



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– MESTRADO –

**Desempenho térmico e mecânico de alvenaria de adobe ativado
alcalinamente e reforçado com fibra de sisal**

Por

Bruno Ramalho Pinto

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2021



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

– MESTRADO –

Desempenho térmico e mecânico de alvenaria de adobe ativado alcalinamente e reforçado com fibra de sisal

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Bruno Ramalho Pinto

Orientador: Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P659d Pinto, Bruno Ramalho.

Desempenho térmico e mecânico de alvenaria de adobe
ativado alcalinamente e reforçado com fibra de sisal /
Bruno Ramalho Pinto. - João Pessoa, 2021.

144 f. : il.

Orientação: Normando Perazzo Barbosa.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Adobes. 2. Fibras de sisal. 3. Ativação alcalina.
4. Comportamento térmico. I. Barbosa, Normando Perazzo.
II. Título.

UFPB/BC

CDU 691.41(043)



**"DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE ALVENARIA DE ADOBE ATIVADO
ALCALINAMENTE E REFORÇADO COM FIBRA DE SISAL"**

BRUNO RAMALHO PINTO

Dissertação aprovada em 27 de setembro de 2021

Período Letivo: 2021.2

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB
Orientador

Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo – UFPB
Examinador Interno

Prof. Dr. Eduardo Braga Costa Santos - UFPA
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

À Deus, que nos permite os diversos dons e talentos, em especial o de estudar e trabalhar para sermos úteis ao próximo.

Ao meu orientador, Professor Normando Perazzo Barbosa, que mesmo durante a Pandemia da Covid-19 não diminuiu sua dedicação à pesquisa, à Universidade Federal da Paraíba e aos seus orientandos. Sempre aconselhando, incentivando e participando efetivamente na melhoria deste trabalho, colocando a mão na massa, literalmente.

Aos professores que fazem parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental por toda a sabedoria compartilhada dentro e fora de aula. Em especial ao Professor Aluísio Braz, pelas sugestões feitas ao longo da construção deste trabalho e por gentilmente disponibilizar a câmara térmica.

Aos laboratoristas e amigos do LABEME, em especial a Sebastião, Delby, Nelly, Anselmo, José Augusto, Rochana e Lucineide por não medirem esforços para superar os desafios diários e sempre aparecerem com uma boa ideia para contornar as dificuldades. Estendo ao professor Aluísio Braz, por gentilmente ced

Ao meu irmão, Flávio Pinto de Oliveira Segundo, por sua ajuda e dedicação essenciais em todas as etapas deste trabalho. Foram inúmeros dias de trabalho em que estivemos no LABEME, realizando o transporte da terra, peneiramento e a produção dos adobes.

Aos meus pais, Adelaide Ramalho e Flávio Pinto, pela sólida base de amor, educação e dedicação que recebi e colho frutos até hoje. Em especial a Laidinha, por não me deixar desanimar e ser sempre incentivadora, mesmo nos puxões de orelha.

Ao meu amor, Mikaely de Oliveira Alves, pela dose diária de incentivo, companheirismo e por entender minhas ausências. Sempre ouvindo com entusiasmo, sem nunca deixar de ser minha *cheerleader*.

A CAPES e a todo povo brasileiro por serem verdadeiros guerreiros em meio a tamanha dificuldade e austeridade, pois continuam persistindo em busca de um país melhor.

*Definir um objetivo é o ponto de
partida de toda realização.*

W. Clement Stone.

RESUMO

A construção com adobes, uma técnica milenar, é uma das que produz menor impacto ambiental no Planeta Terra. Mas o uso "moderno" de adobes, ou construção de terra em geral, requer estabilização com cal ou cimento Portland para melhorar sua propriedade. Neste trabalho, apresenta-se outra possibilidade que é a estabilização da terra por um "ligante alcalino", que também utiliza produtos químicos impactantes, mas em uma quantidade muito pequena apenas 2,2% do peso do solo e curado à sombra. Seu potencial já foi mostrado em trabalhos anteriores na UFPB, algumas composições em certos tipos de terra chegam a tornar o adobe resistente à ação da água, com apenas 1% do ligante alcalino em relação à massa da terra. Agora pretende-se melhorar as propriedades dos adobes com a introdução de fibra de sisal, capazes de aumentar sua resistência à flexão e lhes dar ductilidade. A composição do ligante alcalino utilizada envolve metacaulim como precursor e silicato de sódio mais hidróxido de cálcio como ativadores. Foram obtidas as resistências mecânicas à compressão dos adobe de referência e alcalinamente ativados, com e sem a fibra de sisal. Como não existem informações sobre as propriedades térmicas desse produto, foi feito ensaio em paredes de 1,0 m x 1,0 m em câmara desenvolvida para tal, permitindo estudar o desempenho dos adobes não reforçados e reforçados com fibras de sisal. As mesmas paredes testadas termicamente foram ensaiadas à compressão para se obter seu comportamento estrutural e comparadas com a literatura. Os resultados mostraram que ativação alcalina tornou o adobe estável por 24 horas em água, houve diminuição no tempo de secagem para utilização e acréscimo de resistência a compressão. A fibra de sisal permitiu aumento significativo de deformação dos adobes e da parede sem perda de resistência. No que diz respeito ao comportamento térmico a presença de sisal diminuiu a temperatura na face fria da parede.

PALAVRAS-CHAVE: adobes, fibras de sisal, ativação alcalina, comportamento térmico.

ABSTRACT

The construction with adobes is one of those with the lowest environmental impact on Planet Earth. But “modern” uses of adobes, or earthen construction in general, request stabilization with lime or Portland cement to improve its properties. In this work, another possibility is presented, which is the stabilization of the earth by an “alkaline binder”, which also uses impacting chemicals, but in a very small amount only 2.2% of soil mass. Its potential has already been shown in previous works at UFPB, some compositions in certain types of soil even make adobe resistant to water action, with only 1% of the alkaline binder to the earth's mass. Now it is intended to further improve the properties of the blocks with the introduction of sisal fibers, capable of increasing their flexion strength and giving them ductility. The composition of the alkaline binder used involves metakaolin as a precursor and sodium silicate plus calcium hydroxide as activators. Mechanical compressive strengths of the reference and alkaline activated adobe bricks were obtained, with and without sisal fiber. As there is no information on the thermal properties of this product, a test was carried out on 1.0 m x 1.0 m walls in a chamber developed for this purpose, allowing to study the performance of fiber-reinforced adobes in masonry. After thermal tests were finished, walls were tested under compression to understand their structure behavior. The sisal fiber allowed a significant increase in deformation of blocks and adobe wall without loss of strength. Concerning the thermal scope, the presence of sisal decreased the temperature on the cold face of the wall.

KEYWORDS: adobe, sisal fibers, alkaline activation, thermal behavior.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| RESUMO..... | 06 |
| ABSTRACT..... | 07 |
| LISTA DE FIGURAS..... | 11 |
| LISTA DE TABELAS..... | 15 |
| LISTA DE QUADROS..... | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 22 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 23 |
| 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 23 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 24 |
| 2.1 CONSTRUÇÃO COM TERRA..... | 24 |
| 2.2 ADOBE..... | 29 |
| 2.3 ARGILA..... | 31 |
| 2.4 ATIVAÇÃO ALCALINA | 33 |
| 2.4.1 Ativadores Alcalinos..... | 36 |
| 2.4.2 Metacaulim..... | 37 |
| 2.4.3 Geopolímero | 38 |
| 2.4.4 Cura e Temperatura | 41 |
| 2.5 PESQUISAS RECENTES | 43 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 46 |
| 3.1 MATERIAIS | 47 |
| 3.1.1 Terra..... | 47 |
| 3.1.2 Metacaulim..... | 48 |
| 3.2.3 Silicato de sódio | 49 |
| 3.2.4 Hidróxido de Sódio..... | 50 |
| 3.2.5 Hidróxido de Cálcio | 50 |
| 3.2.6 Água..... | 51 |
| 3.2.7 Fibra de sisal..... | 51 |
| 3.2 MISTURA ALCALINA E SUAS INTERAÇÕES | 52 |
| 3.3 PRODUÇÃO DO ADOBE COM A MISTURA ALCALINA..... | 55 |
| 3.3.1 Processo de cura do Adobe | 59 |
| 3.4 PROCESSOS DE MOLDAGEM..... | 60 |
| 3.4.1 Adobe..... | 60 |
| 3.4.2 Placas de adobe..... | 63 |
| 3.4.3 Paredes de adobe | 65 |

| | |
|--|------------|
| 3.5 PROCEDIMENTOS DOS EXPERIMENTOS DO ADOBE COM A MISTURA ALCALINA..... | 68 |
| 3.5.1 <i>Determinação da absorção de água por imersão e perda de massa dos adobes</i> | 68 |
| 3.5.2 <i>Resistência característica a compressão dos adobes</i> | 70 |
| 3.5.3 <i>Condutividade e resistência térmica das placas de adobe</i> | 72 |
| 3.5.4 <i>Ensaio térmico da parede de adobe</i> | 74 |
| 3.5.4.1 <i>Calibragem da câmara térmica</i> | 77 |
| 3.5.4.2 <i>Calibragem da parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal</i> | 78 |
| 3.5.5 <i>Ensaio de compressão na parede de adobe</i> | 83 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 86 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO..... | 86 |
| 4.1.1 <i>Granulometria do solo</i> | 86 |
| 4.1.2 <i>Limites de consistência</i> | 87 |
| 4.1.3 <i>Mineralogia do solo</i> | 88 |
| 4.1.4 <i>Mineralogia do adobe alcalinamente ativado</i> | 89 |
| 4.3 ESTABILIDADE A ÁGUA, ABSORÇÃO E PERDA DE MASSA POR IMERSÃO | 90 |
| 4.4 RESULTADO DOS ENSAIOS À COMPRESSÃO SIMPLES | 93 |
| 4.5 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA | 99 |
| 4.6 RESULTADO DO ENSAIO DA CÂMARA TÉRMICA | 100 |
| 4.6.1 <i>Tabela comparativo</i> | 101 |
| 4.6.2 <i>Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e sem sisal</i> | 102 |
| 4.6.3 <i>Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e sem sisal</i> | 103 |
| 4.6.4 <i>Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal</i> | 104 |
| 4.6.5 <i>Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e com sisal</i> | 106 |
| 4.6.6 <i>Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e com sisal</i> | 107 |
| 4.6.7 <i>Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado com sisal</i> | 107 |
| 4.6.8 <i>Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que não foram pintadas de cal</i> | 109 |
| 4.6.9 <i>Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que foram pintadas de cal</i> | 111 |
| 4.6.10 <i>Cálculo da capacidade térmica</i> | 113 |
| 4.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO DAS PAREDES DE ADOBE..... | 117 |
| 4.7.1 <i>Parede de adobe sem sisal</i> | 117 |
| 4.7.2 <i>Parede de adobe com sisal</i> | 121 |
| 4.7.3 <i>Discussão dos resultados</i> | 126 |
| 5 Considerações Finais | 129 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS | 130 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 131 |
| APÊNDICES | 139 |
| APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DAS CÂMARAS TÉRMICAS..... | 139 |

| | |
|--|------------|
| <i>1.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal e sem pintura de cal</i> | <i>139</i> |
| <i>2.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal e com pintura de cal</i> | <i>140</i> |
| <i>3.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e sem pintura de cal</i> | <i>141</i> |
| <i>4.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e com pintura de cal</i> | <i>142</i> |
| APÊNDICE B - MEMÓRIA DE CÁLCULO DO ENSAIO DE DESEMPENHO TÉRMICO | 143 |
| <i>1.0 Parede de adobe sem sisal.....</i> | <i>143</i> |
| <i>2.0 Parede de adobe com sisal</i> | <i>145</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: Mesquita de Djenné no Mali é a maior construção com adobe feita no mundo. | 18 |
| Figura 1.2: Principais etapas da construção a) Mistura da terra com água | 19 |
| Figura 1.3: Adição de nova camada de argila a Mesquita de Djenné. | 20 |
| Figura 2.1: Construção em terra no mundo, adaptado da UNESCO. | 24 |
| Figura 2.2: Prédios da cidade de Shibam em adobe ainda em utilização. | 24 |
| Figura 2.3: Casa feita sob a técnica da taipa de mão. | 25 |
| Figura 2.4: Parede de adobe sendo construída. | 26 |
| Figura 2.5: Técnica do superadobe. | 27 |
| Figura 2.6: a) Taipa de pilão realizada de forma tradicional (manual). b) Taipa de pilão com ferramentas mecanizadas. | 27 |
| Figura 2.7: Parede de taipa de mão inacabada. | 28 |
| Figura 2.8: Utilização da prensa mecânica | 29 |
| Figura 2.9: Etapas da produção manual de adobe. | 30 |
| Figura 2.10: Limite do diâmetro dos grãos de solo definidos pela NBR6502 (1995) e compilado em quadro. Fonte: Pinto (2006). | 31 |
| Figura 2.11: Modelo de ativação alcalina. | 34 |
| Figura 2.12: Ativação do Metacaulim. | 38 |
| Figura 2.13: Estrutura dos polissialatos. | 39 |
| Figura 3.1: Aspecto visual da argila após peneiramento da terra em peneira 6.35mm. | 48 |
| Figura 3.2: Metacaulim utilizado. Fonte: Autor. | 49 |
| Figura 3.3: Hidróxido de sódio utilizado. Fonte: Autor. | 50 |
| Figura 3.4: Hidróxido de Cálcio hidratado utilizado. Fonte: Autor | 51 |
| Figura 3.5: Fibra de sisal cortada com aproximadamente 1 cm. Fonte: Autor. | 52 |
| Figura 3.6: Adobe em miniatura após primeiro teste de moldagem. Fonte: Autor | 53 |
| Figura 3.7: Aspecto visual do traço inicial sem silicato de sódio. Fonte: Autor | 54 |
| Figura 3.8: Silicato de sódio homogeneizado em água. Fonte: Autor. | 55 |
| Figura 3.9: Materiais prontos para serem misturados na betoneira. Fonte: Autor. | 56 |
| Figura 3.10: a) Adição de água na fibra de sisal. B) Fibra de sisal imersa em água antes de ser acrescentada ao traço na betoneira. Fonte: Autor. | 57 |
| Figura 3.11: Molde das placas utilizadas no ensaio da câmara térmica e forma para os adobes. Fonte: Autor | 57 |
| Figura 3.12: a) Disposição dos adobes e dos blocos de BTC para que fossem cobertos por telha metálica e b) Vista lateral após os adobes serem cobertos. Fonte: Autor. | 59 |
| Figura 3.13: Adobes após serem cobertos com telha metálica. Fonte: Autor. | 60 |
| Figura 3.14: Adensamento no adobe na forma metálica. Fonte: Autor. | 61 |
| Figura 3.15: Processo de acabamento utilizando colher de pedreiro umedecida. Fonte: Autor. | 62 |
| Figura 3.16: Corte do adobe após retirada da forma. Fonte: Autor. | 63 |
| Figura 3.17: Disposição da forma das placas de adobe. Fonte: Autor. | 64 |
| Figura 3.18: Placas de adobe após adensamento em forma de isopor. Fonte: Autor. | 64 |
| Figura 3.19: a) Assentamento do primeiro adobe sobre chapa de madeira maçaranduba; b) Assentamento da segunda fiada de adobe. Fonte: Autor. | 65 |
| Figura 3.20: a) Verificação do prumo durante elevação da alvenaria de adobe. b) Aspecto final da parede de adobe. Fonte: Autor. | 66 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.21:a) Aspecto visual da argamassa utilizada. b) Imersão em água do adobe ativado alcalinamente com sisal antes de ser utilizada. Fonte: Autor | 67 |
| Figura 3.22: a) Amarração utilizada na parede. b) Detalhe da elevação da alvenaria de Adobe com sisal na 4ª fiada..... | 67 |
| Figura 3.23:a) Visão frontal da parede na altura da 6ª fiada. b) Elevação da alvenaria de adobe ativada alcalinamente com sisal finalizada. Fonte: Autor..... | 68 |
| Figura 3.24:2 Adobes com sisal logo após serem imersos em água..... | 69 |
| Figura 3.25: Adobe posicionados dentro da estufa. Fonte: Autor. | 70 |
| Figura 3.26: Detalhamento do recorte a ser feito no corpo de prova de adobe. | 70 |
| Figura 3.27:Representação da amostra de adobe a ser ensaiada. | 71 |
| Figura 3.28: Condutivímetro com placa de adobe inserida. Fonte: Autor. | 73 |
| Figura 3.29: Detalhe do posicionamento da placa de adobe dentro do Condutivímetro..... | 73 |
| Figura 3.30:a) Planta baixa ilustrativa da câmara térmica; b) Espaço vazio do dry-wall destinado a amostra de parede a ser analisada; c) Espaço vazio do dry-wall preenchido por parede a ser avaliada no trabalho de GOMES (2015). Fonte: Gomes (2015)..... | 74 |
| Figura 3.31: a) Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal in natura; b) a) Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal após a aplicação de 2 demãos de cal. Fonte: Autor..... | 76 |
| Figura 3.32: a) Equipamento utilizado para aquecer o lado quente; b) Parede de adobe iluminada pelo equipamento do lado quente; c) Ar-condicionado utilizado para resfriar o lado frio. Fonte: Autor | 77 |
| Figura 3.33:1ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal..... | 79 |
| Figura 3.34:2ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal..... | 80 |
| Figura 3.35:1ª Avaliação da parede alcalinamente ativada sem sisal e com pintura de cal.81 | |
| Figura 3.36: 2ª Avaliação da parede alcalinamente ativada sem sisal e com pintura de cal. | 82 |
| Figura 3.37: Aspecto final do lado A da parede de adobe sem sisal sob o pórtico pronta para ser rompida, com extensômetro digital instalado. Fonte: Autor..... | 84 |
| Figura 3.38: Aspecto final do lado do lado B da parede de adobe sem sisal sob o pórtico pronta para ser rompida, com extensômetro analógico instalado. Fonte: Autor. | 84 |
| Figura 4.1: Distribuição granulométrica do solo. | 86 |
| Figura 4.2:Mineralogia do solo utilizado. | 88 |
| Figura 4.3: DRX do Adobe alcalinamente ativado..... | 89 |
| Figura 4.4: Adobe alcalinamente ativados imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor..... | 91 |
| Figura 4.5: Adobe alcalinamente ativados e sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor. | 91 |
| Figura 4.6: Adobe alcalinamente ativados 24 horas após serem imergidos em água. Fonte: Autor..... | 91 |
| Figura 4.7: Adobe alcalinamente ativados e sisal 24 horas após serem imergidos em água. Fonte: Autor..... | 91 |
| Figura 4.8: Adobe alcalinamente ativados ainda úmidos prontos para serem inseridos na estufa em 110°C por 24 horas. Fonte: Autor. | 91 |
| Figura 4.9: Adobe alcalinamente ativados e sisal ainda úmidos prontos para serem inseridos na estufa em 110°C por 24 horas. Fonte: Autor. | 91 |
| Figura 4.10: Adobe de referência e sem sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor..... | 93 |
| Figura 4.11: Adobe de referência e com sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.12: Adobe de referência e sem sisal 24 horas após serem imersos em água. Fonte: Autor. | 93 |
| Figura 4.13: Adobe de referência e com sisal 24 horas após serem imersos em água. | 93 |
| Figura 4.14: a) Corpo de prova #2 de adobe sem sisal e com mistura alcalinamente ativado na carga de ruptura. b) Detalhe do corpo de prova após rompimento. Fonte: Autor. . | 95 |
| Figura 4.15: Corpos de prova ativados alcalinamente com sisal, corpo de prova esquerda após receber carga e o corpo de prova a direita sem receber carga. Fonte: Autor. | 96 |
| Figura 4.16: a) Adobe cortado ao meio com fibras de palha b) Seção do adobe com sisal deste trabalho. Fonte: a) Abdulla (2020) e b) Autor. | 98 |
| Figura 4.17: Placas de adobe, a esquerda com sisal e a direita sem sisal. Fonte: Autor. | 99 |
| Figura 4.18: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal. . | 102 |
| Figura 4.19: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com pintura de cal e sem sisal. Fonte: Autor. | 103 |
| Figura 4.20: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada sem sisal com amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor. ... | 104 |
| Figura 4.21: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada sem sisal com amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor. | 105 |
| Figura 4.22: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e sem pintura de cal. Fonte: Próprio autor | 106 |
| Figura 4.23: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e com pintura de cal. Fonte: Autor. | 107 |
| Figura 4.24: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com sisal da amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor. | 108 |
| Figura 4.25: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com sisal pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor. | 109 |
| Figura 4.26: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas não pintadas de cal. Fonte: Autor. | 110 |
| Figura 4.27: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas não pintadas de cal. Fonte: Autor. | 111 |
| Figura 4.28: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com sisal, pintada e não pintada de cal. Fonte: Autor. | 112 |
| Figura 4.29: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas pintadas de cal. Fonte: Autor. | 113 |
| Figura 4.30: Gráfico da Força em função do deslocamento do 1º ciclo e por lado da parede de adobe sem sisal. | 118 |
| Figura 4.31: Gráfico da Força em função do deslocamento do 2º ciclo e por lado da parede de adobe sem sisal. Fonte: Autor. | 119 |
| Figura 4.32: Gráfico da tensão em função da deformação média para a parede de adobe sem sisal. | 119 |
| Figura 4.33: Momento de rompimento da parede em ambos os lados. Fonte: Autor. | 120 |
| Figura 4.34: Seção transversal da parede próxima a área do rompimento. | 121 |
| Figura 4.35: Gráfico da Força em função do deslocamento para parede de adobe sem sisal. | 122 |
| Figura 4.36: Recorte do gráfico da Figura 29 com enfoque ao deslocamento vertical acumulado de até 1,25mm. Fonte: Autor. | 122 |
| Figura 4.37: Momento em que extensômetros foram retirados. | 123 |
| Figura 4.38: Gráfico da tensão em função da deformação para a parede de adobe com sisal. Fonte: Autor. | 123 |
| Figura 4.39: Recorte do gráfico da Figura 32 com enfoque na Tensão até 0,70 MPa. | 124 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.40: Momento de rompimento da parede em ambos os lados. Fonte: Autor. | 125 |
| Figura 4.41: Tensão média em função da deformação média do 1º ciclo de carregamento para ambas as paredes. Fonte: Autor. | 126 |
| Figura 4.42: Tensão média em função da deformação média do 2º ciclo de carregamento para ambas as paredes. Fonte: Autor. | 127 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.1: Composição química do metacaulim. Fonte: Autor | 48 |
| Tabela 3.2: Boletim técnico do Silicato de Sódio Alcalino. Fonte: Auro's Química..... | 49 |
| Tabela 3.3: Boletim técnico do Hidróxido de Cálcio. Fonte: Carbomil..... | 50 |
| Tabela 3.4: Traço original de Félix (2016) em gramas. Fonte: Félix (2016). | 53 |
| Tabela 3.5: Proporção utilizada para adobe alcalinamente ativada em gramas. Fonte: Autor | 55 |
| Tabela 4.1: Composição física fracionada do solo utilizado. | 86 |
| Tabela 4.2: Limites de consistência do solo. | 87 |
| Tabela 4.3: Resultado do ensaio de imersão em água. Fonte: Autor..... | 90 |
| Tabela 4.4: Percentuais médios de absorção e perda de massa dos adobes analisados..... | 92 |
| Tabela 4.5: Resistência à compressão simples das amostras de adobe. Fonte: Próprio autor | 94 |
| Tabela 4.6: Compilação de resultados existentes para a ruptura a compressão de adobe... | 96 |
| Tabela 4.7: Resultado do ensaio de condutividade térmica. Fonte: Autor | 99 |
| Tabela 4.8: Dados compilados das amostras de parede. Fonte: Autor. | 101 |
| Tabela 4.9: Dados iniciais para cálculo da capacidade térmica. | 114 |
| Tabela 4.10: Resultado de índices térmicos para as amostras. Fonte: Autor. | 114 |
| Tabela 4.11: Critérios da NBR e classificação das amostras. | 115 |
| Tabela 4.12: Dados e resultado da aplicação da lei de Fourier. Fonte: Autor..... | 115 |
| Tabela 4.13: Comparação entre as amostras deste trabalho e de Gomes (2015)..... | 116 |
| Tabela 4.14: Fluxo de calor para a parede de adobe com espessura de 0,20 m. | 117 |
| Tabela 4.15: Compilação de resultados e dados da parede de adobe sem sisal. | 118 |
| Tabela 4.16: Compilação de resultados e dados da parede de adobe com sisal..... | 121 |
| Tabela 4.17: Compilação de resultados da compressão de parede de adobe. Fonte: Autor. | 128 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 3.1:Resumo esquemática dos materiais e métodos. Fonte: Autor | 46 |
| Quadro 3.2:Resumo das etapas de preparo do adobe com a mistura alcalina e sisal. Fonte: Próprio autor | 58 |

1. INTRODUÇÃO

No decorrer da história do homem moderno, os materiais tiveram e têm papel importante no desenvolvimento de suas sociedades. Inicialmente, a utilização de materiais na sua forma natural contribuiu à produção de ferramentas para caça, proporcionando ao homem a oportunidade de abandonar seu perfil nômade e tornar-se sedentário.

Em consequência da mudança do perfil nômade para o sedentário, houve a descoberta de novas técnicas tornando possível o domínio do fogo, bem como o emprego de materiais construtivos naturais disponíveis localmente para a construção de suas habitações, como por exemplo a terra, pedra, argila, madeira, palha e outros.

Segundo Minke (2015), as construções com terra são conhecidas há mais de 9000 anos, por exemplo: na região do Turcomenistão Russo foram descobertas casas construídas com blocos de terra (adobe) feitos de 8000 e 6000 A.C; na Síria foram encontradas construções de casas em Taipa (terra batida) datados de 5000 A.C; há também o registro de culturas antigas que utilizavam deste método para realizar a construção de edifícios religiosos, como visto na Figura 1.1.



Figura 1.1: Mesquita de Djenné no Mali é a maior construção com adobe feita no mundo.
Fonte: Andy Gilham (2003).

Esse modo de edificação em terra pode ser visto no conceito de construção vernacular, por se tratar de uma tipologia arquitetônica e construtiva que utiliza materiais disponíveis localmente, bem como técnicas construtivas da comunidade - geralmente repassadas de pai para filho e adequadas ao clima da região. Como vantagem, tem-se construções mais sustentáveis e com maior conforto térmico, quando comparada a construções com materiais mais industrializados (WEBER; YANNAS, 2014). Para Marques (2018), a arquitetura vernácula busca a proteção ao clima com os recursos locais que a própria natureza oferece e se origina da intuição e necessidade básica do ser humano em ter abrigo, resultando em uma fonte passiva de conforto.

No Brasil, a construção com adobe é uma das principais técnicas da arquitetura vernacular que foi largamente utilizada pela sociedade. Adobe é um bloco de terra moldado com o material no estado plástico, tendo como ligante a argila. Ao contrário do tijolo cerâmico tradicional, que exige queima e, como consequência, consome muita energia, os adobes podem ser considerados produtos para a construção de muito baixo impacto ambiental.

Simplificadamente, as etapas da construção com adobe consistem em preparar a terra com presença de argila adequada e misturá-la com a água, moldagem dos blocos, secagem e, por fim, a aplicação construtiva do adobe, conforme exposto na Figura 1.2.



Figura 1.2: Principais etapas da construção a) Mistura da terra com água

b) Moldagem dos adobes c) Execução de construção em adobes.

Fonte: a) Ecocentro Ipec (2019); b) Museu de Caculé (2016); c) Ecocentro Ipec (2019).

Quando comparada aos métodos construtivos que utilizam materiais de construção industrializados, a construção em adobe tem como principais pontos positivos o maior controle da temperatura e umidade interna do ambiente, baixo custo do material e maior sustentabilidade. Tais características podem ser atribuídas principalmente à elevada densidade que a terra tem – o que permite retardar variações de temperatura e equilibrar a passagem de umidade para o ambiente.

Como ponto negativo, pode-se citar a não resistência do adobe à água. Por ser fabricado apenas com terra crua e seco à temperatura ambiente, construções em adobe devem ter cuidados extras para proteção contra a água: o uso de beirais mais longos e pintura impermeabilizantes tornam-se opções para evitar o contato com a água (MINKE, 2015). Entretanto, a depender do ciclo de chuvas da região, é possível adotar a prática de manutenções periódicas, como na Mesquita de Djenné no Mali: anualmente, antes da estação chuvosa, a população local se mobiliza e realiza a aplicação de uma nova camada de argamassa à base de argila sobre as paredes de adobe, conforme visto na Figura 1.3 (BBC, 2015).



Figura 1.3: Adição de nova camada de argila a Mesquita de Djenné.
Fonte: BBC (2015).

Entretanto, os usos “modernos” dos adobes exige que eles tenham melhores propriedades que o adobe tradicional. Segundo Barbosa e Ghavami (2007), a falta de estabilidade à água pode ser suprida de diversos modos, destacam-se os seguintes:

- Ação mecânica: por meio da utilização de prensas – requer equipamento especializado;
- Aplicação de emulsões betuminosas: os poros dos grãos de terra são envolvidos pelo material impermeabilizante;

- Aplicação de produtos repelentes à água para mitigar absorção e adsorção de água por parte dos grãos de solo – produtos de alto custo; e
- Adição de ligantes convencionais à mistura (cal, cimento e asfalto) – contribuem negativamente para o conforto na edificação, além da geração excessivas de poluentes.

Félix (2016) relata que a intervenção no adobe devido à adição de ligantes (cal ou cimento) pode interferir diretamente nas características benéficas da terra. Ocorre que o adobe é composto por solos argilosos e, para torná-lo resistente à água, são necessárias taxas de ligante que podem variar de 7 % a 12% ou mesmo 15%, dependendo do tipo de terra.

Entretanto, nos últimos anos, Oliveira (2015) e Félix (2016) apresentaram resultados promissores acerca da aplicação de um ligante alcalino que, em pequena quantidade – 1%, 2% ou 3% do peso da terra – propiciaria a estabilidade necessária para o adobe em relação à água, além de aumentar sua resistência mecânica.

Nos adobes tradicionais é comum o uso de palha para melhorar sua ductilidade. De fato, há melhora nessa propriedade, porém sem grandes ganhos na resistência. Com relação à característica da palha, por possuir forma lamelar, ela não favorece a uma aderência muito boa com a matriz de terra. No nordeste brasileiro dispõem-se de bastantes fibras vegetais, como de sisal, de coco e mesmo de bananeira. Essas fibras podem ser cortadas em distintos tamanhos, o que permite realizar cortes com relação comprimento/diâmetro adequados, favorecendo a aderência e melhorando a qualidade do adobe.

Tradicionalmente se diz que as construções de adobe têm boas propriedades térmicas, porém pouco se encontra na literatura estudos que discutam acerca do tema. Com relação à incorporação de fibras, não se acha na literatura experimentação em paredes que indiquem, com certa precisão, suas características térmicas. Com o ligante alcalino, muito menos.

Desta forma, este trabalho trata da incorporação de fibras vegetais em adobes estabilizados alcalinamente e obtenção de propriedades térmicas e mecânicas da alvenaria com esse tipo de bloco.

1.1 Justificativa

Pode-se dizer que os ligantes alcalinos são materiais cimentícios do século XXI. Atualmente, há inúmeras pesquisas sobre eles, sobretudo no campo dos concretos de menor impacto ambiental. Esses ligantes são compostos de materiais ricos em sílica e alumina amorfas (chamados precursores) ativados alcalinamente por hidróxidos de sódio, de potássio ou de cálcio, e silicatos de sódio ou de potássio (chamados ativadores). Dessa forma, a maioria das pesquisas sobre esses ligantes dizem respeito à fabricação de concretos e argamassas para os mais diferentes usos, tendo em vista a enorme diversidade de precursores que se pode utilizar.

Diante das presentes situações em que a Terra tem passado por sérios problemas ambientais, pesquisas no campo da engenharia, no sentido de reduzir seu impacto, vêm sendo desenvolvidas cada vez mais, embora não de forma acelerada devido às indústrias de materiais de construção convencionais, que estreitam as lacunas para quaisquer propostas alternativas.

Apesar dos fatos expostos, o uso da tecnologia existente na conjuntura atual, é bastante propícia por possibilitar uma melhora nas propriedades dos materiais, bem como nas tecnologias milenares. Nesse sentido, vê-se nos ligantes alcalinos um grande potencial para que os adobes possam ser empregados modernamente. Com relação à adição de fibra, esta vem para melhorar consideravelmente a ductilidade do adobe e, em virtude da pequena quantidade que se adiciona, pode-se classificá-lo como de menor impacto quando comparado aos materiais que empregam ligantes industrializados, por exemplo a cal e o cimento. Vale salientar que, como os componentes do ligante alcalino promovem uma redução da quantidade de água, há um ganho considerável de resistência em relação aos adobes usuais.

Ao realizar uma pesquisa na literatura acerca do assunto, as publicações relacionadas à estabilização alcalina da terra são bastante escassas, e nenhuma delas trata das propriedades térmicas do adobe com fibras e o seu uso em alvenarias. Tais resultados permitem caracterizar o presente estudo como inovador e passível de futuras publicações embasadas nele.

1.2 Objetivos

Objetivo Geral:

Avaliar o desempenho térmico e mecânico de alvenaria composta por adobes estabilizados alcalinamente, reforçados com fibras de sisal.

Objetivos Específicos:

- Definir uma composição para o ligante alcalino
- Conhecer o comportamento à compressão do adobe com ligante alcalino.
- Estabelecer o efeito das fibras na trabalhabilidade da terra ativada alcalinamente;
- Estabelecer o papel das fibras no comportamento térmico do material.
- Estabelecer o papel das fibras no comportamento mecânico de mini paredes ensaiadas à compressão

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho é composto por 6 capítulos. O primeiro de introdução, expõe-se breve histórico da construção em terra e define os objetivos deste trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se a fundamentação teórica focando em construção em terra, adobes, ativação alcalina. É feito também um estado da arte, citando-se alguns trabalhos recentes envolvendo esses temas.

No capítulo três apresentam-se os materiais e a metodologia empregada neste trabalho. Com destaque para o modo de produção dos adobes, o método que foram ensaiados do ponto de vista térmico e mecânico.

No quarto capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos para as amostras de adobe e da parede de adobe com e sem sisal, comparando-se com a literatura vigente.

No quinto capítulo têm-se as considerações finais e sugestões para próximos trabalhos.

