vista da granulometria das areias utilizadas, dois estudos demonstraram que no geral os revestimentos

com agregados miúdos classificados como areia média apresentaram maiores valores de aderência do que os produzidos com areia fina. Ambos trabalhos concluíram também que, além da influência da areia, as características do substrato são muito relevantes para a aderência. Na mesma linha de raciocínio, o outro trabalho demonstrou que revestimentos de argamassa com areia fina apresentaram resultados de aderência até 20% superiores do que os revestimentos produzidos com areia muito fina.

Outro fator importante que interfere na propriedade de aderência das argamassas é a espessura do revestimento, alguns documentos técnico-normativos (sobre requisitos mínimos de aderência) apresentam exigências para serem considerados adequados, conforme norma NBR 13749 (VAZ & CARASEK, 2019).

2.5.5.1. Módulo de elasticidade

A deformabilidade de argamassas de revestimento é essencial para a minimização de uma das anomalias mais frequentes nas fachadas de edifícios: o aparecimento e a propagação de fissuras. Estas fissuras ocorrem devido a tensões internas na argamassa de revestimento, em consequência de deslocamentos impostos pela estrutura de suporte subjacente. Os estudos de deformabilidade devem incluir um ou mais métodos experimentais para a determinação do módulo de elasticidade das argamassas de revestimento em questão, a fim de avaliar a qualidade e a fiabilidade de cada método experimental. Neste caso os autores realizaram testes pelo método da Frequência de Ressonância e pelos métodos de Ultrassons direto e de Ultrassons indireto (MARQUES et al., 2019).

Outra relação que Fabro et al. (2022) ressaltam, é o módulo de elasticidade dinâmico correlaciona-se com a resistência à tração na flexão, e que esta possui uma boa correlação com o módulo de elasticidade dinâmico. Essa correlação se deve ao fato de que o módulo de elasticidade está relacionado aos vazios da argamassa e, ao serem incapazes de transmitir cargas, acabam afetando a resistência à tração.

2.5.5.2. Resistência à compressão

O experimento de Higashiyama et al. (2012), sobre argamassas contendo agregados de resíduos cerâmicos, apresentou resistência à compressão maior do que a argamassa confeccionada com agregado natural. Os autores associam esse resultado a quantidade de finos

presente no resíduo (maior que na areia), melhorando a coesão entre o agregado e a pasta de cimento e conseqüentemente sua estrutura de poros.

Em estudo sobre uso de areias alternativas em argamassas, Srivastava e Singh (2020) observaram um aumento na resistência mecânica a partir da introdução de rejeitos como agregados. Os autores apresentam alguns exemplos que garantem esse melhor rendimento, como pó de mármore entre 30 e 40% e escória de cobre até 50%, e ainda complementam que de forma geral a utilização de agregados finos de reciclagem na argamassa promove propriedades no estado fresco e endurecido adequadas.

Awoyera et al. (2017), investigaram em argamassas o efeito do pó cerâmico e dos finos cerâmicos como substituição parcial do pó de cimento e agregado fino, respectivamente. Eles mostraram que a amostras incluindo 100% de agregado fino cerâmico (substituído na areia) e 10% de pó cerâmico (substituído no cimento), forneceu maior resistência à compressão e flexão do que as amostras de referência e esse desempenho positivo foi atribuído à ação de preenchimento e à reação pozolânica relativa que ocorreu na mistura.

Testes realizados em argamassas contendo resíduo de vermiculita identificaram que a proporção de 60% em teor de substituição de areia por resíduo, alcançou maiores valores de resistência quando comparada a argamassa de referência (sem adição do resíduo), a autora justifica esse valor devido as características mineralógicas do grupo micáceo encontradas no mineral vermiculita, semelhante as argilas, que gera uma maior coesão entre as moléculas de água e as partículas de resíduo e do cimento, proporcionando uma maior resistência à compressão (DIAS, 2018).

2.5.5.3. Absorção de água

A absorção de água da argamassa por ação capilar é uma propriedade essencial, pois ajuda a determinar a taxa de entrada de água na argamassa por condensação da atmosfera, aumento capilar das águas subterrâneas e da chuva (AWOYERA et al., 2017).

Experimento realizado com laterita (tipo de solo) em substituição no agregado fino de argamassas em diferentes proporções, apresentou maiores valores de absorção capilar na amostra que continha 100% de teor de substituição, esse comportamento pode ser atribuído à propriedade de absorção de água da laterita, agregado dominante na mistura, e a sua estrutura porosa (AWOYERA et al., 2017).

Outro experimento encontrou resultados semelhantes, Dias (2018) avaliou argamassas com resíduo de vermiculita em substituição a areia natural e identificou um aumento de

absorção (por imersão e capilaridade) a medida em que se aumentava o teor de substituição, a autora justifica os resultados pela maior quantidade de poros permeáveis nas amostras contendo resíduo.

Fabro et al. (2022), afirmam que a absorção de água está diretamente relacionada à quantidade de vazios da argamassa, pois a onda ultrassônica tem uma velocidade menor em corpos de porosidade maior.

2.6. Caracterização térmica em argamassas

A condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme (NBR 15220) (ABNT, 2005).

Um experimento apresenta o ensaio de fluxo térmico (tendo como aparato uma câmara térmica), como alternativa para a análise do comportamento térmico das alvenarias mediante a troca de calor, tornando possível obter significativas variáveis, a exemplo de atraso e amortecimento térmico, além da condutividade térmica (SOUZA, 2017).

O amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais, são fenômenos de grande significado para o comportamento térmico de um edifício e ambos estão associados a inércia térmica. Ressaltam também que o amortecimento e o atraso térmico serão maiores quanto maior for a inércia do elemento da construção. Exemplificam que uma parede apresenta maior ou menor inércia segundo sua massa e sua espessura. Com isso, os revestimentos desempenham papel importante, pois revestimentos que tem propriedades isolantes que reduzem as trocas de calor com a parede, e conseqüentemente reduzem sua inércia (FROTA & SHIFFER 2005).

2.6.1. Análise de estudos térmicos em argamassas

Souza (2017), avaliou o desempenho térmico de vedações em blocos de concreto, produzidos com lã de rocha em substituição parcial da areia, em diversas proporções, a pesquisadora realizou ensaios para determinação da condutividade térmica dos materiais e do fluxo térmico dos painéis de alvenaria, por meio da criação de quatro painéis de alvenaria com diferentes traços. Estes painéis dividiram a câmara térmica (revestida internamente por placas de poliestireno com espessura de 3 cm) em dois ambientes, onde apenas em um constava uma

fonte de calor (duas lâmpadas incandescentes com 100 W de potência cada), como pode-se observar na Figura 6.

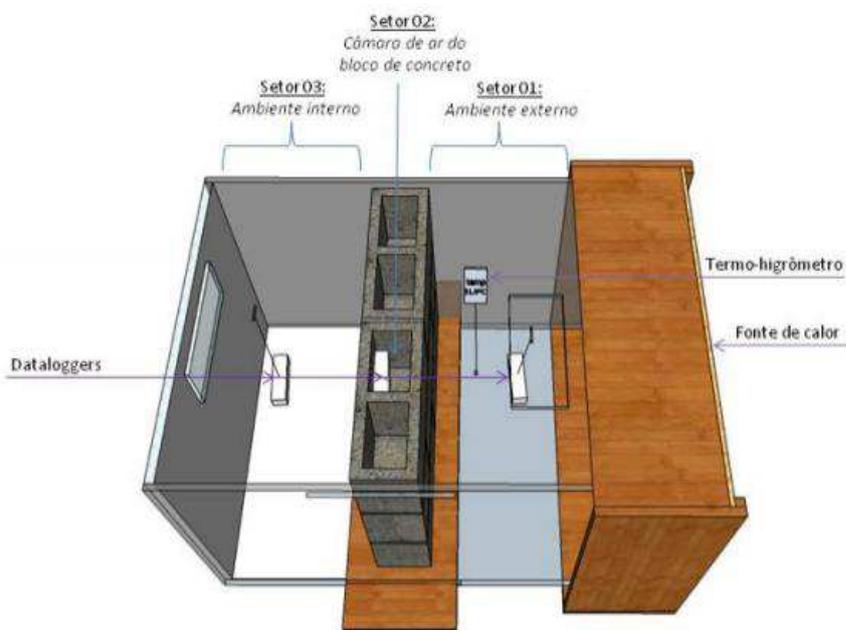


Figura 6. Maquete virtual de protótipo denominado câmara térmica.

Fonte: Souza (2017).

Os dados foram coletados por meio de sensores e durou 24 horas, em seguida realizou-se a análise comparativa dos valores do amortecimento térmico e do atraso térmico dos diversos painéis de alvenaria. A autora explica que a adição da lã de rocha apresentou pequenas diferenças no comportamento térmico, já quanto a influência de argamassa de revestimento nos blocos notou-se significativa melhoria do desempenho térmico, quando comparada às alvenarias não rebocadas, em razão do aumento da massa térmica, refletindo na otimização das propriedades térmicas, o mesmo pode ser notado quando a alvenaria rebocada tem sua superfície externa pintada com a cor branca, causando a redução do fator de calor solar em torno de 75% quando comparado ao valor da alvenaria não rebocada e de aproximadamente 60% em relação à alvenaria rebocada não pintada.

Geraldo et al. (2020), avaliaram o desempenho térmico de argamassas, convencional de cimento Portland e outra ativada por álcalis, expostas a luz do sol e avaliadas quanto a influência da cor (Figura 7). Para realizar o experimento placas foram confeccionadas em diferentes espessuras (5, 7 e 10mm) e após o processo de cura as mesmas faziam o fechamento (como uma tampa) em uma caixa de poliestireno expandido (EPS). A exposição ocorreu em horário com temperaturas mais elevada (12:00) na região e durou 45 min, os dados foram coletados a

partir de câmara de infravermelho para a face superior (exposta) e termopares para face inferior (dentro da caixa), estes dados foram coletados a cada 15 min. Os resultados mostraram que a espessura da placa de argamassa influencia o desempenho térmico - quanto maior a espessura, menor a temperatura registrada. Os resultados da placa não pintada mostraram que a argamassa ativada por álcalis aqueceu mais de que a argamassa de referência, o que está relacionado à cor escura do material, no entanto quando a superfície foi pintada, para ambas as placas, o desempenho térmico foi igual ou melhor que o argamassa de referência. Ou seja, os materiais apresentaram propriedades térmicas melhoradas quando pintadas.

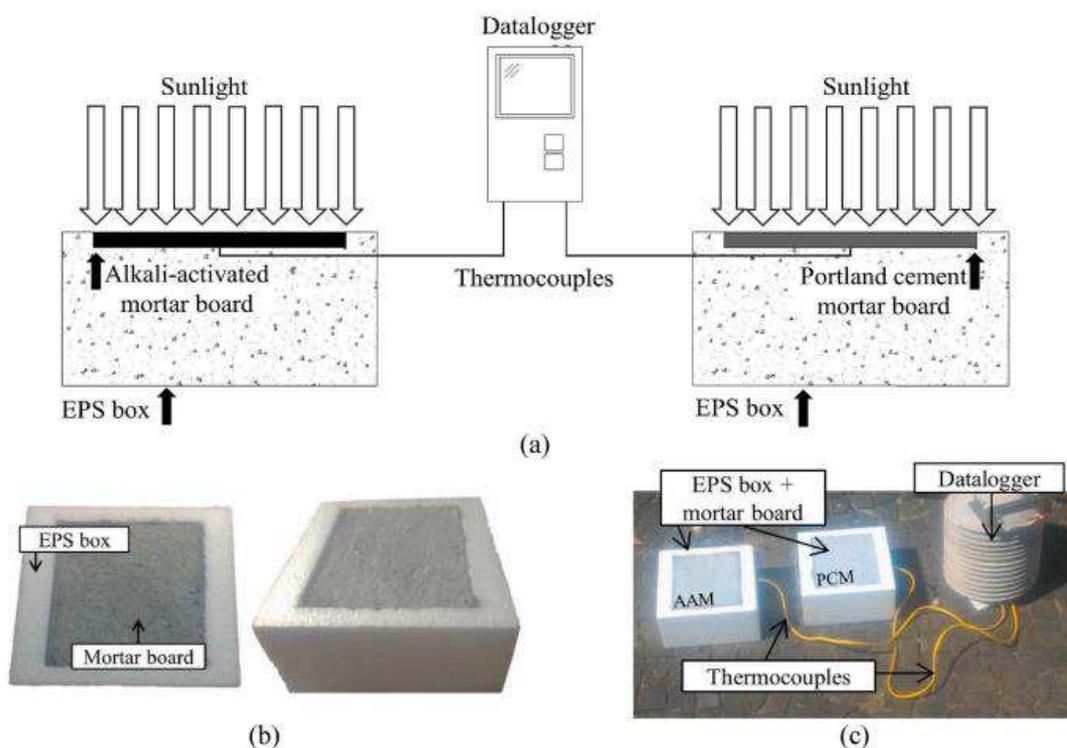


Figura 7. Base experimental para análise de condutividade térmica, primeiro e segundo método, respectivamente.

Fonte: Geraldo et al. (2020).

Franzen (2015), em seu estudo sobre vedações verticais executadas com light steel framing (um sistema aberto, modular, de rápida execução, fácil manutenção e sustentável) analisando o desempenho térmico e acústico, com diferentes produtos, entre eles industrializados, resíduo industrial, gesso acartonado moído e em pedaços (resíduo da construção) e materiais utilizados em outros sistemas construtivos. Chegaram à conclusão que os painéis com acabamento na face externa (estuche sintético), massa látex PVA na parte interna e no interior do painel fibra cerâmica obtiveram o melhor desempenho.