No sexto capítulo encontra-se o Apêndice, com os gráficos da calibração térmica e o memorial de cálculo do desempenho térmico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Construção com Terra

A construção baseada na terra é uma das técnicas construtivas mais tradicionais e universais da humanidade. Presente em todos os continentes, vem, há milhares de anos, sendo utilizada devido à farta disponibilidade, facilidade de execução e herança cultural das sociedades. Há predominância nos países de clima quente e seco, subtropical e temperado, conforme visto na Figura 2.1.

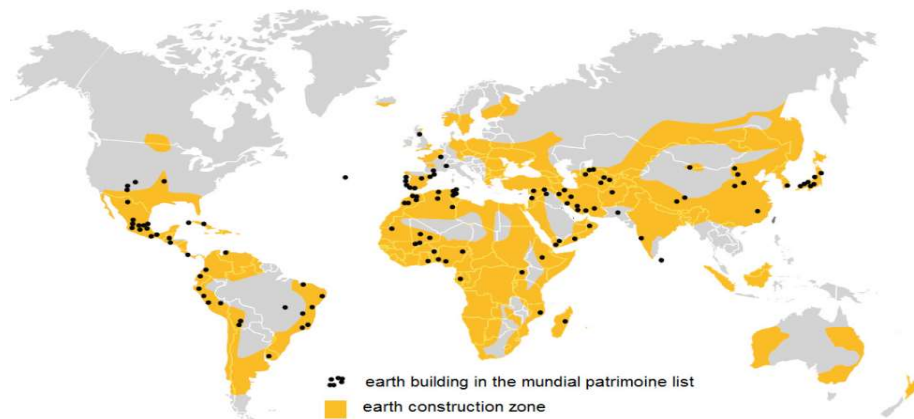


Figura 2.1: Construção em terra no mundo, adaptado da UNESCO.
 Fonte: Gandreau, Delboy e Joffroy (2010).

As edificações realizadas com terra não só compreendem residências, existem inúmeros templos religiosos, cidadelas e até mesmo cidades inteiras, como por exemplo a cidade Shibam, pioneira na verticalização urbana, tem seus prédios feitos de adobe e é tombada pela UNESCO (MACLEOD, 2015), visto na Figura 2.2:



Figura 2.2: Prédios da cidade de Shibam em adobe ainda em utilização.
 Fonte: MACLEOD (2015).

Apesar do histórico de ser conhecida e utilizada há milhares de anos, as construções com terra enfrentam o desafio da escassez de mão de obra especializada e a falta de normas e regulações construtivas.

Diferentemente das obras que utilizam cimento e tijolos cerâmicos queimados, encontrar profissionais que dominem a técnica da construção em terra torna-se um obstáculo. No Nordeste, há muitas construções feitas com terra e oriunda da mão de obra local das comunidades, principalmente na técnica da taipa de mão (Figura 2.3). Em geral, construções feita pela mão de obra local não obedecem a princípios construtivos básicos para proteção da taipa de mão, como por exemplo a primeira fiada ser impermeável e dispor de beirais maiores, ambos visando evitar a absorção de umidade pelas paredes. A falta de conhecimento como tratar o material, conduz a construções de aspecto estético duvidoso.



Figura 2.3: Casa feita sob a técnica da taipa de mão.
Fonte: Rede Globo (2014).

É importante destacar que no Brasil já está-se criando normas para o uso da terra em construções. Atualmente, pode-se citar a norma de blocos de solo-cimento ABNT NBR 8491 (2012) e a de adobe ABNT NBR 16814 (2020), e está sendo elaborada a de taipa de pilão. Com a difusão de legislação sobre o tema vai-se um melhor padrão ter possibilidade de usar os sistemas construtivos com terra de maneira oficial, promovendo a homogeneização da qualidade das construções. Segundo Pacheco-Torga e Jalali (2012), alguns países já dispõem de sua própria legislação para construção em terra, podendo ser citados as seguintes nações e ano da

primeira regulação implantada: Alemanha (1944), Austrália (1952), Espanha (1992), Nova Zelândia (1998) e Zimbabué (2001).

A construção com terra engloba várias técnicas diferentes que podem ser aplicadas a depender da disponibilidade dos materiais na região e da especialização da mão de obra local. A seguir, algumas técnicas de construção com terra são exemplificadas:

- Adobe: São blocos feitos de argila e terra secos ao sol, unidos por argamassa de terra argilosa, formando paredes. Indicado para regiões quentes e com baixo índice pluviométrico devido à sua inércia térmica e degradação frente à umidade. A Figura 2.4 ilustra o levantamento de uma parede de adobe.



Figura 2.4: Parede de adobe sendo construída.
Fonte: Cezar (2014).

- Superadobe: É uma variante da técnica construtiva derivada do adobe. Consiste na utilização de sacos de polipropileno amarrados com arame e preenchidos com uma mistura de terra e argila, conforme visto na Figura 2.5. Após o ensacamento, os sacos são apilados. Esse tipo de construção tem como características boa inércia térmica, mas não resiste à umidade, semelhante ao adobe.



Figura 2.5:Técnica do superadobe.
Fonte: Martins (2016).

- Taipa de pilão: A terra úmida é apiloada e compactada entre tábuas de madeira até alcançar a altura necessária, formando paredes monolíticas e com função estrutural, conforme visto na Figura 2.6, a). Atualmente, o processo de construção foi aprimorado por meio da utilização de compactador de solo pneumático e formas metálicas, conforme Figura 2.6 b).

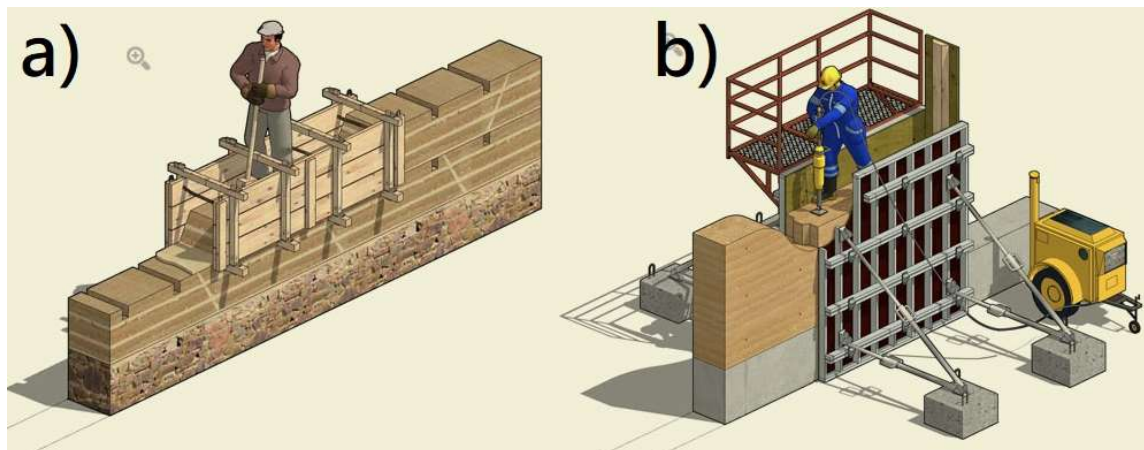


Figura 2.6:a) Taipa de pilão realizada de forma tradicional (manual). b) Taipa de pilão com ferramentas mecanizadas.
Fonte: Rénover & Construire En Pisé (2020).

- Taipa de mão: Sob uma trama vertical e horizontal de madeira, a terra úmida é lançada até que cubra a trama (Figura 2.7). Fibras naturais podem ser adicionadas para diminuir o aparecimento de fissuras na parede. É uma das técnicas mais antigas e tradicionais, sendo executada há pelo menos 6 mil anos.



Figura 2.7: Parede de taipa de mão inacabada.
Fonte: Coisas da Roça (2017)

- Blocos de terra comprimida: O método de produção manual do adobe é o mais popular, entretanto, desde 1950 é conhecida a primeira prensa mecânica de blocos de adobe criada pelo engenheiro chileno Raúl Ramirez, chamada de CINVA Ram. Para utilizar as prensas mecânicas e obter um adobe com desempenho satisfatório, é necessário diminuir a presença de água na mistura e incluir algum ligante, geralmente cimento, no percentual de 4 a 8% de massa (Minke, 2015). Na Figura 2.8 é possível ver o esquema representativo da operação da prensa mecânica por duas pessoas.

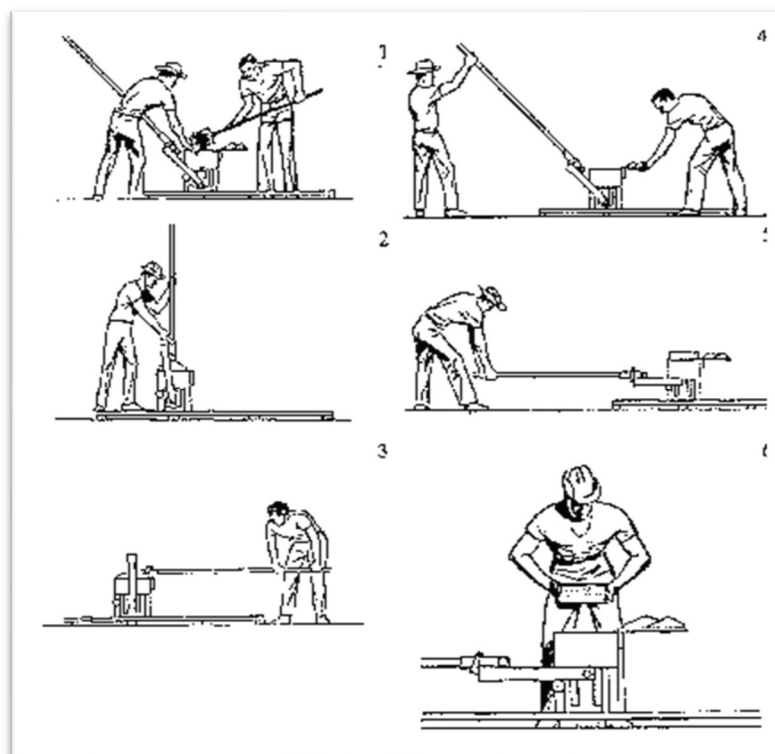


Figura 2.8: Utilização da prensa mecânica
Fonte: Gate (1988).

Apesar das prensas existirem há setenta anos, elas ainda são em geral inacessíveis à população brasileira, devido ao alto custo das máquinas. Entretanto, atualmente nas capitais e grandes cidades há um mercado ascensão com a venda dos blocos sob o nome de “tijolo ecológico”, por não serem queimados.

2.2 Adobe

Dá-se o nome de Adobe aos blocos de terra produzidos de forma manual ou mecanicamente prensados, que tem por composição a mistura de argila, silte e água, podendo ter a presença de fibras vegetais com o objetivo de incrementar a resistência mecânica do elemento moldado. A existência do adobe como técnica construtiva é registrada no Velho Testamento e por arqueólogos que encontraram diversas construções que permanecem sobrevivendo ao tempo até a atualidade em diversas regiões do mundo (QUAGLIARINI; LENCI, 2010).

Ao contrário do tijolo cerâmico, o adobe não passa pela etapa de queima e seu processo de secagem geralmente é feita por meio da exposição ao sol, tornando-o mais sustentável do que a construção tradicional que utiliza concreto e

blocos de alvenaria, pois, os adobes podem durar centenas de anos e ainda serem totalmente recicláveis (MINKE, 2015).

Além de ser reciclável, o adobe é poroso e permeável, podendo ser considerado como material que favorece o conforto dentro da edificação. Funciona, também, como filtro de ar por facilitar sua renovação dentro da edificação e, ainda, regula a umidade entre o ambiente interno e externo (CALABRIA; VASCONCELOS; BOCCACCINI, 2009).

A fabricação do adobe de forma tradicional é bastante acessível. Consiste primeiro em preparar e deixar a terra com certa umidade de forma que, quando jogada dentro da fôrma de madeira, se molde. Em seguida, a terra é compactada para evitar o aparecimento de vazios e, por fim, a fôrma é retirada. Caso algum acabamento seja necessário, é feito com colher de pedreiro, pedaço de madeira ou até mesmo alisando a mão, conforme ilustrado ludicamente na Figura 2.9.



Figura 2.9: Etapas da produção manual de adobe.
Fonte: ECOCENTRO IPEC (2016).

No processo construtivo, durante a elevação vertical da parede de adobe, deve-se utilizar uma argamassa com a mesma composição dos blocos, ou seja, utilizar o mesmo solo e atentar para a quantidade de água a ser utilizada pois, a depender do tipo de argila, os limites de plasticidade e liquidez tornam-se próximos. Pode-se acrescentar também cal ou cimento na argamassa, porém em pequenas proporções, pois atacam a pele e tendem a deixar a argamassa rígida e quebradiça.

2.3 Argila

A argila é o ligante natural da construção com terra pois, em presença de água, possibilita condições de moldagem e adaptação do solo à técnica construtiva que se pretende empregar. Um método empírico para averiguar a presença de argila no solo é por meio da fricção da amostra nos dedos: solos argilosos caracterizam-se pela maciez na fricção e solos arenosos pela aspereza.

A argila é um dos solos e sedimentos mais ativos do ponto de vista químico, isto se deve ao pequeno tamanho de sua partícula e à elevada razão entre superfície e volume (BLEAM, 2016).

Por meio dos estudos de geologia do médico e minerólogo Georgius Agricola no século XV, a argila recebeu sua primeira definição. Atualmente, após consenso entre a Associação Internacional para Estudo da Argila - AIPEA (Sigla em francês) e Sociedade dos Minerais Argilosos (CMS) foi definido o termo “argila” como “material natural composto por grãos finos, que é geralmente plástico em presença de água e endurecerá em seu estado seco ou queimado” (em tradução livre) (BERGAYA; LAGALY, 2006).

A NBR 6502-ABNT (1995), define a argila como “um solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade”. Pinto (2006) compilou em quadro o limite do diâmetro das partículas dos solos definidos pela NBR 6502 (1995), conforme visto na Figura 2.10:

| Fração | Limites definidos pela Norma da ABNT |
|--------------|--------------------------------------|
| Matacão | de 25 cm a 1 m |
| Pedra | de 7,6 cm a 25 cm |
| Pedregulho | de 4,8 mm a 7,6 cm |
| Areia grossa | de 2,0 mm a 4,8 mm |
| Areia média | de 0,42 mm a 2,0 mm |
| Areia fina | de 0,05 mm a 0,42 mm |
| Silte | de 0,005 mm a 0,05 mm |
| Argila | inferior a 0,005 mm |

Figura 2.10: Limite do diâmetro dos grãos de solo definidos pela NBR6502 (1995) e compilado em quadro. Fonte: Pinto (2006).

O estudo da argila remete a um grupo de minerais de silicatos que contam com características físicas e químicas únicas, principalmente na mineralogia e ao tamanho de suas partículas. A argila difere de outros minerais encontrados na maioria das pedras e rochas porque suas propriedades químicas são formadas na superfície da terra, onde há condições favoráveis para a formação de seus grãos, que são extremamente pequenos e têm elevada proporção de área superficial por volume. Esses fatores colaboram para que a argila seja um componente de solo com maior atividade química (BLEAM, 2016).

O feldspato é um grupo de minerais presente em 60% da crosta terrestre que sofre ataque da natureza e dá origem aos argilo-minerais, fração mais fina do solo com dimensão inferior a 2mm. Assim, o comportamento particular da argila é oriundo de sua pequena dimensão e complexa constituição mineralógica dos argilo-minerais (PINTO, 2006).

Quimicamente, a argila é composta por dois tipos de estruturas ligadas entre si por átomos de oxigênio: uma é formada por tetraedros sobrepostos num plano, com átomos de silício ligados a quatro átomos de oxigênio (SiO_4); e a outra estrutura é composta por octaedros, nos quais os átomos de alumínio são circundados por oxigênio ou hidroxilas $[\text{Al}(\text{OH})_3]$. Um fator que colabora para a complexidade da argila são as imperfeições que ocorrem em sua composição mineralógica, principalmente a substituição isomórfica (PINTO, 2006).

Segundo Sampaio (2011), na substituição isomórfica acontece a alteração dos cátions das unidades tetraédricas ou octaédricas por outras de menor valência. Essas trocas não alteram o arranjo dos átomos, mas originam um excesso de cargas negativas, as principais substituições na argila são as seguintes:

- Si^{4+} substituído pelo Al^{3+} em estruturas tetraédricas; e
- Al^{3+} substituído pelo Fe^{2+} ou Mg^{2+} em estruturas octaédricas.

Oriundas da substituição isomórfica, as cargas negativas excedentes juntam-se às partículas de cátions livres do solo (por exemplo Ca^{++} e Na^{+}) e, quando combinadas, atraem camadas próximas, porém com pouca força, pois não impedem a entrada de água entre as camadas. Assim, os minerais argilosos são eletro-negativos e têm uma estrutura eletroestática desequilibrada (SAMPAIO, 2011).

A água é um mineral complexo que atua como bipolo em função de sua orientação às cargas externas, por existir movimento constante dos átomos de hidrogênio em relação ao átomo central de oxigênio. Assim, quando a água e as partículas argilosas se encontram, há o rearranjo das moléculas e íons que circundam as partículas, acontecendo o afastamento dos íons em relação às partículas, que ficam circundados por água (Pinto, 2006).

2.4 Ativação alcalina

De acordo com Pacheco-Torgal, Castro-Gomes e Jalili (2008), Glukhosvsky foi o primeiro autor a investigar o material aglutinante utilizado nas construções Egípcias e Romanas da antiguidade. Em suas conclusões, ele constatou que os aglutinantes eram compostos por aluminossilicatos de cálcio hidratado, similar ao que é encontrado no cimento Portland. Com base nesse estudo, Glukhosvsky desenvolveu um novo tipo de aglomerante obtido a partir da mistura de aluminossilicatos na forma amorfa com resíduos industriais alcalinos.

Assim, a ativação alcalina é caracterizada por um mecanismo de reação, onde o modelo resultante do mecanismo de ação é composto pela dissolução, coagulação, condensação e cristalização da matéria prima natural contendo em sua composição aluminossilicatos – comumente denominado de precursor (LONGHI, 2015).

Com base na composição dos materiais, Palomo, Grutzeck e Blanco (1999), estabeleceram dois modelos de ativação alcalina. O primeiro é a ativação alcalina por meio da escória de alto forno (Si+Ca) com ativador alcalino de concentração intermediária e o gel de silicato de cálcio hidratado C-S-H como principal produto de reação. O segundo modelo de ativação alcalina foi definido como Si+Al, que se tem o exemplo o Metacaulim e a cinza volante com ativador alcalino de concentração alta, que como produto da reação formam as zeólitas. Por ser utilizado neste trabalho, há enfoque no segundo modelo de ativação alcalina de Palomo, Grutzeck e Blanco (1999).

Com relação ao segundo modelo, Severo *et al.* (2013) explica que tal modelo proposto por Glukhosvsky em 1959, onde o processo ocorre através de uma reação química exotérmica. Nesse processo, de acordo com Vassalo (2013), os ativadores alcalinos Si+Al realizam a dissolução que somente é possibilitada se inserida em

um ambiente altamente alcalino, é propiciado pela utilização do hidróxido de sódio. Posteriormente, ocorre a hidrólise e a dissolução de quantidades significativas dos ativadores e, por meio da policondensação, o resultado é um gel de estrutura sílico-aluminato, de uma forma geral, pode-se descrever a ativação alcalina como sendo um produto resultante da hidratação dos aluminossilicatos e os ativadores corroboram à reação da síntese (PINTO, 2002). A Figura 2.11, apresenta o modelo de ativação alcalina estabelecido por Glukhosvsky.

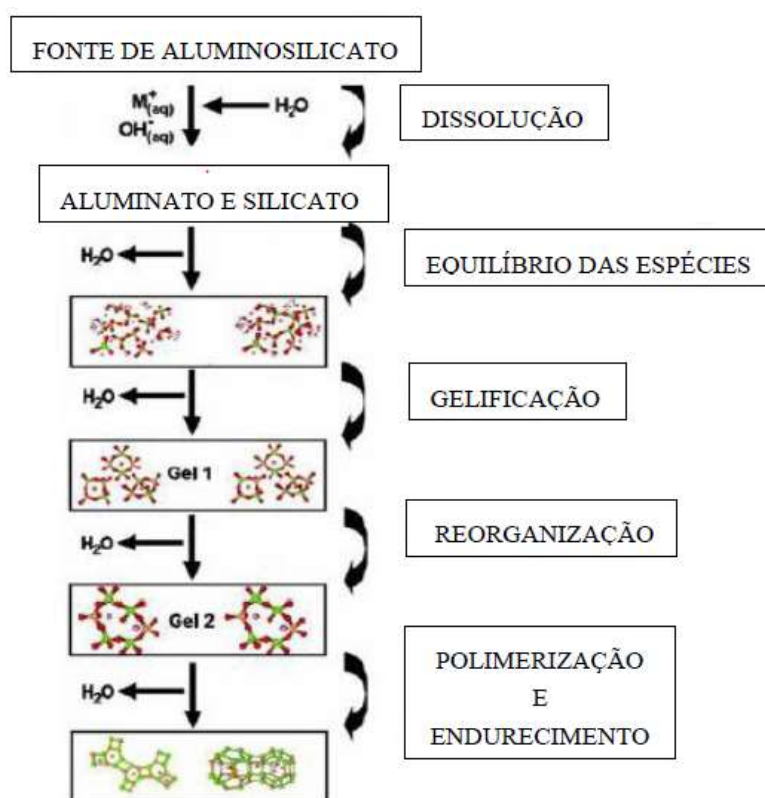


Figura 2.11: Modelo de ativação alcalina.
Fonte: Adaptado de Aredes (2012).

Teoricamente, quaisquer materiais compostos por sílica e alumínio podem ser ativados alcalinamente, desde que haja uma significativa concentração desses componentes na forma amorfa. Entretanto, até o presente, os principais materiais testados pela literatura foram: escória de alto forno, metacaulim, cinzas volantes, argilas caulínicas e lama vermelha (resíduo poluente oriundo do processamento da bauxita) (LI; SUN; LI; 2010).

Glukhosvsky, Rostovskaja e Rumyna (1980, apud Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalili, 2008) realizaram investigações importantes a respeito da ativação da escória de alto forno. Como resultado, foi observado que os produtos da hidratação

eram compostos de silicato de cálcio hidratado e aluminossilicatos hidratados de sódio e cálcio; outra descoberta importante foi a percepção de que minerais argilosos, quando submetidos à ativação alcalina, formavam hidratos de aluminossilicatos (zeólitas).

Assim, Glukhosvky (1981, apud Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalili, 2008) classificou os ativadores alcalinos em seis grupos, sendo M o íon alcalino (geralmente Na e K):

- a) Álcalis: MOH
- b) Sais ácidos fracos: $M_2\text{CO}_3, M_2\text{SO}_3, M_3\text{PO}_4, MF$
- c) Silicatos: $M_2\text{CO}_3 \cdot n\text{SiO}_3 \cdot n\text{SiO}_2$
- d) Aluminatos: $M_2\text{O} \cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$
- e) Aluminossilicatos: $M_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (2 - 6)\text{SiO}_2$
- f) Sais ácidos fortes: $M_2\text{SO}_4$

Campbell e Folk (1991) mostraram em seu estudo que a durabilidade desse antigo material aglutinante era devido à elevada concentração de compostos formados por zeólitas. Zeólitas são aluminossilicatos de metais alcalinos ou alcalinos terrosos, sendo as suas principais unidades hidratadas formada por Sílica tetraédrica $(\text{SiO}_4)^{-4}$ e Alumina $(\text{AlO}_4)^{-5}$, na qual acontece a substituição isomórfica de Si^{+4} por Al^{+3} , porém os átomos de silício também podem ser substituídos por átomos de boro, cromo, ferro e outros (SILVA, 2016). Para Granizo (1998), a presença de compostos zeólitos sugere que esses são a fase final estável de uma longa conversão de materiais e que no seu estágio inicial eram apenas materiais semelhantes às zeólitas.

Palomo, Grutzeck E Blanco (1999) apontaram que a ativação alcalina das cinzas volantes e do Metacaulim são semelhantes e geram um produto cimentício que é silicoaluminato alcalino amorfo, contendo pequenas proporções de quartzo, mulita e maghemita do cinza volante ou Metacaulim originário. O tipo da solução alcalina e a temperatura são os fatores mais significantes na resistência mecânica do produto da reação. O tipo da solução alcalina é essencial no desenvolvimento das reações, quando a solução contém hidróxido e silicato solúvel (Silicato de Sódio ou Potássio), a reação ocorre em taxas maiores do que quando utiliza-se apenas hidróxido. Com silicato solúvel as reações de dissolução, acumulação e policondensação da estrutura ocorrem quase que simultaneamente, resultando em rápido

ganho de resistência. A temperatura de cura foi considerada como um importante fator de acelerador da reação principalmente nas primeiras horas, entre 2 e 5 horas, tendo sua influência bastante diminuída à medida que o tempo de cura atingia 24 horas.

2.4.1 Ativadores Alcalinos

Os ativadores alcalinos são matérias primas que desempenham a função de propiciar a alcalinidade necessária ao meio para que ocorra a reação de síntese, denominada ativação alcalina, podendo esses serem cátions ou hidróxidos de metais alcalinos que administram e influenciam grande parte das fases que compõem a ativação alcalina, além do mais, a escolha do ativador está intimamente ligada com as características existentes nos precursores de origem (SEVERO *et al.*, 2013).

Sun e Vollpracht (2019) e Murta (2008) apontam as cinzas volantes e o metacaulim como precursores de origem de destaque utilizados na obtenção da ativação alcalina, e o hidróxido de sódio (NaOH) e o silicato de sódio (Na_2SiO_3) como compostos químicos mais utilizados como ativadores. Vale salientar para a escolha do ativador: ela deve ser realizada levando em consideração o precursor a ser utilizado, o contato do precursor e o ativador induz a dissolução.

O emprego do hidróxido de sódio na obtenção da ativação alcalina está relacionado com o pH elevado, visto que o ambiente necessário para que haja síntese é de alta alcalinidade. Dessa forma, o hidróxido de sódio possibilita um pH próximo a 14, propiciando o meio altamente alcalino (CILLA; MORELLI, 2012; SILVA *et al.*, 2015).

Com relação ao uso do silicato de sódio, como o metacaulim possui uma deficiência acerca da quantidade existente de silício, o silicato de sódio entra atuando como fonte principal ofertando a parcela restante possibilitando a ativação e, concomitantemente, servindo como ativador alcalino no mecanismo de reação (ALVARENGA, 2018; SILVA *et al.*, 2015).

O uso do silicato de sódio também pode vir a ofertar melhores propriedades mecânicas nos produtos formados, porém, o excesso de concentração dos ativadores provoca atraso na obtenção da ativação alcalina, evidenciando a importância e a necessidade de se estudar a influência da concentração quanto às propriedades

físicas e mecânicas, principalmente quando tais propriedades são visadas no produto final (BEZERRA *et al.*, 2013).

Rovnanik (2010) salienta que as propriedades mecânicas, bem como a microestrutura do material alcalinamente ativado, dependem essencialmente da relação inicial entre silício e alumínio, Aquino, Lange e Olek (2001) e Temuujin, Williams e Van Riessen (2009) estudaram essa relação e chegaram à conclusão de que a razão ideal entre Si/Al está compreendida entre 1,5 e 2 e valores superiores reduzem as propriedades mecânicas.

2.4.2 Metacaulim

Também conhecido como caulim calcinado, o metacaulim é um material rico em caulinita, resultante da calcinação do caulim, e corresponde ao precursor mundialmente predominante na obtenção de concretos geopoliméricos e ativações alcalinas, devido ao seu processo de obtenção bastante reativo (MACCARINI, 2015).

A reatividade presente no metacaulim – derivada do tratamento térmico ao qual é submetido – favorece fortemente a reação química existente na geopolimerização, além disso, características relacionadas à composição química e mineralógica do caulim, podem influenciar na finura e cor do produto final (VASSALO, 2013). Silva *et al.* (2015) descreve que boas características de resistência são obtidas na ativação alcalina que têm como material de origem produtos resultantes da calcinação e influenciarem de forma positiva na qualidade final.

Além de ser um mineral industrial de fácil acesso, podendo ser obtido em grande quantidade, e comum, ele também é menos agressivo ao meio ambiente ao comparar com o cimento Portland – aglomerante utilizado na obtenção do concreto mundialmente utilizado –, sua temperatura de calcinação é consideravelmente inferior e a emissão de CO₂ é reduzida em até 90% (ROVNANIK, 2010).

A ativação alcalina do metacaulim, Figura 2.12, pode ser obtida através de uma solução de hidróxido alcalino, como por exemplo o hidróxido de sódio (NaOH), estabelecendo o cátion, ou sal alcalino que, após hidrólise, resulta no silicato alcalino – solução fortemente básica, onde ocorre o processo de dissolução na estrutura primária do aluminossilicato do metacaulim, seguida pela condensação do silicato livre e alumina, originando uma estrutura tridimensional e, posteriormente, a policondensação, através da temperatura e cura (ROVNANIK, 2010; LI *et al.*, 2019). A

estrutura tridimensional tem caráter amorfo evidenciando que a ativação alcalina à base de metacaulim é um material altamente amorfo.

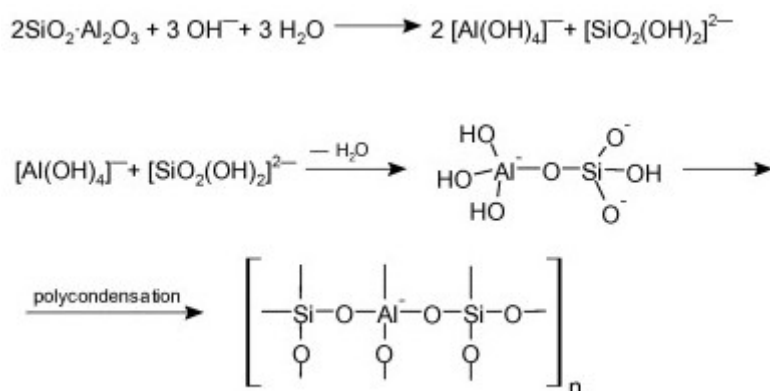


Figura 2.12: Ativação do Metacaulim.
Fonte: Rovnanik (2010).

2.4.3 Geopolímero

Segundo Callister (2002), os materiais sólidos têm sido divididos em 3 categorias básicas: metais, cerâmicos e polímeros. Embora alguns materiais possam ter características intermediárias, para que ocorra a classificação é necessário que sejam realizadas análises a partir da composição química e estrutura atômica.

O termo Geopolímero é datado da década de 1970, e foi denominado pelo engenheiro Francês Josph Davidovits que, genericamente, aplicou o termo para descrever um aluminossilicato alcalino de origem amorfa (Duxson *et al*, 2007). Além disso, os geopolímeros fazem parte da classe de materiais capazes de substituir o concreto usualmente empregado nas construções devido às suas vantagens como: a alta força inicial, alta durabilidade, resistência a agentes agressivos e capacidade de imobilizar átomos tóxicos e questões envolvendo o ambientalmente correto (PEREIRA *et al*, 2018).

Atualmente, há outras denominações: polímero inorgânico, cimento alcalinamente ativado, geocimento e outros e, apesar da variedade de nomenclaturas, o geopolímero tem – essencialmente – a mesma formação química: ligações alternadas de Si-O-Al (Duxson *et al*, 2007).

Davidovits (2002), desenvolveu e patenteou um aglomerante oriundo da ativação alcalina do metacaulim e denominou-o “geopolímero”. Para designar os compostos químicos do geopolímero, Davidovits sugeriu o termo “polissialatos”, onde a parte dos “sialato” refere-se a uma abreviação do óxido de aluminossilicatos. Esses

sialatos são formados por ligações tetraédricas de ânions ($[SiO_4]^{4-}$ e $[AlO_4]^{5-}$, que compartilham oxigênio e assim precisam de íons positivos ($Na^+, K^+, Li^+, Ca^{2+}, Ba^{2+}, Li^+, NH_4^+, H_3O^+$) da tabela periódica para complementar a coordenação tetraédrica do Al^{3+} (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalili, 2008). Na figura 2.13, é possível visualizar a estrutura dos polissialatos proposta por Davidovits:

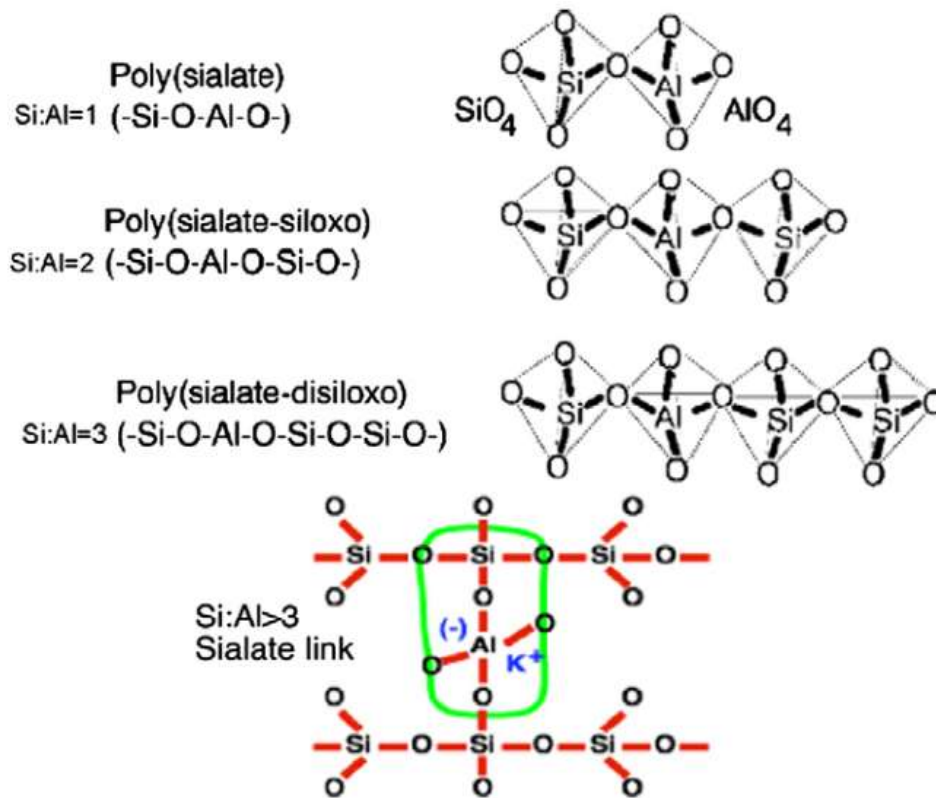


Figura 2.13: Estrutura dos polissialatos.
Fonte: (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalili, 2008).