Conforme a Figura 8, é possível observar a planta baixa do laboratório de acústica do Departamento de Mecânica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), e o vão entre as salas de emissão e recepção onde foi instalada os componentes para avaliação (Figura 9).



Figura 8. Infraestrutura utilizada (espaço físico).

Fonte: Franzen (2015).



Figura 9. Vão entre as salas no laboratório do departamento de mecânica da UFPR.

Fonte: Franzen (2015).

Para os ensaios térmicos, foi necessária a confecção de uma fonte de calor que mantivesse a temperatura de uma das faces do painel constante por um determinado tempo, simulando uma fachada que recebe calor na face externa (Figura 10). A fonte de calor foi montada em uma estrutura de madeira (MDF) sobre cavalete com rodízio com 1,20 x 1,78 x

0,30 m, revestida internamente com papel aluminizado e 12 lâmpadas de 250 watts totalizando 3.000 watts, o que representa 1.449 watts/m². O controle de temperatura e tempo da fonte de calor é feito por um termostato ligado a um disjuntor. A fonte de calor possui 2,13 m² que é exatamente o tamanho do vão entre as salas de emissão e recepção (Figura 8). A fonte era ligada antes do início dos ensaios e demorava aproximadamente 28 minutos para alcançar a temperatura de 80°C (temperatura de execução dos ensaios). O ensaio térmico iniciava após o atingimento de 80°C na superfície externa do painel. O termostato foi regulado para desligar quando a temperatura da superfície aquecida alcançasse 85°C e ligasse quando a temperatura da superfície estivesse a 75°C (FRANZEN, 2015).



Figura 10. Fonte térmica utilizada para o aquecimento da face externa do painel.

Fonte: Franzen (2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este tópico apresenta a descrição do programa experimental empregado para caracterização dos materiais e análise do desempenho termomecânico de argamassas com resíduos de vermiculita e bentonita.

O experimento foi desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) –PB, no Laboratório de Construções Rurais e Ambientação (LaCRA), no ano de 2021 e 2022, conforme etapas no fluxograma (Figura 11).

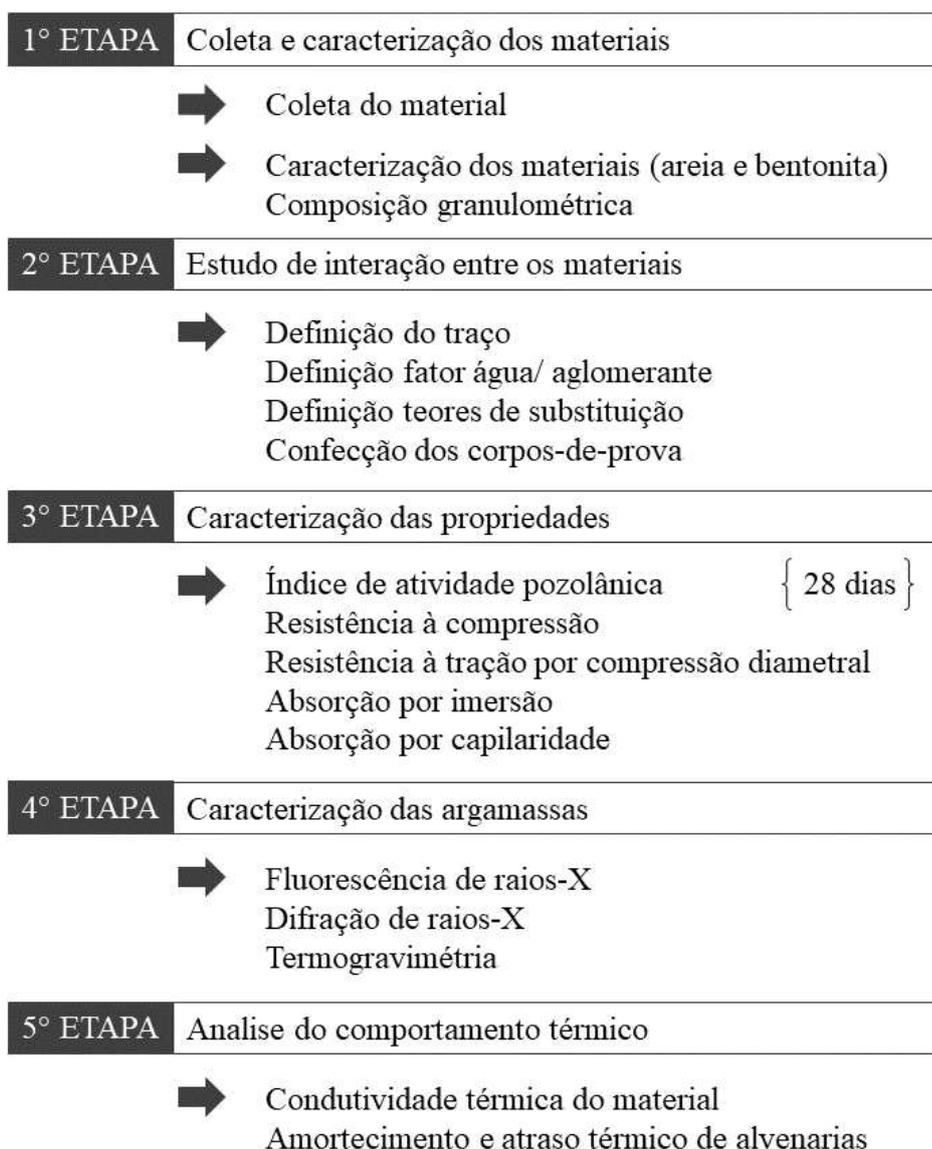


Figura 11. Fluxograma com etapas do experimento.

3.1. Coleta e caracterização dos materiais

A Bentonita foi coletada na empresa Bentonisa, localizada no município de Boa Vista – PB, km 19, a quantidade adquirida foi em média 50 kg do material, que dentre os diversos tipos (sódio, cálcio e magnésio) se apresenta como sódica, definida como o tipo que tem maior grau de expansão (Figura 12 A e B).



Figura 12. (A) Aspecto bentonita; (B) Embalagem do material disponibilizado pela empresa Bentonisa.

A caracterização dos materiais utilizados na produção da argamassa, seguiram as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

3.1.1. Distribuição granulométrica da bentonita e da areia natural

Aplicou-se como agregado miúdo a areia natural (Figura 13), obtida do leito do Rio Paraíba, entre Barra de Santana e Cabaceiras - PB. Utilizou-se também como agregado miúdo, porém em diferentes teores de substituição a areia natural, o resíduo de vermiculita em sua porção fina, similar às características de granulometria da areia utilizada.

Especificamente o resíduo de vermiculita, em substituição do agregado miúdo da argamassa, foi proveniente de mesma coleta do estudo de Dias (2018) não sendo necessário, neste caso, repetir os ensaios de granulometria, massa unitária e absorção de água, já obtidos pela autora citada.

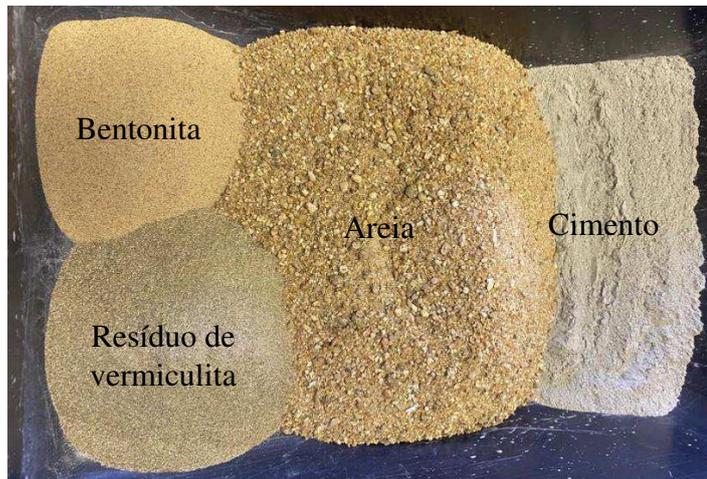


Figura 13. Aspecto físico dos materiais secos utilizados no experimento.

Diante disso, foi necessário realizar o ensaio de composição granulométrica conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) da bentonita e a areia natural.



Figura 14. (a) Série de peneiras; (b) Mesa vibratória.

Após o ensaio (com peneiras de malhas 4; 8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15mm, com fundo coletor) foram calculadas as porcentagens dos materiais (retidos e acumulados). O módulo de finura foi determinado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa da areia e da bentonita, nas peneiras da série normal, dividida por 100, com aproximação de 0,01 e as dimensões máximas características desses materiais correspondem à abertura nominal (mm), da malha da peneira na qual cada material apresentou uma porcentagem retida acumulada, sendo ela, igual ou inferior a 5% em massa.

3.1.2. Aglomerante

Para produção das argamassas foi utilizado foi o cimento Portland CP II E, como aglomerante, o mesmo é fabricado pela empresa Montes Claros e sua escolha ocorreu devido à ausência de material pozolânico, com o objetivo de avaliar a existência de propriedades pozolânicas de cada material (bentonita e resíduo de vermiculita) individualmente, sem influência do cimento selecionado.

No ensaio de atividade pozolânica foi utilizado cimento Portland CPII F – 32, conforme exigência da norma NBR 12653.

3.1.3. Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de Campina Grande, fornecida pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba).

3.2. Estudo de interação/ produção das argamassas

Esta etapa, teve como base o estudo de Dias (2018), que utilizou o traço de 1:4 (cimento: areia) e obteve em seus resultados (quanto resistência mecânica e gradiente térmico) 60% como melhor teor de substituição no agregado convencional (areia) por resíduo de vermiculita, em mesma proporção de granulometria, este mesmo valor foi utilizado como base neste experimento, alterando apenas a proporção de bentonita no aglomerante.

Com isso, o agregado utilizado, teve como composição areia e resíduo de vermiculita em 60% de teor de substituição a porção fina (mesma granulometria) da areia. Já a bentonita será substituída no aglomerante em 0, 4, 8 e 12%.

Em seguida foi estabelecido o fator água/aglomerante de 0,70 para a argamassa de referência, que teve como parâmetro valores utilizados em argamassas convencionais com a mesma aplicação. Para atingir a mesma consistência da argamassa de referência foi necessário aumentar o fator água/cimento gradativamente à medida que se aumentava a proporção de substituição como observa-se na Tabela 7.

Tabela 7. Traço, composição, teores de substituição e fator água aglomerante utilizados no experimento

Traço	Composição do traço	Teor de substituição agregado (%)	Teor de substituição aglomerante (%)	Nomenclatura	Fator água/aglomerante
1:4	cimento:areia	0	0	A0C0	0,70
1:4	cimento (0% B): areia (60% RV)	60	0	A60C0	0,80
1:4	cimento (4% B): areia (60% RV)	60	4	A60C4	0,85
1:4	cimento (8% B): areia (60% RV)	60	8	A60C8	0,90
1:4	cimento (10% B): areia (60% RV)	60	12	A60C12	0,95

*B: proporção de bentonita substituída no aglomerante; RV: proporção de resíduo de vermiculita substituída na porção fina do agregado.

A nomenclatura utilizada para as argamassas foi de “AC”, onde “A” representa a areia (agregado) e “C” cimento (aglomerante). Após a letra “A”, foi colocado o número que representa o teor de substituição da porção fina do agregado pelo resíduo de vermiculita, em porcentagem, que neste caso é 60% para todos os tratamentos, após o “C” é inserido o valor do teor de substituição de bentonita no aglomerante. Com exceção da argamassa se referência que não contém nenhuma substituição, tendo como nomenclatura A0C0.

3.2.1. Produção dos corpos-de-prova

Após a elaboração dos estudos com diferentes proporções, foram confeccionados (Figura 15) corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, seguindo as exigências da NBR 7215 (ABNT, 1996).



Figura 15. (a) Moldagem das argamassas nos corpos-de-prova; (b) Moldagem das argamassas finalizadas.

Para cada proporção (A0C0, A60C0, A60C4, 60C8 e A60C12) foram utilizados 4 corpos de prova para testes de resistência mecânica, 4 para testes de resistência à tração por compressão diametral, 4 para testes de absorção por capilaridade e 4 para testes de absorção por imersão, com tempo de cura úmida (imerso em água) de 28 dias para todas as proporções, totalizando 80 corpos de prova (5 proporções x 16 unidades de corpos de prova ao total, para cada proporção).

3.2.2. Índice de atividade pozolânica da bentonita e do resíduo de vermiculita

Além dos copos de prova confeccionados, foi necessário confeccionar copos de prova específicos para análise do desempenho do índice de atividade pozolânica da bentonita e do resíduo de vermiculita realizado segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014).

3.3. Caracterização das propriedades

3.3.1. Resistência à compressão

As avaliações de resistências à compressão foram realizadas conforme recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo utilizados 4 corpos de prova para cada teor de substituição, avaliados aos 28 dias de cura. Os ensaios foram realizados em máquina para ensaios de compressão semiautomática com capacidade máxima de 24.000 kgf da marca Pavitest.



Figura 16. Equipamento para realização do ensaio de resistência à compressão.

3.3.1.1. Avaliação da eficiência do ensaio

Em seguida ao ensaio de resistência à compressão, foi necessário avaliar a eficiência dos ensaios de resistência a compressão a partir do coeficiente de variação dos resultados (cve), inicialmente através da obtenção do desvio-padrão do ensaio pela média das amplitudes dos resultados dos exemplares, por meio da Equação 1.