Para Davidovits, o geopolímero é caracterizado um polímero por se transformar, polimerizar e endurecer em temperatura ambiente; ao mesmo tempo em que são inorgânicos, duros, resistentes a altas temperaturas e não inflamáveis (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalili, 2008). Sendo assim, a fórmula empírica dos polissialatos é a seguinte:

$$M_n \{-(SiO_2)_z - AlO_2\}_n, wH_2O$$

Sendo:

M: Cátion alcalino (Na^+ ou K^+);

N: Grau de polimerização;

Z: 1, 2 ou 3

Os usos para o geopolímero têm variado bastante ao decorrer do tempo. Originalmente, o material foi desenvolvido após uma série de incêndios na Europa, tendo assim seu primeiro uso como uma camada ou pintura resistente ao fogo. Com o decorrer do tempo, foram desenvolvidas outras aplicações: isolante térmico, compósitos para aeronaves e veículos, isolante tóxico e radioativo, material estrutural e de ornamentação para construção, dentre outros (DAVIDOVITS, 2008).

Embora existam essas diversas aplicações, o potencial comercial do Geopolímero ainda precisa ser destravado. São poucos os lugares no mundo em que é possível comprar algum produto que contenha esse material, o que contrasta diretamente com o interesse e popularidade das pesquisas científicas a respeito do Geopolímero, que tem crescido consideravelmente e se espalhado, resultando em diversos estudos que caracterizam-no, mas ainda com poucas aplicações práticas ante o potencial do material tais como custos competitivos, maior desempenho e menor impacto ambiental em relação ao cimento Portland (PROVIS e VAN, 2009; AZEVEDO, 2017; PELISSER *et al.*, 2018).

O uso de adobes com geopolímero em alternativa ao cimento Portland, provém do baixo impacto ambiental: estima-se que, a cada tonelada de CP produzido, são consumidos de 3 a 6 GJ de energia e são liberados, no meio ambiente, 0,85 toneladas de dióxido de carbono (CO₂), o que reforça a questão de sustentabilidade, além disso, os MAA são subprodutos industriais ou resíduos, podendo ser aplicados diretamente ou obtidos através da calcinação ou ativação térmica, não ultrapassando o limite de 700°C a 900°C, o que pode ser comparado com o clínquer composto no CP, que chega a 1500°C, para ser obtido (PROVIS; PALOMO; SHI 2015). Os autores ainda ressaltam que se deve levar em consideração alguns índices de poluição ao meio ambiente com o intuito de evitar imprecisões na comparação entre os materiais, tais como: a localização da indústria, a fonte de cada componente material, a unidade funcional e o projeto de obtenção dos materiais geopoliméricos e Portland.

Singh (2015) também traz a ideia principal acerca do emprego do geopolímero como alternativa ecológica ao cimento Portland visto que, por ser essencialmente formado por uma solução alcalina e aluminossilicatos, essa última classe de minerais permite a incorporação de diversos resíduos industriais que não teriam mais valor econômico, reduzindo assim o impacto ambiental e diminuindo seu custo de produção, além do mais, a resistência à compressão antes dos 28 dias pode chegar

até 80 MPa, dependendo das condições de cura e dosagem, corroborando com os estudos realizados por Provis, Palomo e Shi (2015).

Assim, o principal objetivo para incorporar a mistura alcalinamente ativada no adobe é aproveitar seu elevado poder aglomerante, elevada resistência à compressão e acrescentar estabilidade ao adobe, pois a não estabilidade à água é uma das principais limitações do material e acarreta manutenções anuais em estruturas por todo o mundo.

2.4.4 Cura e Temperatura

Na síntese dos Materiais Alcalinamente Ativados, como por exemplo o geopolímero, o controle necessário sobre os parâmetros temperatura, tempo e umidade evidenciam a importância que exercem sobre as propriedades finais do produto, bem como o precursor visto que tal fator determinará a escolha do ativador no processo de ativação alcalina (BEZERRA *et al.*, 2013).

Altan e Erdorgan (2012), discorrem acerca da cura à qual o material será submetido e ressaltam que está intimamente ligada ao tipo de ativador a ser empregado, ou seja, o tipo de cura a ser utilizada corresponderá ao ativador, essa afirmativa é pertinente devido à condição de que um fator pode vir a ter mais influência sobre o outro no quesito resistência, além do mais, a cura em altas temperaturas pode demandar até dois ativadores, à medida que, em temperaturas ambientes, apenas um ativador possa vir a suprir.

Apesar da cura ser um processo bastante determinante nas propriedades da geopolímero, é necessário entender como esse processo funciona na microestrutura do produto: enquanto Severo *et al.* (2013) discorrem acerca do geopolímero à base de metacaulim obter melhores propriedades físicas quando submetido à temperatura de 60°, Sun e Vollpracht (2019), que, durante um ano estudaram geopolímeros com cura variando de 20°C a 60°C, com intervalos de dias entre 7, 28, 180 e 365 dias, concluíram que, nas curas realizadas a 60°C, o material apresentou ótima resistência, porém, o mesmo não foi analisado na microestrutura e qualidade, já em temperaturas ambiente, entre 20°C e 30°C, inicialmente, não houve uma resistência considerável, mas aos 28 dias, resultou em uma força superior aos demais e, devido ao intervalo de tempo que permitiu que a reação ocorresse, os resultados

da microestrutura foram bastante positivos, não apresentando danos. Ambos usaram como ativador o silicato de sódio e como precursor o metacaulim.

Outro autor que estudou a influência da cura em diferentes temperaturas, foi Rovnaník (2010). As temperaturas escolhidas para o estudo foram de 10°C a 80°C e pôde concluir que, quando a mistura fresca é submetida a temperaturas elevadas (acima de 50°C), a resistência é bastante atrativa, porém a microestrutura apresenta-se deteriorada e a perda das propriedades mecânicas devido ao aumento da porosidade com o passar do tempo. Em contraponto, curas em temperaturas ambientes - respeitando o período de cura – mostraram um maior ganho de resistência e homogeneidade, resultando em uma microestrutura com a qualidade almejada.

Mancilha (2012), também realizou os mesmos estudos que os autores acima e os resultados obtidos não se distanciam dos obtidos por eles. A autora ainda afirma que quanto maior a o tempo de cura, melhor a polimerização do produto, mas quando ocorre concomitantemente a uma cura a 60°C as reações se distorcem, daí o lado negativo da cura em altas temperaturas.

Diante do exposto, compreende-se a complexidade do comportamento do geopolímero, e que as características almejadas dependem de uma gama de fatores: uma elevada resistência inicial (que é obtida quando o produto está a uma temperatura de 60°C) acarreta uma geopolimerização acelerada e, como resultado, uma microestrutura fraca; por outro lado, uma geopolimerização que respeite um intervalo de dias consideráveis, não só apresenta uma resistência ótima como uma microestrutura de qualidade. Claro, esses fatores devem considerar que a matéria prima utilizada foi o metacaulim e o ativador o silicato de sódio.

Outro ponto explorado por todos os autores abordados neste tópico, foi a condição de umidade do ambiente quanto à cura em ambientes a 60°C: ela deve ser controlada e mantida ao longo de toda a cura pois sua perda resulta em um produto final não desejado, com perda das propriedades, granuloso e poroso. Ou seja, além da temperatura elevada prejudicar algumas propriedades, a umidade, quando não controlada, contribui para deteriorar as características da amostra

2.5 Pesquisas recentes

O tema da sustentabilidade na sociedade e dos meios de produção em geral tem sido bastante discutida, e por não ser diferente, as técnicas construtivas mais sustentáveis voltaram a despertar uma atenção maior das pessoas e dos pesquisadores.

Félix (2016) demonstrou que a ativação alcalina é menos impactante do ponto de vista energético do que o cimento, e avaliou o desempenho da ativação alcalina no adobe, a respeito da estabilização à água e à resistência mecânica. A análise foi realizada utilizando o metacaulim e resíduo de cerâmica vermelha em conjunto com a utilização de precursores como o silicato industrial e silicato não-industrial. Os resultados mostraram que, mesmo em pequenas proporções – de 1 a 3% de ativante alcalino em relação a massa do solo – a ativação alcalina se mostrou eficaz para tornar o adobe estável à água e aumentar a resistência à compressão significativamente.

Kafodya, Okonta e Kloukinas (2019) avaliaram a influência que a adição da fibra vegetal de sisal exerce no adobe e na argamassa de argila. Foram construídas paredes a partir desses materiais e realizados testes de compressão uniaxial e cisalhamento diagonal. Em geral, o acréscimo da fibra de sisal resultou em significativas melhorias no desempenho mecânico dos materiais envolvidos, com destaque para o aumento de 31% na resistência à tração da argamassa e 25% na resistência à compressão do adobe.

Costa *et al* (2019) fizeram síntese histórica a respeito do princípio do adobe até os dias atuais. Eles mostram que, embora países subdesenvolvidos sejam predominantes na técnica de construção com adobe, há países desenvolvidos que contam com construções em adobe: Portugal, Alemanha, França e Inglaterra. Em seguida, estabeleceram a relação que esses países desenvolvidos estão preocupados com a conservação de seu patrimônio histórico e que a utilização de geopolímeros é uma alternativa viável do ponto de vista sustentável.

Giada, Caponetto e Nocera (2019) realizaram uma revisão literária a respeito das propriedades que as construções com terra têm de permitir a movimentação de calor e umidade entre o ambiente interno e externo. Os autores concluíram que a terra funciona como material de mudança fase natural, isto é, devido à sua estrutura porosa que permite a passagem de calor e vapor d'água naturalmente; outra

constatação foi de que a adição de fibra vegetais no adobe diminui a condutividade térmica, devido à maior absorção de água e aumento da presença de ar nos poros. Entretanto, os autores constataram que há grande variabilidade nos testes realizados pelos autores pesquisados, dificultando a comparação entre si e demonstrando que há a necessidade de normatização dos experimentos bem como os equipamentos envolvidos nos testes.

Martins, Fernández e Varum (2019), analisaram a influência que a presença da água exerce no comportamento mecânico da alvenaria de adobe, sendo testadas as condições saturada e não saturada da argila. Os resultados dos testes mostraram que as resistências à compressão e ao cisalhamento da alvenaria de adobe não saturada foram adequadas aos requisitos das normas internacionais, entretanto a parede saturada apresentou resultado nos mesmos testes bem inferiores à não saturada, sendo 22% e 25% respectivamente.

Elert *et al* (2019) avaliaram a performance de paredes de adobe quando submetidas a dois tipos de tratamento de material, o primeiro utilizando ativação alcalina e solução de KOH, e o segundo tratamento feito pela utilização de silicato etílico. Os resultados experimentais revelaram que o tratamento via ativação alcalina foi mais efetivo em melhorar a resistência à água e à compressão do material.

Piani *et al* (2019) testaram a influência que a presença de fibras vegetais e o efeito da presença de água tem no comportamento dinâmico de adobe. Após os testes, os autores constataram que a grande concentração de fibras acarreta maior heterogeneidade do material e maior área para falhas; quanto à presença de água, os autores afirmam que o melhor desempenho foi alcançado com o adobe totalmente seco de forma natural, devido a formação de uma ligação química mais forte, garantindo um arranjo interpartículas mais denso.

Elert, Pardo e Rodriguez-Navarro (2015) testaram a ativação alcalina como um método alternativo para a consolidação da construção com terra em pequenos adobes. Para a solução ativadora foram utilizados dois componentes diferentes: NaOH e KOH na mesma concentração de 5M. Como resultado, os autores concluíram que devido ao elevado pH ao qual o solo foi inserido, a ativação alcalina favoreceu substancialmente o ganho da resistência à compressão e estabilidade à água do adobe testado.

Calabria, Vasconcelos e Boccaccini (2009) analisaram o mecanismo de degradação química que ocorre com o adobe e os tijolos de barro queimados. Os autores

concluíram que o tijolo queimado é menos susceptível a soluções de água por apresentar menor superfície específica e tamanho de poros menores.

Muñoz *et al* (2013) avaliaram a influência que a presença da pasta de celulose exerce no tijolo de argila queimado, sem que as propriedades mecânicas sejam totalmente comprometidas. Os resultados mostraram que apenas a partir da presença de 5% de pasta de celulose, em relação à massa do tijolo, há diminuição na condutividade térmica, sendo o ponto ótimo de 15% pois, à medida que a concentração de celulose aumenta, ocorre diminuição na resistência mecânica à compressão. Percebeu-se também que a condutividade térmica dos tijolos segue uma linha de tendência parabólica e a resistência à compressão tendência linear.

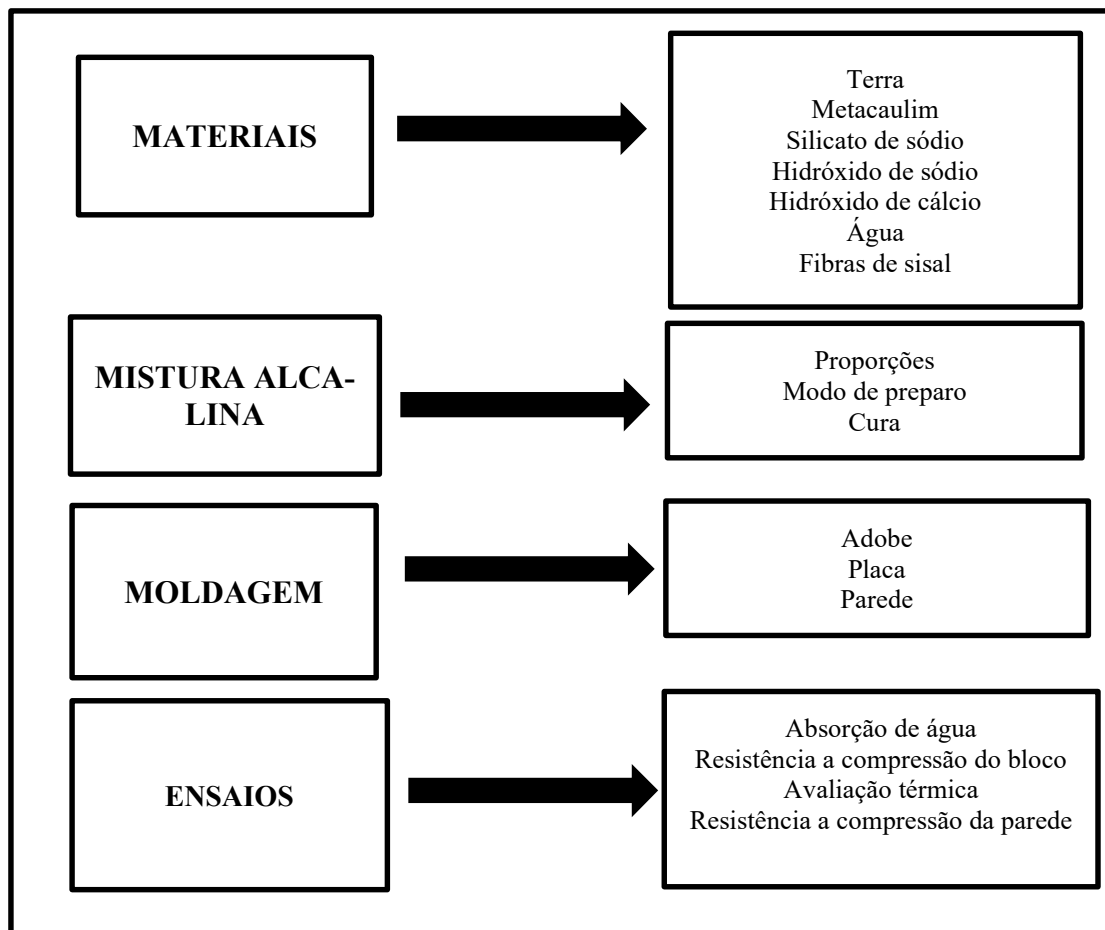
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo detalham-se os materiais utilizados e a metodologia aplicada neste trabalho. De maneira geral, as etapas adotadas foram as seguintes:

- a) Escolha e caracterização dos materiais utilizados;
- b) Definição da mistura alcalina e suas interações;
- c) Produção dos adobe e de paredes;
- d) Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos adobes;
- e) Avaliação das propriedades térmicas do material e em mini paredes;
- f) Comportamento estrutural de mini-paredes.

O quadro 3.1 apresenta um resumo esquemático desta seção.

Quadro 3.1:Resumo esquemática dos materiais e métodos. Fonte: Autor



3.1 Materiais

Buscou-se neste trabalho a utilização de materiais disponíveis localmente no comércio de João Pessoa – PB, com exceção de um dos produtos químicos. A construção em Adobe prima pela utilização da terra disponível no local de construção, desde que ofereça condições adequadas de trabalhabilidade.

No decorrer pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

- terra;
- metacaulim;
- silicato de sódio;
- hidróxido de sódio;
- hidróxido de cálcio;
- água;
- fibras de sisal.

3.1.1 Terra

Foi utilizada apenas um tipo de terra tendo sua coloração preponderantemente amarela. Ela foi obtida em depósito de material de construção da cidade de João Pessoa e é oriunda do município de Santa Rita – PB, na região metropolitana de João Pessoa e conhecida por concentrar diversas olarias.

Para caracterização do solo foram feitos os ensaios da NBR-7184(2016) Análise Granulométrica dos solos, para identificar os teores de Silte e argila, e os ensaios da NBR-7180(2016) e NBR-6459(2016) para determinar o Limite de plasticidade do solo e a Determinação do limite de liquidez, respectivamente.

O solo também foi analisado sobre a ótica da difração de Raio – X (DRX) e comparado após ser alcalinamente ativado, ambos para valores de 2θ entre 5° a 70° e velocidade $0,5^\circ/\text{min}$.

Na Figura 3.1 vê-se o aspecto da terra empregada.



Figura 3.1: Aspecto visual da argila após peneiramento da terra em peneira 6.35mm.
Fonte: Autor.

3.1.2 Metacaulim

O Metacaulim é um material pozzolânico amorfo que é obtido por meio da calcinação de argilas caulíníticas a temperaturas de 650 a 800°C. Rico em Sílica (SiO_2) e Alumina (Al_2O_3) amorfas é um dos principais precursores utilizados na síntese de geopolímeros (LI *et al.*, 2010).

Foi utilizado o metacaulim vendido comercialmente pela empresa SOLEMI-NAS que é facilmente encontrado e economicamente acessível na cidade de João Pessoa.

A composição química aproximada consta na Tabela 3.1 e na Figura 3.2 é possível visualizar sua coloração avermelhada.

Tabela 3.1: Composição química do metacaulim. Fonte: Autor

| SiO ₂ (%) | Al ₂ O ₃ (%) | Fe ₂ O ₃ (%) | CaO (%) | MgO (%) | SO ₃ (%) | Na ₂ O (%) | K ₂ O (%) | TiO ₂ (%) | Ou- tros (%) |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| 53,65 | 31,79 | 9,9 | 0,12 | 1,17 | 0,08 | 0,2 | 0,65 | 1,84 | 0,6 |



Figura 3.2: Metacaulim utilizado. Fonte: Autor.

3.2.3 Silicato de sódio

O silicato é um ativador alcalino cuja composição química pode variar bastante, principalmente a razão de $\frac{SiO_2}{Na_2O}$, podendo ter intervalos de 1,6 a 3,75 em massa, a depender do fabricante. À medida que a concentração de $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ aumenta, mais viscoso o líquido fica (JOHN, 1995).

No mercado é possível encontrar Silicato de Sódio em versão em pó e líquida, neste trabalho optou-se por utilizar o silicato de sódio em pó devido a facilitar o controle de percentual de água utilizado na mistura. Este material foi obtido pela internet devido a não disponibilidade no comércio local. Na Tabela 3.2 consta o boletim técnico fornecido pelo fabricante.

Tabela 3.2: Boletim técnico do Silicato de Sódio Alcalino. Fonte: Auro's Química

| | |
|-------------------------------|---|
| Nome químico | Silicato de Sódio |
| Nº CAS | 1344-09-8 |
| Faixa de concentração | 76-81% |
| Aspecto | Pó Branco |
| Densidade relativa | 1,2 - 1,6 g/cm³ em 20°C |
| Solubilidade em água | Solúvel |
| Fórmula | Na ₂ O(SiO ₂) ₂ |
| Na ₂ O ≥ | 23,3% |
| SiO ₂ ≥ | 50,9% |
| Relação $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ | 1,95 - 2,15 |
| PH | 11,00 - 13,00 |
| Densidade | 600 - 750 g/L |
| Presença de água | 19,00-22,00% |

3.2.4 Hidróxido de Sódio

O hidróxido de sódio (NaOH) utilizado foi adquirido na cidade de João Pessoa em pote de 1 kg, com pureza de 97% e na forma de escamas e com cor predominantemente branca. Neste trabalho, o hidróxido de sódio (Figura 3.3) foi utilizado apenas na primeira fase de testes da mistura alcalina com o solo.



Figura 3.3: Hidróxido de sódio utilizado. Fonte: Autor.

3.2.5 Hidróxido de Cálcio

O hidróxido de Cálcio hidratado (CaOH) utilizado foi adquirido na cidade de João Pessoa em saco de 20 kg. Neste trabalho, o hidróxido de cálcio foi utilizado para substituir o hidróxido de sódio, para aumentar o tempo de pega. Na Tabela 3.3 consta o boletim técnico fornecido pelo fabricante e na Figura 3.4 tem-se sua imagem.

Tabela 3.3: Boletim técnico do Hidróxido de Cálcio. Fonte: Carbomil

| | |
|---|-------------------------------|
| Produto | Cál Hidratada – CH 1 |
| Características da Matéria Prima | |
| Mineral de origem: | Calcário |
| Origem: | Cretáceo |
| Formação: | Sedimentar |
| Estrutura: | Microcristalina |
| Classificação quanto ao teor MgO: | Calcítico |
| Características do Produto | |
| Ca(OH) ₂ : | ≥ 92,5 % |
| Mg(OH) ₂ : | ≤ 5,0 % |
| RI em HCl: | ≤ 1,5 % |
| SiO ₂ : | ≤ 1,3 % |
| Retenção em 325 mesh: | ≤ 6,0 % |
| Umidade: | ≤ 2,0 % |
| Densidade Aparente: | 0,55 – 0,65 g/cm ³ |



Figura 3.4: Hidróxido de Cálcio hidratado utilizado. Fonte: Autor

3.2.6 Água

Foi utilizada água potável oriunda da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba – CAGEPA.

3.2.7 Fibra de sisal

As fibras de sisal têm elevada resistência a tração, variando de 150 MPa (sem tratamento químico) até 300 MPa com tratamento alcalino (Silva, 2018). Neste trabalho a fibra de sisal é originária do município de Pocinhos – PB, foi cortada com 10mm de comprimento e antes de ser inserida na betoneira foi imersa em água para não absorver água da ativação alcalina. Não foi aplicado nenhum tratamento químico e a Figura 3.5 apresenta o aspecto da fibra após o corte.



Figura 3.5: Fibra de sisal cortada com aproximadamente 1 cm. Fonte: Autor

3.2 Mistura alcalina e suas interações

A mistura alcalina utilizada neste trabalho foi adaptada a partir dos trabalhos de Oliveira (2015) e Félix (2016) que apresentaram bons resultados.

Estes autores utilizaram como precursores alcalinos diversos produtos químicos, alguns industrializados e outros desenvolvidos em sua pesquisa. Tendo em vista o padrão industrial qualitativo e o grau extra de dificuldade que envolvem a produção de certos químicos, neste trabalho optou-se pela utilização de precursores alcalinos industrializados e possíveis de serem adquiridos no comércio local.

Assim, antes de começar a produção propriamente dita do adobe, foram realizados testes empíricos e em pequenas quantidades para avaliar se a combinação dos ativadores alcalinos utilizados por Oliveira (2015) e Félix (2016) atenderiam aos seguintes critérios para produção:

- a) Trabalhabilidade suficiente para moldar o adobe;
- b) Início de enrijecimento igual ou maior que 30 minutos;

Além de estarem diretamente ligados a viabilização da etapa de produção e moldagem, esses critérios podem influenciar diretamente a aparência final do adobe.

Optou-se por iniciar os testes das misturas em pequena escala, assim, foi produzida uma forma vazada em miniatura de madeira para que pudesse ser simulada as condições de produção do adobe. Desse modo foi possível avaliar o desempenho do traço, verificando se as expectativas de produção foram atendidas.

Ao se reproduzir o traço de Félix (2016) composto por terra, metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio, verificou-se que se conseguia resistência adequada. O traço encontra-se descrito na Tabela 3.4 a seguir.

Tabela 3.4: Traço original de Félix (2016) em gramas. Fonte: Félix (2016).

| Terra | Metacaulim | Silicato de sódio | Hidróxido de sódio | Água destilada | Água potável |
|-------|------------|-------------------|--------------------|----------------|--------------|
| 1000 | 11,8 | 10,4 | 1,2 | 6,6 | 104 |

Porém o traço de Félix (2016) teve processo de moldagem difícil, pois o endurecimento iniciava-se assim que o processo de mistura era finalizado, criando uma textura pegajosa no material. Na Figura 3.6 é possível visualizar como a falta de trabalhabilidade prejudica a qualidade final do adobe.



Figura 3.6: Adobe em miniatura após primeiro teste de moldagem. Fonte: Autor

Para adequar o traço às condições julgadas mais susceptíveis a moldagem definida no capítulo de metodologia, foram testadas diferentes combinações de ativadores alcalinos, sempre mantendo as proporções estequiométricas originais do traço. A descrição e os resultados empíricos, encontram-se a seguir:

a) Remoção do Hidróxido de sódio, mantendo-se presente na mistura: água potável, terra crua, Metacaulim e o silicato de sódio.

→Trabalhabilidade: Não adequada para fabricação do adobe. Mistura não ficou muito fluida. Após desforma base do tijolinho ficou deformada devido ao peso do solo.

→Endurecimento: Adequada para fabricação do adobe. Verificou-se que o início de endurecimento da mistura ocorreu após 60 minutos.

b) Remoção do Silicato de sódio, mantendo-se presente na mistura: água potável, terra crua, Metacaulim e o Hidróxido de sódio.

→ Trabalhabilidade: Não adequada para fabricação do adobe. Mistura requereu +2% de água em relação ao volume de solo e apresentou textura pegajosa, dificultando a moldagem e desforma. Não foi possível realizar acabamento de forma satisfatória na parte superior do adobe, conforme visto na Figura 3.7.

→ Endurecimento: Não adequada para fabricação do adobe. Verificou-se que o início de endurecimento da mistura ocorreu antes de 30 minutos.



Figura 3.7: Aspecto visual do traço inicial sem silicato de sódio. Fonte: Autor

Diante estas duas experimentações, pôde-se inferir que nestas condições de materiais e traço, o hidróxido de sódio foi o elemento responsável por diminuir a trabalhabilidade e acelerar o tempo de endurecimento da mistura. Portanto, buscou-se superar essa dificuldade, fazendo o seguinte teste:

c) Substituição do hidróxido de sódio pelo hidróxido de cálcio, mantendo-se presente na mistura: água potável, terra, Metacaulim e o silicato de sódio.

→ Trabalhabilidade: Adequada para fabricação do adobe. Requereu acréscimo de 1% de água em relação ao original de Felix (2016), não apresentou textura pegajosa e a desforma foi feita de forma fácil.

→ Endurecimento: Adequado para fabricação do adobe. Verificou-se que o início de endurecimento da mistura ocorreu após 60 minutos.

Este último teste mostrou-se bastante adequado para a proposta do trabalho. Assim, a composição final utilizada no trabalho está indicada na Tabela 3.5. Ressalta-se que ao se adicionar a fibra de sisal no adobe alcalinamente ativado a proporção dos materiais não foi alterada.

Tabela 3.5: Proporção utilizada para adobe alcalinamente ativada em gramas. Fonte: Autor

| Terra | Metacaulim | Silicato de sódio | Hidróxido de cálcio | Água potável | Fibra de sisal |
|-------|------------|-------------------|---------------------|--------------|----------------|
| 1000 | 12 | 05 | 05 | 170 | 10 |

3.3 Produção do Adobe com a mistura alcalina

O método de preparo da mistura alcalina foi padronizada para todas as amostras produzidas no trabalho: testes preliminares, adobe, placas para ensaio térmico e alvenaria de adobe.

A primeira etapa da mistura alcalina consistiu em pesar o silicato de sódio em pó e diluí-lo em pequena quantidade de água pelo menos 24 horas antes da mistura efetiva de todos os materiais. Após o silicato de sódio em pó ser homogeneizado em água, a solução era tampada e deixada descansar até o dia seguinte, conforme Figura 3.8.



Figura 3.8: Silicato de sódio homogeneizado em água. Fonte: Autor

Após o descanso de 24 horas da solução de Silicato de Sódio e Água, os demais materiais eram devidamente pesados e posicionados a frente da Betoneira, conforme Figura 3.9. Optou-se por realizar a misturas dos materiais líquidos e em pó de forma separada, até que houvesse homogeneização suficiente para misturar ambos.

Portanto, primeiro a solução de Silicato de sódio e água (preparada no dia anterior) era dissolvida com o restante da água e misturada de forma a se tornar homogênea. Em seguida, os demais materiais (terra, Metacaulim e cal) eram colocados dentro da betoneira por no mínimo 5 minutos. Por fim eram inseridos os materiais líquidos.



Figura 3.9: Materiais prontos para serem misturados na betoneira. Fonte: Autor.

Quanto aos traços que tinham a presença de sisal, o processo de mistura era de forma semelhante. Antes de acrescentar o sisal, este era umedecido para não absorver água da mistura. Ele era gradualmente lançado na betoneira antes da adição dos líquidos, esta fase era feita com cuidado para não promover o aparecimento de “tufos” da fibra de sisal. Na Figura 3.10 é vista a fibra de sisal cortada imersa em água para absorção antes de ser acrescentada ao traço na betoneira.



Figura 3.10: a) Adição de água na fibra de sisal. B) Fibra de sisal imersa em água antes de ser acrescentada ao traço na betoneira. Fonte: Autor.

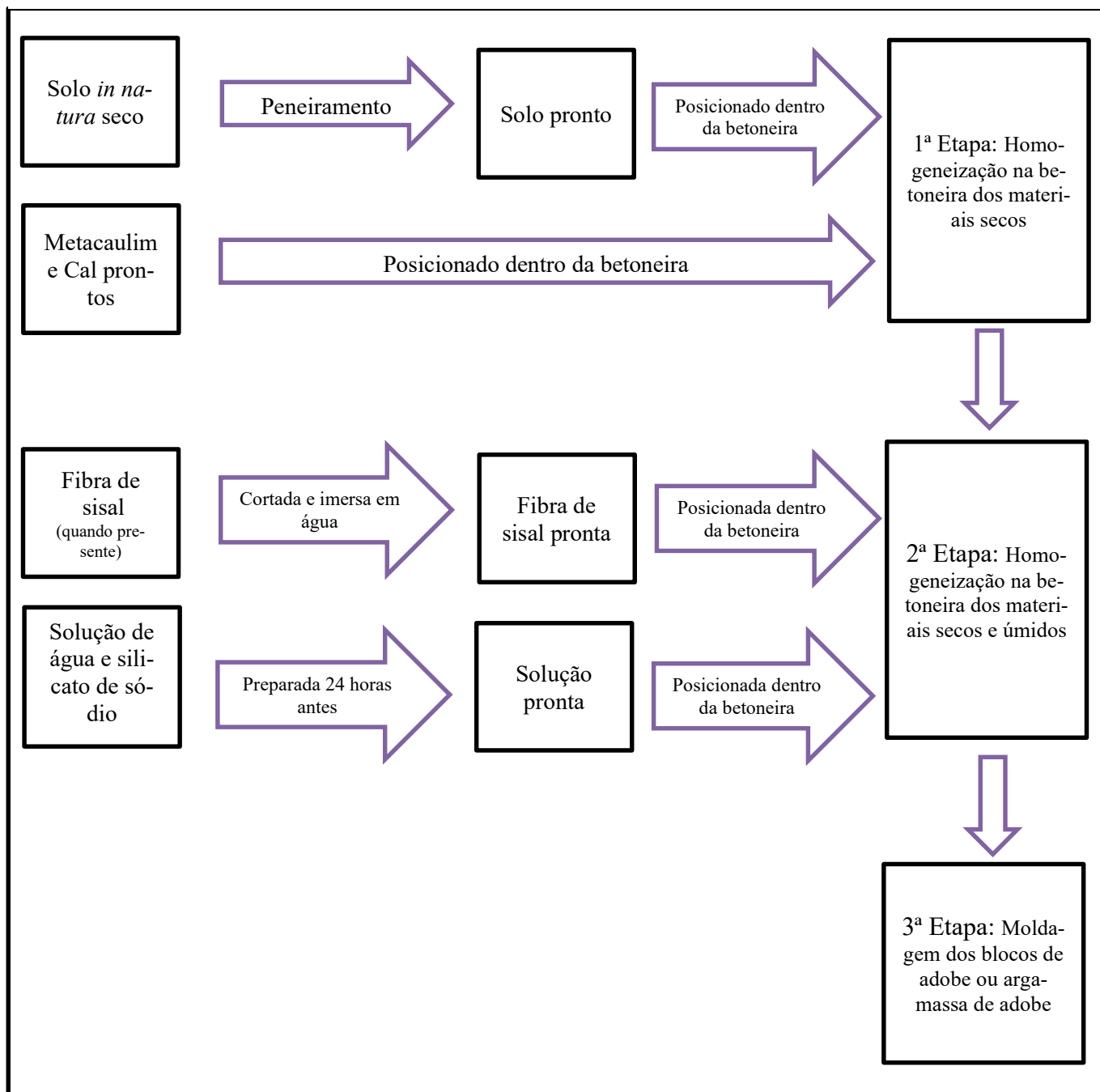
Após a mistura encontrar-se em estado homogêneo, ela era transferida para um carrinho de mão e aplicado no molde. Na Figura 3.11 pode-se visualizar o molde para produzir as placas de adobe que foram utilizadas no ensaio da câmara térmica e a forma metálica para produção do adobe.



Figura 3.11: Molde das placas utilizadas no ensaio da câmara térmica e forma para os adobes. Fonte: Autor

De forma a facilitar o entendimento do processo de moldagem, o Quadro 3.2 indica o resumo das atividades:

Quadro 3.2: Resumo das etapas de preparo do adobe com a mistura alcalina e sisal. Fonte: Próprio autor



3.3.1 Processo de cura do Adobe

O processo de cura aplicado aos adobes com mistura alcalina consistiu em após a desmoldagem e corte serem realizados, proteger os adobes da incidência direta solar para que fossem curados a sombra, por no mínimo 48 horas, pois este foi o tempo em que as amostras se mostraram resistentes ao manuseio.

Para proteção dos adobes da secagem direta do sol foi feito uso de uma telha metálica para cobri-los. Assim, eram dispostas quatro pilhas de Bloco de Terra Crua (BTC), sendo quatro nas extremidades da fileira do adobe e uma pilha próxima ao meio da fiada de blocos para garantir que ao ser posta a telha não encostaria diretamente no adobe e que houvesse uma altura suficiente para circulação do ar. Conforme pode ser visto na Figura 3.12 e 3.13.

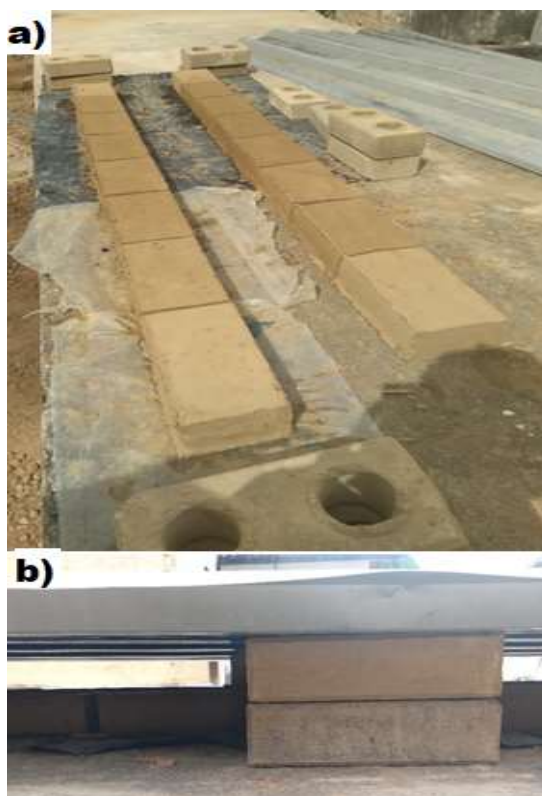


Figura 3.12: a) Disposição dos adobes e dos blocos de BTC para que fossem cobertos por telha metálica e b) Vista lateral após os adobes serem cobertos. Fonte: Autor.



Figura 3.13: Adobes após serem cobertos com telha metálica. Fonte: Autor.

Durante o processo inicial de secagem e cura dos adobes, percebeu-se que a face inferior do bloco que se encontra em contato com o solo, continuava úmida após 48 horas. A presença de umidade em idade inicial prejudica bastante o manuseio do bloco.

Assim, visando melhorar o processo de secagem, adotou-se a técnica de rotacionar o adobe após as primeiras 24 horas de secagem, ou seja, a face inferior (que estava em contato com o solo e ainda estava úmida) era posicionada para cima ficando em contato direto com o ar e protegida da incidência direta do sol por meio da telha metálica. Logo, ao verificar o bloco na idade de 48 horas, ambas as faces já não estavam úmidas e, portanto, aptas ao manuseio.

3.4 Processos de moldagem

3.4.1 Adobe

Devido ao adobe ativado não ser autoadensável, durante o processo de moldagem foi dispensada atenção especial para o preenchimento homogêneo do ma-

terial na forma, conforme visto na Figura 3.14. Além de comprometer suas propriedades térmicas e mecânicas, o adobe mal adensado tem sua estética bastante prejudicada.



Figura 3.14: Adensamento no adobe na forma metálica. Fonte: Autor

Assim, após o material ativado ser misturado na betoneira, era posicionado no carrinho de mão e disposto próximo a forma metálica. Em seguida, o material era cuidadosamente adensado de forma manual dentro da forma até atingir o nível em que pudesse receber o seu acabamento. O acabamento consistia em pressionar e alisar o material com uma colher de pedreiro umedecida para acrescentar uma aparência uniforme a parte superior do adobe, de acordo com a Figura 3.15.



Figura 3.15: Processo de acabamento utilizando colher de pedreiro umedecida. Fonte: Autor

Após realizar o acabamento por toda extensão da forma metálica, ela era removida para que o adobe pudesse ser cortado com comprimento de 25 centímetros, conforme visto na Figura 3.16. Para facilitar a medida e precisão do corte, foi utilizado um BTC medindo 25 centímetros como gabarito do corte.



Figura 3.16: Corte do adobe após retirada da forma. Fonte: Autor

3.4.2 Placas de adobe

As placas de adobe foram moldadas com as dimensões de 29cm x 29cm (largura e comprimento), por 3 cm de espessura. Estas foram as medidas para utilização do Condutivímetro K30 disponível no laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da UFPB.

Para o processo de moldagem foi utilizado uma folha de isopor de dimensões 100 cm x 50 cm (comprimento e largura) com 3 cm de espessura, foram feitos 3 recortes utilizando placa modelo, que havia sido ensaiada anteriormente, em mesa de superfície plana conforme visto na Figura 3.17.



Figura 3.17: Disposição da forma das placas de adobe. Fonte: Autor.

Após o recorte dos moldes, foram dispostos blocos de terra crua sobre a folha de isopor para evitar movimentações desnecessárias e garantir que as medidas permanecessem conforme o requerido. O adensamento foi feito de forma semelhante aos do adobe, de forma manual com cuidado para evitar a formação de vazios e ao fim o acabamento com colher de pedreiro umedecida, resultando no aspecto final das placas visto na Figura 3.18.



Figura 3.18: Placas de adobe após adensamento em forma de isopor. Fonte: Autor.

3.4.3 Paredes de adobe

Para execução do ensaio da câmara térmica, localizada no LABEME – UFPB, foi necessário construir uma parede de adobe, com os blocos feitos anteriormente e utilizando argamassa composta com as mesmas proporções e materiais do adobe, conforme consta na NBR 16814 (2020) de título Adobe - Requisitos e métodos de ensaio.

As paredes construídas tiveram as dimensões aproximadas de 1,05 m x 1,03 m (altura e largura), com argamassa de assentamento entre os blocos com espessura de 1 centímetro, na execução foi utilizado o prumo de face e a régua a cada fiada da parede.

Durante o manuseio da argamassa é importante ressaltar que deve ser feita a utilização de luvas por parte do pedreiro, pois a formulação do traço contém agentes químicos que são nocivos à pele humana. A parede foi assentada sobre uma peça espessa de madeira Maçaranduba (Figura 3.19), para que pudesse ser transportada posteriormente para o local de ensaio.



Figura 3.19:a) Assentamento do primeiro adobe sobre chapa de madeira maçaranduba; b) Assentamento da segunda fiada de adobe. Fonte: Autor.

Outro ponto importante a ser observado e é considerado como boa prática na elevação da parede de adobe, é a imersão dos adobes em água. Deve-se imergir o bloco e após remoção deixar descansar para escorrer o excesso de água, dessa forma o adobe não absorve a água da argamassa e facilita a união entre o bloco e a argamassa.

Durante elevação as fiadas foram amarradas entre si, semelhante a técnica que ocorre na alvenaria de tijolo cerâmico tradicional, os adobes do canto (meio adobe) foram cortados de um adobe inteiro. Após chegar à altura desejada, foi feita uma final camada de regularização sobre os adobes, para eliminar pequenas imperfeições oriundas da fase de moldagem, conforme pode ser visto na Figura 3.20.



Figura 3.20: a) Verificação do prumo durante elevação da alvenaria de adobe. b) Aspecto final da parede de adobe. Fonte: Autor.

Para o adobe com sisal e ativação alcalina foi construída uma parede seguindo as mesmas diretrizes anteriormente descritas. As fibras estavam presentes também na argamassa de assentamento. Nas Figuras 3.21 a 3.23, visualiza-se o processo de construção da parede:



Figura 3.21: a) Aspecto visual da argamassa utilizada. b) Imersão em água do adobe ativado alcalinamente com sisal antes de ser utilizada. Fonte: Autor



Figura 3.22: a) Amarração utilizada na parede. b) Detalhe da elevação da alvenaria de Adobe com sisal na 4ª fiada. Fonte: Autor



Figura 3.23:a) Visão frontal da parede na altura da 6ª fiada. b) Elevação da alvenaria de adobe ativada alcalinamente com sisal finalizada. Fonte: Autor.

3.5 Procedimentos dos experimentos do Adobe com a mistura alcalina

3.5.1 Determinação da absorção de água por imersão e perda de massa dos adobes

Para determinação da absorção de água por imersão e da perda de massa dos adobes foi utilizado um método alternativo ao que dita a NBR-8492 (2012) e será especificado abaixo.

O método da NBR-8492 (2012) estabelece que antes da imersão, as amostras devem ser secas em estufas por 48h em temperatura entre 105°C e 110°C, após esse período são imersas em água. Depois de 24 horas imersos as amostras devem ser retiradas da água e secas com pano para retirar o excesso de água, em seguida são pesadas e então novamente submetidos a estufas entre 105°C e 110°C para determinar a perda de massa. Essa temperatura poderia modificar a estrutura interna do material alcalino, dessa forma, optou-se por não utilizar nenhum procedimento com a estufa antes da imersão em água.

Assim, o adobe seco era pesado antes de ser imerso em água por 24 horas. Então o peso seco corresponde àquele do adobe com umidade de equilíbrio com a atmosfera do ambiente.

Após o tempo de imersão era retirado da água, seco superficialmente e em seguida pesado. Na Figura 3.24 visualizam-se dois blocos de adobe com sisal que foram ativados alcalinamente logo após serem imersos em água.



Figura 3.24:2 Adobes com sisal logo após serem imersos em água.
Fonte: Autor

Foi utilizada a seguinte fórmula para determinar a absorção de água no adobe:

$$W = \frac{P_w - P_s}{P_s} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

W: Absorção de água em %;

P_w = Peso úmido em gramas;

P_s = Peso seco em gramas.

Em seguida, para determinar a perda de massa do adobe oriunda da imersão em água, as amostras foram postas na estufa por 105°C por 48 horas, para evaporação da água residual, conforme Figura 3.25. Em seguida foram pesadas novamente e aplicada a seguinte fórmula:

$$M = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

M: Perda de massa em %;

P1 = Peso seco antes do ensaio (correspondente a Ps);

Ps= Peso seco após o ensaio.



Figura 3.25: Adobe posicionados dentro da estufa. Fonte: Autor.

É importante ressaltar que após os adobes serem retirados da estufa, estes foram descartados para não comprometer os resultados dos próximos ensaios, pois neste trabalho todos os adobes foram curados a sombra e a temperatura ambiente.

3.5.2 Resistência característica a compressão dos adobes

Para determinação da resistência a compressão do adobe foi seguido o procedimento descrito na ABNT NBR 16814 (2020). Em suma, a norma permite que sejam alternadamente extraídos até dois corpos de prova por adobe, conforme exemplificado na Figura 3.26.

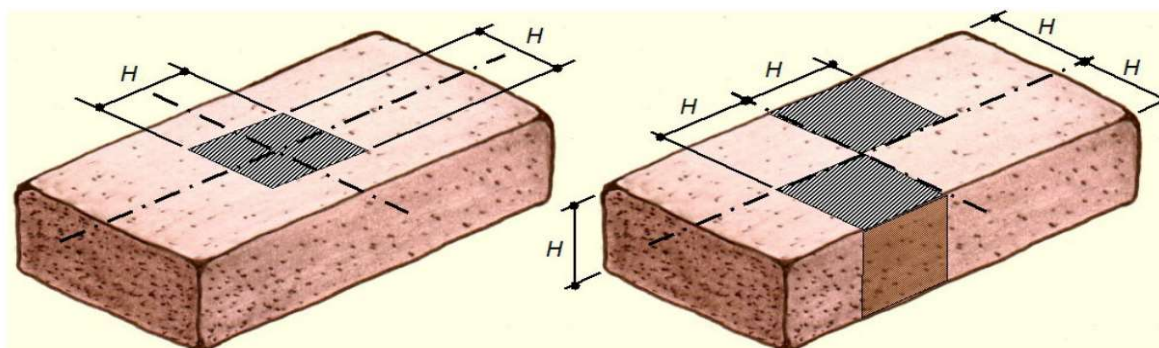


Figura 3.26: Detalhamento do recorte a ser feito no corpo de prova de adobe.
Fonte: NBR 16184 (2020).

O capeamento pode ser realizado desde que não exceda a espessura de 3mm e seja realizada com argamassa de cimento e areia fina no traço de 1:2, com resistência superior ao do adobe.

As dimensões da seção de ruptura a serem ensaiadas, devem ser aferidas nos dois lados de cada seção à meia altura para que se faça a média entre elas, para assim seja obtido a área da seção ruptura (A_{rup}), conforme Figura 3.27 e Equação 3.

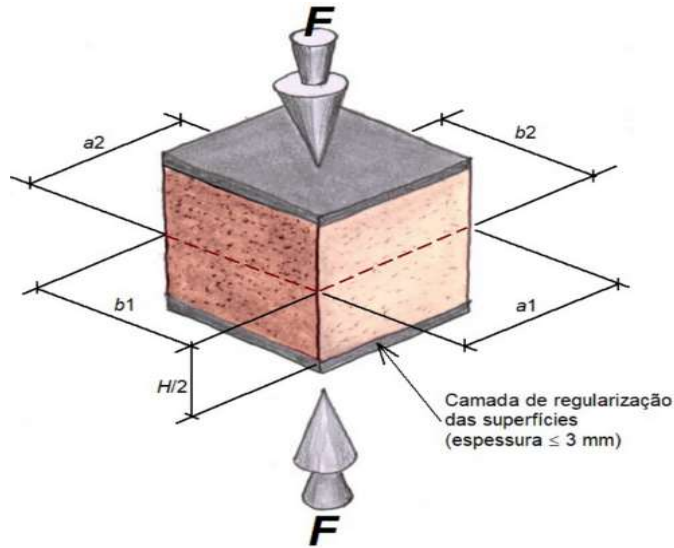


Figura 3.27: Representação da amostra de adobe a ser ensaiada.
Fonte: NBR 16184 (2020).

$$A_{rup} = \frac{(a1+a2)}{2} * \frac{(b1+b2)}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

- $a1, a2, b1$ e $b2$: dimensões da seção de ruptura a meia altura, expresso em milímetro(mm);
- A_{rup} : área da seção de ruptura, expresso em milímetros quadrados (mm^2).

Após obtenção da área da seção da ruptura, o corpo de prova é submetido a resistência à compressão em prensa com leitura força com aproximação de $\pm 2\%$ da carga de ruptura, para ser aplicada a Equação 4.

$$f_{ca} = \frac{F_{rup}}{A_{rup}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- f_{ca} : Resistência à compressão do corpo de prova, expressa em megapascals (mm);
- A_{rup} : área da seção de ruptura, expresso em milímetros quadrados (mm^2);

- F_{rup} : força de ruptura, expressa em newtons (N).

A NBR-16184(2020) estabelece a Resistência Característica à Compressão do Adobe (f_{cak}) como “valor acima do qual existe a probabilidade de se encontrarem 95 % dos resultados individuais da população”, calculado pela Equação 5:

$$f_{cak} = f_{cam} - 1,645 * Sd \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

- f_{cak} : Resistência característica à compressão do adobe, expressa em megapascals (MPa);
- f_{cam} : resistência à compressão média da amostra (n corpos de prova), expressa em megapascals (MPa);
- Sd desvio-padrão da amostra, expresso em megapascals (MPa).

Para os ensaios de resistência à compressão foi extraído de cada adobe 1 corpo de prova quadrado com a mesma dimensão da altura do adobe. Assim, o corpo de prova cúbico rompido tinha aproximadamente as seguintes dimensões: 7,5 cm x 7,5 cm x 7,5cm.

Foram ensaiados ao total 20 amostras de adobe de 4 tipos diferentes, sendo assim 5 corpos de prova ensaiados para cada tipologia de adobe. Os corpos de prova foram capeados e rompidos em prensa manual com célula de carga de até 20 toneladas.

A NBR-16184 (2020) define como parâmetro a resistência característica mínima à compressão o valor de 1,5 MPa.

3.5.3 Condutividade e resistência térmica das placas de adobe

Para determinação da condutividade e resistência das placas de adobe adotou-se o método fluximétrico em regime estacionário por meio de corpos-de-prova de material homogêneo na forma de placas planas, conforme a NBR 15220-5 (2005) - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico.

Neste ensaio foi utilizado o equipamento Condutímetro K30 disponível no LABEME para realizar os ensaios nas placas de adobe com sisal e sem sisal, conforme Figura 3.28



Figura 3.28: Condutivímetro com placa de adobe inserida. Fonte: Autor.

O ensaio consiste em uma placa aquecedora - neste equipamento a placa superior – fluxímetro, corpo de prova e placa resfriadora (neste caso a inferior) (Figura 3.29). Assim, o Condutivímetro realiza a medição por base no fluxo de calor e diferença de temperatura entre as faces da amostra submetidas ao gradiente térmico previamente definido.



Figura 3.29: Detalhe do posicionamento da placa de adobe dentro do Condutivímetro. Fonte: Autor.

Neste experimento foram utilizadas placas de adobe alcalinamente ativado sem sisal e com sisal, ambas na idade de 28 dias. Ao total 6 amostras foram ensaiadas, sendo 3 de cada tipo.

Os ensaios foram executados por no mínimo 2 horas e apenas foram considerados as leituras obtidas na segunda hora de ensaio. Foi realizada a média das

leituras e desconsiderados os resultados com variação \pm de 15% em relação a média para todas as placas.

3.5.4 Ensaio térmico da parede de adobe

A parede é composta pelos adobes assentados no sistema de amarração direta, unidos com argamassa de composição semelhante à dos adobes, sendo construída diretamente dentro da câmara térmica para avaliação do desempenho térmico. A área da parede efetivamente exposta foi de 1,00 metro por 1,00 metro, altura e largura respectivamente.

A câmara térmica é segmentada em dois ambientes, sendo um aquecido e o outro resfriado, separados termicamente por uma parede de dry-wall revestido em seu interior por manta de fibra de vidro. As paredes externas são revestidas por isopor e há uma porta revestida entre os dois ambientes, conforme Figura 3.30 a seguir.



Figura 3.30: a) Planta baixa ilustrativa da câmara térmica; b) Espaço vazio do dry-wall destinado a amostra de parede a ser analisada; c) Espaço vazio do dry-wall preenchido por parede a ser avaliada no trabalho de GOMES (2015). Fonte: Gomes (2015).

Entre a câmara quente e a fria encontra-se o espaço vazio em que a parede a ser analisada deve ser posicionada, conforme visto na Figura 3.30 b). Do ponto de vista construtivo, pode-se construir a parede fora da câmara térmica e transportá-la para o seu interior ou simplesmente construí-la *in loco*, opção usada neste trabalho.

Após o posicionamento da parede de adobe, foi realizada a vedação do seu entorno com isopor e posicionamento dos termopares em cada face da parede.

Para cada ambiente foram utilizados 4 termopares, sendo 1 para verificar a temperatura do ambiente por meio do globo negro e 3 em contato direto na superfície da parede. Os termopares em contato com a parede foram alinhados no eixo horizontal e posicionados nas alturas de 30, 50 e 70 cm da superfície em que a parede foi construída.

Em seguida, foi realizado o processo de calibragem das câmaras para verificar a estabilidade térmica do ambiente dentro um intervalo de tempo. Esse processo consiste em coletar os dados de temperatura do ar e na superfície da parede construída nos dois ambientes da câmara, contíguos e isolados, à medida que apenas um dos equipamentos (refrigeração ou aquecimento) está ligado, conforme será detalhado nesta seção.

Após a confirmação da calibragem da câmara térmica, dar-se-á início as medições serão realizadas no intervalo de 24 horas com os equipamentos de refrigeração e aquecimento ligados simultaneamente em seu respectivo ambiente.

Neste trabalho para cada parede de adobe foram analisadas duas situações, a primeira com o bloco *in natura* em ambas as faces e a segunda situação com a aplicação de 2 demãos de cal na face exposta ao lado aquecido e *in natura* no lado exposto ao ambiente refrigerado.

Na Figura 3.31 a) é possível visualizar o lado exposto a fonte de calor da parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal, em b) visualiza-se a mesma parede com seu lado exposto a fonte de calor após a aplicação de 2 demãos de cal. Para o lado exposto a câmara fria, foi aplicada a mesma disposição dos termopares da câmara quente.



Figura 3.31: a) Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal in natura; b) Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal após a aplicação de 2 demãos de cal. Fonte: Autor

Para o aquecimento do lado quente foi utilizado um dispositivo composto por 12 lâmpadas incandescentes ao total, sendo 11 de 100W e 1 de 150 W, totalizando 1250W e estando sempre a 1 metro da parede avaliada. Para o lado frio, o equipamento utilizado foi o Ar-condicionado de 10.000 Btus. Na Figura 3.32 pode-se visualizar ambos os equipamentos utilizados.



Figura 3.32: a) Equipamento utilizado para aquecer o lado quente; b) Parede de adobe iluminada pelo equipamento do lado quente; c) Ar-condicionado utilizado para resfriar o lado frio.
 Fonte: Autor

3.5.4.1 Calibragem da câmara térmica

Antes do início dos ensaios com ambos os equipamentos ligados, é necessário averiguar a estabilidade térmica de cada ambiente contíguo e isolado. Assim, foram coletados dados simultâneos de cada ambiente e de cada face da parede apenas com um dos equipamentos (refrigeração e aquecimento) ligados para visualizar a variação de temperatura ao longo do tempo.

A calibragem da câmara térmica foi realizada sob o seguinte ciclo:

- **1ª Avaliação:** Ambiente com fonte de calor ligada e ambiente com resfriamento desligado por 24 horas.
 24 horas de intervalo com ambos os equipamentos desligados.
- **2ª Avaliação:** Ambiente com fonte de calor desligada e ambiente com resfriamento ligado por 24 horas.

24 horas de intervalo com ambos os equipamentos desligados.

Este intervalo de 24 horas entre os ensaios foi observado para garantir que na próxima avaliação ambos os ambientes partissem de temperaturas estáveis, sem interferência dos equipamentos. Após a confirmação da estabilidade térmica do ambiente procedeu-se a última avaliação do ciclo:

- **3ª Avaliação:** Ambiente com fonte de calor ligada e ambiente com resfriamento ligado, ambos por 24 horas.

Ao total foram realizados 4 ciclos de calibragem térmica, pois foram avaliados dois tipos de parede com adobe alcalinamente ativada: uma parede com adobes sem sisal e outra parede de adobes contendo sisal. Para cada uma dessas paredes foi avaliada a condição *in natura* e após receber 2 demãos de cal sempre na face da parede exposta ao equipamento de aquecimento.

Devido as características construtivas e de equipamentos da câmara térmica se manterem constantes durante todos os experimentos neste trabalho, serão comentadas neste capítulo as 1ª e 2ª avaliações do ciclo da parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal. Os gráficos referentes a parede de adobe alcalinamente ativada com sisal encontram-se no Apêndice A.

Os resultados obtidos da 3ª avaliação para as 4 amostras ensaiadas estão comentados e comparadas entre si na seção de Resultados e discussões.

3.5.4.2 Calibragem da parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal

Para a parede de adobe alcalinamente ativada sem a presença sisal iniciou-se a avaliação na condição *in natura*, na Figura 3.33 é possível visualizar o resultado desta primeira etapa.

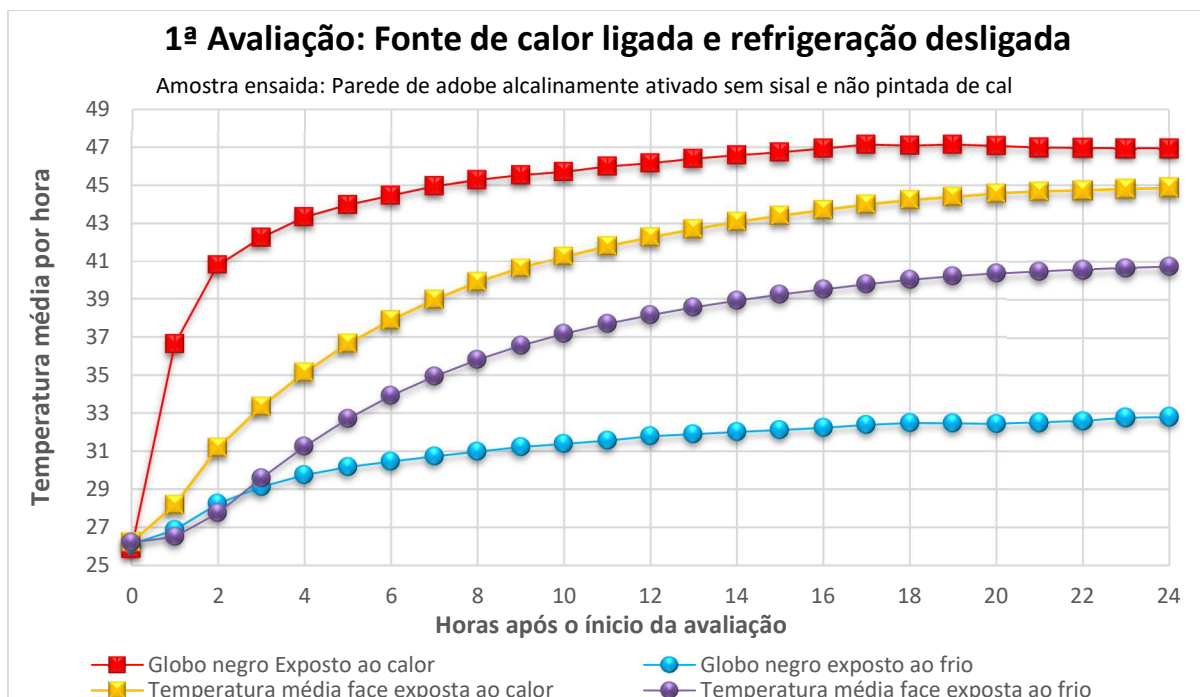


Figura 3.33: 1ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal.
Fonte: Autor.

Observa-se o ponto de partida para todos os termopares foi a temperatura de 26°C, mas em apenas 2 horas houve acentuado crescimento na temperatura do globo negro exposto ao calor, chegando a atingir 41°C. Os outros termopares também acompanharam a tendência de incremento na temperatura, mas em menor grau: a face da parede exposta a fonte de calor atingiu 31°C, o globo negro do lado frio e a face da parede exposta ao frio atingiram 28°C.

Na marca das 4 horas a um descolamento das temperaturas do lado frio, a parede atinge a marca de 30°C e o globo negro 29°C, nas horas seguintes esta diferença de temperaturas atinge a marca de 7°C nas últimas horas do ensaio.

Nota-se que a partir da 12ª hora de ensaio há tendência para equilíbrio da temperatura dos globos negros, pois quando comparada a 24ª hora do ensaio há acréscimo de apenas 1° C em cada ambiente. Outra observação importante, é que a diferença de temperatura do ar entre as câmaras se mantém constante em 14°C desde a 5ª hora do ensaio.

Após a realização da 1ª avaliação, as câmaras ficaram em repouso por 24 horas, para que então fosse iniciada a 2ª avaliação, cujo resultado é possível visualizar na Figura 3.34.

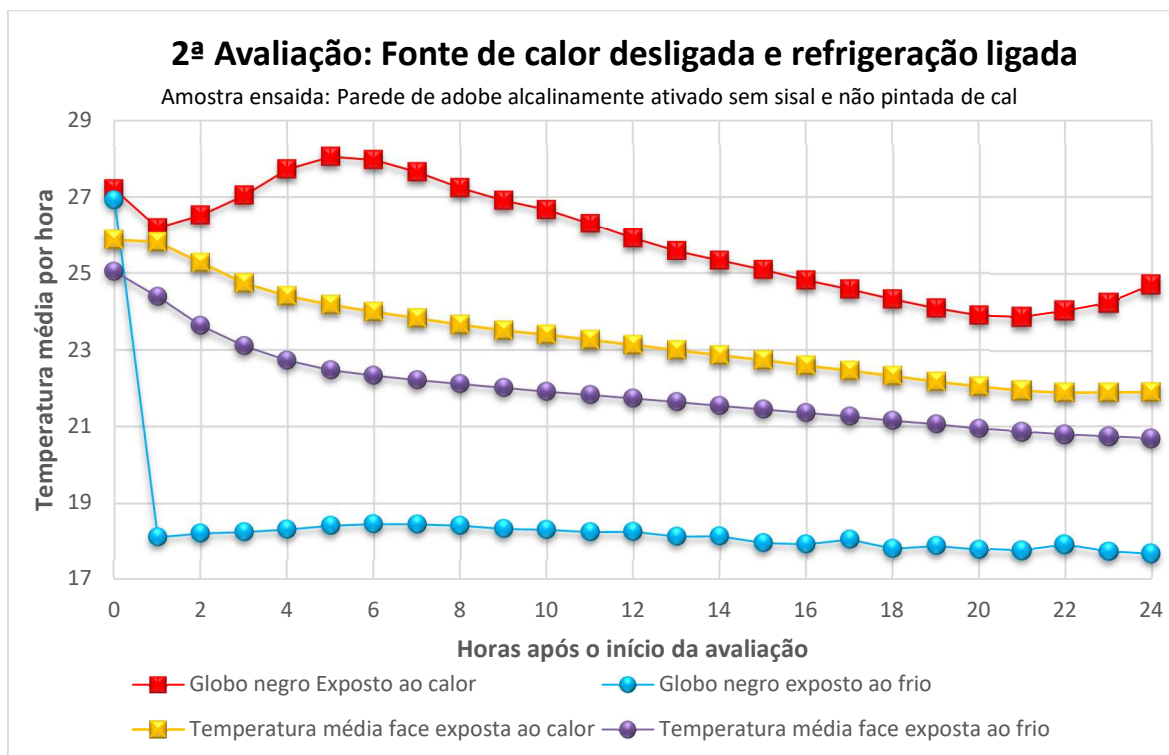


Figura 3.34:2ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal.
Fonte: Autor.

Nesta segunda avaliação as temperaturas dos globos negros partiram de aproximadamente 27°C, a face da parede exposta ao calor com 25,9°C e a face exposta ao lado frio com 25,1°C. Ao longo do ensaio as temperaturas nas faces da parede caíram gradativamente, mantendo-se em média uma diferença negativa e constante de 1,4°C para o lado exposto ao frio.

Nas primeiras 5 horas do ensaio houve tendência de resfriamento para todos os termopares, exceto o do globo negro exposto ao calor. Este aquecimento pode ser explicado devido a variação climáticas do ambiente externo a câmara térmica. Pois, o ensaio foi iniciado às 8 horas da manhã e a 5ª hora do ensaio correspondente a 13 horas. A partir da 6ª hora de ensaio a tendência de aquecimento foi revertida para resfriamento perdurando até a 21ª hora do ensaio, hora equivalente a 05 horas da manhã.

A temperatura do globo negro exposto ao lado frio, sofreu pequenas variações durante todo o ensaio. É importante ressaltar que desde a 1ª hora do ensaio a temperatura na câmara fria se mantém em torno de 18°C. Sendo que a máxima temperatura média (18,46°C) ocorreu na 6ª hora de ensaio e a mínima temperatura

média (17,66°C) ocorreu na 24^a hora de ensaio, resultando em uma diferença de temperatura de apenas 0,8°C.

Após 24 horas com os equipamentos desligados em ambas as câmaras, foi realizada a 3^a avaliação partindo de uma temperatura constante nas duas câmaras, essa avaliação está descrita na seção de resultados.

Após a finalização do ciclo de avaliação da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal e não pintada de cal foi realizada a aplicação de 2 demãos de cal na face exposta ao equipamento quente. Após secagem da pintura os termopares foram recolocados na mesma posição e foi realizada o 1º ciclo de avaliação, conforme Figura 3.35.

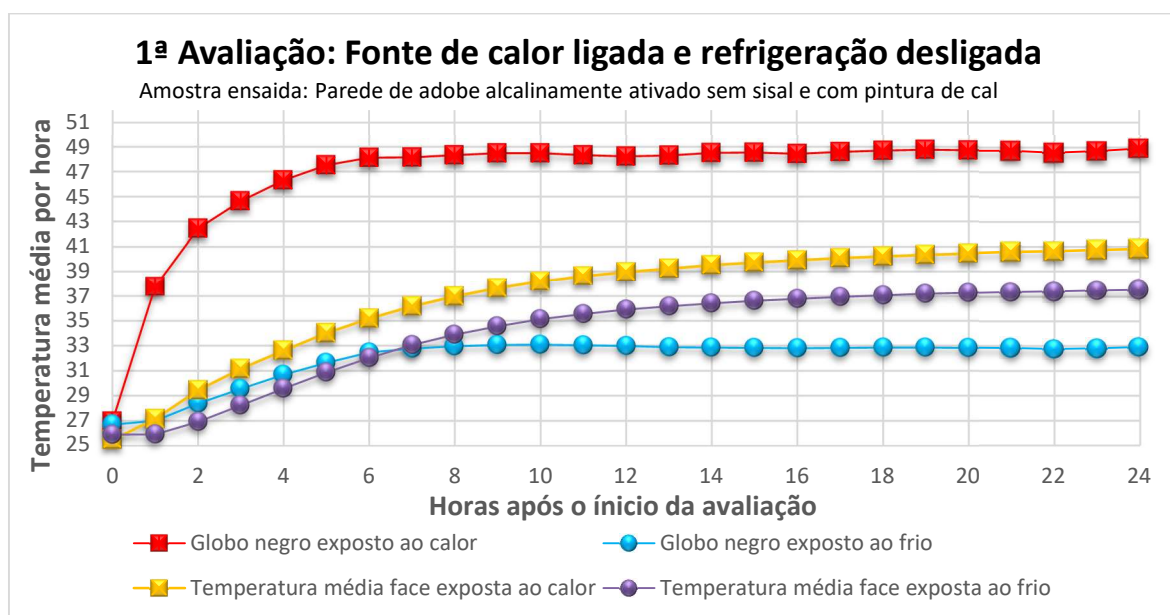


Figura 3.35: 1ª Avaliação da parede alcalinamente ativada sem sisal e com pintura de cal.
Fonte: Autor.