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \times n} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: A_i = amplitude dos resultados, diferença entre o maior e menor resultado do exemplar em megapascals (MPa); n = número de exemplares da amostra; d_2 = coeficiente (Tabela 8).

Tabela 8. Coeficiente d_2

Nº corpos-de-prova	2	3	4	5	6
Coeficiente d_2	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007).

Em seguida, foi calculado o coeficiente de variação do ensaio (cve) pela Equação 2.

$$CV_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: CV_e = coeficiente de variação do ensaio; S_e = desvio padrão calculado; f_{cm} = resistência média dos exemplares, em Mpa.

Desse modo, avaliada a eficiência do ensaio, de acordo com a Tabela 9.

Tabela 9. Avaliação da eficiência do ensaio

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Excelência	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
$CV_e \leq 3,0$	$3,0 < CV_e \leq 4,0$	$4,0 < CV_e \leq 5,0$	$5,0 < CV_e \leq 6,0$	$CV_e \geq 6,0$

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007).

3.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

As avaliações de resistências à tração por compressão diametral foram conduzidas conforme indicações da NBR 7222 (ABNT, 2015), sendo utilizados 4 corpos-de-prova para cada teor de substituição, avaliados aos 28 dias de cura. Os ensaios foram realizados em máquina para ensaios de compressão semiautomática com capacidade máxima de 24.000 kgf da marca Pavitest.

3.3.3. Absorção de água por imersão

Este ensaio (Figura 17) foi realizado através de 4 corpos-de-prova, aos 28 dias de cura. O ensaio seguiu a metodologia descrita na NBR 9778 (ABNT, 2009).



Figura 17. Ensaio de absorção de água por imersão.

3.3.4. Absorção de água por capilaridade

O ensaio (Figura 18) de absorção por capilaridade ocorreu conforme NBR 9779 (ABNT, 1995), utilizando, assim como nos ensaios citados anteriormente, 4 corpos-de-prova, aos 28 dias de cura.



Figura 18. Ensaio de absorção de água por capilaridade.

3.4. Caracterização das argamassas

Para uma melhor compreensão e justificativa do comportamento dos materiais em estudo, foi necessário realizar caracterizações para diagnósticos da caracterização química, por meio do ensaio de espectroscopia de raios-x (EDX) por dispersão de energia, análise mineralógica, por difração de raios-x (DRX), e análise térmica, por meio de análise

termogravimétrica (TG). Para os devidos ensaios, foram utilizadas amostra de três diferentes proporções (A0C0, A60C4 e A60C12) com a melhor proporção de substituição de bentonita mediante os resultados obtidos na Etapa 3. Cada amostra foi proveniente da argamassa no seu estado em pó.

3.4.1. Fluorescência de raios-x

O ensaio teve com o objetivo identificar os elementos químicos das amostras. Após reduzido a pó, material fornecido foi quarteado e prensado manualmente em forma de pastilha.

3.4.2. Difração de raios-x

A difração de raios X (DRX) é uma técnica que gera amplas informações quanto à qualificação, caracterização e quantificação dos minerais presentes no material. O ensaio foi conduzido em um equipamento Shimadzu XRD-6000, utilizando radiação Cu $k\alpha$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA, varredura entre 2θ de 5° a 40° e com uma velocidade de $2^\circ/\text{min}$.

3.4.3. Termogravimetria

Esta análise se baseia na perda de massa com a variação da temperatura e foi conduzido em um aparelho TGA 51 da Shimadzu. Foram utilizados em torno de 5 mg do material, taxa de aquecimento de $10^\circ/\text{min}$, da temperatura ambiente até 1.100°C , sob atmosfera de nitrogênio.

3.5. Análise do comportamento térmico

O aparato experimental, assim como execução dos ensaios dos próximos tópicos foram realizados dentro de câmara térmica. A câmara climática possui área de $5,7 \text{ m}^2$, pé-direito de $2,65 \text{ m}$ e com uma unidade de refrigeração, mantendo a temperatura constante em todos os ensaios.

3.5.1. Condutividade térmica do material

A condutividade térmica do material, foi avaliada a partir de placas de argamassa compostas por diferentes proporções de substituição de bentonita e resíduo de vermiculita, avaliadas em um protótipo conforme etapas descritas.

3.5.2. Confeção da caixa térmica I

Desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (Lacra), o protótipo denominado “Caixa térmica I” (Figura 19) se resume a uma caixa retangular, onde foi inserida placa de argamassa que dividia a caixa em dois espaços: setor 1 - com fonte de calor, simulando assim o ambiente externo de uma edificação e setor 2 – sem fonte de calor, simulando o ambiente interno de uma edificação.

Todo o sistema é formado por três partes fundamentais: envoltório, fonte radiante e sistema de instrumentação. O envoltório confeccionado em material MDF (Medium Density Fiberboard), com dimensões de 560 x 230 x 200mm e 15mm de espessura, e seu isolamento interno feito por isopor com 12mm de espessura revestido com folha de alumínio para melhor proteção. A fonte radiante composta por uma lâmpada halógena com potência de 15W. O sistema de instrumentação contém um Arduino do tipo UNO com cartão de memória (para armazenamento de dados); dois sensores de temperatura do tipo 18B20 (faixa de trabalho entre -55 a 125°C) que foram locados no centro de cada uma das faces (interna e externa) das placas protegidos por fita isolante e isopor e dois sensores do tipo DHT22 para registro da temperatura do ambiente nos setores 1 e 2.

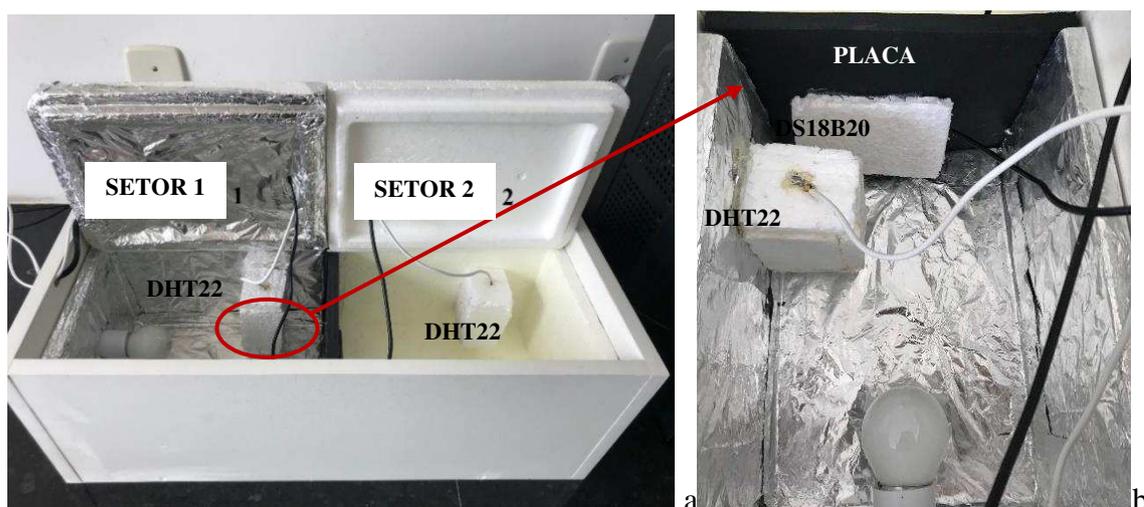


Figura 19. (a) distribuição dos setores na caixa; (b) imagem ampliada do setor 1.

Conforme a Figura 19, o setor 1 (com fonte de calor) possui tampa, utilizada para fechar o espaço citado, que foi fechada e bem vedada durante todo o experimento, para que as temperaturas se mantivessem constantes. Já no setor 2 (sem fonte de calor) precisou ser retirada esta tampa de fechamento, pois foi observado que ao longo do experimento a temperatura neste setor não iria se manter constante conforme a temperatura da câmara climática. Com esta alteração a temperatura do setor 2 se manteve equivalente a temperatura da câmara climática, simulando o espaço interno de uma edificação.

3.5.3. Produção das placas de argamassa

Foram produzidas cinco placas de argamassa, referente as composições em análise (A0C0, A60C0, A60C4, A60C8, A60C12) com comprimento de 190mm, altura 150mm e 200mm de espessura, utilizando-se moldes de madeira (Figura 20) e cura úmida de 28 dias para cada uma das placas (Figura 21).



Figura 20. Moldes de madeira para confecção das placas.

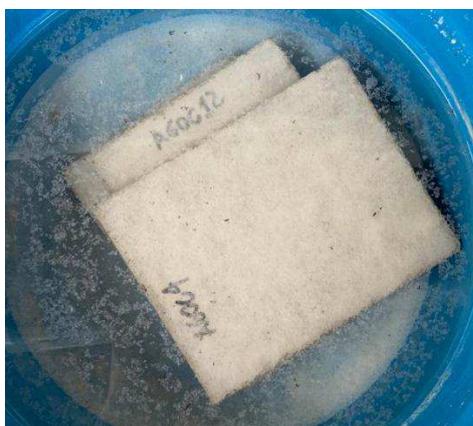


Figura 21. Placas em processo de cura por 28 dias.

3.5.4. Realização do ensaio

O ensaio iniciou a partir da introdução da placa na caixa térmica I e acionamento de todo o sistema (fonte de radiação e refrigeração da câmara térmica) simultaneamente. O fluxo térmico do sistema saiu do setor 1 (fonte de radiação), atravessou a placa de argamassa e chegou ao setor 2. Os valores de temperatura foram coletados e armazenados a cada minuto durante um período de 5 horas, até que as temperaturas em ambas das faces da placa permanecessem constantes. Para cada placa foram realizadas 4 repetições, afim de gerar confiabilidade, em seguida todos os dados registrados foram transferidos para planilha eletrônica para gerar a média dos valores obtidos.

3.5.5. Cálculos

Para o coeficiente de condutividade (k) utilizou-se a lei de Fourier que define o valor de transferência de calor por condução (Equação 3). A condutividade de cada composição foi resultado da média dos últimos 10 min de dados, onde os dados permaneceram constantes.

$$k = \frac{e \cdot q_{cond}}{A \cdot (T_e - T_o)} \quad (\text{Eq.3})$$

Em que: e = espessura da placa (m); q_{cond} = taxa de transferência de calor por condução (W); A = área da placa exposta a radiação (m²); T_e = temperatura da face da placa exposta à radiação (K); T_o = temperatura da face da placa oposta à radiação (K).

De acordo com o princípio do balanço de energia na superfície da placa, o fluxo de calor que chega por condução é igual à taxa de transferência de calor que chega por convecção ($q_{cond} = q_{conv}$), então para se obter o valor da taxa de transferência de calor por condução é possível calcular pela equação de resfriamento de Newton (Equação 4).

$$q_{conv} = A \cdot h \cdot T_o - T_a \quad (\text{Eq.4})$$

Em que: A = área da placa exposta à radiação (m²); h = coeficiente médio de transferência de calor por convecção (W/m².K⁻¹); T_o = temperatura da face da placa oposta à radiação (K); T_a = temperatura no ambiente oposto à radiação (K).

Incropera et al. (2008), citaram que a faixa de valores do coeficiente de transferência de calor (h) em convecção natural para diversos gases varia de 2 a 25 m⁻¹.K⁻¹/W. Como h = 1/R, e conforme citado pela NBR 15220 (ABNT, 2005), a resistência (R) da camada de ar adjacente à camada de ar externa de um componente que transfere calor por radiação e/ou convecção para fluxo na direção horizontal/ascendente ou descendente é igual a 0,04 m⁻¹.K⁻¹/W. Adotando R como 0,04 m⁻¹.K⁻¹/W, tem-se h utilizado para nosso cálculo igual a 25 W/m².K⁻¹. Conforme o princípio de balanço de energia, o fluxo de calor que chega à superfície da placa por condução é igual a taxa de transferência de calor por convecção: q_{cond} = q_{conv} (Equação 5).

$$k \cdot A \cdot (T_e - T_o/e) = A \cdot h \cdot (T_o - T_a) \quad (\text{Eq.5})$$

Foram realizados os cálculos dos parâmetros de desempenho térmico através dos procedimentos definidos pela norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005), calculando-se a resistência térmica (R) e transmitância térmica (U).

A condutividade térmica de um material é inversalmente proporcional a resistência térmica (quanto maior condutividade, menor resistência a passagem do calor). A resistência térmica foi calculada por meio da Equação 6.

$$R = \frac{e}{k} \quad (\text{Eq.6})$$

Em que: R = resistência térmica (m⁻¹.K⁻¹/W); e = espessura da placa (m); k = coeficiente de condutividade térmica do material (W/m⁻¹.K⁻¹).

A transmitância térmica (U), determina o nível de isolamento térmico, onde uma baixa transmitância apresenta maior isolamento térmico foi calculada pela Equação 7.

$$U = \frac{1}{R} \quad (\text{Eq.7})$$

Em que: U = transmitância térmica ($W/m^2.K^{-1}$); R = resistência térmica ($m^2.K/W$).

3.5.6. Amortecimento e atraso térmico em alvenarias

A análise do comportamento térmico de alvenaria pode ser avaliada a partir da inércia térmica, que pode ser compreendida como uma unidade que nos mostra o quanto de calor o sistema construtivo captura do ar interno e podendo ser calculada por meio de ensaios que envolvem as temperaturas na face exposta e oposta a uma fonte de calor.