Assim como na amostra avaliada sem a pintura de cal, a partir da 12^a hora de ensaio as temperaturas tenderam a estabilidade. As temperaturas do globo negro praticamente não se alteraram, mas a temperatura na face do lado quente apresentou acréscimo constante de 0.17°C por hora e a face do lado frio de 0.15°C por hora.

Em geral após a pintura da face exposta ao lado quente houve decréscimo nas temperaturas medidas pelos termopares quando comparada a parede não pintada com cal, exceto para o Globo negro exposto a fonte de calor que atingiu 49°C frente a 47°C medido na parede não pintada de cal.

Ao final das 24 horas de ensaio, a temperatura da parede na face exposta ao calor atingiu 40.8°C e na face exposta ao lado frio 37.5°C. A mesma parede sem a pintura de cal na 24ª hora do ensaio atingiu 44.8°C na face quente e 40.7°C na face exposta ao frio, redução de 4.0°C na face quente e diminuição de 3.2°C na face fria após a aplicação de 2 demãos de cal na face da parede exposta ao lado quente.

Após a finalização da 1ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal e com pintura de cal, esperou-se 24 horas e foi realizada a 2ª avaliação, na Figura 3.36.

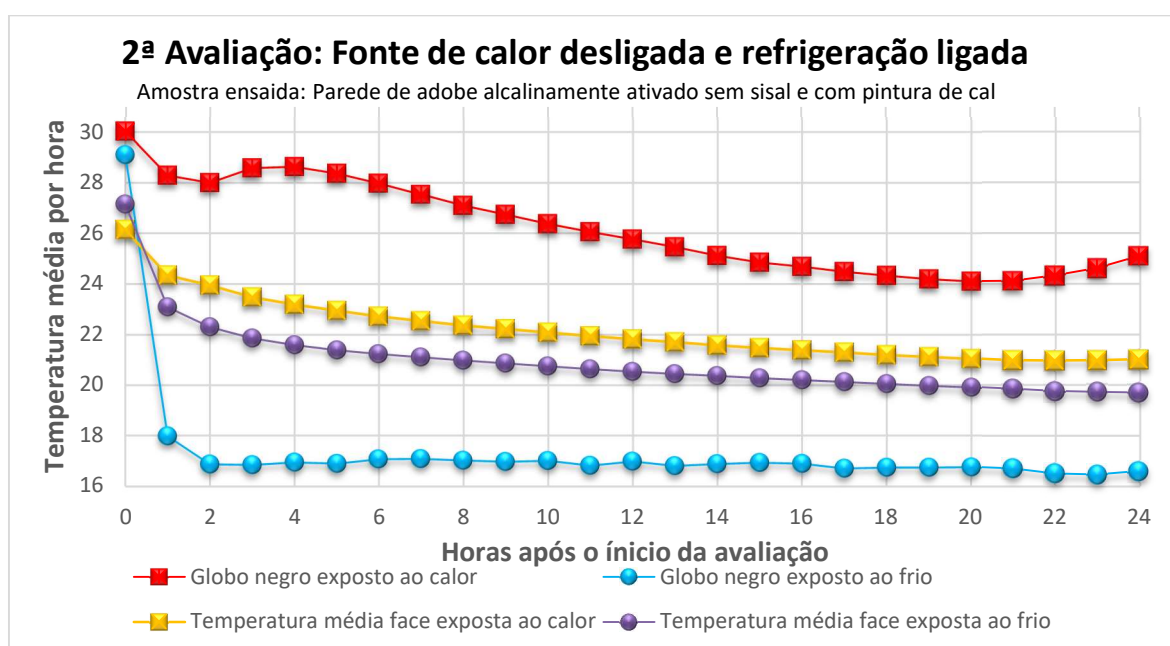


Figura 3.36: 2ª Avaliação da parede alcalinamente ativada sem sisal e com pintura de cal.
 Fonte: Autor.

Ao observar-se a Figura 3.35, vê-se que o comportamento da parede pintada com cal foi semelhante à parede não pintada de cal. Ao longo do ensaio, a temperatura do globo negro no lado frio apresentou estabilidade a partir da 2ª hora de ensaio, sendo a máxima variação de -0,5°C para a 23ª hora do ensaio, que apresentou 16,5°C, a menor temperatura aferida no ensaio.

Semelhantemente à 2ª avaliação da parede não pintada de cal, ao longo do ensaio a diferença de temperatura entre as faces da parede foi de 1°C positivo para o lado quente em relação ao lado frio. Por influência da temperatura externa a câmara, também houve variação no termopar do globo negro do lado da fonte de

calor, entretanto menor do que a registrada no ensaio da parede não pintada de cal.

3.5.5 Ensaio de compressão na parede de adobe

Após o ensaio na câmara térmica cada parede foi cuidadosamente transportada para baixo do pórtico do Laboratório, coincidindo o eixo da parede com o eixo do pórtico para então ser preparada para o ensaio.

Foi aplicada uma pintura de cal no lado que ainda estava com os adobes sem pintura (lado da câmara fria). Essa pintura de cal é usada para facilitar a visualização de fissuras na parede à medida que a carga é aplicada na parede.

Em seguida, foi posicionada uma viga metálica no topo de parede ensaiada para distribuir as cargas de maneira uniforme em toda parede. Esta viga metálica tinha sua largura e comprimento maior do que a parede ensaiada e entre a viga metálica e a parede de adobe foi colocada uma fina camada de gesso para absorver imperfeições destes materiais.

Por fim, em cada lado da parede foi posicionado um deflectômetro para verificar a deformação vertical à medida que a carga era aplicada. As Figuras 3.37 e 3.38 apresentam o aspecto final da parede de adobe sem sisal pronta para ser rompida, sendo a foto a) referente ao lado que estava exposto a câmara quente e b) o lado exposto a câmara fria, sendo pintada com cal para facilitar a visualização de fissuras.

O carregamento foi aplicado em dois ciclos de forma crescente. No primeiro ciclo a carga foi até 60 kN, em intervalos de 10 kN, Após atingir aquele valor, houve descarregamento completo e foi aplicado novo ciclo com intervalos de 20 kN até 60 kN, para em seguida prosseguir com incrementos de 10 kN até a ruptura.



Figura 3.37: Aspecto final do lado A da parede de adobe sem sisal sob o pórtico pronta para ser rompida, com extensômetro digital instalado. Fonte: Autor.



Figura 3.38: Aspecto final do lado do lado B da parede de adobe sem sisal sob o pórtico pronta para ser rompida, com extensômetro analógico instalado. Fonte: Autor.

A análise dos dados obtidos do ensaio será feita pela plotagem de dois gráficos, o primeiro expondo a Força [N] pelo Deslocamento vertical acumulado [mm] e o segundo da Tensão [MPa] pela Deformação [%].

Para o primeiro gráfico, a Força [N] foi obtida diretamente da leitura do instrumento de carga e o Deslocamento vertical acumulado foi calculado por meio da média aritmética entre cada extensômetro de cada face da parede.

Para o segundo gráfico foram utilizadas as Equações 6 e 7, que estão definidas a seguir:

Equação 6:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Onde:

- σ : Tensão uniaxial sobre a parede, expressa em megapascals (MPa);
- F : Força em que a parede está submetida, expressa em Newtons (N);
- A : Área da seção transversal da parede, expressa em milímetros quadrados (mm²).

Equação 7:

$$\epsilon = \frac{\Delta_{Acum}}{L}$$

Onde:

- ϵ : Deformação nominal (%);
- Δ_{Acum} : Variação do comprimento de referência acumulado em milímetros (mm);
- L : Comprimento de referência em milímetros (mm).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção estão apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa e suas respectivas discussões.

4.1 Caracterização do solo

4.1.1 Granulometria do solo

Quanto a caracterização do solo utilizado neste trabalho, pode-se visualizar na Figura 4.1 a curva de distribuição de suas partículas. Na Tabela 4.1 tem-se os componentes granulométricos principais em percentual e a granulometria ideal para o adobe segundo a NBR 16.814 (2020).

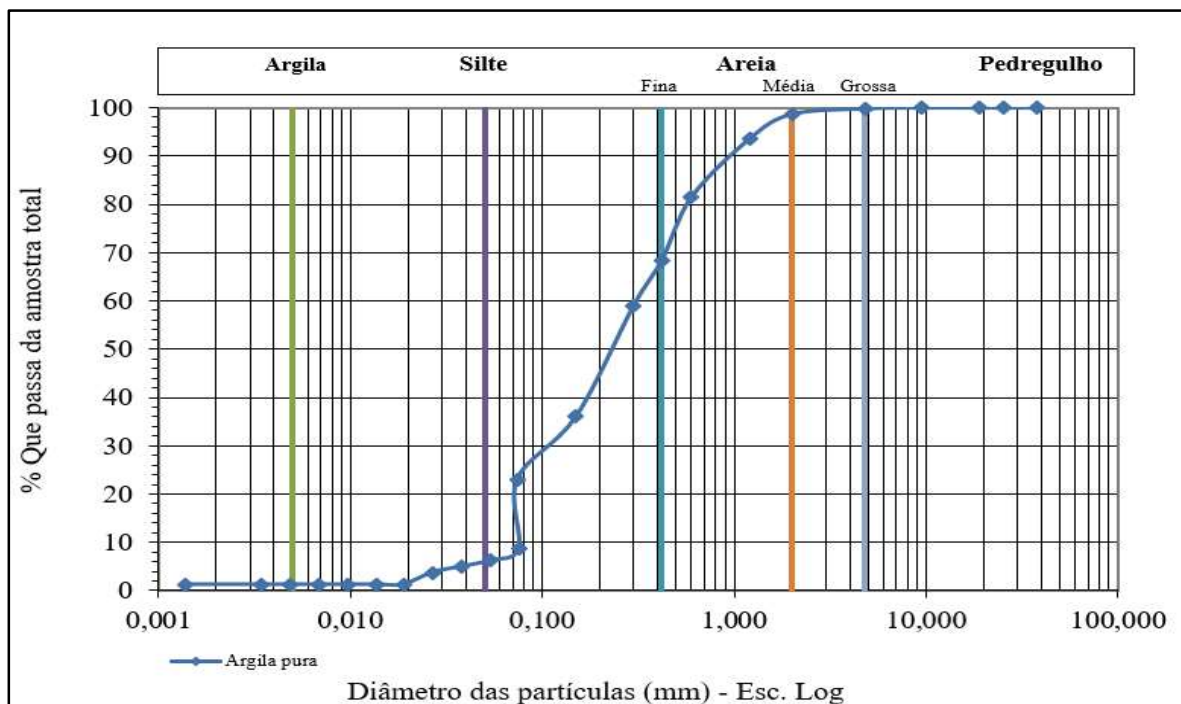


Figura 4.1: Distribuição granulométrica do solo.
Fonte: Autor.

Tabela 4.1: Composição física fracionada do solo utilizado.
Fonte: Autor e NBR-16814(2020).

| Granulometria do solo em (%) | | Intervalo da NBR 16814(2020) |
|------------------------------|----|------------------------------|
| Pedregulhos (> 2,00mm) | 1 | |
| Areia (0,06mm a 2,00 mm) | 17 | 45 a 65 |
| Silte (0,002mm a 0,06mm) | 78 | até 30 |
| Argila (<0,002mm) | 4 | 25 a 35 |

Na análise do solo utilizado deste trabalho, destacam-se a alta concentração de silte (78%) e a baixa concentração de argila (4%). Quando comparado o resultado da granulometria do solo utilizado com os parâmetros definidos na NBR-16814(2020), é nítido que este solo não se enquadra em nenhum dos intervalos definidos na norma.

Os valores definidos na NBR-16814(2020) servem de referência ao adobe não estabilizado, pois a argila funciona como elemento natural de ligação as partículas do solo. Entretanto, ao adicionar aglomerantes químicos (mistura alcalinamente ativada, cimento e outros) pode-se considerar o percentual de argila como fator secundário, pois os estabilizantes irão realizar o papel esperado para a argila. De acordo com Félix (2016), o ligante com características de mistura alcalinamente ativada modifica a reologia da terra ao ponto de realizar a aglutinação das partículas maiores mesmo com baixa concentração de finos (argila).

Félix (2016) também concluiu que houve redução na quantidade de água na mistura para torná-la plástica quando comparado a quantidade necessária para o solo puro; isto se deve ao processo de sintetização das misturas alcalinamente ativadas que resulta na formação de moléculas de água, reduzindo a quantidade de água inicialmente necessária e favorecendo ao aumento de resistência à compressão.

4.1.2 Limites de consistência

Quanto a caracterização do solo utilizado neste trabalho, pode-se visualizar na Figuras 4.2 a curva de distribuição de partículas do solo e na Tabelas 5.02 os limites de consistência do solo puro e após acrescentar metacaulim e hidróxido cálcio.

Tabela 4.2: Limites de consistência do solo.
Fonte: Autor.

| Limites de Atterberg (%) | |
|--------------------------|------|
| Solo puro | |
| Limite de Liquidez | 29,8 |
| Limite de plasticidade | 25,7 |
| Índice de plasticidade | 4,1 |

| Solo acrescido de Metacaulim e Hidróxido de Cálcio | |
|--|------|
| Limite de Liquidez | 29,5 |
| Limite de plasticidade | 26,1 |
| Índice de plasticidade | 3,4 |

A adição de metacaulim e hidróxido de cálcio modificou muito pouco os índices de Atterberg, isto porque estes materiais entram em proporção de 1,2% e 0,5% respectivamente em relação ao peso do solo.

4.1.3 Mineralogia do solo

A mineralogia do solo utilizado foi obtida por meio de DRX e pode ser visualizada na Figura 4.2:

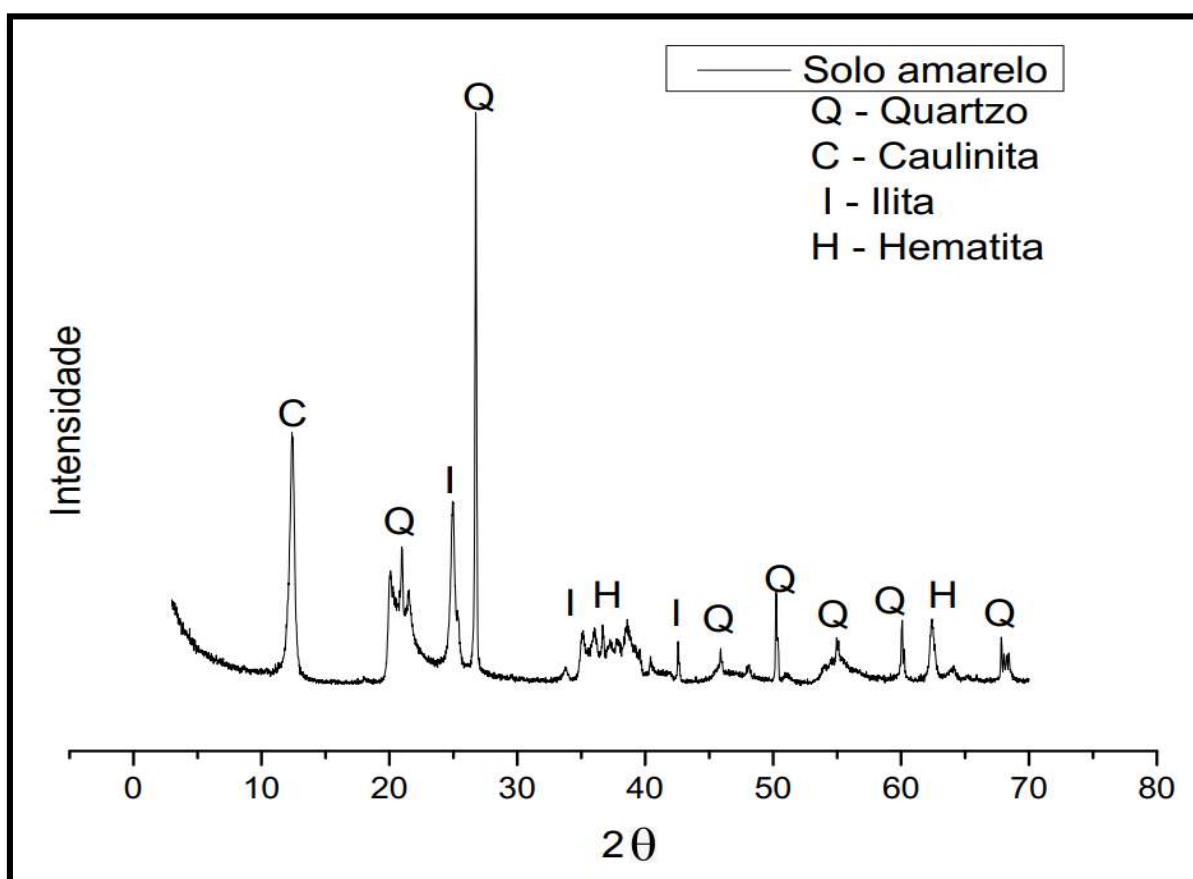


Figura 4.2: Mineralogia do solo utilizado.
Fonte: Autor.

No solo utilizado há predominância de picos de Quartzo, seguida pela Ilita, Caulinita e Hematita. O difratograma apresenta grande quantidade de picos cristalinos relevantes com estes minerais indicando elevada cristalinidade. Não se nota

presença significativa material amorfo, de forma que a terra vai funcionar mais como agregado, participando pouco da interação com os ativadores alcalinos.

4.1.4 Mineralogia do adobe alcalinamente ativado

Após o solo ter sido alcalinamente ativado, este foi macerado e submetido ao DRX. O resultado encontra-se na Figura 4.3.

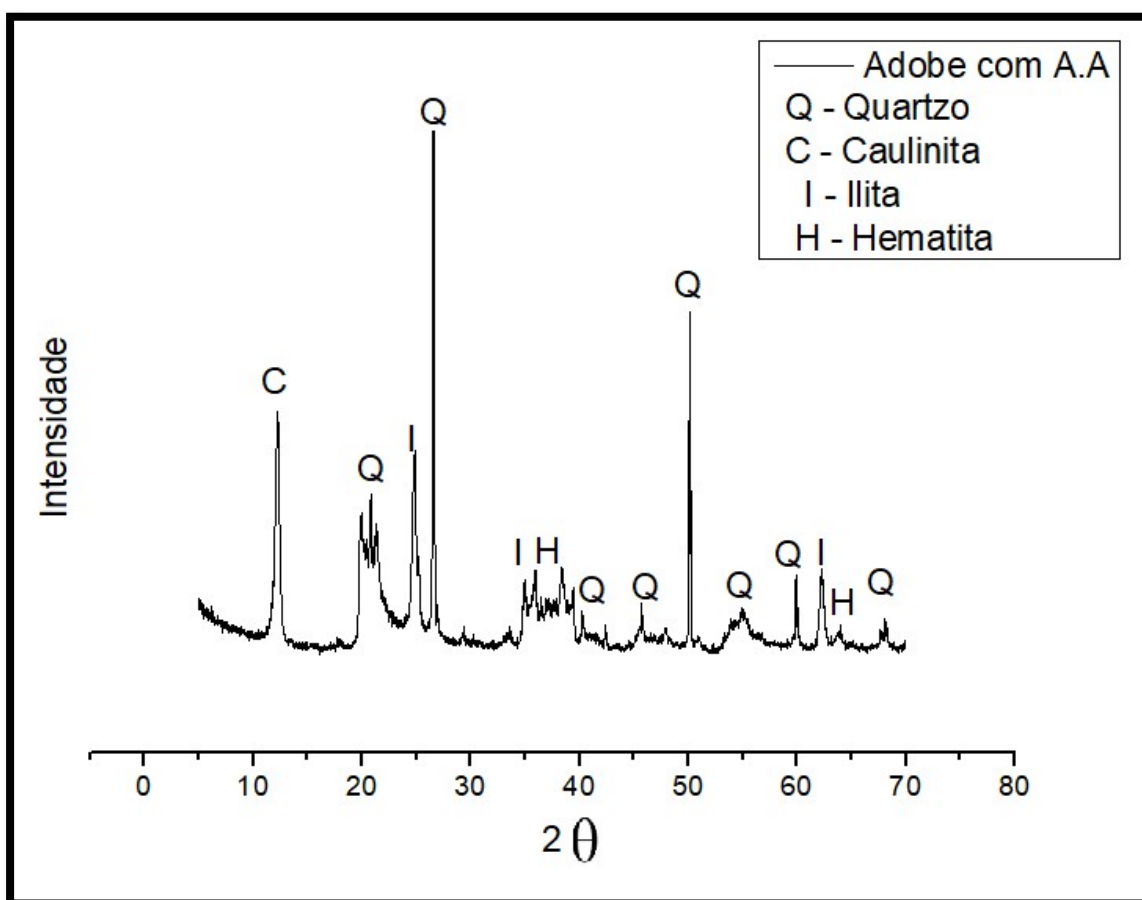


Figura 4.3: DRX do Adobe alcalinamente ativado.
Fonte: Autor.

Note-se que no DRX do material ativado não apresenta picos correspondentes a hidróxido de cálcio, sinal de que ele foi consumido nas reações alcalinas. A semelhança entre os difratogramas antes e após a ativação alcalina se dá pela pequena percentagem do ligante alcalino, em torno de apenas 2,2%.

4.3 Estabilidade a água, absorção e perda de massa por imersão

Os ensaios de estabilidade a água foram conduzidos para os dois tipos de adobe estudados neste trabalho, bem como para dois moldados para referência.

Para os adobes de referência não houve adição da mistura alcalinamente ativada. Assim, um tipo de adobe era composto pela terra e outro composto pela terra e a fibra de sisal com percentual em massa equivalente ao adobe com mistura alcalinamente ativada e a fibra de sisal.

Todos os adobes de referência foram ensaiados na idade de 30 dias, esta foi a idade em que estavam secos. Os adobes alcalinamente ativados foram ensaiados na idade de 17 dias, pois esta foi a idade mínima em que se mostraram estáveis a água em testes preliminares com pequenas amostras. Na Tabela 4.3, é possível visualizar os resultados individuais de cada tipo de adobe.

Tabela 4.3: Resultado do ensaio de imersão em água. Fonte: Autor.

| Tipo do adobe * | Peso seco [g] | Peso úmido [g] | % de absorção | Peso após secagem na estufa[g] | % de perda de massa |
|--|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Adobe de referência 1 | 3770,5 | Não resistiu | - | - | - |
| Adobe de referência 2 | 3849,8 | Não resistiu | - | - | - |
| Adobe de referência com sisal 1 | 3700,0 | Não resistiu | - | - | - |
| Adobe de referência com sisal 2 | 3935,2 | Não resistiu | - | - | - |
| Adobe alcalinamente ativado 1 | 4378,1 | 4815,7 | +10,00% | 4327,3 | -1,16% |
| Adobe alcalinamente ativado 2 | 4429,0 | 4775,3 | +7,82% | 4271,7 | -3,55% |
| Adobe alcalinamente ativado e com sisal 1 | 4235,9 | 5028,9 | +18,72% | 4083,0 | -3,61% |
| Adobe alcalinamente ativado e com sisal 2 | 4255,6 | 5073,4 | +19,22% | 4138,9 | -2,74% |

* : A numeração após a tipologia do adobe refere-se a identificação individual de cada amostra.

Conforme esperado, os adobe de referência com e sem sisal não resistiram ao teste de imersão em água por 24 horas. Para os adobes ativados com a mistura alcalinamente ativada o resultado foi animador, pois foram curados em temperatura ambiente e com apenas 17 dias de idade apresentaram estabilidade a água por 24 horas.

Nas Figuras 4.4 a 4.9 é possível visualizar os adobe alcalinamente ativados ao longo dos testes de estabilidade a água, absorção e perda de massa por imersão. No fim desta seção, nas Figuras 4.10 a 4.13 estão as fotos das amostras de referência.



Figura 4.4: Adobe alcalinamente ativados imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor.



Figura 4.5: Adobe alcalinamente ativados e sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor.



Figura 4.6: Adobe alcalinamente ativados 24 horas após serem imergidos em água. Fonte: Autor.



Figura 4.7: Adobe alcalinamente ativados e sisal 24 horas após serem imergidos em água. Fonte: Autor.



Figura 4.8: Adobe alcalinamente ativados ainda úmidos prontos para serem inseridos na estufa em 110°C por 24 horas. Fonte: Autor.



Figura 4.9: Adobe alcalinamente ativados e sisal ainda úmidos prontos para serem inseridos na estufa em 110°C por 24 horas. Fonte: Autor.

Analisando os percentuais médios de absorção e de perda de massa dos adobes com ativação alcalina, percebe-se que os resultados para o adobe sem

sisal foram melhores quando comparado ao adobe com sisal, conforme visualizado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Percentuais médios de absorção e perda de massa dos adobes analisados.
Fonte: Autor.

| Tipo do adobe | % médio de absorção | % médio de perda de massa |
|--|----------------------------|----------------------------------|
| Adobe de referência sem sisal | - | - |
| Adobe de referência com sisal | - | - |
| Adobe ativado alcalinamente sem sisal | 8,91% | 2,36% |
| Adobe ativado alcalinamente com sisal | 18,97% | 3,18% |

Uma importante observação foi que embora o percentual médio de absorção no adobe alcalinamente ativado com sisal tenha sido 10% maior do que a mesma amostra sem sisal, o percentual médio de perda de massa com sisal foi praticamente o mesmo da amostra sem sisal, apenas 0,82% superior.

Provavelmente, este resultado superior do adobe alcalinamente ativado é oriundo da não presença de fibras neste tipo de adobe. Dado que a fibra de sisal tem boa capacidade de absorção de água e à medida que a absorção acontece o diâmetro da fibra tende a aumentar. O aumento no diâmetro favorece o aparecimento de pequenas forças de tração dentro do adobe, contribuindo para o deslocamento da massa do adobe principalmente próximo as extremidades do bloco, favorecendo o fenômeno da perda de massa.

Outra provável causa da diferença de desempenho é que a mistura alcalinamente ativada aglomera a terra melhor do que aglomera o conjunto terra e sisal. Pois, apesar do uso em peso da fibra de sisal seja de apenas 1% do peso da terra, as fibras de sisal apresentam volume considerável quando cortadas. Assim, a mistura alcalinamente ativada pode não apresentar poder de aglomeração tão satisfatório quando há a presença de fibras na mistura.

Quanto as amostras de referência, ambas não resistiram a imersão em água. Entretanto, o estado final das amostras após a imersão em 24 horas foi diferente. A amostra de referência sem sisal foi desfeita na água em inúmeros pequenos pedaços. A amostra de referência com sisal se desfez em pedaços maiores, porém ainda unidos pela fibra de sisal. Nas Figuras 4.10 a 4.13 estão apresentados os adobes de referência antes e após a imersão em 24 horas em água.

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>Figura 4.10: Adobe de referência e sem sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor.</p> | <p>Figura 4.11: Adobe de referência e com sisal imediatamente após serem imersos em água. Fonte: Autor.</p> |
|  |  |
| <p>Figura 4.12: Adobe de referência e sem sisal 24 horas após serem imersos em água. Fonte: Autor.</p> | <p>Figura 4.13: Adobe de referência e com sisal 24 horas após serem imersos em água. Fonte: Autor.</p> |

4.4 Resultado dos ensaios à compressão simples

Semelhante aos ensaios de estabilidade a água, absorção e perda de massa por imersão os ensaios de resistência à compressão simples foram analisados sob a perspectiva de 4 tipos de adobe.

Destes 4 tipos de adobe, 2 adobes são considerados como de referência, pois não há adição da mistura alcalinamente ativada, sendo um bloco com apenas argila e o outro com argila e sisal. Os outros 2 tipos de adobe tem a presença da mistura alcalinamente ativada, sendo um sem a fibra de sisal e outro com a fibra de sisal.

Os adobes alcalinamente ativados foram rompidos na idade de 17 dias, pois foi este o período que os blocos ativados alcalinamente precisaram para estarem secos e serem estáveis dentro da água. Para os adobes de referência (sem a mistura alcalinamente ativada) a idade utilizada foi de 30 dias. Esta idade foi necessária

para assegurar que o bloco estivesse seco, pois na idade de 17 dias ainda se encontravam úmidos.

É importante ressaltar que a NBR-16814 (2020) não estabelece uma idade de referência para ensaio dos corpos de prova, mas afirma que devem ter resistência à compressão de no mínimo 1,5MPa.

Naturalmente, é esperado que a resistência à compressão do solo não ativado alcalinamente tenha desempenho inferior quando comparado ao solo ativado alcalinamente. Na Tabela 4.5 a seguir é possível visualizar os resultados obtidos para as amostras.

Tabela 4.5: Resistência à compressão simples das amostras de adobe. Fonte: Próprio autor

| Amostra | Corpo de prova sem sisal | | Corpo de prova com sisal | |
|-------------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------|-------------|
| | Alcalinamente ativado | Não Ativado | Alcalinamente ativado | Não Ativado |
| | Resistência em [MPa] | | | |
| 1 | 2,12 | 2,05 | 5,34* | 3,20 |
| 2 | 2,02 | 1,68 | 3,47 | 3,16 |
| 3 | 1,94 | 2,13 | 3,53 | 3,59 |
| 4 | 2,09 | 1,97 | 3,35 | 3,24 |
| 5 | 1,86 | 2,01 | 3,45 | 3,23 |
| Média | 2,01 | 1,97 | 3,45 | 3,28 |
| Desvio Padrão | 0,11 | 0,17 | 0,07 | 0,19 |
| f_{cak} | 1,83 | 1,69 | 3,33 | 2,99 |
| Requerido na NBR 16814 | | 1,5 MPa | | |

*: Não considerado no cálculo da média e do desvio padrão

Analisando os resultados dos adobes sem sisal, constata-se que ambos atendem a NBR 16814(2020) e apresentaram desempenho semelhante entre si. A amostra alcalinamente ativada apresentou f_{cak} de 1,84 MPa e a amostra não ativada f_{cak} de 1,69 MPa. Houve desempenho pouco superior do adobe alcalinamente ativado frente ao *in natura*. Ressalta-se que o adobe ativado alcalinamente atinge os requisitos normativos com tempo de cura de 17 dias, frente a 30 dias de adobe *in natura*. Na Figura 4.14 visualiza-se o adobe durante o ensaio e logo após a ruptura.

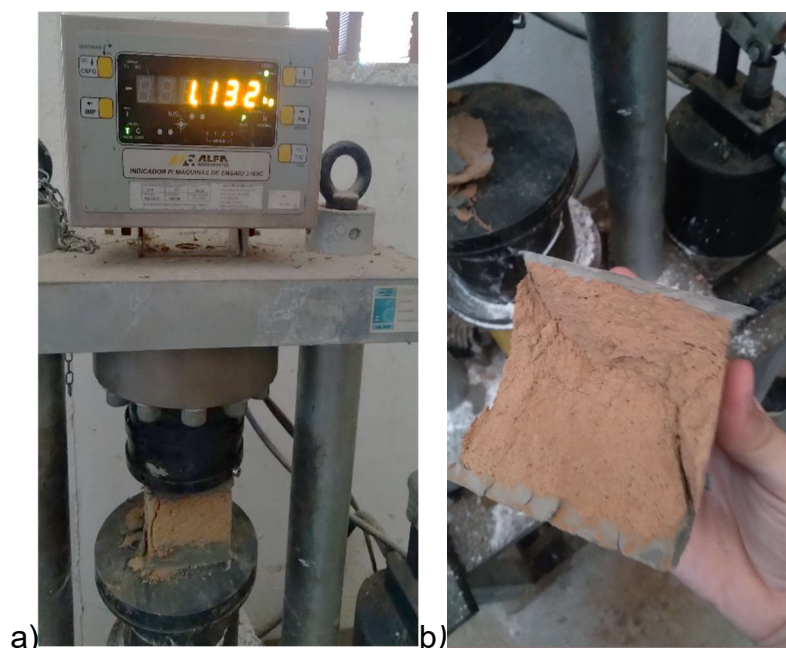


Figura 4.14: a) Corpo de prova #2 de adobe sem sisal e com mistura alcalinamente ativado na carga de ruptura. b) Detalhe do corpo de prova após rompimento. Fonte: Autor.

Esta melhora no desempenho pode ser atribuído a presença da mistura alcalinamente ativada em sua composição, mesmo em pequena concentração (2.2% do peso de terra).

Para os corpos de prova obtidos do adobe com sisal não foi possível chegar à carga máxima de ruptura, pois à medida que aumentava a tensão, o corpo de prova simplesmente se deformava vertical e lateralmente.

No primeiro corpo de prova de adobe com sisal e alcalinamente ativado foi aplicada tensão de 5,27 MPa e não se chegou ao máximo, apesar de o corpo de prova se achar com aproximadamente 60% de sua altura inicial, conforme pode ser visto na Figura 4.15.

Para os demais corpos de prova de sisal a tensão aplicada limitou-se a 2 vezes o valor exigido por norma. Não foi possível aprofundar os estudos na deformação dos corpos de prova devido a não disponibilidade de equipamento adequado no laboratório.



Figura 4.15: Corpos de prova ativados alcalinamente com sisal, corpo de prova esquerda após receber carga e o corpo de prova a direita sem receber carga. Fonte: Autor.

A seguir na Tabela 4.6 está compilado o resultado de autores que também avaliaram a ruptura a compressão de corpos de prova de adobe com e sem sisal, os autores descritos utilizaram apenas o adobe *in natura*.

Tabela 4.6: Compilação de resultados existentes para a ruptura a compressão de adobe.
Fonte: Adaptado de Abdulla (2020)

| Amostra | Autor e ano | Formato do corpo de prova | Tensão de ruptura a compressão [MPa] |
|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Adobe alcalinamente ativado sem sisal | Autor (2021) | Cúbico | 1,83 |
| Adobe sem sisal | Autor (2021) | Cúbico | 1,69 |
| Adobe | Rodríguez-Mariscal E Solís (2020) | Cúbico | 1,13 |
| Adobe | Silveira (2015) | - | 1,08 |
| Adobe | Silveira et al. (2012) | Cilíndrico | 1,17 |
| Adobe | Quagliarini e Lenci (2010) | Retangular | 2,88 |
| Adobe | Varum (2007) | Cúbico | 1,35 |
| Adobe alcalinamente ativado com sisal | Autor (2021) | Cúbico | 3,33 |
| Adobe com sisal | Autor (2021) | Cúbico | 2,99 |
| Adobe com palha 1:0,8 (Solo: areia) | Wu (2013) | Retangular | 1,7 |
| Adobe com palha 1:1,0 (Solo: areia) | | | 1,66 |
| Adobe com palha 1:1,2 (Solo: areia) | | | 1,39 |

| | | | |
|------------------------------------|----------------------------|------------|------|
| Adobe com palha (14 dias) | Abdulla (2020) | Cúbico | 1,18 |
| Adobe com palha (28 dias) | | | 1,45 |
| Adobe com palha (56 dias) | | | 1,59 |
| Adobe com palha (28 dias) | | Cilíndrico | 1,11 |
| Adobe com palha (0,3% em massa) | Quagliarini e Lenci (2010) | Retangular | 2,14 |
| Adobe com palha (20-40% em volume) | Illampas et al. (2014) | Cúbico | 1,75 |
| Adobe com palha (15-28% em volume) | | Cúbico | 0,6 |
| Adobe com palha (20-40% em volume) | | Cilíndrico | 1,41 |
| Adobe com palha (15-28% em volume) | | Cilíndrico | 0,76 |
| Adobe com palha (20-40% em volume) | | Retangular | 2,16 |
| Adobe com palha (15-28% em volume) | | Retangular | 0,52 |

A alta variabilidade de resultados encontrados pelos autores é algo natural decorrente da distribuição heterogênea do solo. Nas amostras de adobe sem fibra, o intervalo de resultados encontrados foi entre 1,08 e 2,88 MPa, sendo a maior parte concentrado até 1,35 MPa e os resultados deste trabalho encontram-se no tercil intermediário.