Foram confeccionadas minis paredes de alvenaria, rebocadas com as argamassas de revestimento propostas (contendo diferentes teores de substituição de bentonita e resíduo de vermiculita), onde foi realizado o ensaio de fluxo térmico à partir do protótipo desenvolvido, denominado com Caixa Térmica II. Com isso, foi possível observar a influência dos materiais adicionados (resíduo de vermiculita e bentonita) em diferentes teores de substituição, que permitiu definir o atraso térmico (ω) e amortecimento térmico (μ) promovido por cada argamassas.

3.5.7. Confeção da caixa térmica II

A confeção do protótipo caixa térmica II foi desenvolvida através de uma adaptação da metodologia utilizada por Souza (2017), que se trata de uma caixa, simulando uma câmara térmica, confeccionada em MDF (Medium Density Fiberboard), onde em sua face frontal apresenta uma abertura para entrada/saída do painel de alvenaria móvel que divide a caixa em dois espaços: espaço 1 – que contém uma fonte de calor que simula o ambiente externo e espaço 2 – sem fonte de calor simulando ambiente interno de uma edificação.

A coleta de dados neste experimento ocorreu através de termômetros e datalogger que foram inseridos durante os ensaios.

Assim como o primeiro protótipo denominado “caixa térmica I” esse também foi dividido em três partes fundamentais: envoltório, fonte radiante e sistema de instrumentação.

A caixa térmica II foi confeccionada em MDF com 15mm de espessura, com dimensões externas de 0,70 (comprimento) x 0,54 (altura) x 0,72 m (profundidade) e revestida internamente com placas de poliestireno de espessura 25mm, para uma melhor vedação, além de uma camada de folha fina de papel alumínio nas regiões próximas a fonte de calor, com intuito de não degradar o poliestireno. O protótipo (Figura 23) apresenta uma tampa em sua

face superior, o que permitiu uma fácil manutenção e ajustes dos equipamentos antes de iniciar os ensaios.



Figura 22. (a) caixa térmica com tampa fechada; (b) caixa térmica com tampa aberta.

Em sua face frontal não houve fechamento em MDF, apenas uma grande abertura na qual posteriormente se encaixou a mini parede de alvenaria (Figura 23), onde a mesma faz o fechamento da caixa. Senso assim, uma face da mini parede fica voltado para parte interna da caixa, onde existe a fonte de calor (simulação do ambiente externo), e a outra face fica voltada para a câmara climática, que por sua vez se manteve em temperatura constante (simulando o ambiente interno de uma edificação).



Figura 23. Caixa térmica II com mini parede de alvenaria fazendo seu fechamento.

A fonte radiante, inserida na parte interna da caixa, foi composta por seis lâmpadas halógenas de 42W cada, instaladas com suporte de bocal para fixação das mesmas no painel de MDF e distribuídas de forma simétrica (Figura 24a).

Inicialmente a quantidade de lâmpadas com 42W somavam 252W de potência, que através dos ensaios prévios elevaram muito a temperatura em °C que os sensores captavam, comprometendo a estrutura do protótipo. Com isso, foi necessário instalar um dimmer (dispositivo de controle de luminosidade de lâmpadas) de 1000W para reduzir a potência (W) emitida, além de acoplar um wattímetro que registrou a potência emitida pelas seis lâmpadas, que após ajuste apresentou 136W total e constante em todos os ensaios. Onde a intenção era chegar a uma temperatura do ambiente externo próximo a temperaturas já registradas, neste caso arredondado para 60°C a temperatura do ambiente exposto ao calor (Figura 24b).



Figura 24.(a) caixa térmica II com tampa fechada; (b) caixa térmica II com tampa aberta.

O sistema de instrumentação foi composto por um microcontrolador ESP32 (Figura 25) e o mesmo foi programado utilizando linguagem Arduino. Além de doze sensores de temperatura do tipo 18B20 (Figura 26), desses, cinco unidades distribuídos de forma centralizada na face exposta ao calor da mini parede de alvenaria, cinco unidades na face oposta ao calor da mini parede de alvenaria, um sensor no ambiente interno da caixa e outro na parte externa da caixa (com objetivo de coletar a temperatura da câmara climática).

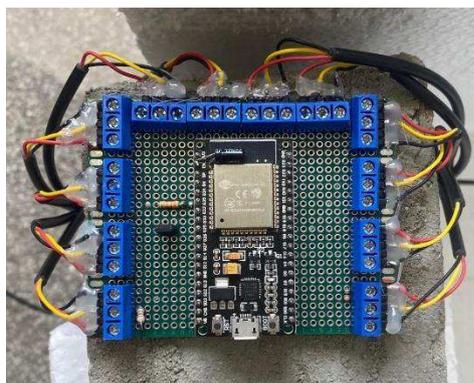


Figura 25. Microcontrolador ESP32.



Figura 26. (a) distribuição dos sensores na mini parede de alvenaria e sensor do ambiente interno da caixa térmica II; (b) caixa térmica II fechada com sensor na parte externa.

Os sensores foram encaixados/fixados em uma proteção (Figura 27) de poliestireno de espessura 25mm com uma cavidade para encaixe dos mesmos, com objetivo de isolar cada

sensor da temperatura ambiente (interna ou externa) e coletar apenas a temperatura que insidia na alvenaria.



Figura 27. Proteção para sensores (vista externa e interna).

3.5.8. Produção das minis paredes de alvenaria

Foram produzidos um total de cinco painéis de alvenaria, referentes as composições em estudo (A0C0, A60C0, A60C4, A60C8, A60C12), com dimensões de 0,61 (comprimento) x 0,42 (altura) x 0,15m (espessura), aproximadamente 0,4m², sendo utilizados tijolos de oito furos, assentados (espessura de 15mm) com argamassa convencional de traço 1:5 (cimento:areia) e rebocados (espessura de 20mm) com argamassa de revestimento de cada uma das proporções avaliadas neste estudo (Figura 28), todos esses processos seguiram as exigências descritas na NBR 13.749 (ABNT, 2013) e passaram por processo de cura de 28 dias.



Figura 28. (a) painel de alvenaria chapiscado; (b) painel de alvenaria rebocado.

Estes painéis foram assentados sob uma base móvel, com rodízios, em MDF que se encaixavam na caixa térmica, fechando a mesma. Com dimensões de 0,67 (comprimento) x 0,15 (largura) x 0,15 m (espessura). Para uma melhor fixação dos painéis nas bases foi necessário criar uma película rugosa, já que as bases foram revestidas com papel adesivo para evitar contato com umidade, através de aplicação de uma camada de cola branca e areia média na face que foi assentada a alvenaria (Figura 29).



Figura 29. (a) base móvel em MDF revestida com papel adesivo; (b) base móvel em MDF revestida com papel adesivo e com aplicação de película rugosa.

3.5.9. Realização dos ensaios

O ensaio ocorreu em ambiente com temperatura controlada e constante em 22°C, por meio de um aparelho de ar condicionado existente no local.

Após o posicionamento da mini parede de alvenaria na caixa térmica II e certificação de todo o isolamento de brechas da caixa, foi acionamento todo o sistema. O fluxo térmico do sistema saía do espaço 1 (fonte de radiação), atravessava a parede de alvenaria e chegava ao espaço 2 (sem fonte de calor). Os valores de temperatura foram coletados e armazenados a cada 10 minutos durante um período de 12 horas para cada parede, até que as temperaturas em ambas das faces da alvenaria permanecessem constantes. Foram realizadas 4 repetições em cada uma das paredes de alvenaria, para gerar confiabilidade nos ensaios, em seguida todos os dados registrados foram transferidos para planilha eletrônicas gerando a média dos valores obtidos.

3.5.10. Cálculos

Para obter os valores de amortecimento (representados em %) e atraso térmico (representados em horas), foi necessário calcular as médias de temperaturas de cada um dos sensores, especificamente para o amortecimento (μ) e utilizar as amplitudes térmicas e aplicá-las na Equação 8.

$$\mu = 1 - \left(\frac{\textit{amplitude_interna}}{\textit{amplitude_externa}} \right) \quad (\text{Eq.8})$$

Após os cálculos, foram gerados gráficos e tabelas contendo os valores máximos e mínimos de temperatura entre as faces, diferença (em grau °C) entre essas temperaturas (amplitude) e o retardo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio de caracterização dos materiais

4.1.1. Distribuição granulométrica da bentonita e da areia natural

A bentonita apresenta predominância de grãos com diâmetros de 0,15mm (76,652%), diâmetro máximo de partículas 0,6mm e módulo de finura 1,00. A areia natural apresenta maior concentração de grãos na peneira 0,3mm (33,36%), diâmetro máximo de partículas 4,8mm e módulo de finura de 2,70 (Tabela 10).

Tabela 10. Caracterização granulométrica

Peneira (mm)	*Resíduo de vermiculita		Areia natural		Bentonita	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
4,8	-	-	4	4	-	-
2,4	-	-	6,2	10,2	-	-
1,2	-	-	14,962	25,162	-	-
0,6	0,022	0,022	23,898	49,06	-	-
0,3	30,022	8,202	33,36	82,42	-	-
0,15	51,61	81,63	16,81	99,23	76,652	76,652
Fundo	18,38	100	0,77	100	23,348	100
Total	100	-	100	-	100	-
Dimensão máxima característica (mm)	0,6		4,8		0,15	
Módulo de finura	1,11		2,70		1,70	

*Resíduo de vermiculita. Fonte: Dias (2018).

Tomando como base o experimento de Dias (2018) quanto a análise granulométrica do resíduo de vermiculita, é possível observar que na peneira com abertura de 0,15mm a granulometria apresenta-se com 51,61% de material retido já a areia natural utilizada neste experimento apresenta-se com apenas 16,81% de concentração de grãos. Diante de tal evidência, optou-se por utilizar como granulometria mais similar a peneira 0,3mm que contém

uma quantidade significativa de ambos os grãos retidos acumulados (30,022% de resíduo de vermiculita e 33,36% de areia natural) já que o objetivo foi substituir parte da areia natural por resíduo de vermiculita.

De acordo com classificação granulométrica apresentada por Lopes Neto (2017), o resíduo de vermiculita pode ser considerado agregado muito fino, por apresentar uma concentração granulométrica na faixa entre 0,1 e 0,30mm, a areia natural apresenta concentração entre as faixas de 0,30 e 0,60mm, considerada areia fina e a bentonita apresenta maior concentração na peneira 0,15, considerada assim um material pulverulento.

4.2. Ensaio das argamassas no estado endurecido

4.2.1. Índice de atividade pozolânica

Materiais com atividade pozolânica podem ser capazes de viabilizar os concretos de alto desempenho, que são um aprimoramento de concretos convencionais a partir da redução da porosidade e das modificações microestruturais (GOBBI, 2014). Na Tabela 11 observa-se os valores da resistência a compressão apresentada aos 28 dias de cura e os respectivos índices de desempenho de cada um dos materiais.

Tabela 11. Avaliação da atividade pozolânica

Resistência a compressão (MPa)		
28 dias de cura		
Argamassa (A) - Referência	Argamassa (B) – Bentonita	Argamassa (C) – Resíduo de vermiculita
11,00	3,74	3,74
13,00	3,00	3,00
12,00	3,74	3,74
	I_B= 30,4%	I_B= 30,4%

Segundo a NBR 12653/ (ABNT, 2012), para se constatar a pozolanicidade do material, a argamassa com substituição de cimento deve ter resistência à compressão maior ou igual a 75% da resistência à compressão da argamassa de referência (sem substituição), o que não ocorre na bentonita nem no resíduo de vermiculita, caracterizando assim os materiais como não pozolânicos.

4.2.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas está relacionada à propriedade de durabilidade e neste estudo se apresenta como parâmetro entre os teores de substituição no agregado e no aglomerante, em diferentes proporções. Os resultados estão indicados na Figura 30 e Tabela 12.

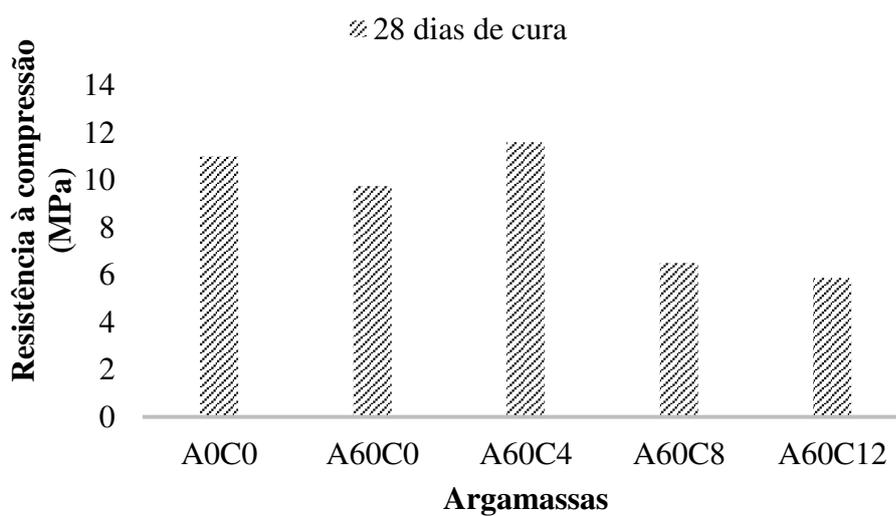


Figura 30. Resistência a compressão de argamassas em diferentes proporções.