Utilizando o critério de resistência a compressão da NBR 16814 (2020) nas amostras sem fibra, apenas as amostras deste trabalho e de Quagliarini e Lenci (2010) atingiram o mínimo de 1,5 MPa de resistência a compressão. Os resultados encontrados neste trabalho foram satisfatórios e coerentes com o apresentado na literatura.

Para as amostras com fibra incorporada o intervalo de resultados variou de 0,52MPa a 3,33 MPa, sendo o maior resultado obtido deste trabalho. Com exceção deste, todos os outros autores descritos utilizaram a palha como fibra, este pode ser um dos fatores que influenciou o destaque das amostras com sisal positivamente no resultado.

A fibra de sisal parece se incorporar melhor no adobe do que a palha, devido a menor espessura da fibra. Formando assim inúmeras pequenas pontes bem distribuídas dentro do adobe, aumentando a tensão interna que o material suporta. Na Figura 4.16 a) visualiza-se o adobe de Abdulla (2020) cortado ao meio e em b) recorte do adobe com sisal deste trabalho.

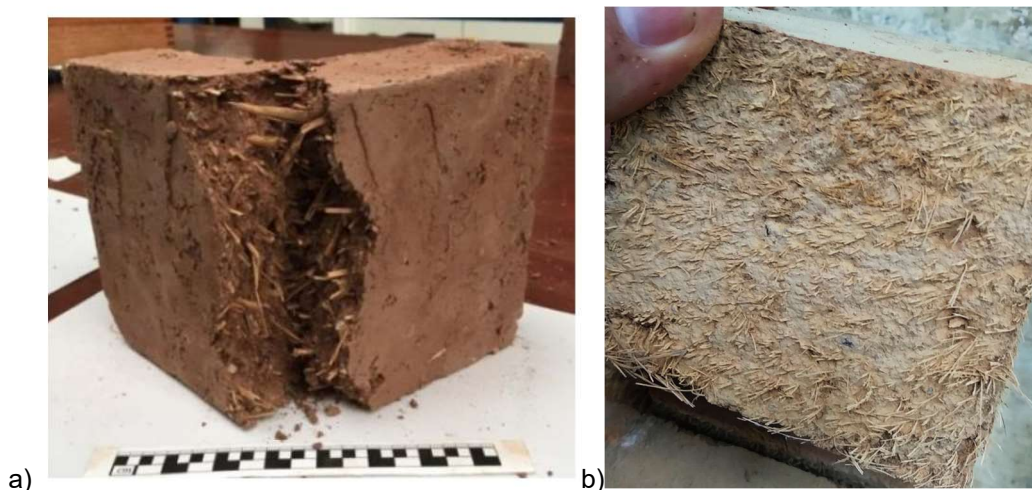


Figura 4.16: a) Adobe cortado ao meio com fibras de palha b) Seção do adobe com sisal deste trabalho. Fonte: a) Abdulla (2020) e b) Autor.

Interessante observar que todos os autores que trabalharam com incorporação de fibras no adobe apresentaram desempenho exigido na NBR 16814 (2020) em pelo menos uma de suas amostras. Demonstrando a tendência também observada neste trabalho que a incorporação de fibras no adobe aumenta a resistência a compressão.

Pode-se observar também que o formato do corpo de prova influencia o resultado obtido. Abdulla (2020) e Illampas et al. (2014) analisaram a resistência a compressão de adobe para diferentes corpos de prova e há tendência para que os moldes cilíndricos apresentem menor resistência a compressão, com exceção do adobe com palha (15-28% em volume) de Illampas et al. (2014), que apresentou maior resistência a compressão que o cúbico e retangular. Em geral houve preferência pela utilização dos corpos de prova cúbicos pelos autores, entretanto melhor análise estática é necessária para confirmação desta tendência de resultados.

Outra observação vem do trabalho de Abdulla (2020), a respeito da relação entre a idade do adobe e sua resistência a compressão. Seus resultados mostraram que há ganho de resistência significativo à medida que a idade do adobe avança, principalmente entre o intervalo de 14 a 28 dias. Segundo o autor, este ganho é resultado do lento processo de secagem do adobe, que também é influenciado pela presença de fibras na composição.

4.5 Ensaio de condutividade térmica

Os ensaios de condutividade térmica para as placas de adobe foram obtidos pelo ensaio da placa quente, na Tabela 4.7 encontra-se o resultado dos ensaios.

Tabela 4.7: Resultado do ensaio de condutividade térmica. Fonte: Autor

| Amostra | | Condutividade térmica das argamassas – $K - (\frac{W}{m \cdot K})$ | Densidade ($\frac{kg}{m^3}$) |
|---|-----------|--|--------------------------------|
| Placas de adobe alcalinamente ativado | Sem sisal | 0.29 | 1801.9 |
| | Com sisal | 0.32 | 1778.3 |
| Referências normativas da NBR 15.220 (2005) | | | |
| Terra argilosa seca | | 0.52 | 1700 |
| Areia seca | | 0.30 | 1500 |
| Argila expandida | | 0.16 | <400 |

Ao analisar os resultados obtidos constata-se que a condutividade térmica para as amostras ensaiadas foi muito próxima aos valores normativos da areia seca ($0,30 \frac{W}{m \cdot K}$) e a densidade das amostras foram ligeiramente superior a terra argilosa seca ($1700 \frac{kg}{m^3}$). Na Figura 4.17 temos duas amostras das placas lado a lado.

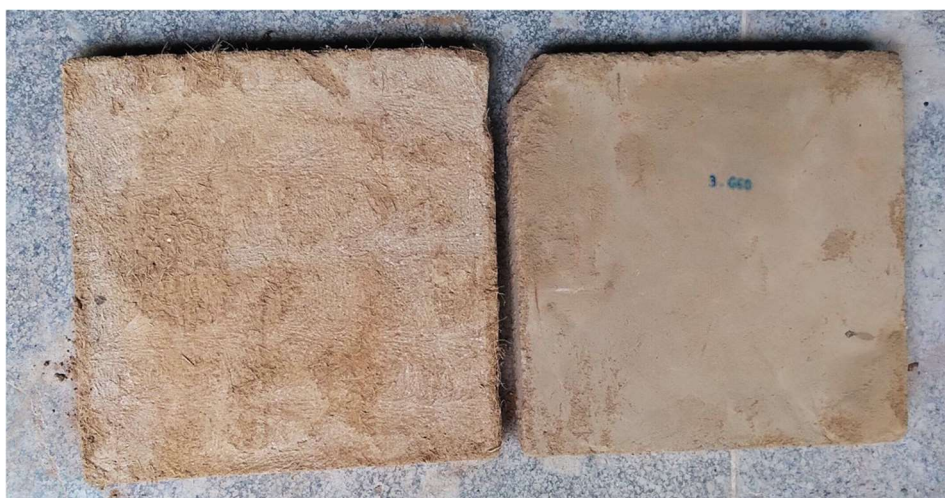


Figura 4.17: Placas de adobe, a esquerda com sisal e a direita sem sisal. Fonte: Autor.

Devido ao bom desempenho térmico do sisal, era esperado que a placa de adobe com sisal apresentasse menor condutividade térmica frente a placa sem sisal. Entretanto, a placa sem sisal apresentou desempenho 10% inferior a placa com sisal.

Esta diferença provavelmente é oriunda de imperfeições do processo de moldagem, para a execução do ensaio é necessário que ambas as faces da placa estejam planas.

Entretanto, só foi possível manter esta característica para uma das faces, pois a outra se encontrava rugosa e com ondulações: acarretando o acúmulo de bolsões de ar entre o equipamento e a placa de adobe. Assim, os resultados obtidos foram influenciados por esta dificuldade de moldagem das amostras, impossibilitando o aproveitamento.

4.6 Resultado do ensaio da câmara térmica

Durante os ensaios da câmara térmica foram mantidas constante as condições do equipamento de aquecimento, resfriamento e da área da parede exposta aos equipamentos, conforme explicitado na metodologia.

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos da 3ª avaliação (ambiente com fonte de calor ligada e ambiente com resfriamento ligado, ambos por 24 horas) descrito na seção de metodologia.

Inicialmente encontra-se o quadro comparativo com as principais conclusões deste ensaio. Em seguida os resultados para cada tipo de amostra serão discutidos individualmente para após serem comparados entre si, primeiro sobre a influência da pintura de cal e em seguida da presença de sisal nos resultados. Por fim é apresentado o cálculo da capacidade térmica das paredes.

A seguir encontra-se a ordem em que os resultados estão encontrados com seus respectivos subtópicos:

1. Tabela comparativo
2. Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e sem sisal;
3. Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e sem sisal;
4. Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal;
5. Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e com sisal;
6. Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e com sisal;

7. Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado com sisal;
8. Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que não foram pintadas de cal;
9. Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que foram pintadas de cal.
10. Cálculo da capacidade térmica

4.6.1 Tabela comparativo

Nesta seção estão compilados os resultados para as 4 amostras ensaiadas, apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Dados compilados das amostras de parede. Fonte: Autor.

| Caracterização da amostra | | | Temperatura média na estabilidade* | | | |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------------------------|----------------|-------------|----------------|
| | | | Lado quente | | Lado frio | |
| Parede de adobe | Presença de sisal | Pintura de cal | Globo negro | Face da parede | Globo negro | Face da parede |
| | Não | Não | 45,8°C | 39,1°C | 18,3°C | 31,7°C |
| | Não | Sim | 46,0°C | 33,9°C | 17,6°C | 27,9°C |
| | Sim | Não | 46,4°C | 38,3°C | 17,6°C | 31,3°C |
| | Sim | Sim | 46,2°C | 34,1°C | 17,9°C | 27,5°C |

* Últimas 14 horas de ensaio

Em síntese a presença de sisal ou da pintura de cal nas amostras apresentou tendência de redução nas temperaturas. Com a utilização de sisal e a pintura de cal foi aferida a menor temperatura na face do lado frio (27,5°C), seguida pela parede sem sisal e pintada de cal (27,9°).

A pintura de cal se mostrou bastante efetiva na diminuição das temperaturas. Nas amostras sem sisal, a face fria houve redução de 3,8°C e na face quente 5,2°C. Nas amostras com sisal a redução de temperatura na face fria 3,8°C e na face quente de 4,2°C.

A adição de sisal nos adobes e na argamassa também apresentou redução de temperatura nas faces da parede em relação a amostras sem sisal. A face fria da amostra com sisal e não pintada de cal apresentou redução de 0,4°C e a quente 0,8°C, quando comparadas a amostra sem sisal e não pintada de cal.

4.6.2 Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e sem sisal

Na Figura 4.18 encontra-se o gráfico com as informações compiladas da 3ª avaliação do adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e sem presença de sisal no traço.

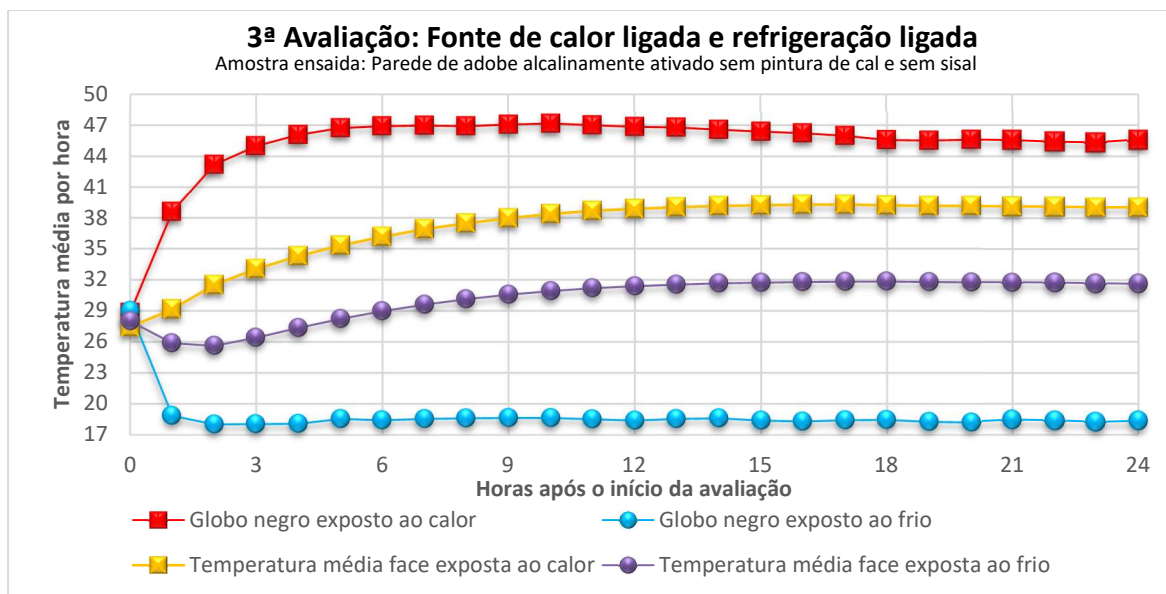


Figura 4.18: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada sem pintura de cal.
Fonte: Autor.

Seguindo o padrão de resultado encontrado na 1ª e 2ª avaliações, a partir das 14 horas de ensaio na 3ª avaliação os resultados apresentaram estabilidade em cada parâmetro analisado. Este padrão foi encontrado em todas as outras amostras analisadas neste trabalho

A partir da 14ª hora de ensaio a temperatura média na face da parede exposta ao calor foi de 39,1°C e na face da parede exposta ao frio de 31,7°C, resultando em uma diferença média de 7,4°C entre as duas faces da parede.

Para o globo negro exposto ao calor a temperatura média a partir da estabilidade térmica foi de 45,8°C e no globo negro exposto ao frio foi de 18,3°C, mantendo uma diferença média entre os dois ambientes de 27,5°C

A diferença média de temperatura do globo negro exposta a face quente foi 6,7°C superior à temperatura média encontrada na face da parede de mesmo lado. Para o lado frio, a temperatura média do globo negro foi 13,7°C inferior à média encontrada na face da parede deste mesmo lado.

4.6.3 Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e sem sisal

Na Figura 4.19 visualiza-se o gráfico com os resultados obtidos da 3ª avaliação do adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e sem presença de sisal no traço.

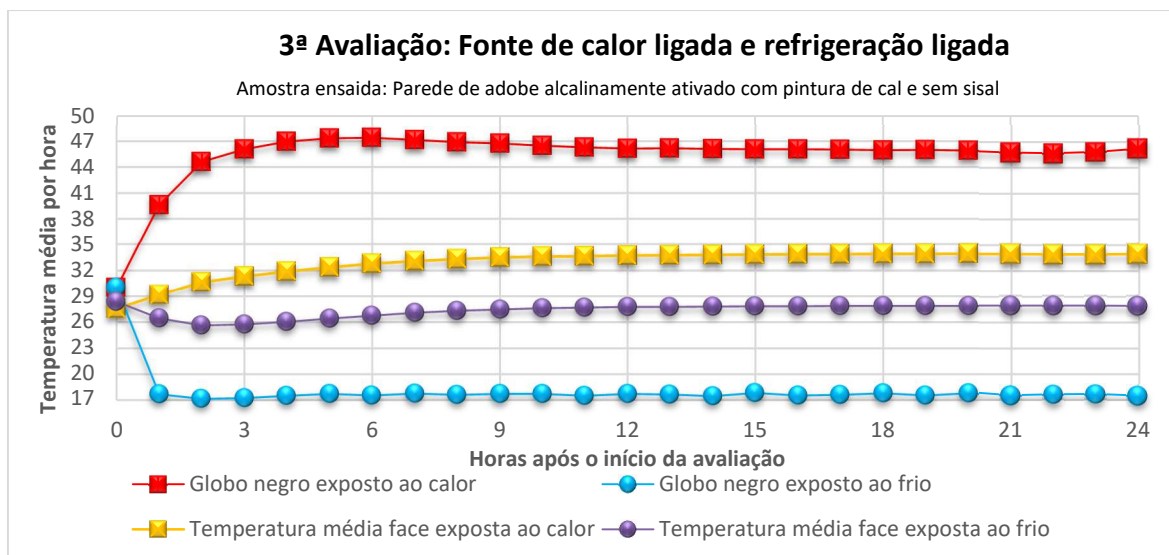


Figura 4.19: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com pintura de cal e sem sisal. Fonte: Autor.

Analisando o período de estabilidade do ensaio constata-se que a temperatura média na face da parede exposta ao lado quente foi de 33,9°C e para a face da parede exposta ao lado frio foi de 27,9°C, resultando em uma diferença de temperatura média entre as duas faces da parede de 5,0°C

No globo negro exposto ao lado quente a temperatura média foi de 46,0°C e para o globo negro exposto ao lado frio foi de 17,6°C, sendo a diferença média de temperatura entre os globos negros de 28,4°C.

Comparando as temperaturas média do globo negro exposto a face quente e a face da parede exposta a face quente, constata-se que a temperatura do primeiro é 12,1°C superior ao segundo. Para o lado frio, o globo negro tem em média 10,3°C a menos do que a temperatura registrada na face da parede exposta ao lado frio.

4.6.4 Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal

Mantidas constantes as variáveis no decorrer do ensaio da parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal, foi possível analisar o impacto térmico que a pintura de cal na face das paredes e na temperatura de cada ambiente. Na Figura 4.20 visualiza-se a comparação entre os lados quentes das duas amostras ensaiadas, sem a pintura de cal e com a pintura de cal.

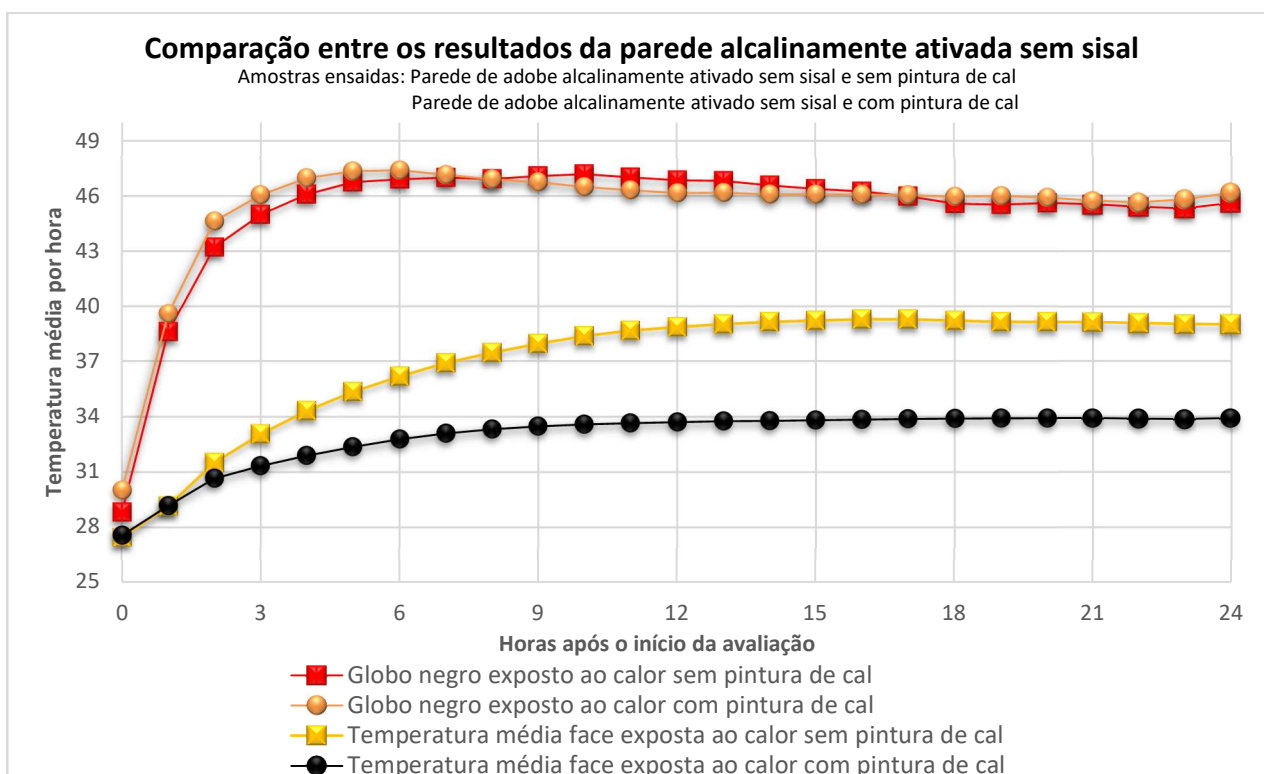


Figura 4.20: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada sem sisal com amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor.

Observa-se que as temperaturas do Globo Negro exposto ao lado quente praticamente se mantiveram constantes, a diferença média de temperatura após a estabilidade foi apenas 0,2°C superior para a amostra com a pintura de cal. Essa diferença de temperatura não pode ser atribuída diretamente a pintura, pois conforme visto nos outros ciclos de avaliação a temperatura externa da câmara pode exercer influência.

Para os termopares posicionados na face da parede exposta ao lado quente, a redução de temperatura na amostra pintada de cal quando comparada a face não pintada foi de 5,2°C. Esta redução se deve a diferença de cor entre as faces das amostras expostas ao lado quente. A cor branca da parede pintada com cal tem

elevada refletividade, acarretando diminuição na energia térmica absorvida pela parede, diferente da cor marrom *in natura* que o adobe apresenta.

Esta diminuição na absorção da energia térmica do lado quente se reflete em menor energia térmica transmitida para a face oposta (lado frio), na Figura 4.21 é possível visualizar a comparação de temperaturas do lado frio para as duas amostras ensaiadas.

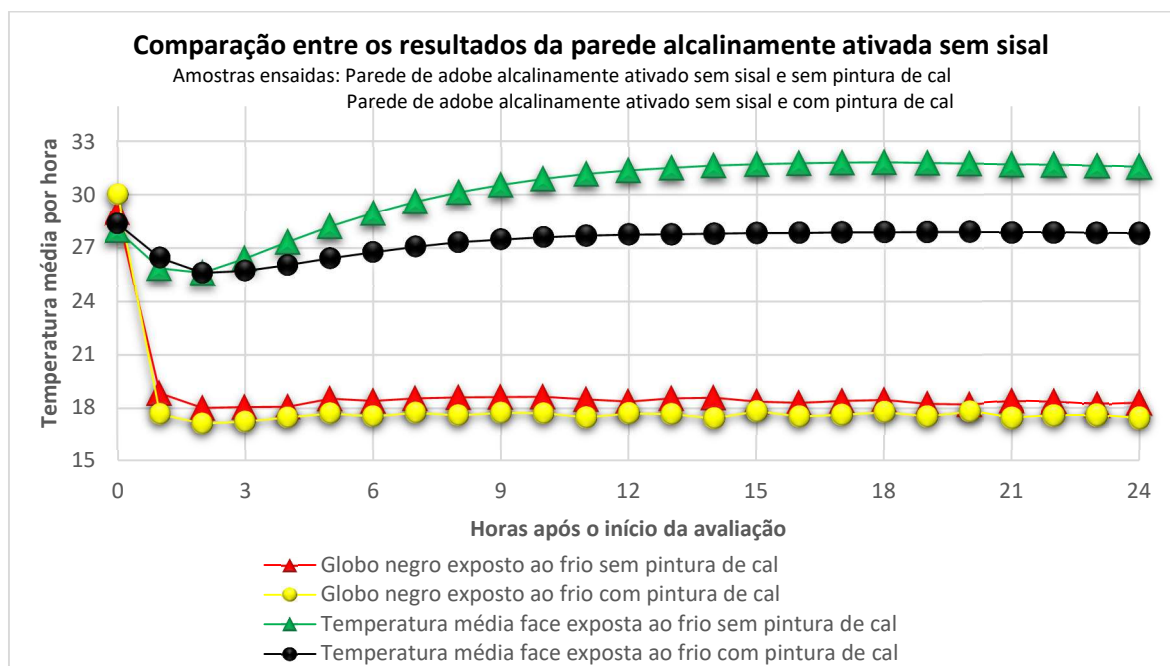


Figura 4.21: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada sem sisal com amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor.

A face da parede exposta ao frio com pintura de cal apresentou temperatura média redução média de 3,8°C quando comparada a mesma parede sem pintura de cal nas últimas 14 horas de ensaio. Em relação aos globos negros também foi observado diminuição na temperatura média do ambiente frio, saindo de 18,3°C para a parede sem pintura de cal para 17,6°C, redução de 0,7°C na temperatura interna do ambiente.

Portanto, a aplicação de 2 demãos de pintura de cal na face exposta ao lado quente mostrou ter uma boa relação custo x benefício. A pintura com cal é uma técnica de fácil aplicação e bastante barata, ao passo que foi possível reduzir a temperatura na face da parede interna em 3,8°C e a temperatura ambiente em 0,7°C, promovendo assim um melhor conforto térmico aos usuários.

4.6.5 Parede de adobe alcalinamente ativado sem pintura de cal e com sisal

Observa-se na Figura 4.22 o resultado da 3ª avaliação com a fonte de calor e de refrigeração ligada para a parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e sem pintura de cal.

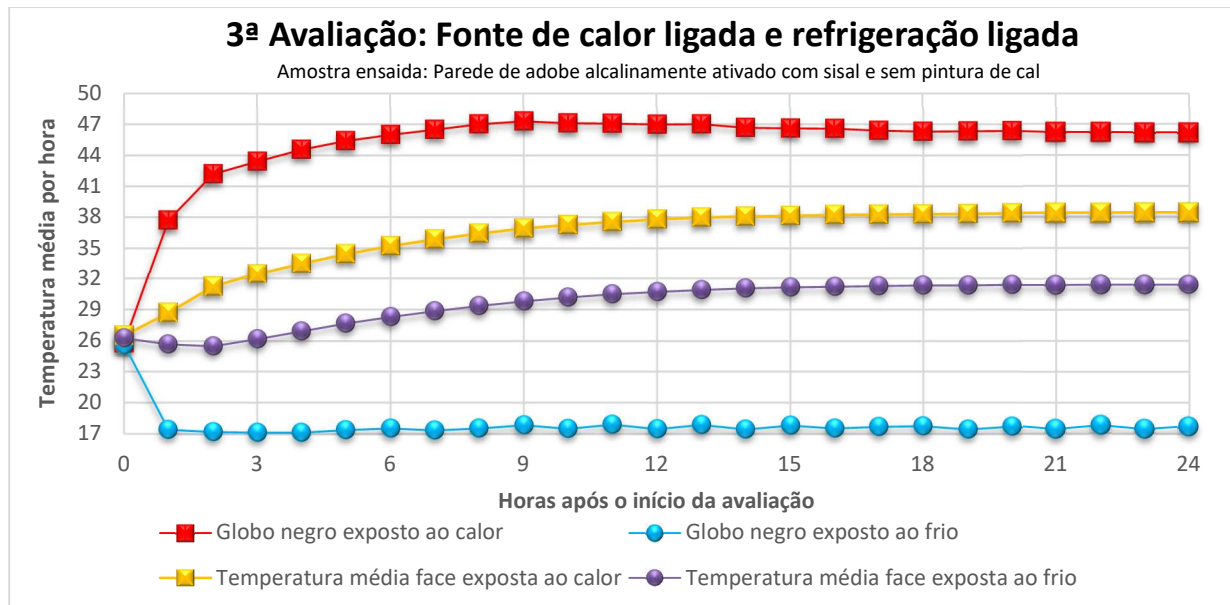


Figura 4.22: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e sem pintura de cal. Fonte: Próprio autor

A temperatura média na face exposta ao lado da fonte de calor atingiu 38,3°C e para a face exposta ao lado refrigerado 31,3°C, resultando em uma diferença média de 7,0°C.

Para o globo negro exposto ao lado aquecido a temperatura média após a estabilidade atingiu 46,4°C e para o lado refrigerado 17,6°C, resultando em contraste de temperatura de 28,8°C entre os dois ambientes.

4.6.6 Parede de adobe alcalinamente ativado com pintura de cal e com sisal

Na Figura 4.23 visualiza-se o resultado da 3ª avaliação após a face da parede exposta ao lado quente receber a pintura de cal. Assim como nos outros experimentos, todas as demais características da câmara térmica foram mantidas constantes.

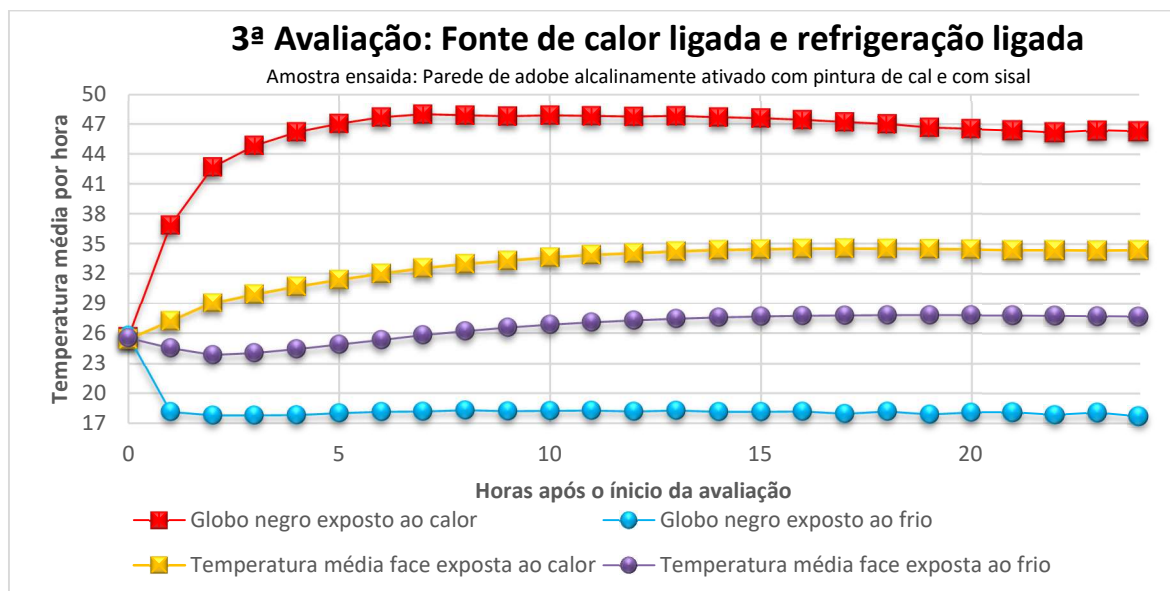


Figura 4.23: 3ª avaliação da parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e com pintura de cal. Fonte: Autor.

Nas últimas 14 horas de ensaio a temperatura média do globo negro exposto ao calor foi de 46,8°C, para o globo negro exposto ao lado frio foi de 33,8°C, atingindo 13,0°C de diferença entre os dois ambientes.

Para a face da parede exposta ao lado quente a temperatura média foi de 34,4°C e no lado da parede exposta ao lado frio foi de 27,7°C. Resultando em uma diferença de 6,7°C entre as duas faces da parede.

4.6.7 Comparação entre os resultados da parede de adobe alcalinamente ativado com sisal

Com os resultados obtidos pode-se comparar as temperaturas para analisar a influência da pintura de cal na amostra parede com sisal. Na Figura 4.24 visualiza-se as temperaturas da parede de adobe alcalinamente para o lado quente, com e sem pintura de cal.

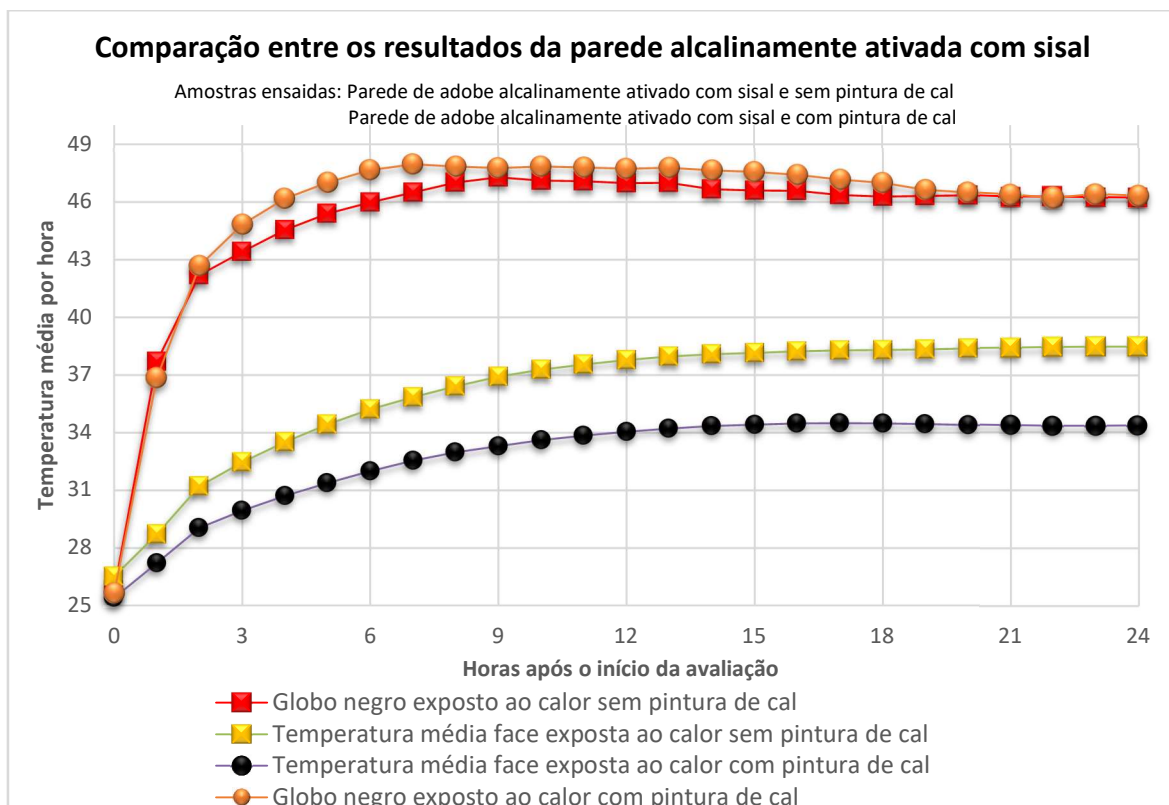


Figura 4.24: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com sisal da amostra pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor.