A argamassa de referência (A0C0), aos 28 dias de cura, apresenta uma resistência à compressão de 11MPa. A partir da introdução do resíduo de vermiculita em 60% de substituição (A60C0), na porção fina do agregado de mesma granulometria, há um decréscimo resultando em 9,75MPa. Porém, mantendo a mesma substituição de resíduo de vermiculita e adicionando bentonita em substituição de 4% no aglomerante (A60C4), é possível observar um aumento da resistência, principalmente quando comparada a argamassa de referência, chegando a alcançar 11,6MPa.

Yang et al. (2019), justificam esse comportamento devido ao refinamento da estrutura porosa promovido pela adição da bentonita que se manifesta principalmente por uma diminuição nos poros capilares grandes e um aumento nos poros capilares pequenos, além de seu formato de agulha que cresce na superfície ou na borda da bentonita, resultando em um caminho de penetração mais tortuoso para melhorar o desempenho da barreira da argamassa de

cimento. Man et al. (2019), ainda complementam que a adição de bentonita atua como material de preenchimento dos poros o que melhora as propriedades da argamassa.

Porém, com o aumento do teor de substituição da bentonita para 8% (A60C8) e 12% (A60C12) no aglomerante, é notório a diminuição da resistência à compressão, justificada por Dias (2018), devido ao fator água/aglomerante mais elevado para se atingir a trabalhabilidade desejada, o que gera maior plasticidade e conseqüentemente uma menor resistência.

Para melhor entendimento, na Tabela 12 constam todos os valores de resistência à compressão obtidos durante o experimento.

Tabela 12. Resistência à compressão das argamassas

Teor de substituição	Resistencia à compressão (MPa) aos 28 dias de cura
A0C0	11,00
A60C0	9,75
A60C4	11,6
A60C8	6,5
A60C12	5,87

Esse aumento na resistência a compressão da amostra A60C4 pode ser compreendido pela composição química encontrada nesta argamassa, que apresenta uma maior quantidade de sílica e menor quantidade de cálcio, devido as características químicas dos materiais isolados (resíduo de vermiculita e bentonita) que ao serem introduzidos na composição da argamassa melhoram as propriedades de resistência.

No geral todas as composições obtiveram valores de resistência à compressão em conformidade e satisfação às exigências mecânicas expostas na NBR 13281 (Tabela 14), com identificação classe II, por apresentar resistência aos 28 dias entre 4,0 e 8,0MPa para as argamassas A60C8 e A60C12, as demais argamassas na classe III acima de 8,0MPa.

Tabela 13. Exigências mecânicas descritas na NBR 13281 (ABNT, 2005)

Características	Identificação	Limites
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$
	III	$> 8,0$

4.2.3. Eficiência do ensaio de resistência à compressão

Após o ensaio de resistência à compressão foi oportuno avaliar a eficiência do mesmo. A Tabela 15 apresenta os resultados e suas devidas avaliações para cada composição de argamassa produzida.

Tabela 14. Eficiência do ensaio de resistência à compressão

Eficiência do ensaio		
Teor de substituição	Coefficiente de variação	Avaliação
A0C0	0,48	Excelente
A60C0	0,48	Excelente
A60C4	0,48	Excelente
A60C8	0,48	Excelente
A60C12	0,48	Excelente

Diante da Tabela 14, é possível observar que o ensaio de resistência à compressão apresenta coeficiente de variação de 0,48 em todas as diferentes argamassas (A0C0, A60C0, A60C4, A60C8 e A60C12) aos 28 dias de cura. Com isso, eficiência classificada no nível 1 como excelente, o que garante confiabilidade ao experimento.

4.2.4. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral está relacionada à propriedade do módulo de elasticidade, onde quanto maior esse módulo menor será a deformação elástica do material e conseqüentemente ele será mais rígido. Os resultados obtidos neste experimento estão indicados na Figura 31 e Tabela 15.

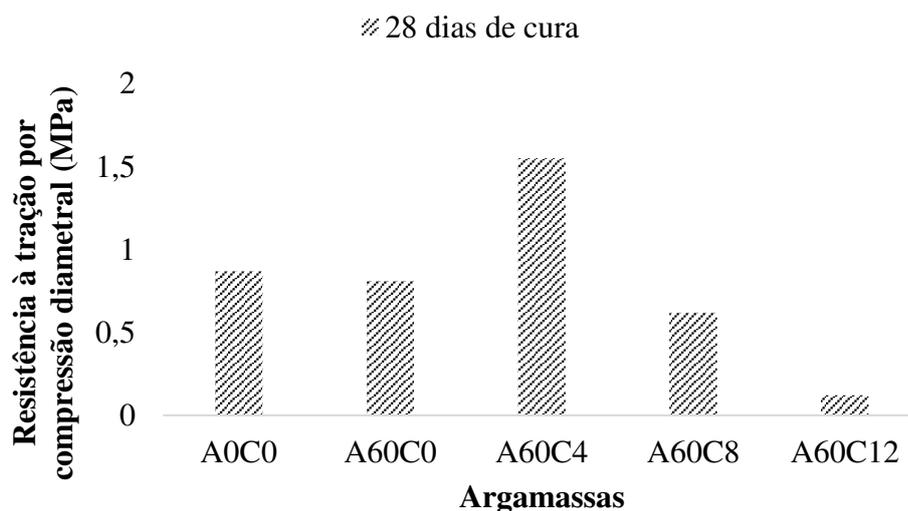


Figura 31. Resistência à tração na compressão diametral de argamassas em diferentes proporções.

Ao analisar a Figura 31 é possível observar um comportamento semelhante ao resultado da resistência à compressão, onde a argamassa A60C4 apresenta valor superior à argamassa de referência (A0C0), além da argamassa A60C0 demonstrar valor entre A0C0 e A60C4, por fim A60C8 e A60C12 uma redução gradativa à medida que aumentava o teor de bentonita em sua composição. Observou-se que esses resultados de resistência à tração por compressão são mais expressivos do que nos resultados de resistência à compressão.

Para uma melhor compressão desses resultados, na Tabela 15 observa-se os valores em MPa de cada uma das composições.

Tabela 15. Resistência à tração na compressão diametral das argamassas

Teor de substituição	Resistencia à tração na compressão diametral (MPa) aos 28 dias de cura
A0C0	0,87
A60C0	0,81
A60C4	1,55
A60C8	0,62
A60C12	0,12

A argamassa A0C0 (referência) apresenta aos 28 dias de cura uma resistência à tração na compressão diametral de 0,87MPa. A partir da introdução do resíduo de vermiculita

(A60C0) ocasiona uma redução para 0,81MPa de resistência. Ao se manter a mesma substituição de resíduo de vermiculita e adicionando bentonita em substituição de 4% no aglomerante (A60C4) observou-se um aumento significativo de 78,15% quando comparado a argamassa de referência.

Yang et al. (2019) explicam que, esse comportamento do aumento de resistência à tração ocorre devido a porosidade do material que provoca um aumento dos poros capilares pequenos e torna o material mais resistente, justificativa semelhante ao ensaio de resistência à compressão. Porém os autores destacam que a resistência à tração é criticamente afetada pelo diâmetro dos poros bem como a porosidade total, conforme ocorre nas argamassas A60C8 e A60C12, com o teor de substituição em 8 e 12% no aglomerante, respectivamente.

Assim como na resistência a compressão, uma justificativa para o melhor desempenho da amostra A60C4 na resistência a tração, seja a característica química de sua composição. Que através dos ensaios de fluorescência e difração de raios-X apresentaram uma maior quantidade de sílica e menor quantidade de cálcio, que contribuem para aumento na resistência.

4.2.5. Absorção de água por imersão

As argamassas produzidas com resíduo, de forma geral, apresentaram maiores índices de absorção por imersão quando comparadas com a argamassa de referência. Os resultados para os ensaios de absorção de água por imersão estão indicados na Figura 32 e Tabela 17.

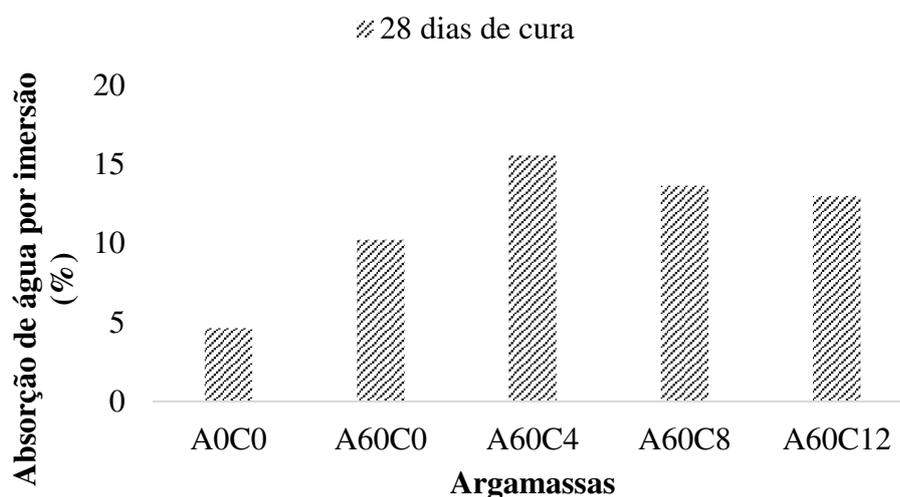


Figura 32. Absorção de água por imersão das argamassas em diferentes proporções.

Os resultados demonstram que, a absorção de água por imersão aumenta de forma significativa em função da quantidade de resíduo de vermiculita e bentonita presentes na

composição da argamassa. Quando acrescentada a bentonita na composição (A60C4, A60C8 e A60C12) os valores se apresentam maiores que a argamassa de referência (A0C0) e da argamassa que continha apenas resíduo de vermiculita em teor de substituição (A60C0). Porém à medida que o teor de bentonita é elevado estes valores apresentam um decréscimo, tendo a argamassa A60C4 como o maior valor de absorção por imersão.

Yang et al. (2019) justificam que, a melhora na resistência à água das argamassas pode ser atribuída principalmente bentonita e como ela inibe o movimento da água em argamassa de cimento. Estes autores apresentaram proporção da mistura cimento: água: areia em 1: 0,79: 3,97. Porém, no estudo aqui apresentado, o resultado demonstrou o oposto dos autores, pois a adição de bentonita na composição aumentou a absorção. Este comportamento, pode ser justificado pela proporção da mistura cimento: água: areia em 1: 0,85: 4,00 (A60C4), 1: 0,90: 4,00 (A60C8), 1: 0,95: 4,00 (A60C12) sendo observado um maior fator água/ aglomerante que comprometeu a estrutura da argamassa e conseqüentemente interferiu no aumento da absorção.

Tabela 16. Absorção de água por imersão das argamassas

Teor de substituição	Absorção de água por imersão (%)
A0C0	4,63
A60C0	10,23
A60C4	15,56
A60C8	13,64
A60C12	13,00

O estudo desenvolvido por Medeiros (2016) sobre argamassas de revestimento com resíduo de scheelita, apresentou semelhança com os resultados obtidos neste experimento, o autor explica que, conforme se aumenta o teor de substituição de areia natural por resíduo, aumenta também a absorção por imersão, por exemplo, para 0% obteve 13,22% de absorção e em 100% alcançou 13,97%. O mesmo fundamenta que, essa característica indica que as amostras com maior quantidade de resíduo, possuem mais poros permeáveis que as amostras fabricadas apenas com areia natural como agregado e por isso tendem a absorver mais água.

De modo geral, todas as argamassas estudadas apresentam valores similares aos estudos de referência, como os de Silva et al. (2013) e Medeiros (2016) que avaliaram argamassas de revestimento contendo resíduos minerais. Porém, A60C4 apresenta maior absorção de água por imersão.

4.2.6. Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos neste ensaio constam na Figura 33 e Tabela 17.

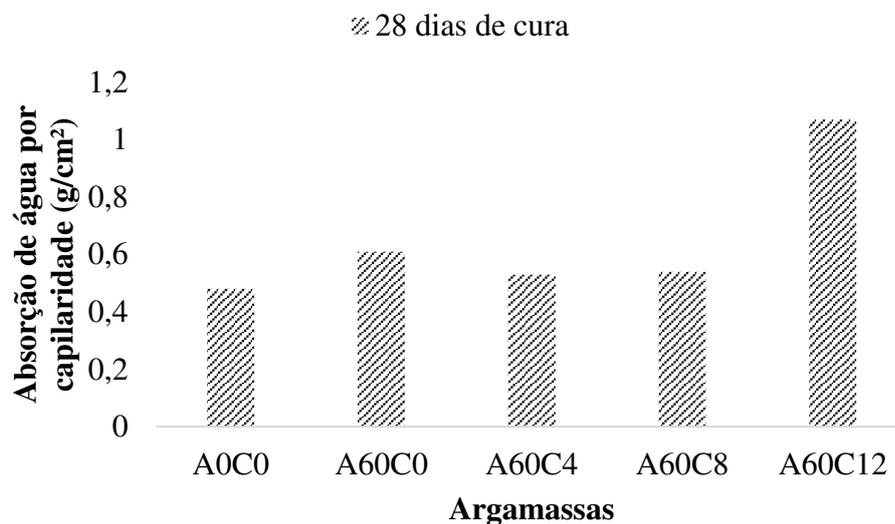


Figura 33. Absorção de água por capilaridade das argamassas em diferentes proporções.

Pelos resultados constata-se que a absorção de água por capilaridade aumenta em todas as proporções com introdução de resíduo de vermiculita e bentonita, quando comparada com a argamassa de referência (A0C0). Porém, nas argamassas que contêm bentonita em 4 e 8% houve um decréscimo quando comparadas a argamassa que contém apenas resíduo de vermiculita (A60C0). Ou seja, a introdução de vermiculita aumenta o teor de absorção e com a introdução de bentonita apresenta uma redução. Porém, quando se acrescenta um teor mais elevado de substituição de bentonita, especificamente 12%, esta absorção sobe para um valor elevado e significativo.

Na Tabela 17 constam os valores de absorção por capilaridade aos 28 dias de cura e as porcentagens de aumento em cada proporção quando comparada a argamassa de referência.

Tabela 17. Absorção de água por capilaridade das argamassas

Teor de substituição	Absorção de água por capilaridade (g/cm²)
A0C0	0,48
A60C0	0,61 (+27,0%)
A60C4	0,53 (+10,4%)
A60C8	0,54 (+12,5%)
A60C12	1,07 (+122,9%)

Bernardo et al. (2020), explicam que apesar da absorção influenciar nos parâmetros de durabilidade, eles também devem ser levados em consideração, juntamente com os resultados de resistência, para avaliar a durabilidade e resistência ao arrancamento, pois ambos fatores que controlam a durabilidade das argamassas aplicadas. Corinaldesi (2012), ainda complementa que, este comportamento no aumento desta condição pode ser vantajoso em termos de uma drenagem eficaz da umidade presente na argamassa.

4.3. Caracterização das argamassas

Os resultados referentes a caracterização das argamassas se referem as características químicas, análise mineralógica e análise térmica das argamassas estudadas, mais especificadamente as amostras A0C0, A60C4 e A60C12, que apresentam melhores resultados.

4.3.1. Análise química por fluorescência de raios-X (FRX)

Na Tabela 18 observa-se os resultados de composição química para A0C0, A60C4 e A60C12.

Tabela 18. Análise química por fluorescência de raios-X das argamassas

Elementos presentes	Argamassas		
	A0C0	A60C4	A60C12
CaO	70,425	67,453	63,641

SiO ₂	13,539	15,610	18,692
MgO	3,921	4,115	3,877
Al ₂ O ₃	3,748	4,098	4,874
SO ₃	3,588	3,444	3,345
Fe ₂ O ₃	3,108	3,530	3,975
K ₂ O	1,219	1,120	1,101
TiO ₂	0,285	0,335	0,374
Outros	0,166	0,295	0,121

É possível observar que, a adição do resíduo de vermiculita na composição do agregado e a adição da bentonita no aglomerante, provoca uma mudança na composição química das argamassas. Observa-se um aumento do teor de sílica (SiO₂) comparado com a argamassa de referência (A0C0), isto provavelmente é observado pelo fato de que, tanto o resíduo de vermiculita, quanto a bentonita, apresentam alto teor de SiO₂ na sua composição química (LEITE et al., 2008; PASSOS & CARASEK, 2018). Também se observa que o teor de CaO diminui com o aumento do teor de bentonita. Tanto o resíduo vermiculita como a bentonita possuem um baixo teor de cálcio (CaO) na sua composição química, diminuindo assim a quantidade de cálcio para as argamassas modificadas (GARCÍA-ESPARZA et al., 2018).

4.3.2. Difração de raios-X (DRX)

A Figura 34 ilustra os difratogramas de DRX para as amostras A0C0, A60C4 a A60C12.

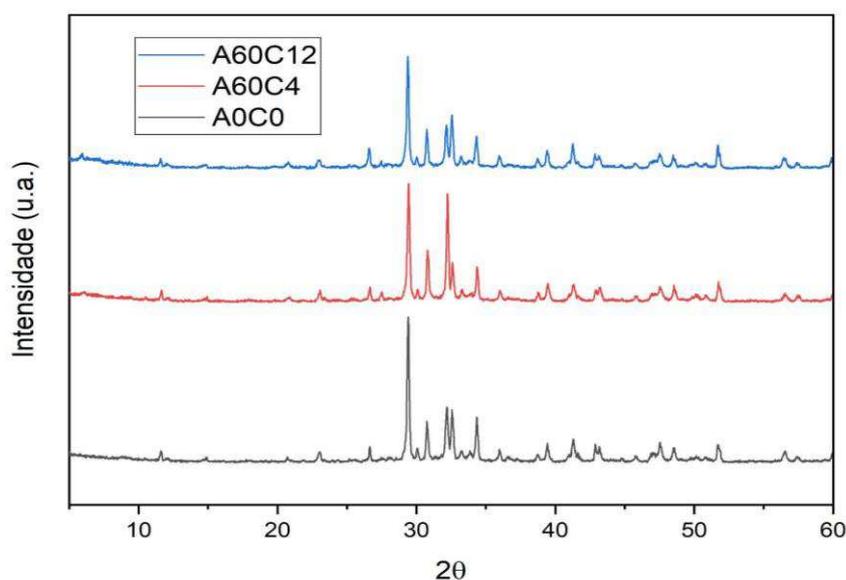


Figura 34. Difratomogramas de raios-X das argamassas obtidas.

Observa-se um elevado teor de cálcio na análise por FRX (Tabela 18), o que é comprovado por meio do difratograma a partir da forma de calcita (CaCO_3). Existe também a presença dos picos de quartzo e caulinita, onde os mesmos são os principais componentes das argamassas (DALTO et al., 2016). Analisando o difratograma, ainda foi possível verificar a presença de feldspato ($2\theta = 27^\circ$), sendo notado só para as amostras contendo bentonita em sua composição (A60C4 e A60C12).

Nos difratogramas é possível observar que não ocorre uma mudança no padrão cristalino para os três tipos de argamassas produzidas, comprovando, desta forma, os resultados de FRX apresentados na Tabela 18, onde não ocorre mudança significativa para a análise química. Como na amostra A0C0 possui uma maior quantidade de CaO, a mesma apresenta uma menor resistência mecânica, pois possui em sua composição uma maior quantidade de aglomerante. As amostras A60C4 e A60C12 apresentam uma menor quantidade de CaO e maior quantidade de SiO_2 , fazendo com que essas amostras se tornem mais resistentes mecanicamente.

4.3.3. Termogravimetria

O resultado da termogravimetria das amostras A0C0, A60C4 e A60C12 estão representadas através das curvas de TG/DTG (Figura 35).

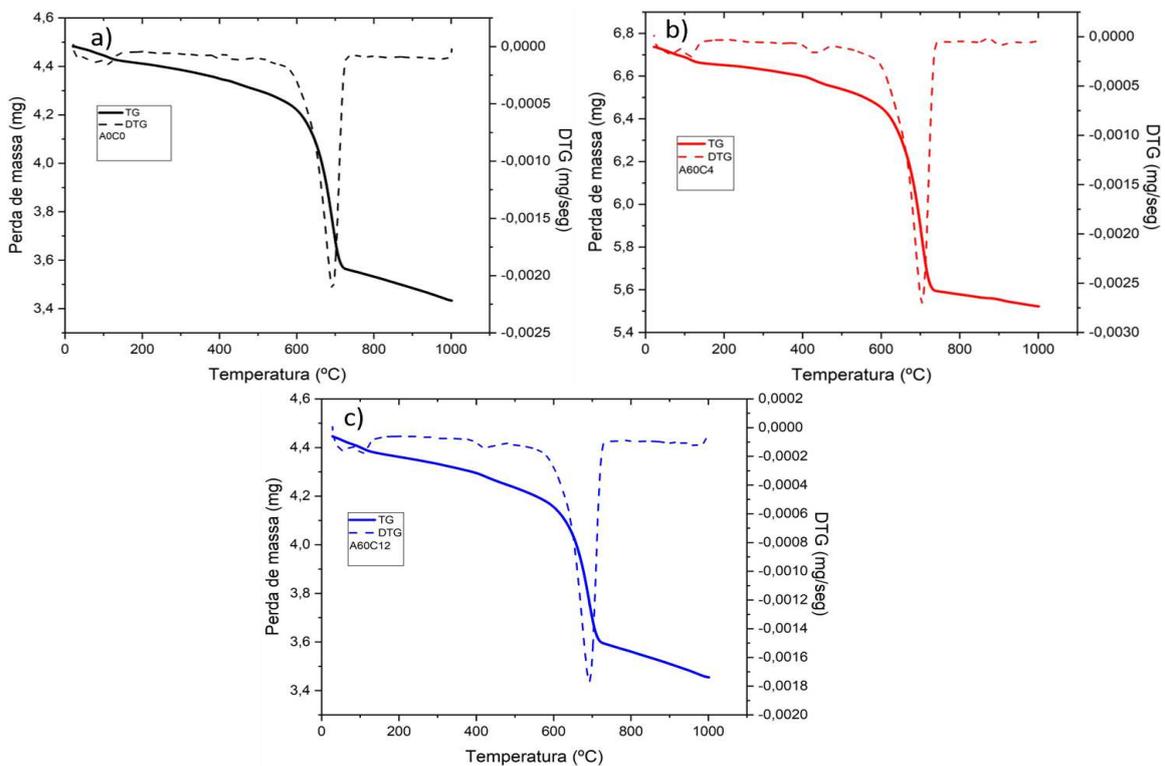


Figura 35. Curva de análise termogravimétrica das argamassas obtidas: a) A0C0, b) A60C4 e c) A60C12.

Na Figura 36 é possível observar que as três curvas apresentam um comportamento semelhante. Em torno de 100°C, fica visível uma perda de massa associada à perda de água livre (MENEZES et al., 2009). Entre 600 a 800°C existe um evento que é referente a desidroxilação do carbonato de cálcio (CaCO_3), onde corresponde à sua decomposição térmica em CO_2 (SILVA et al., 2005). Esse evento foi bastante acentuado devido a grande quantidade de CaO presente para as três argamassas em estudo. Em torno de 420°C é observado para todas as amostras a desidroxilação da caulinita em metacaulinita (GARDOLINSKI et al., 2003). Em um aspecto geral, as amostras A0C0 e A60C12 foram as que obtiveram uma maior estabilidade térmica para o ensaio em questão, podendo assim, interferir em determinadas propriedades das argamassas.

4.4. Análise do comportamento térmico

4.4.1. Coeficiente de condutividade térmica do material

O valor do coeficiente k é maior para os materiais que são bons condutores e baixo para aqueles que são isolantes térmicos. Para se obter os resultados, foi necessário realizar o ensaio

de fluxo térmico, representado nas Figuras 36, 37, 38, 39 e 40 para as respectivas amostras A0C0, A60C0, A60C4, A60C8 e A60C12. O objetivo foi obter as temperaturas para realizar os cálculos, onde a cor azul representa a temperatura do ambiente exposto a fonte radiante; Laranja a temperatura do ambiente oposto a fonte radiante; Cinza a temperatura da face exposta a fonte radiante; Amarelo a temperatura da face oposta a fonte radiante.

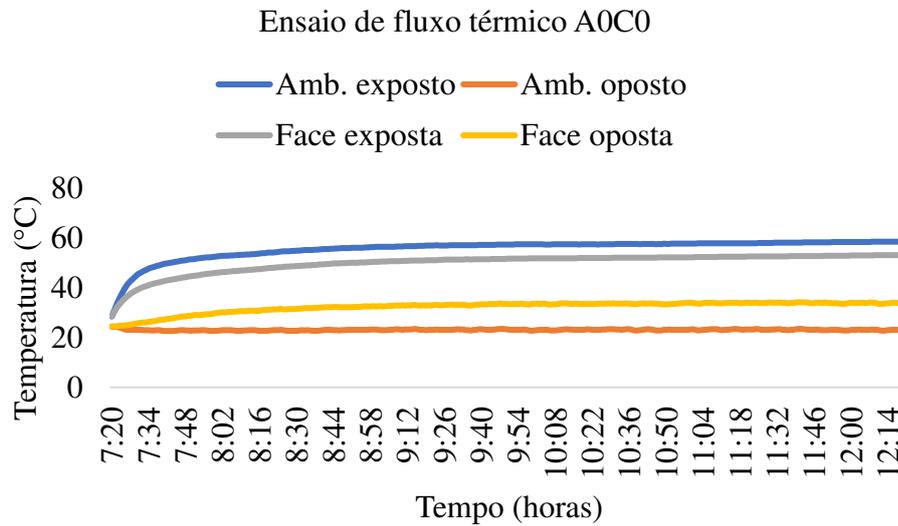


Figura 36. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A0C0.

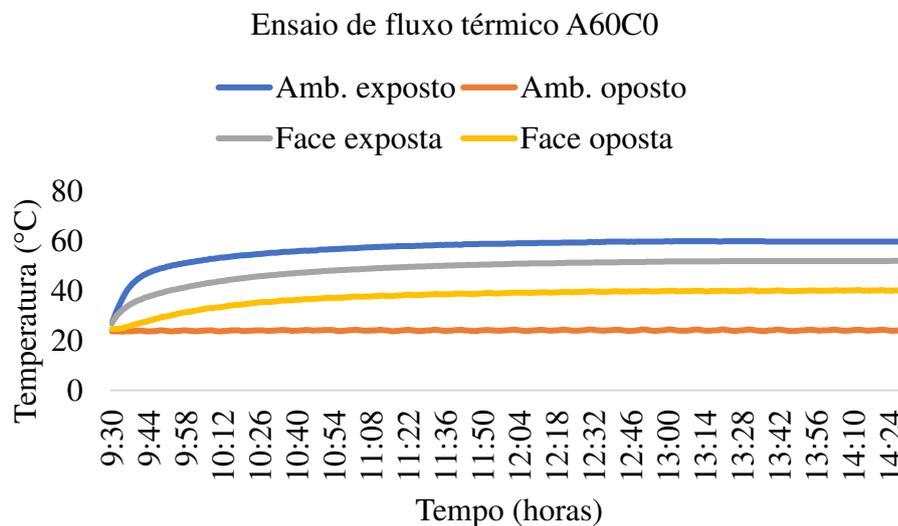


Figura 37. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C0.