Para ambas as amostras ensaiadas as temperaturas medidas no globo negro exposto ao calor foram muito próximas entre si. Na face pintada de cal a temperatura média nas últimas 14 horas atingiu 46,8°C e para a face não pintada de cal foi de 46,4°C, diferença positiva de 0,4°C para a amostra pintada de cal.

As temperaturas medidas na face da parede apresentaram diferença média de 3,9°C entre as duas amostras ensaiadas. Para a face da parede que não recebeu a pintura de cal a temperatura média foi de 38,3°C e para a face da parede que recebeu a pintura de cal foi de 34,4°C. Esta redução de temperatura na face da parede tende a reduzir a temperatura na face interna, na Figura 4.25 visualiza-se os resultados da face exposta ao lado frio da parede.

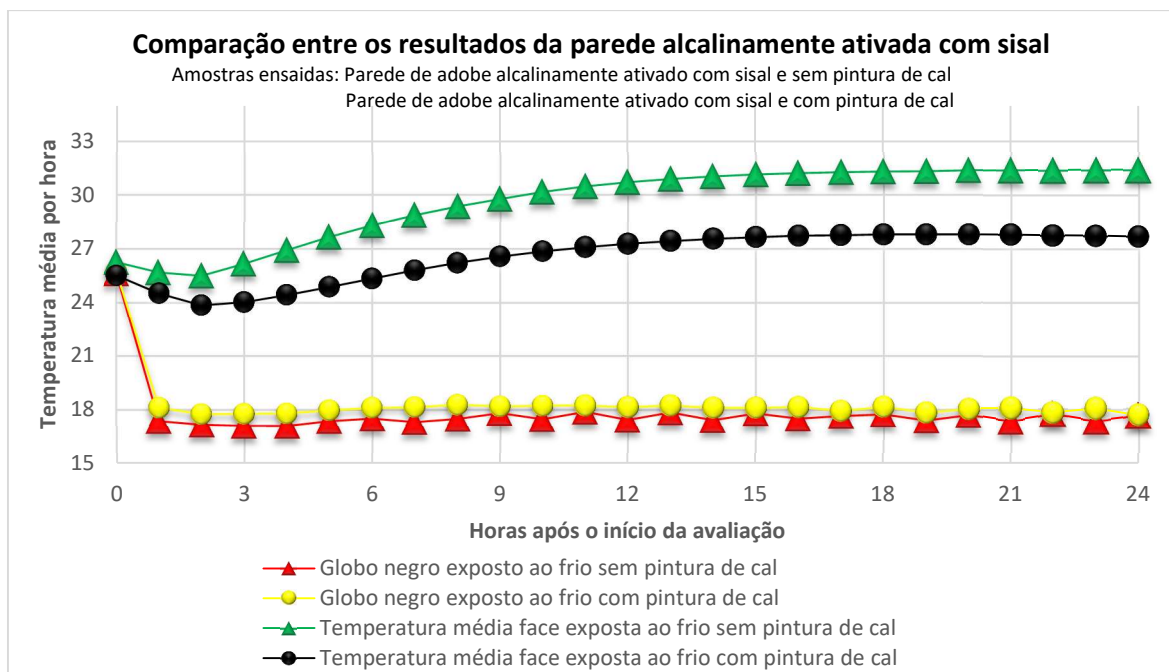


Figura 4.25: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com sisal pintada de cal e não pintada de cal. Fonte: Autor.

A temperatura média na face exposta ao frio sem pintura de cal foi de 31,3°C e para a mesma face após ser pintada de cal foi de 27,7°C. Uma diferença de 3,6°C entre as faces das paredes.

Naturalmente era esperado que a temperatura do globo negro do lado frio com a pintura de cal apresentasse menor temperatura do globo negro quando comparada ao globo negro exposto ao frio sem a pintura de cal. Mas este não foi o desempenho encontrado.

A temperatura média do globo negro exposto ao frio com pintura de cal foi de 18,0°C e para o globo negro sem pintura de cal foi de 17,6°C. Uma diferença negativa de 0,4°C para o globo negro sem pintura de cal. Este resultado ligeiramente fora do esperado pode ser atribuído a influência da temperatura externa a câmara térmica pode provocar, os testes foram realizados durante o mês de Julho em João Pessoa – PB, que apresenta dias mais frios devido a intensas chuvas e dias quentes semelhantes aos do verão de maneira aleatória.

4.6.8 Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que não foram pintadas de cal

Seguindo as comparações entre os resultados, podemos analisar a influência térmica que inserção de sisal nos traços dos adobes e argamassa acarretou.

Na Figura 4.26 visualiza-se temperaturas obtidas para o lado quente da parede com e sem sisal que não receberam pintura de cal.

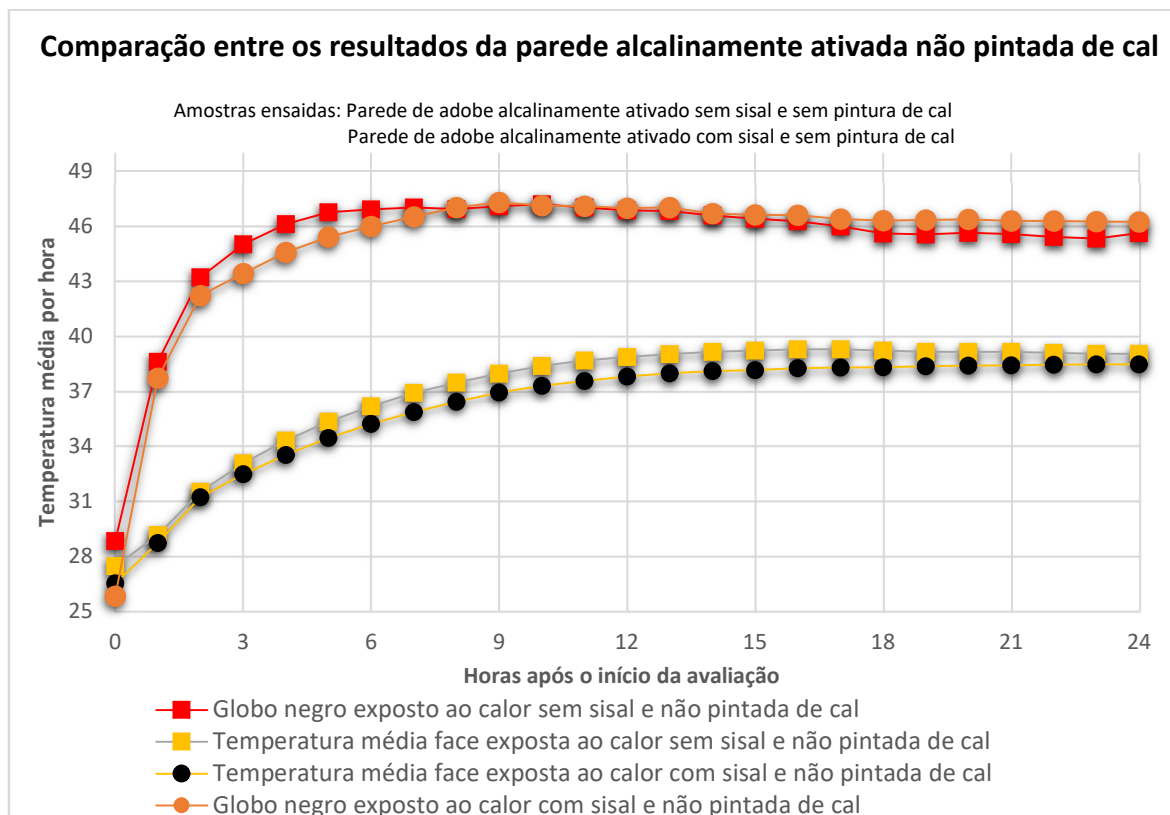


Figura 4.26: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas não pintadas de cal. Fonte: Autor.

A temperatura média no globo negro da parede com sisal e não pintada de cal foi levemente superior a amostra da parede sem a presença de sisal. A parede com sisal obteve temperatura média de 46,4°C e a sem sisal de 45,8°C.

Para a temperatura média nas faces da parede, a amostra que não continha sisal apresentou temperatura média de 39,1°C e a face da parede com sisal atingiu 38,3°C, representando uma diferença de 0,8°C entre as duas paredes. Esta diminuição na temperatura é atribuída diretamente a presença do sisal e demonstra que a fibra de sisal favorece a inércia térmica do material.

A seguir é apresentado a comparação entre os resultados da face fria para as amostras, ver Figura 4.27.

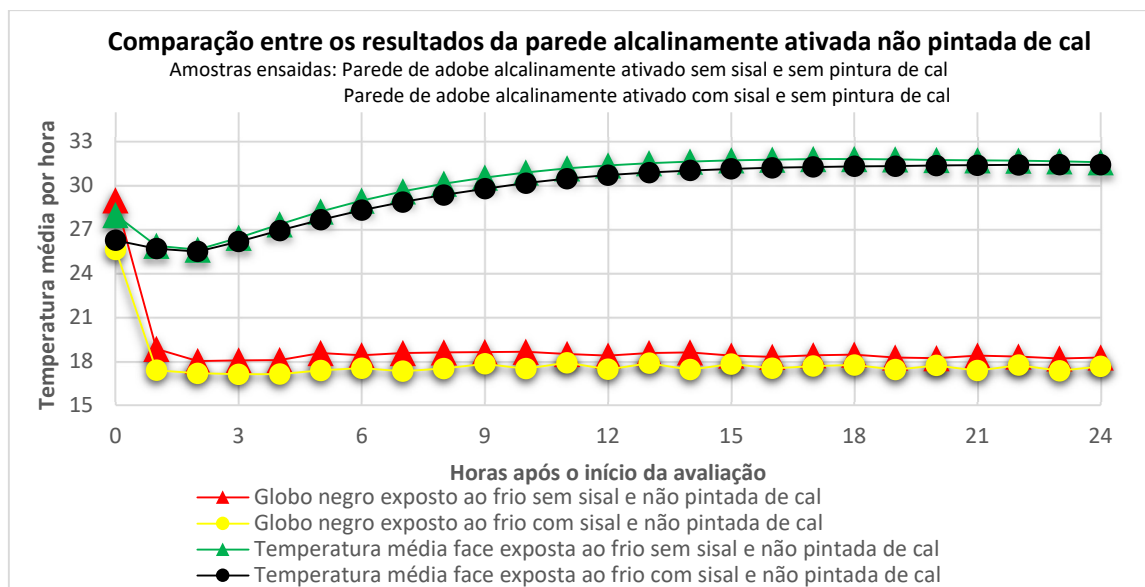


Figura 4.27: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas não pintadas de cal. Fonte: Autor.

Seguindo tendência apresentada no lado quente, a temperatura média no globo negro da parede com sisal e não pintada de cal foi levemente inferior a amostra da parede sem a presença de sisal e não pintada de cal. O globo negro exposto ao frio para a parede com sisal apresentou temperatura média de 17,6°C e a parede sem sisal foi de 18,3°C, uma diferença de 0,7°C.

Para a face exposta ao lado frio da parede com sisal a média de temperatura foi de 31,3°C e para a parede sem sisal foi de 31,7°C, uma redução de 0,4°C. Obteve temperatura média de 46,4°C e a sem sisal de 45,8°C. Assim, a presença de sisal influenciou para redução nas temperaturas da face da parede.

4.6.9 Comparação entre os resultados das paredes alcalinamente ativadas com e sem sisal que foram pintadas de cal

A última comparação dos resultados obtidos da parede, na Figura 4.28 encontra-se comparação para o lado quente para as amostras com e sem sisal que receberam pintura de cal.

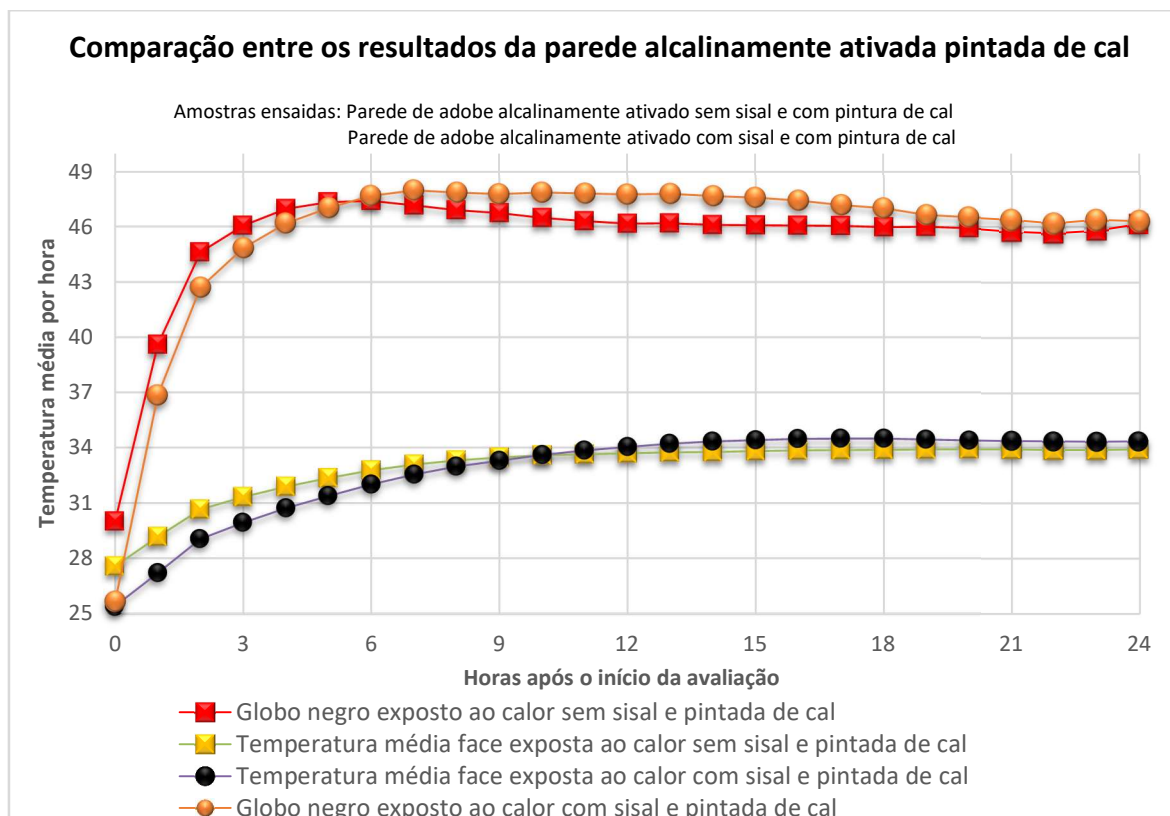


Figura 4.28: Comparação entre os resultados do lado quente da parede alcalinamente ativada com sisal, pintada e não pintada de cal. Fonte: Autor.

A temperatura média no globo negro da parede com sisal e pintada de cal foi ligeiramente superior a amostra da parede sem a presença de sisal. Nas últimas 14 horas de ensaio, a parede com sisal obteve temperatura média de 46,2°C e a sem sisal de 46,0°C.

Para a temperatura na face da parede exposta ao lado quente a amostra com sisal também apresentou temperatura levemente superior 34,1°C, frente a 33,9°C da amostra de parede sem sisal.

A comparação dos resultados do lado frio das duas amostras encontra-se na Figura 5.24 a seguir.

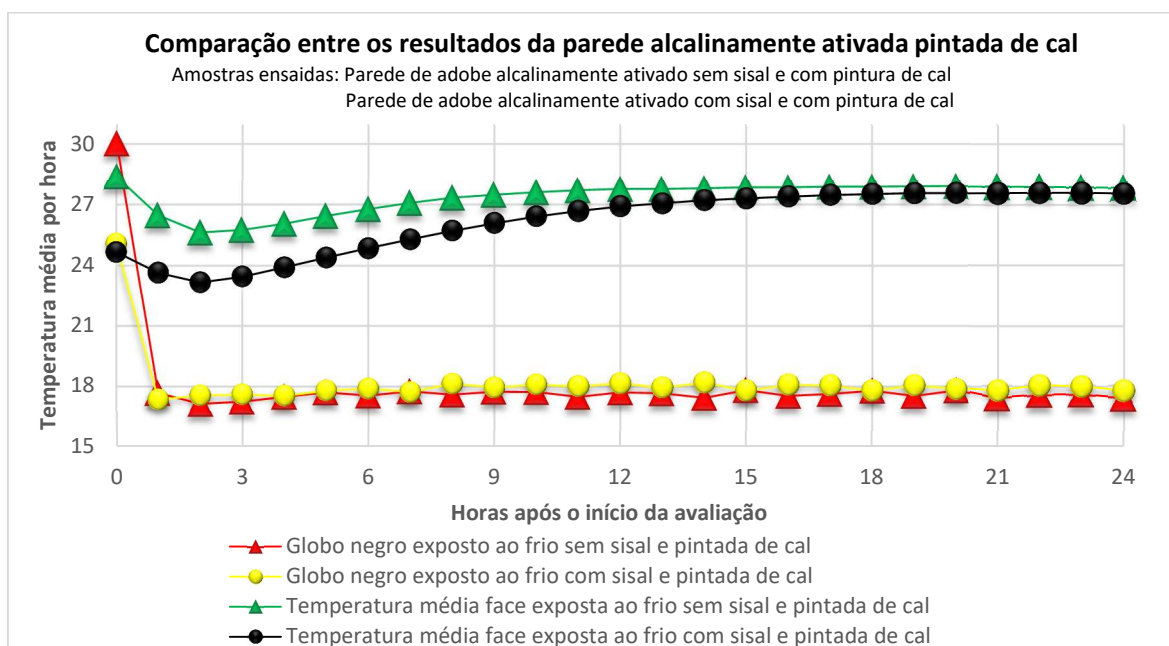


Figura 4.29: Comparação entre os resultados do lado frio da parede alcalinamente ativada com e sem sisal, ambas pintadas de cal. Fonte: Autor.

O globo negro exposto ao lado frio sem sisal apresentou temperatura média de 17,6°C e o globo negro exposto da amostra com sisal foi de 17,9°C; uma pequena diferença de 0,3°C.

Diferente do resultado indicado pelo globo negro, a face com sisal apresentou temperatura média inferior a face sem sisal: 27,5°C frente a 27,9°C, respectivamente.

Deve-se ressaltar que os resultados para ambos os lados tiveram diferença de temperatura muito sutil, podendo ter seus resultados influenciados por variações de temperatura do exterior.

4.6.10 Cálculo da capacidade térmica

Com os dados obtidos após finalização dos ensaios da câmara térmica e utilizando o procedimento de cálculo da NBR 15220-5 (2003), pode-se obter a classificação das paredes conforme o critério desta mesma norma.

Nesta seção foi planejado a utilização dos dados obtidos no ensaio de condutividade térmica. Entretanto, apenas a densidade será utilizada, pois o resultado obtido para a condutividade térmica foi diretamente afetado pela rugosidade da face superior das amostras. Assim, para prosseguir com os cálculos foram utilizados

valores referenciados na NBR15220-5 (2003), para ambas as paredes e descrito na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Dados iniciais para cálculo da capacidade térmica.
Fonte: Autor e NBR-15220-5 (2003).

| Amostra | Densidade ($\frac{kg}{m^3}$) | Condutividade térmica ¹ ($\frac{W}{m \cdot K}$) | Calor es- pecífico ¹ ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) | Comprimento (m) | Espessura (m) |
|------------------|-----------------------------------|---|---|--------------------|------------------|
| Parede sem sisal | 1801,9 | 0,52 | 0,84 | 1,02 | 0,125 |
| Parede com sisal | 1778,3 | 0,52 | 0,84 | 1,03 | 0,125 |

¹ Referência da NBR15220-2003

Para efeitos de cálculo, ambas as paredes foram consideradas como um material homogêneo. Sendo o efeito da pintura de cal apenas considerado na absorvância solar. Na Tabela 4.10, encontra-se o resultado para as 4 amostras.

Tabela 4.10: Resultado de índices térmicos para as amostras. Fonte: Autor.

| Amostra | | (R) Resistência térmica ($\frac{m^2 \cdot K}{W}$) | (CT) Capacidade térmica ($\frac{K \cdot J}{m^2 \cdot K}$) | (U) Transmitância térmica ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$) | (Φ) Atraso tér- mico (horas) | (FS _o) Fator de ga- nho solar (%) |
|---------------------|-------------|--|--|--|---------------------------------------|--|
| Parede sem sisal | Não pintada | 0,41 | 189,20 | 2,44 | 6,42 | 7,80 |
| | Pintada | | | | | 1,32 |
| Parede com sisal | Não pintada | 0,41 | 186,72 | 2,44 | 6,38 | 7,80 |
| | Pintada | | | | | 1,32 |

Os resultados encontrados para as paredes foram praticamente os mesmos, com pequena variação apenas na capacidade térmica e no atraso térmico das paredes. Isto aconteceu devido ao não aproveitamento dos dados obtidos via ensaio de condutividade térmica e sim a utilização dos valores referenciados em norma em ambas as paredes, com exceção da densidade.

A NBR 15220-5 (2003) apresenta valores de referência para a transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para classificação das vedações externas, na Tabela 4.11 encontram-se os valores referenciados em norma.

Tabela 4.11: Critérios da NBR e classificação das amostras.
Fonte: NBR 15220-5 (2003) e Autor.

| Vedações externas | | U $(\frac{W}{m^2 \cdot K})$ | Φ (horas) | FS_o (%) |
|-------------------|----------------|---|--------------------|-----------------|
| Paredes | Leve | $U \leq 3,0$ | $\varphi \leq 4,3$ | $FS_o \leq 5,0$ |
| | Leve Refletora | $U \leq 3,6$ | $\varphi \leq 4,3$ | $FS_o \leq 4,0$ |
| | Pesada | $U \leq 2,2$ | $\varphi \geq 6,5$ | $FS_o \leq 3,5$ |
| Amostras | | Classificação da parede segundo a NBR 15220 -5 (2003) | | |
| Parede sem sisal | Não pintada | Leve | - | - |
| | Pintada de cal | Leve | - | Leve |
| Parede com sisal | Não pintada | Leve | - | - |
| | Pintada de cal | Leve | - | Leve |

Comparando os resultados com os valores referenciados em norma, apenas a transmitância térmica apresentou classificação como vedação externa do tipo leve para todas as paredes. No atraso térmico nenhuma das paredes obteve classificação leve, mas ficaram muito próximos de serem classificadas como pesadas.

Quanto ao fator de ganho solar, as pintadas com cal foram classificadas como vedações externas do tipo leve, as paredes que não receberam pintura de cal apresentam fator de ganho solar superior ao valor definido em norma e não foram classificadas.

Por meio dos dados obtidos no ensaio da câmara térmica e dos valores referenciados em norma é possível calcular o fluxo de calor das paredes, que é a energia térmica transferida pela superfície do material medida por unidade de tempo, tradicionalmente expressa em Watts.

Utilizando a lei de Fourier foi possível obter o fluxo de calor através do material, os resultados encontram-se na tabela 4.12.

Tabela 4.12: Dados e resultado da aplicação da lei de Fourier. Fonte: Autor.

| Amostra | | DT (K) | A (m ²) | K $(\frac{W}{m \cdot K})$ | E (m) | Q (W) |
|------------------|-------------|-----------|------------------------|------------------------------|----------|----------|
| Parede sem sisal | Não pintada | 280,40 | 1 | 0,52 | 0,125 | 1166,46 |
| | Pintada | 279,00 | 1 | 0,52 | 0,125 | 1160,64 |
| Parede com sisal | Não pintada | 280,00 | 1 | 0,52 | 0,125 | 1164,80 |
| | Pintada | 279,60 | 1 | 0,52 | 0,125 | 1163,14 |

DT: Diferença de temperatura; A: Área da parede; K: Condutividade térmica
E: espessura da parede; Q: Fluxo de calor

Os resultados obtidos para o fluxo de calor foram em torno de 1160 W por m², com pequena variação devido apenas as diferenças de temperaturas entre as amostras. Na Tabela 4.13 encontra-se comparação entre os resultados obtidos e de Gomes (2015), cujos resultados foram obtidos de forma semelhante.

Tabela 4.13: Comparação entre as amostras deste trabalho e de Gomes (2015).
Fonte: Autor e Gomes (2015)

| Amostra | E (m) | Q* (W) |
|---|----------|-----------|
| Parede sem sisal não pintada | 0,125 | 1166 |
| Parede sem sisal pintada com cal | 0,125 | 1161 |
| Parede com sisal não pintada de cal | 0,125 | 1165 |
| Parede com sisal pintada de cal | 0,125 | 1163 |
| Parede de bloco com 60% EVA e com argamassa em ambos os lados | 0,11 | 1506 |
| Parede de tijolos de 8 furos com argamassa em ambos os lados | 0,11 | 1063 |
| Parede de bloco de concreto com argamassa em ambos os lados | 0,11 | 2092 |
| Parede de bloco com 60% EVA e com argamassa em ambos os lados | 0,145 | 1309 |
| Parede de bloco com 80% EVA e com argamassa em ambos os lados | 0,145 | 1222 |
| Parede de bloco com 80% EVA e com argamassa em ambos os lados | 0,16 | 1280 |

*: Fluxo de calor (Q) por m²

O fluxo de calor das paredes de adobe foram inferiores a todas as paredes avaliadas por Gomes (2015), exceto para a parede de tijolos de 8 furos com argamassa em ambos os lados. Este melhor resultado para a amostra de tijolo com 8 furos é devido as câmaras de ar existentes no tijolo que dificultam o fluxo de calor entre os lados da parede.

Considerando que as paredes de adobe não apresentavam revestimentos e eram compostas apenas por adobes homogêneos e maciços, os resultados demonstram o baixo fluxo de calor deste método construtivo. Sendo indicado principalmente para regiões de clima quente e que não necessitam de retenção de energia térmica a ser liberada a noite.

Para obter-se um fluxo de calor menor do que o encontrado na parede de tijolo de 8 furos revestida e cumprir os requisitos da ABNT NBR 16814 (2020) que exige paredes de espessura mínima de 20 cm, pode-se aumentar a espessura da parede e manter constante as demais variáveis da lei de Fourier. Na Tabela 4.14 encontra-se os resultados.

Tabela 4.14: Fluxo de calor para a parede de adobe com espessura de 0,20 m.
Fonte: Autor.

| Amostra | | DT (K) | A (m ²) | K ($\frac{W}{m \cdot K}$) | E (m) | Q * (W) |
|------------------|-------------|-----------|------------------------|--------------------------------|----------|------------|
| Parede sem sisal | Não pintada | 280,40 | 1 | 0,52 | 0,20 | 729,04 |
| | Pintada | 279,00 | 1 | 0,52 | 0,20 | 725,40 |
| Parede com sisal | Não pintada | 280,00 | 1 | 0,52 | 0,20 | 728,00 |
| | Pintada | 279,60 | 1 | 0,52 | 0,20 | 726,96 |

*: Fluxo de calor (Q) por m²

Assim atendendo aos requisitos normativos para o adobe, o fluxo de calor é diminuído significativamente, conduzindo a uma proteção térmica superior às apresentadas pelas alvenarias da Tabela 4.13.

4.7 Ensaio de compressão das paredes de adobe

Após o fim dos ensaios na câmara térmica as paredes foram movidas para o pórtico do Laboratório de Estruturas e preparadas para o ensaio de compressão.

4.7.1 Parede de adobe sem sisal

A seguir encontra-se na Tabela 4.15 os resultados e as Figura 4.30 e 4.31 apresentam os gráficos Força em função do Deslocamento para o 1º e 2º ciclo e a Figura 4.32 apresenta o gráfico da Tensão em função da Deformação, respectivamente.

Tabela 4.15: Compilação de resultados e dados da parede de adobe sem sisal.
Fonte: Autor.

| Parede de adobe sem sisal | | | | |
|---------------------------|-----|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Espessura | | 0,125m | Força de ruptura | 115200 N |
| Comprimento | | 1,02m | Tensão de ruptura | 0,904 MPa |
| Altura | | 1,05m | L de referência | 670 mm |
| Área da seção | | 127500 mm ² | | |
| F (kN) | | Δ _Acum médio[mm] | Tensão [MPa] | Deformação média nominal [%] |
| 1º Ciclo | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | 10 | 0,05 | 0,08 | 0,07 |
| | 20 | 0,09 | 0,16 | 0,13 |
| | 30 | 0,15 | 0,24 | 0,22 |
| | 40 | 0,23 | 0,31 | 0,34 |
| | 50 | 0,31 | 0,39 | 0,46 |
| | 60 | 0,42 | 0,47 | 0,62 |
| 2º Ciclo | 0 | 0,17 | 0,00 | 0,25 |
| | 20 | 0,25 | 0,16 | 0,37 |
| | 40 | 0,37 | 0,31 | 0,55 |
| | 60 | 0,51 | 0,47 | 0,75 |
| | 70 | 0,62 | 0,55 | 0,93 |
| | 80 | 0,78 | 0,63 | 1,16 |
| | 90 | 0,99 | 0,71 | 1,47 |
| | 100 | 1,24 | 0,78 | 1,85 |
| | 110 | 1,72 | 0,86 | 2,57 |

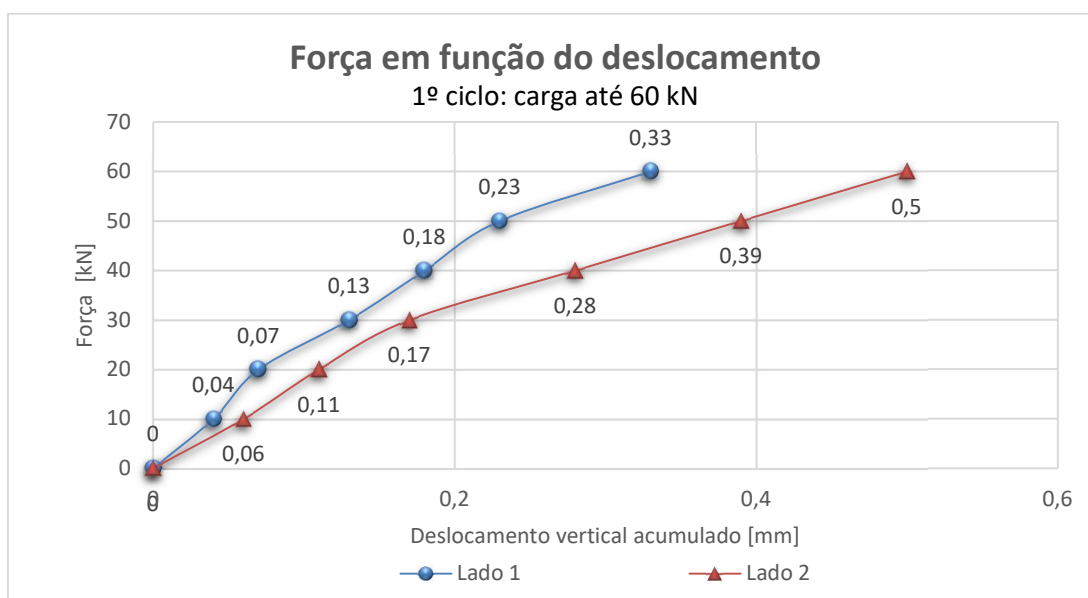


Figura 4.30: Gráfico da Força em função do deslocamento do 1º ciclo e por lado da parede de adobe sem sisal.
Fonte: Autor.

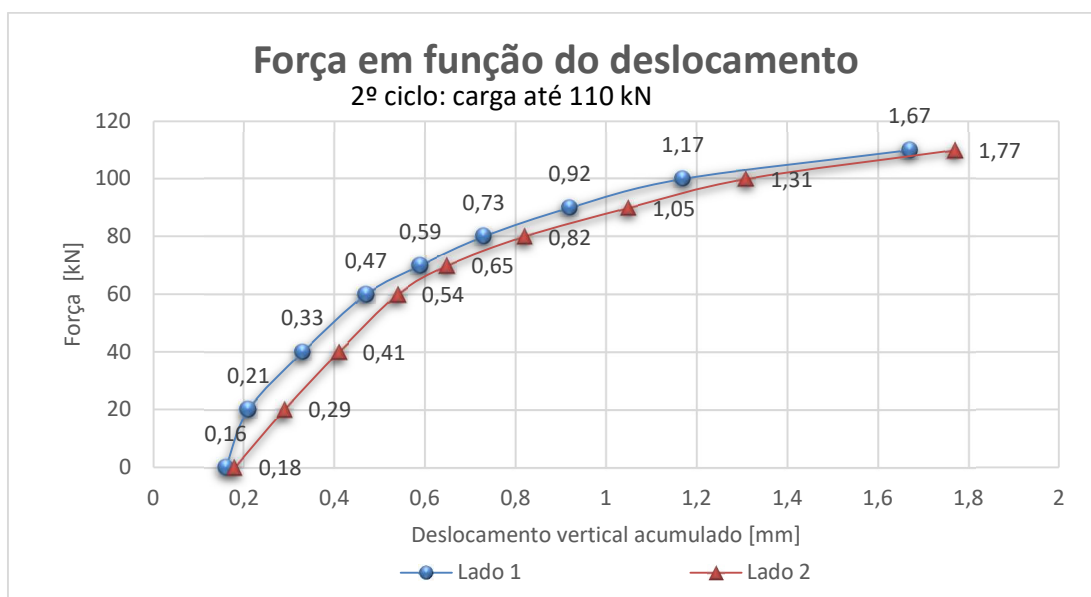


Figura 4.31: Gráfico da Força em função do deslocamento do 2º ciclo e por lado da parede de adobe sem sisal. Fonte: Autor.