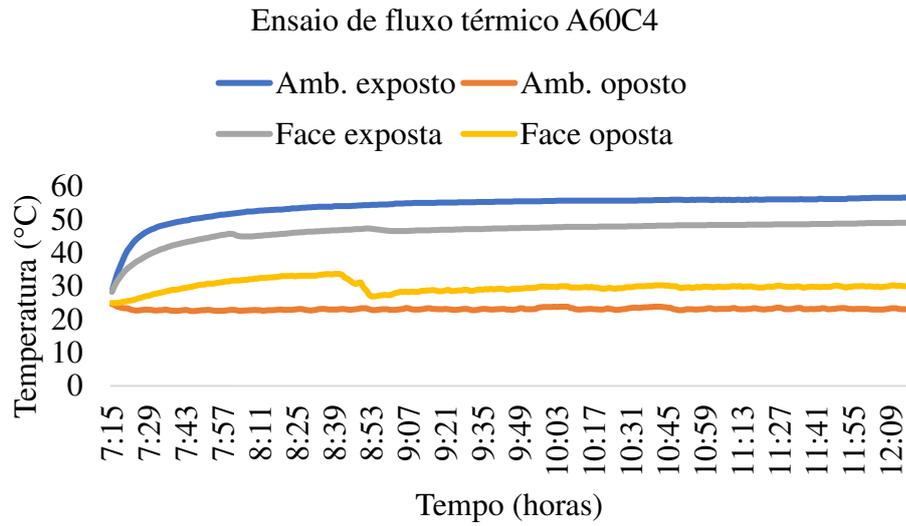


Figura 38. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C4.

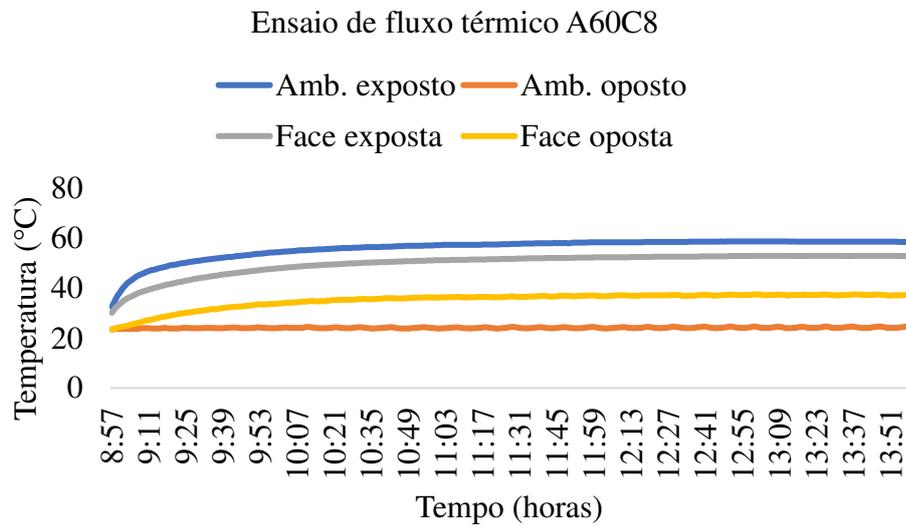


Figura 39. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C8.

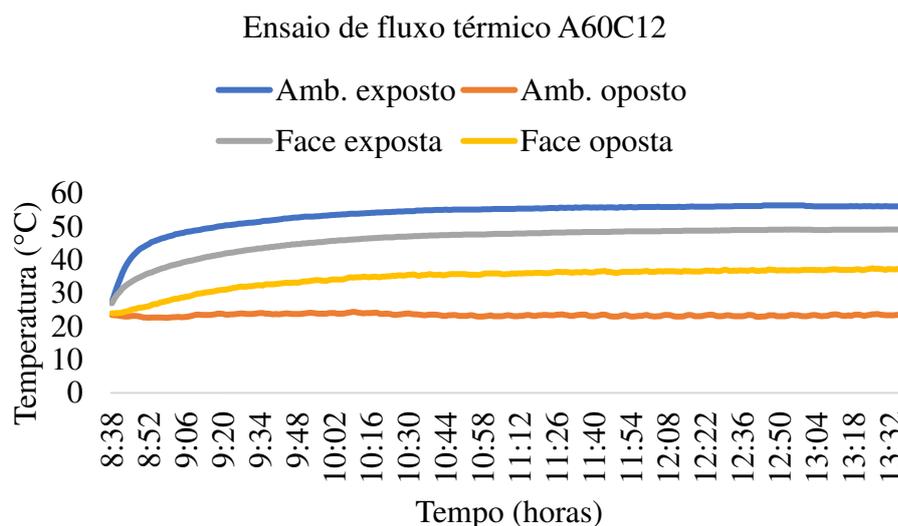


Figura 40. Ensaio de fluxo térmico para tratamento A60C12.

Os ensaios apresentam o mesmo comportamento, apenas diferenciam nos valores das temperaturas durante as 12 horas de análise para todas as amostras, essa característica similar em todas as argamassas reforça a confiabilidade do ensaio e a equidade para as amostras.

A análise das propriedades térmicas das argamassas estudadas possibilita investigar o nível de contribuição dos materiais (resíduo de vermiculita e bentonita) na melhoria do desempenho térmico das argamassas de revestimento. A partir dos valores de condutividade foi possível descobrir os valores de resistência e transmitância térmica em cada proporção. Todos os valores estão dispostos na Tabela 19.

Tabela 19. Condutividade, resistência e transmitância térmica

Argamassa	k (condutividade)	R (resistência)	U (transmitância)
A0C0	0,27	0,07	13,9
A60C0	0,67	0,02	33,5
A60C4	0,18	0,11	9,0
A60C8	0,41	0,04	20,5
A60C12	0,57	0,03	28,9

Observa-se que, os resultados da condutividade térmica das argamassas estudadas acontecem de forma específica e não gradativa, pois era esperado que ao introduzir os materiais propostos a condutividade iria reduzir de forma proporcional aos teores de substituição. Porém, a argamassa apenas com substituição de resíduo de vermiculita obteve maior condutividade

térmica e ao se introduzir a bentonita nesta mesma proporção, observa-se que se reduz o valor de condutividade, melhor do que a argamassa de referência. No entanto, quando esse teor de bentonita é elevado para 8 e 12% a condutividade cresce de forma progressiva.

Os dados apresentam-se congruentes quando comparado o comportamento em cada umas das propriedades avaliadas (condutividade, resistência e transmitância térmica), reforçando a amostra A60C4 como melhor proporção dentre todas as amostras.

Estes dados evidenciam que, apenas o resíduo de vermiculita utilizado na composição das argamassas não melhora as características térmicas do material, sendo necessária a introdução da bentonita, mais especificamente em 4%, sendo A60C4 a argamassa que melhora em 33,33% a condutividade térmica, 57,14% a resistência térmica e 35,25% a transmitância térmica do material quando comparada a argamassa de referência.

Pode-se constatar que, essas melhorias térmicas da argamassa, podem ser explicada pelas características físicas desses materiais (resíduo de vermiculita e bentonita) que foram introduzidos em substituição ao agregado e aglomerante, respectivamente. Estes se apresentam como materiais finos e porosos, com isso aumentam a densidade do material e apresentam uma composição química específica que contribuiu para um melhor resultado.

4.4.2. Amortecimento e atraso térmico em alvenarias

Pela Tabela 20 observa-se os dados da análise na inércia térmica, elaborados com a utilização do software Excel, permitindo quantificar em minutos, o atraso da transmissão de onda de calor nas minis paredes de alvenaria.

Tabela 20. Amortecimento e atraso térmico das minis paredes

Mini paredes	Face exposta			Face oposta			Amortec. (μ) (%)	Atraso térmico (ϕ) (h:min:s)
	Temp. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Amplit. (°C)	Temp. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Amplit. (°C)		
A0C0	49,4	21,1	28,3	30,3	21,1	9,2	32	00:20:00
A60C0	55,6	21,3	34,3	33,1	21,3	11,8	34	00:30:00
A60C4	56,1	21,1	35,0	33,3	21,1	12,2	34	01:10:00
A60C8	55,4	21,1	34,3	33,3	21,1	12,2	35	00:40:00
A60C12	54,0	21,6	32,4	32,6	21,6	11,0	33	00:20:00

Os dados apresentados na Tabela 20, demonstram que a incorporação dos materiais propostos contribui para que a alvenaria possa reter quantidade mais significativa da energia térmica que flui entre suas faces, a partir da amplitude térmica que se observa em cada proporção.

A amplitude se torna maior nas argamassas que contém resíduos de vermiculita e bentonita, quando comparadas com a argamassa de referência. Esse comportamento contribui para redução da temperatura no interior das habitações e diminui as sensações de desconforto em razão do calor.

O atraso térmico também apresenta características similares ao amortecimento, onde as argamassas contendo resíduo de vermiculita e bentonita demonstram maior retardamento temporal entre as temperaturas máximas (oposta e exposta), com exceção da argamassa A60C12 que aparenta o mesmo intervalo de tempo que a argamassa de referência.

O atraso térmico tem o maior retardamento na argamassa A60C4 com 01h10 min, podendo-se observar que a argamassa de revestimento contendo 60% de resíduo de vermiculita e 4% de bentonita contribui para maior capacidade de retenção de energia térmica por um intervalo de tempo maior.

A compreensão para o melhor resultado na argamassa A60C4 se deve as características físicas e térmicas do material, proporcionalmente quanto a condutividade, já avaliada e discutida neste experimento e que se apresenta como o melhor isolante térmico dentre as argamassas estudadas. Importante ressaltar essa condição de conforto térmico interno que permite controlar a temperatura interna de determinado ambiente e evita que o mesmo se torne desconfortável em razão do frio ou calor.

5. CONCLUSÃO

Por este trabalho pôde-se concluir que:

Os materiais, resíduo de vermiculita e bentonita, utilizados na incorporação da argamassa não possuem propriedade pozolânica;

Apenas a incorporação do resíduo de vermiculita na argamassa gera uma redução das propriedades mecânicas: resistência à compressão e resistência à tração na compressão diametral;

Argamassa com adição de resíduo de vermiculita e bentonita gera aumento das propriedades mecânicas: resistência à compressão e resistência à tração na compressão diametral;

O acréscimo de resíduo de vermiculita e bentonita, causa um aumento na absorção de água da argamassa;

As argamassas que receberam bentonita tiveram melhores resultados do coeficiente de condutividade, resistência e transmitância térmica do que a argamassa convencional e a argamassa que continha apenas resíduo de vermiculita, evidenciando assim, a capacidade de desempenhar melhor a função de isolante térmico;

A incorporação de resíduo de vermiculita e bentonita nas argamassas de revestimento, causa aumento do amortecimento e atraso térmico. As argamassas alternativas propostas, exercem melhor a função de isolante térmico que a argamassa convencional;

Alvenarias com argamassa de revestimento contendo resíduo vermiculita e bentonita apresentam desempenho térmico melhor do que as que são revestidas com argamassa convencional;

Todas as argamassas estudadas denotam confiabilidade e adequação para uso em edificações.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A continuidade da análise do desempenho mecânico e térmico de argamassa, contendo bentonita e resíduo de vermiculita é válida para garantir sua aplicação, principalmente nas habitações rurais. Apresenta-se como sugestões para trabalhos futuros:

Realização de trabalhos referentes ao desempenho físico, mecânico e térmico de argamassa contendo bentonita e resíduo de vermiculita, alterando as proporções e o tipo de cimento utilizado;

Realização de pesquisa similar as que foram realizadas nesta tese para mais análises de propriedades térmicas, a exemplo utilização de pinturas/ cores que possam melhorar essa propriedade;

Realização de pesquisa com argamassa de revestimento contendo bentonita e resíduo de vermiculita com uso de aditivos químico, para caracterização física, mecânica e térmica do compósito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento Portland – Resistência a compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45: Agregados-Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13749: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12653: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

AMLASHI, A. T.; ABDOLLAHI, S. M.; GOODARZI, S.; GHANIZADEH, A. R. Soft computing-based formulations for slump, compressive strength, and elastic modulus of bentonite plastic concrete, *Journal Cleaner Prod.*, v.230, p.1197–1216, 2019.

ANDREJKOVICOVÁ, S.; ALVES, C.; VELOSA, A.; ROCHA, F. Bentonite as a natural additive for lime and lime–metakaolin mortars used for restoration of adobe buildings, *Cem. Concr. Compos.*, v.60, p.99–110, 2015.

ATA, A. A.; SALEM, T. N.; ELKHAWAS, N. M. Properties of soil–bentonite–cement bypass mixture for cutoff walls. *Constr. Build. Mater.*, v.93, p.950–956, 2015.

ALENCAR, A. C. A. B.; COSTA, T. P. G. da; ALVES, C. S.; LINHARES, F. M. Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL - Mineração Pedra Lavrada (Santa Luzia-PB), na extração de vermiculita. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v.2, n.2, p.25-36, 2015.

ANSI/ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, GA, USA, 2017.

AWOYERA, P. O.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H.; AKINMUSURU, J. O. Suitability of mortars produced using laterite and ceramic wastes: Mechanical and microscale analysis, *Constr. Build. Mater.*, v.148, p.195–203, 2017.

ARAÚJO, A. G.; CARNEIRO, A. M. P.; PALHA, R. P. Sustainable construction management: A systematic review of the literature with meta-analysis, *Journal of Cleaner Production*, v.256, 2020.

BANIHASHEMI, S.; HOSSEINI, M. R.; GOLIZADEH, H.; SANKARAN, S. Critical success factors (CSFs) for integration of sustainability into construction project management practices in developing countries, *International Journal of Project Management*, v.35, p.1103–1119, 2017.

BERNARDO, H. M.; ROMANO, R. C. DE O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Efeito da absorção de água e do tipo de substrato no desempenho de argamassa de revestimento nos estados fresco e endurecido. *Ambiente Construído*, v.20, n.3, p.493-511, 2020.

CHANG, S.; CASTRO-LACOUTURE, D.; YAMAGATA, Y. Decision support for retrofitting building envelopes using multi-objective optimization under uncertainties. *Journal of Building Engineering*, v.32, 2020.

CORINALDESI, V. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction And Building Materials*, v.35, p.788-784, 2012.

CUNHA, S.; AGUIAR, J. B.; TADEU, A. Thermal performance and cost analysis of mortars made with PCM and different binders. *Construction and Building Materials*, v.22, p.637–648, 2016.

DALTO, D. P. da SILVA; DE MOURA, L. C. R.; DA CONCEIÇÃO RIBEIRO, R. C. Caracterização tecnológica das argamassas históricas do museu Casa Rui Barbosa. *Geonomos*, v.24, n.2, p.221-226, 2016.

DEAR, R. de; XIONG, J; KIM, J.; CAO, B. A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy & Buildings*, v.214, n.1, 2020.

DIAS, R. T. V. Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais. 75f. Dissertação (Mestrado). Curso de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

DUPRÉ MINERALS. Vermiculite. Disponível em: <https://www.dupreminerals.com/wp-content/uploads/2019/03/SDS-TEV-all-grades-v5.1-250219-EU_EN.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

FEEDAP. EFSA Panel on Additives and Products or Substances used in Animal Feed. Scientific Opinion on the efficacy of Bentonite (dioctahedral montmorillonite) for all species. EFSA Journal, v.9, n.6, e2276, 2011.

FABRO, J. R.; SILVA, S. H. L. da; FAGANELLO, A. M. P.; ALTOÉ, S. P. S. Avaliação do desempenho de argamassas estabilizadas. Open Science Research III. Cap. 188, p.2516-2529, 2022.

FADAIE, M. A.; NEKOOEI, M.; JAVADI, P. Effect of dry and saturated bentonite on plastic concrete. KSCE Journal Civ. Eng., v.23, n.8, p.3431–3442, 2019.

FERBA GROUP. 2019. Disponível em: <http://www.ferbagroup.com/vermiculite/>. Acesso em: 01 abr. 2020.

FERNANDES, A. D.; RODRIGUES, A. S.; CARRIJO, A. S. Cinza da casca de arroz como substituição parcial do cimento. In: Congresso Nacional de Pesquisa Multidisciplinar, 1, 2018, Mineiros. Anais...Mineiros, 2018.

FERNANDEZ, R.; CUEVAS, J.; MADER, U. K. Modelling concrete interaction with a bentonite barrier. Eur. Journal Mineral, v.21, n.1, p.177–191, 2009.

FRANZEN, F. P. Análise do desempenho térmico e acústico de vedações verticais externas executadas em light steel framing. 141f. Dissertação (Mestrado). Pós graduação de Engenharia de Construção Civil. Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

FONTES, C. W.; MENDES J. C.; SILVA, S. N. da; PEIXOTO, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. Construction and Building Materials, v.112, p.988-995, 2016.

FONTES, W.C.; PEREIRA, A. C. P.; CHIBLI, P. A.; BASTOS, L. A. DE C.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, R. A. F. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 10, 2013, Fortaleza. Anais...Fortaleza, 2013.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. Manual Conforto Térmico. 7ª. ed. v.1. São Paulo, Studio Nobel, 2005. 243p.

GARCÍA-ESPARZA, J. A.; PARDO, F.; PALMERO, L. M. A multi-analysis characterization of medieval and vernacular coating mortars in rural Valencia (Spain): An experimental study for a Heritage Action Plan. *Journal of Cultural Heritage*, v.31, p.83-96, 2018.

GARDOLINSKI, J. E.; MARTINS FILHO, H. P.; WYPYCH, F. Comportamento térmico da caulinita hidratada. *Química Nova*, v.26, p.30-35, 2003.

GERALDO, R. H.; AGUIAR, R. C.; CAMARINI, G. Thermal performance assessment of alkali-activated mortar boards, *Journal of Building Engineering*, v.31, 2020.

GOBBI, A. Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares. 143f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

HIGASHIYAMA, H.; SAPPAKITTIPAKORN, M.; SANO M.; YAGISHITA F. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, v.33, p.48-54, 2012.

HOSSEINI, M. R.; BANIHASHEMI, S.; MARTEK, I.; GOLIZADEH, H.; GHODOOSI, F. Sustainable delivery of megaprojects in Iran: integrated model of contextual factors. *Journal of Management in Engineering*, v.34, 2018.

HOSSEINI, P.; AFSHAR, A.; VAFAEI, B.; BOOSHEHRIAN, A.; RAISI, E. M.; ESRAFILI, A. Effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete, *Eur. J. Environ. Civ. En.*, v.21, n.2, p.127–147, 2017.

IEA. World Energy Outlook. International Energy Agency. Disponível em: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2013/>. Acesso em: 09 abr. 2020.

IEA. The Future of Cooling. Opportunities for energy efficient air conditioning, IEA Publications France, 2018. 88p.

LAURENT, A.; BAKAS, I.; CLAVREUL, J.; BERNSTAD, A.; NIERO, M.; GENTIL, E.; HAUSCHILD, M. Z.; CHRISTENSEN, T. H. Review of LCA studies of solid waste management systems-part I: lessons learned and perspectives. *Waste Manage*, v.34, p.573-588, 2014.

LEITE, I. F.; RAPOSO, C. M. O.; SILVA, S. M. L. Caracterização estrutural de argilas bentoníticas nacional e importada: antes e após o processo de organofilização para utilização como nanocargas. *Cerâmica*, v.54, p.303-308, 2008.

LEWANDOWSKI, W. M.; LEWANDOWSKA-IWANIAKB, W. The external walls of a passive building: A classification and description of their thermal and optical properties. *Energy and Buildings*, v.69, p.93–102, 2014.

LIU, Q.; SINGH, A.; XIAO, J.; LI, B.; TAM, V. W. Y. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks. *Resources, Conservation & Recycling*, v.157, 2020.

LOCHE, J. M.; AMMAR, A.; DUMARGUE, P. Influence of the migration of chloride ions on the electrochemical impedance spectroscopy of mortar paste, *Cem. Concr. Res*, v.35, n.9, p.1797–1803, 2005.

LOPES NETO, J. P. Construções e Instalações Rurais. NT Editora. Brasília, 2017. 138p.

MAN, X.; HAQUE, M. A.; CHEN, B. Engineering properties and microstructure analysis of magnesium phosphate cement mortar containing bentonite clay, *Construction and Building Materials*, v.277, 2019.

MANGAN S. D.; ORAL G. K.; SOZEN I.; KOCAGIL I. E. Evaluation of settlement textures in terms of building energy, economic performance, and outdoor thermal comfort. *Sustainable Cities and Society*, v.56, 2020.

MARQUES, A. I. B.; MORAIS, J. B. de; SANTOS, C.; MORAIS, P.; VEIGA, M. do R. Módulo de elasticidade dinâmico de argamassas. *Revista Construindo*. v.11. Ed. Especial, p.63-78, 2019.

MEDEIROS, M. Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita. 88f. Tese (Mestrado). Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SOUZA, J.; MELO, W. A.; FERREIRA, H. S.; FERREIRA, H. C. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.795-801, 2009.

MENG, B.; GUO, Q.; MEN, X.; REN, S.; JIN, W; SHEN, B. Preparation of modified bentonite by polyhedral oligomeric silsesquioxane and sodium dodecyl sulfate in aqueous phase and its adsorption property, *Mater. Lett.*, v.253, p.71-73, 2019.

MENGLIANG. L.; YANG, H.; ZHENYU, L.; TAO, Y.; XIN, H.; JIE, W.; ZHONGYUAN, L.; SHUZHEN, L. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*, v.241, e118015, 2020.

NTC BRASIL. Vermiculita Expandida. Disponível em: <<https://www.ntcbrasil.com.br/outros/vermiculita-expandida>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

OLIVEIRA, M. L. de. Bentonita. Agência Nacional de Mineração (ANM). Sede, 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/bentonita_sm_2018/view.

PASSOS, P. M.; CARASEK, H. Argamassas com resíduos para revestimento isolante térmico de parede pré-moldada de concreto. *Cerâmica*, v.64, p.577-588, 2018.

PAULA, E. DE F. Vermiculita. Agência nacional de mineração (ANM). Sede, 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.

PLATAFORMA AGENDA 2030. Disponível em: <<http://www.agenda2030.com.br/>>. Acesso em: 28 abr. 2020.

PCZIECZEK, A. Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis. 147f. Dissertação (Mestrado). Programa de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2017.

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

RECENA, F. A. P. Conhecendo Argamassa. 2. ed. Rio Grande do Sul: Edipucrs, 2012. 188p.

RIBEIRO, D.; MOURA, L. S. de; PIROTE, N. S. dos. Sustentabilidade: formas de reaproveitar os resíduos da construção civil. *Revista de Ciências Gerenciais*, v.20, n.31, p.41-45, 2016.

ROJAS-RAMÍREZ, R. A.; MACIEL, M. H.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; COELHO, A. C. V. Impacto do uso de resíduo de vermiculita no estado endurecido de argamassas. *Cerâmica*, v.65, n.373, p.107-116, 2019.

ROQUE, E.; VICENTE, R.; ALMEIDA, R. M. S. F. Energy consumption in intermittently heated residential buildings: Light Steel Framing vs hollow brick masonry constructive system. *Journal of Building Engineering*, v.43, 2021.

SANTAMARÍA-VICARIO, I.; RODRÍGUEZ, A.; GUTIÉRREZ-GONZÁLE, S.; CALDERÓN, V. Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, v.95, p.197-206, 2015.

SANDROLINI, F.; FRANZONI, E. Characterization procedure for ancient mortars' restoration: The plasters of the Cavallerizza courtyard in the Ducal Palace in Mantua (Italy). *Materials Characterization*, v.61, p.97-104, 2010.

SANTOS, S. S. Patologias construtivas em revestimentos de fachada. 49f. Monografia (Curso de Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

SEGAD, M.; JONSSON, B.; AKESSON, T.; CABANE, B. Ca/Na montmorillonite: structure, forces and swelling properties, *Langmuir*, v.26, n.8, p.5782–5790, 2010.

SETO, K. C.; GÜNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, v.109, p.16083-16088, 2012.

SILVA, A. S.; CANDEIAS, A. E.; PAIS, A. C.; NOGUEIRA, P. M. Caracterização de argamassas do conjunto monumental do castelo de Viana do Alentejo. *Conservar Património*, v.1, p.21-32, 2005.

SILVA, N.; SILVA, G. G.; GLEIZE, P. J. P. Argamassa de revestimento utilizando areia residual proveniente da produção de minérios. In: *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, 10, 2013, Fortaleza. *Anais...Fortaleza*, 2013.

SIMMONS, K. J. Vermiculite. *Mineral commodity summaries 2022*. U.S. Geological Survey. p.184-185, 2022.

SOUZA, T. dos S. de. Análise das manifestações patológicas encontradas nos revestimentos argamassados de um edifício residencial na cidade de Içara. *Revista Especialize On-line Ipog*, v.15, p.1-15, 2018.

SOUZA, C. R. Avaliação do desempenho térmico de vedações em blocos de concreto produzidos com lã de rocha. 187f. Dissertação (Mestrado). Pós graduação de Engenharia Ambiental Urbana. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2017.

SRIVASTAVA A.; SINGH S. K. Utilization of alternative sand for preparation of Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review. *Journal of Cleaner Production*, v.253, 2020.

WILLETT, J. C. Clays. *Mineral commodity summaries 2020*. U.S. Geological Survey, p.48-49, 2020.

UN DESA. *World urbanization prospects: The 2014 revision, highlights*. United Nations. Department of Economic and Social Affairs. Disponível em: <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html>. Acesso em: 09 abr. 2020.

TANG, Z.; LI, W.; TAM, V. W. Y.; XUE, C. Advanced progress in recycling municipal and construction solid wastes for manufacturing sustainable construction materials. *Resources, Conservation & Recycling: X*. v.6, 2020.

TORRES, I.; MATIAS, G.; FARIA, P. Natural hydraulic lime mortars - The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering*, v.32, 2020.

UN-Habitat. Disponível em: <<http://unhabitat.org/urbanthemes/energy/>>. Acesso em: 09 abr. 2020.

VAZ, F. H.; CARASEK, H. Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema. *Cerâmica*, v.65, 2019.

YANG, H.; LONG, D.; ZHENYU, L.; YUANJIN, H.; TAO, Y.; XIN, H.; JIE, W.; ZHONGYUAN, L.; SHUZHEN, L. Effects of bentonite on pore structure and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*, v.224, p.276–283, 2019.

YOO, J. Y.; LEE, H. S.; ISMAIL, M. A. An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure. *Construction and Building Materials*, v.25, n.1, p.99-108, 2011.