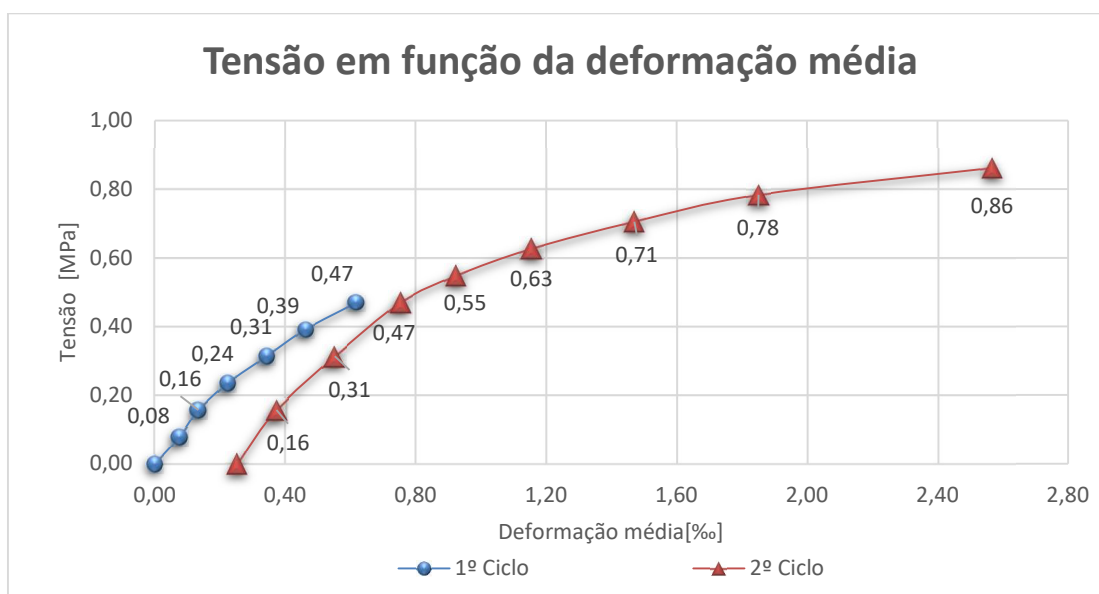


Figura 4.32: Gráfico da tensão em função da deformação média para a parede de adobe sem sisal. Fonte: Autor.

A primeira fissura na parede de adobe sem sisal foi detectada no 2º ciclo com o carregamento de 60 kN. Os extensômetros foram retirados quando a carga atingiu 110 kN, o que daria uma tensão média de 0,86 MPa. A parede já apresentava fissuras relevantes no lado 1.

A ruptura ocorreu por esmagamento à compressão de adobes da base que receberam uma tensão maior causada pela excentricidade do carregamento. Até

poucos segundos antes do rompimento o lado 2 apresenta apenas microfissuras. Nas figuras 4.33 e 4.34 encontra-se o estado final da parede após a ruptura.





Figura 4.34: Seção transversal da parede próxima a área do rompimento.
Fonte: Autor

Observa-se que a parede apresentou deformação média mais vigorosa a partir de 0,63 MPa, com destaque para o último acréscimo medido de 0,72‰, resultando na deformação total de 2,57 ‰.

4.7.2 Parede de adobe com sisal

A seguir encontra-se a Tabela 4.16 com os resultados, a Figura 4.35 apresenta o gráfico da Força em função do deslocamento e a Figura 4.36 apresenta um recorte do gráfico para melhor visualização dos dados iniciais.

Tabela 4.16: Compilação de resultados e dados da parede de adobe com sisal.
Fonte: Autor.

| Parede de adobe com sisal | | | | |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------------|------|
| Espessura | 0,125m | Força de ruptura | 102500 N | |
| Comprimento | 1,03m | Tensão de ruptura | 0,796 MPa | |
| Altura | 1,055m | L de referência | 670 mm | |
| Área da seção | 128750 mm ² | | | |
| F (kN) | Δ_Acum | Tensão [MPa] | Deformação nominal [‰] | |
| 1º Ciclo | 0 | 0 | 0,00 | 0 |
| | 10 | 0,02 | 0,08 | 0,03 |
| | 20 | 0,03 | 0,16 | 0,04 |
| | 30 | 0,05 | 0,23 | 0,07 |
| | 40 | 0,09 | 0,31 | 0,13 |
| | 50 | 0,15 | 0,39 | 0,22 |
| | 60 | 0,23 | 0,47 | 0,34 |
| 2º Ciclo | 0 | 0,03 | 0,00 | 0,04 |

| | | | |
|-----|------|------|------|
| 20 | 0,11 | 0,16 | 0,16 |
| 40 | 0,2 | 0,31 | 0,30 |
| 60 | 0,29 | 0,47 | 0,43 |
| 70 | 0,41 | 0,54 | 0,61 |
| 80 | 0,61 | 0,62 | 0,91 |
| 90 | 0,97 | 0,70 | 1,45 |
| 100 | 5,31 | 0,78 | 7,93 |
| 110 | - | - | - |

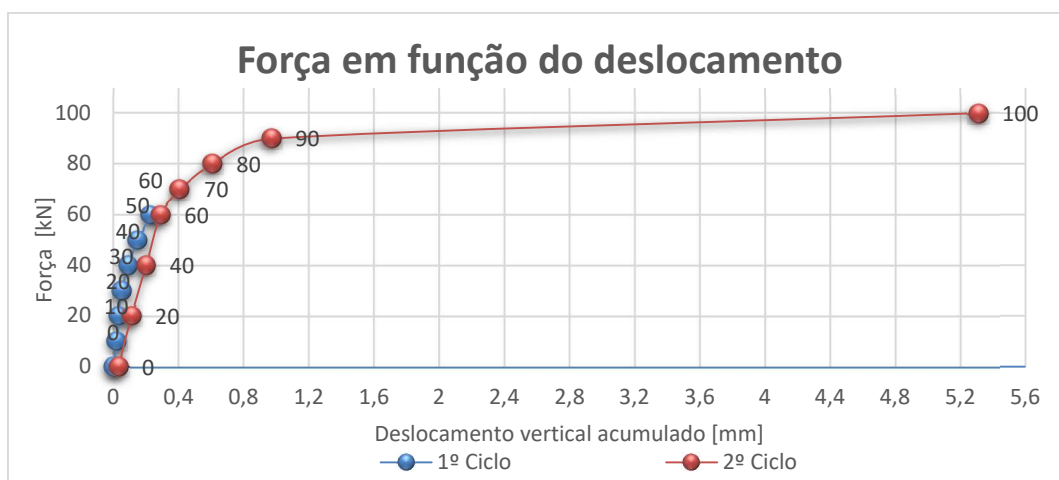


Figura 4.35: Gráfico da Força em função do deslocamento para parede de adobe sem sisal. Fonte: Autor.

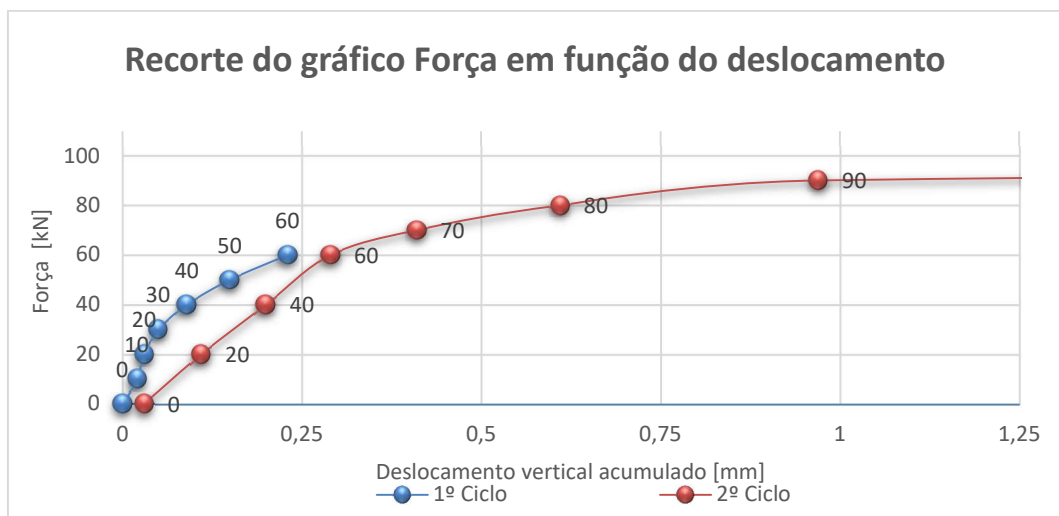
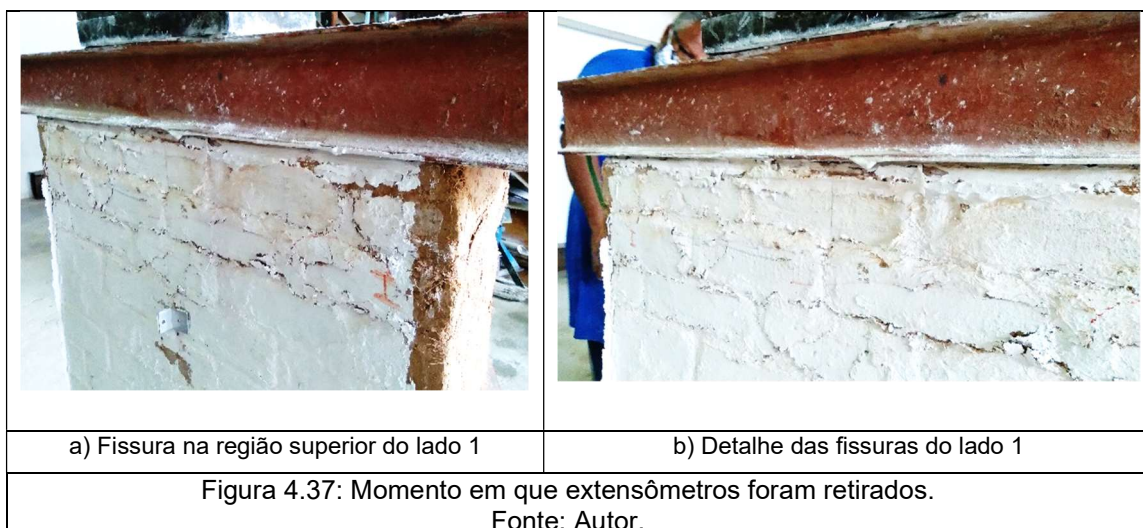


Figura 4.36: Recorte do gráfico da Figura 29 com enfoque ao deslocamento vertical acumulado de até 1,25mm. Fonte: Autor.

As primeiras fissuras foram notadas apenas no lado 1 da parede, pouco antes dos extensômetros serem removidos. As 3 fiadas superiores apresentaram fissuras ao longo do plano horizontal, seguindo o caminho da argamassa conforme exposto na Figura 4.37. Os extensômetros foram removidos na tensão de 0,78 MPa para não serem danificados.



A seguir encontram-se nas Figuras 4.38 e 4.39 os gráficos da Tensão pela Deformação e um recorte para facilitar a visualização da curva inicial.

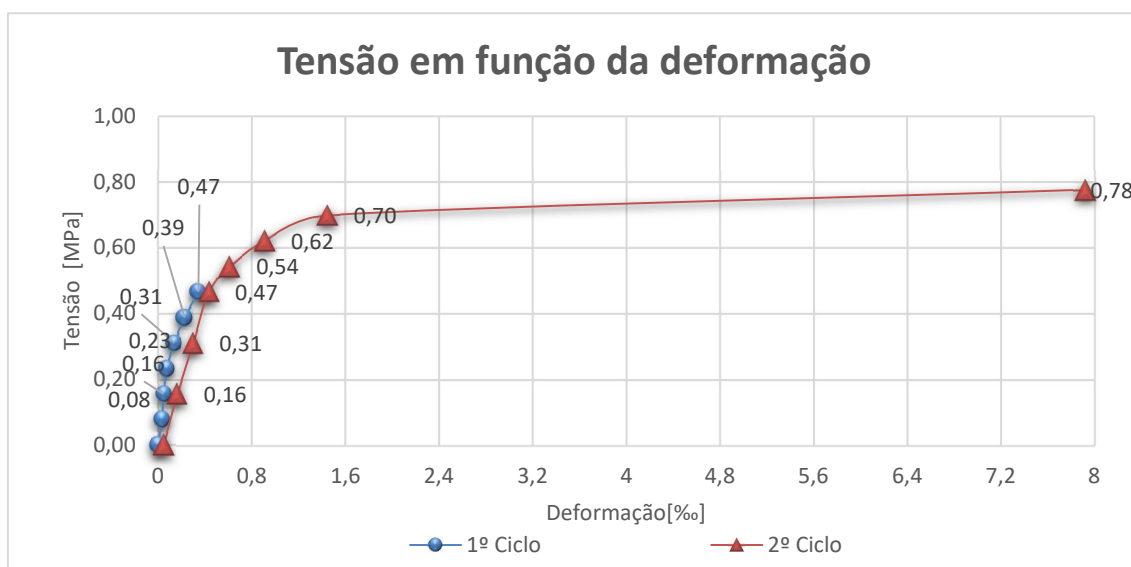


Figura 4.38: Gráfico da tensão em função da deformação para a parede de adobe com sisal.
Fonte: Autor.

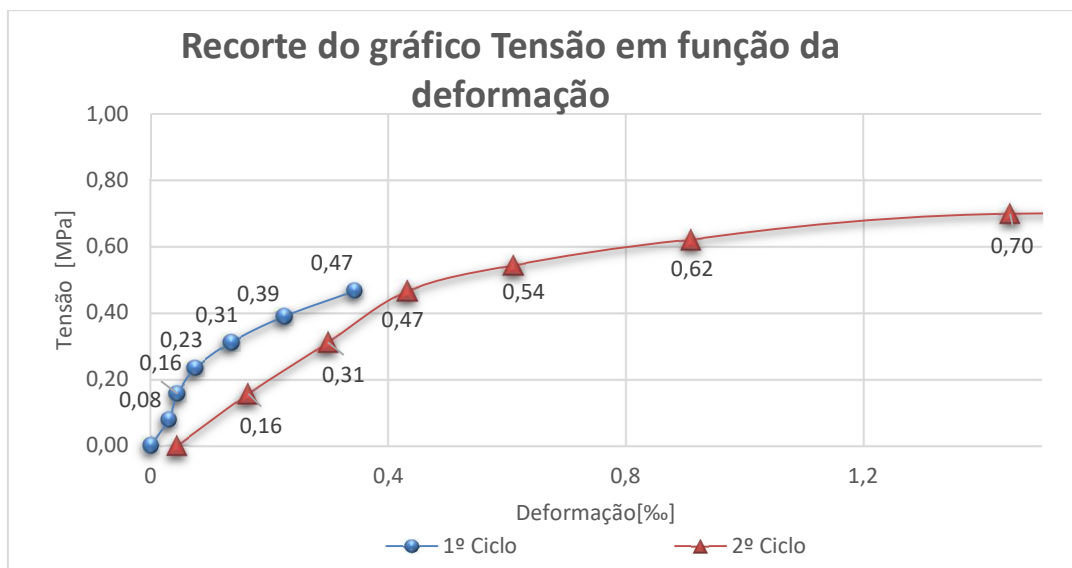


Figura 4.39: Recorte do gráfico da Figura 32 com enfoque na Tensão até 0,70 MPa.
Fonte: Autor.

A parede de adobe com sisal apresentou grande capacidade de deformação, principalmente quanto mais perto da ruptura. Na última deformação medida, houve incremento de 5,46 vezes em relação a toda deformação acumulada ao ponto anterior (1,45‰), chegando a atingir 7,92‰ na última tensão aferida. Reafirmando a grande deformação visualizada durante o ensaio dos corpos de prova de adobe testados a compressão

Outro ponto importante observado foi a fase elástica da parede. No fim do 1º ciclo sob a tensão de 0,47MPa a deformação acumulada era de 0,34‰, ao ser removida toda carga a deformação registrada voltou para 0,04‰, cerca de 11,7% do registrado ao fim do 1º ciclo.

O colapso da parede se deu pela excentricidade e desaprumo, difíceis a evitar no ensaio experimental. Na Figura 4.40 vê-se a iminência do colapso, ocorrido mais por instabilidade que por falha do material.



a) Parede em desaprumo



b) Parede na eminência do tombamento



c) Lado 1 da parede no momento da foto a)



d) Lado 1 da parede no momento da foto b)

Figura 4.40: Momento de rompimento da parede em ambos os lados. Fonte: Autor.

Como o macaco hidráulico tem liberdade de movimentação e não há contenção lateral no topo da parede, na realidade tem-se uma peça cujo comprimento de flambagem, L_e , é o dobro da sua altura. Considerando que sua altura é 1,05 m, $L_e = 210$ cm. Sendo a espessura 12,5 cm, sua esbelteza pode ser considerada igual a:

$$\lambda = 210/12,5 = 16,8.$$

Segundo a ABNT NBR 16814 (2020) - Adobe: requisitos e métodos de ensaio, o índice de esbelteza (λ) da alvenaria estrutural, não deve exceder a 15. Portanto a parede ensaiada tem esbelteza elevada, daí a ruptura por instabilidade.

4.7.3 Discussão dos resultados

Nesta seção encontra-se a comparação entre os resultados das paredes, os ciclos estão analisados separadamente para melhor visualização das curvas obtidas. Na Figura 4.41 encontra-se a curva de Tensão em função da deformação para o 1º ciclo de carregamento.

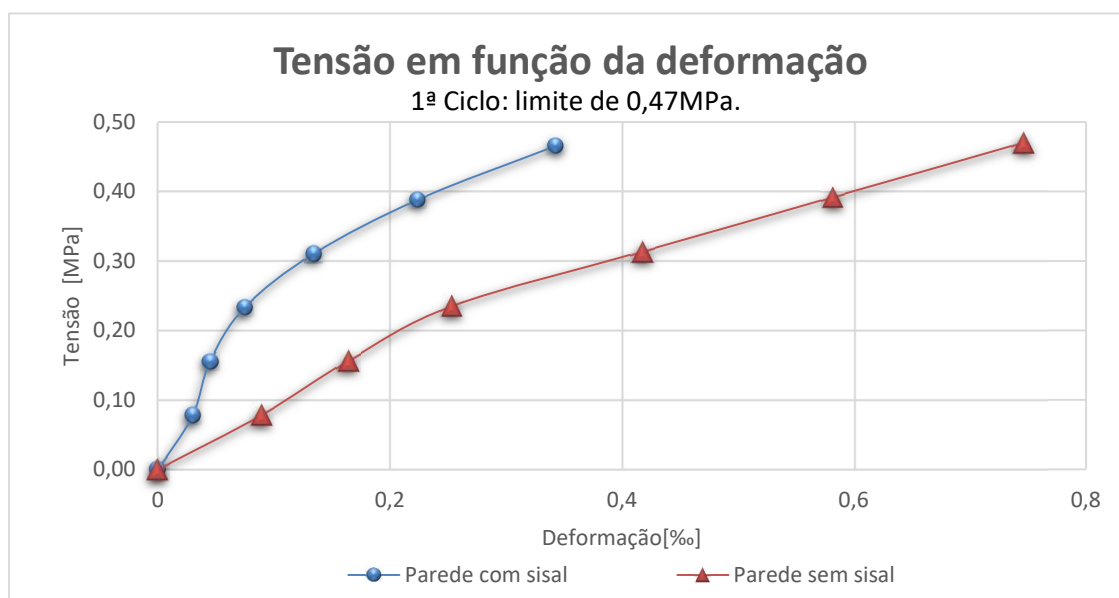


Figura 4.41: Tensão média em função da deformação média do 1º ciclo de carregamento para ambas as paredes. Fonte: Autor.

No 1º ciclo de carregamento a parede com sisal apresentou deformação inferior a parede com sisal em todas as tensões analisadas. No fim deste ciclo, a amostra com sisal deformou apenas 46% do registrado para a amostra sem sisal sob a mesma tensão.

Essa menor deformação é atribuída a presença das fibras nos adobes e na argamassa. O sisal ao ser incorporado nestes elementos espalha-se de forma uniforme e aleatória, formando malhas em todas as direções que tendem a manter o adobe inteiro sob os esforços decorrentes do ensaio de compressão.

Na Figura 4.42 encontra-se a curva de Tensão em função da deformação para o 2º ciclo de carregamento.

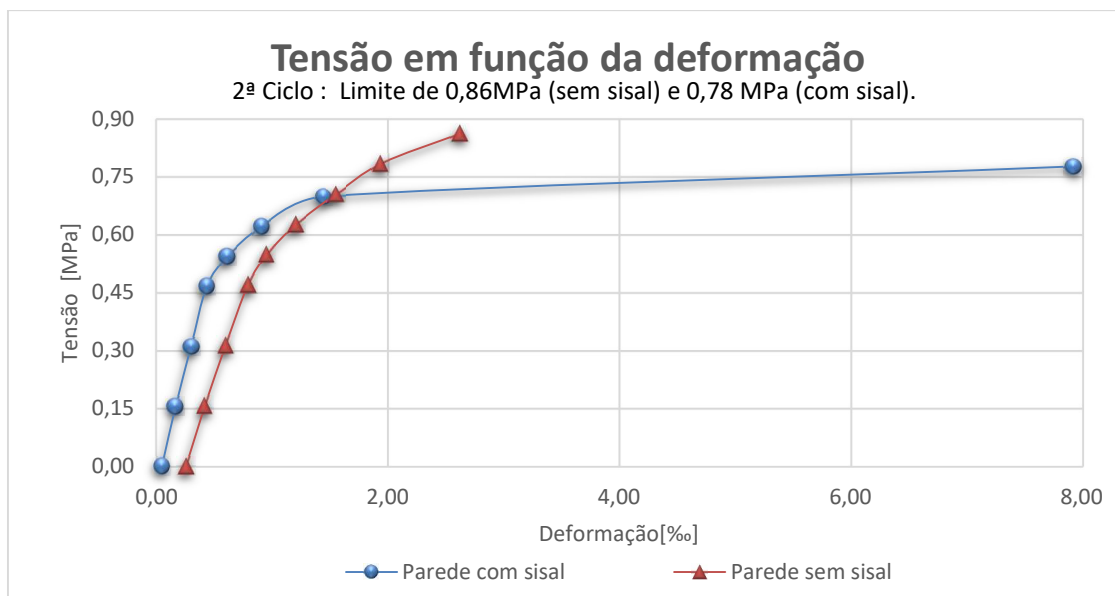


Figura 4.42: Tensão média em função da deformação média do 2º ciclo de carregamento para ambas as paredes. Fonte: Autor.

A curva da tensão em função do 2º ciclo apresentou comportamento semelhante ao do 1º ciclo. A deformação obtida para a parede com sisal foi menor em praticamente todo o ensaio. A exceção ocorreu apenas na última tensão em que a parede com sisal foi submetida, neste momento a deformação da parede com sisal apresentou deformação 308% maior quando compara a mesma tensão da parede sem sisal.

A parede com sisal apresentou fase elástica superior a sem sisal. No início do 2º ciclo (sem aplicação de tensão) a parede com sisal acumulou 11,6% da deformação medida ao fim do 1º ciclo, nestas mesmas condições a parede sem sisal acumulou 33,3%.

Observando as curvas das duas paredes, vê-se que a parede sem sisal apresenta a curva típica de materiais frágeis, onde não há grandes deformações antes da ruptura. Para a parede com sisal a curva tem característica de materiais dúcteis, pois apresentou grande capacidade de deformação.

Comparando os resultados de resistência a compressão com o da literatura, obtemos a Tabela 4.17:

Tabela 4.17: Compilação de resultados da compressão de parede de adobe. Fonte: Autor.

| Amostra | Autor | Tensão de ruptura da parede | Tensão de ruptura do adobe | Relação |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|
| | | [MPa] | [MPa] | |
| | | (a) | (b) | $\frac{(a)}{(b)}$ |
| Parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal | Próprio Autor | 0,904 | 1,83 | 0,494 |
| Parede de adobe | Parajuli (2020) | 0,865 | - | - |
| Parede de adobe | Rodríguez-Mariscal E Solís (2020) | 1,43 | 1,13 | 1,265 |
| Parede de adobe | Silveira (2015) | 0,766 | 1,08 | 0,71 |
| Parede de adobe | Varum (2007) | 1,163 | 1,35 | 0,861 |
| Média | | | | 0,833 |
| Parede de adobe alcalinamente ativado com sisal | Próprio Autor | 0,796 | 3,33 | 0,239 |
| Parede de adobe com palha | Abdulla (2020) | 1,24 | 1,59 | 0,78 |
| Parede de adobe com palha 1:0,8 (Solo: areia) | Wu (2013) | 0,88 | 1,7 | 0,518 |
| Parede de adobe com palha 1:1,0 (Solo: areia) | Wu (2013) | 0,98 | 1,66 | 0,590 |
| Parede de adobe com palha 1:1,2 (Solo: areia) | Wu (2013) | 0,95 | 1,39 | 0,683 |
| Média | | | | 0,562 |

O intervalo de resultado encontrados para paredes de adobe sem fibras variou de 0,77 MPa a 1,16 MPa e para paredes de adobe com fibra foi de 0,80 MPa a 1,24 MPa. Foi possível estabelecer uma relação entre a resistência a compressão das paredes e dos corpos de prova de adobe, em média o adobe sem fibras apresentou relação de 0,833 e o adobe com fibras de 0,562.

O resultado do rompimento a compressão da amostra da parede sem fibra deste trabalho encontrou-se no espectro intermediário do intervalo encontrado pelos autores. Para a ruptura do adobe, esta mesma amostra obteve o melhor desempenho. Deste modo ao ser analisada a relação da tensão de ruptura da parede sobre a ruptura do adobe, foi obtido o menor resultado entre as amostras.

Para as amostras com fibra o resultado deste trabalho encontrou-se de forma semelhante ao dos autores. A parede com sisal obteve a menor tensão de ruptura, mas os adobes obtiveram a maior tensão de ruptura. Assim, a relação entre as tensões encontradas foi a menor de todas as amostras.

Embora a relação das duas paredes deste trabalho tenha ficado abaixo das obtidas por outros autores, isto pode ser devido às demais paredes terem uma esbeltez menor que a deste trabalho.

5 Considerações Finais

A ativação alcalina dos adobes mostrou-se efetiva para melhorar significativamente suas propriedades físicas e mecânicas. Usando-se apenas uma proporção de 2,2% do ligante alcalino, ele permitiu tornar o material estável com relação à água, mesmo em imersão por 24 horas. A ativação alcalina reduz a quantidade de água necessária para a produção de adobes. O tempo de cura, pode ser reduzido, e no caso, passou-se de 30 dias para os adobes de referência para 17 dias naqueles alcalinamente ativados. A resistência a compressão foi incrementada, com a presença do ligante alcalino.

No caso, o ligante alcalino original era composto pelo precursor (metacaulim) e os ativadores silicato de sódio e hidróxido de sódio. Com esses ativadores o tempo de pega era muito curto, dificultando a moldagem. Então o hidróxido de sódio foi substituído por hidróxido de cálcio, aumentando bastante o tempo em que a mistura terra-água-ligante alcalino permanecia no estado plástico.

Do ponto de vista térmico em pequenas paredes, a adição de sisal favoreceu a redução na temperatura da face fria quando comparada à amostra sem sisal. Os ensaios mostraram que a pintura de cal é uma importante forma de diminuir a temperatura absorvida pelas alvenarias

A adição da fibra de sisal mostrou-se bem-sucedida para incrementar as propriedades mecânicas e térmicas do adobe. Nas propriedades mecânicas há destaque para o substancial incremento da capacidade de deformação, o que é visto no ensaio da resistência à compressão dos corpos de prova. Quanto à resistência a compressão, houve incremento das amostras alcalinamente ativadas e com sisal frente as amostras deste trabalho sem sisal. Comparando-se com resultados de outros autores, o material desenvolvido no presente trabalho teve, em geral, melhor desempenho.

Os resultados encontrados são animadores devido a pequena proporção (2,2%) de ativadores alcalinos em relação ao peso total de solo e pelo método de cura utilizada que não requerer tratamento térmico – todas as amostras foram curadas a sombra na temperatura ambiente. Importante seria a difusão desta nova técnica como tecnologia social, pois torna possível a produção de adobes mais resistentes e de baixo custo.

5.1 Sugestões para próximos trabalhos

- a) Estudar alternativa para remoção e ou substituição do silicato de sódio por material mais facilmente encontrado nas cidades nordestinas;
- b) Avaliar a influência do percentual de fibra de sisal nas propriedades mecânicas do adobe e da parede;
- c) Analisar o desempenho mecânico do adobe com outros tipos de fibra;
- d) Investigar as propriedades do adobe a flexão após incorporação da fibra de sisal e estabelecer correlação com a resistência a compressão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLA, Kurdo F.; CUNNINGHAM, Lee S.; GILLIE, Martin. Experimental Study on the Mechanical Properties of Straw Fiber–Reinforced Adobe Masonry. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 32, n. 11, p. 04020322, 2020.

ALTAN, E; ERDOĞAN, Sinan T. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 131-139, 2012.

ALVARENGA, Cristiane Bom Conselho Sales. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal**. 2018. 81 f. Dissertações (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Materiais de Construção Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANDY GILHAM. **Grande Mesquita de Djenné**. 2003. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Image:Great_Mosque_of_Djenn%E9_1.jpg>. Acesso em: 10 dez. 2019.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil: Fatores de Conversão**. 2007. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_fatoresdeconversao_index.pdf. Acesso em: 22 de julho de 2019

AQUINO W., LANGE D. A., OLEK J., **The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of álcali-silica reaction products**. Cement and Concrete Composites, Vol. 23, p. 485-493, 2001.

AREDES, Fernanda Gomes Mendes. **Estudo da influência da temperatura na cura de um Geopolímero à base de metacaulinita**. 80f. Tese de mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 16814**: Adobe — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro – RJ. 2020. 32p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-5**: Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico - Rio de Janeiro – RJ. 2005. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. - Rio de Janeiro – RJ. 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro – RJ. 2018. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro – RJ. 2018. 05p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro – RJ. 2016. 03p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro – RJ. 2012. 04p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS - ANFACER (São Paulo). **História da Cerâmica**. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/historia-ceramica>>. Acesso em: 19 fev. 2019.

AZEVEDO, A. G. de S. *et al.* Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na₂O e Na₂SiO₃. **Cerâmica**, v. 63, n. 366, p. 143-151, 2017.

AZEVEDO, A. M.; **Síntese e caracterização química, física e mecânica de geopolímero utilizando caulim da amazônia desidroxilizado**. 2017. 41 f. Dissertação 65 (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Terra crua para edificações**. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciências e Engenharia de Materiais**. [S.I.] IBRACON, 2007. p. 1505-1538.

BBC. **The race to cover a Mali mosque in mud**. 2015. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/world-africa-32485152>>. Acesso em: 13 dez. 2019.

BERGAYA, Faiza; LAGALY, Gerhard. General introduction: clays, clay minerals, and clay science. **Developments in clay science**, v. 1, p. 1-18, 2006.

BERNI, Mauro Donizeti; BAJAY, Sérgio Valdir; GORLA, Felipe D. Oportunidades de eficiência energética na indústria: relatório setorial do setor cerâmico. Brasília: CNI, 2010, 75 p. ISBN 978-85-7957-008-7.

BEZERRA, I. M. T. et al; Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 8, n. 2, p. 101-105, 2013.

BLEAM, William F. **Soil and Environmental Chemistry**. 2. ed. Madison - Wi: Academic Press, 2016. 563 p. ISBN 978-0-12-804178-9.

BOAS, Bruno Villas; CONCEIÇÃO, Ana. Déficit de moradias no país já chega a 7,7 milhões. **Valor Econômico**, Rio de Janeiro e São Paulo, v. 3, 2018. Disponível em: < <https://valor.globo.com/brasil/noticia/2018/05/03/deficit-de-moradias-no-pais-ja-chega-a-77-milhoes.ghml>>. Acesso em: 20 dez. 2019.

CALABRIA, Juliana A.; VASCONCELOS, Wander L.; BOCCACCINI, Aldo R. Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. **Ceramics International**, v. 35, n. 2, p. 665-671, 2009.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma introdução, 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CAMPBELL, Donald H.; FOLK, Robert T L. Ancient Egyptian Pyramids--Concrete or Rock. **Concrete International**, v. 13, n. 8, p. 28, 30-39, 1991.

CARTER, Barry C; NORTON, Grant M. **Ceramic Materials: science and engineering**. Washington: Springer, 2007. 716 p.

CEZAR, Peter. **Reboco para adobe**. 2014. Disponível em: <<http://marcenariade-cacamba.blogspot.com/2014/05/reboco-para-adobe.html>>. Acesso em: 08 abr. 2020.

CILLA, M.; MORELLI, M.. Effect of the alkaline activator on the refractoriness of a geopolymer containing metakaolin and fly-ash. **Materials Sciences and Applications**. 2012.

COISAS DA ROÇA. **Taipa da antiguidade até os dias atuais entrelaçando construções**. 2017. Disponível em: <<https://www.coisasdaroca.com/coisas-antigas-da-roca/taipa.html>>. Acesso em: 06 abr. 2020.

COSTA, Cristiana *et al.* Development of Geopolymers Formulations Based on Low-Grade Kaolins as a Potential Construction Material. **Preprints**. 2019.

COSTA, Cristiana *et al.* The sustainability of adobe construction: past to future. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 5, p. 639-647, 2019.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications-Market trends and Potential breakthroughs**. Geopolymer. 2002.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer: chemistry and applications**. Institute Geopolymere, Saint-Quentin, France, 2008.

DUXSON, Peter *et al.* Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of materials science**, v. 42, n. 9, p. 2917-2933, 2007.

ECOCENTRO IPEC. **Como fazer adobe**. 2016. Disponível em: <<https://sara-cura.org/2016/06/04/como-fazer-adobe/>>. Acesso em: 04 dez. 2019.

ELERT, Kerstin *et al.* Performance of alkaline activation for the consolidation of earthen architecture. **Journal of Cultural Heritage**, v. 39, p. 93-102, 2019.

ELERT, Kerstin; PARDO, Eduardo Sebastián; RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos. Alkaline activation as an alternative method for the consolidation of earthen architecture. **Journal of Cultural Heritage**, v. 16, n. 4, p. 461-469, 2015.

FÉLIX, Adriano da Silva. **Ativação Alcalina de Blocos de Terra Crua**. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

FILIPE, José Miguel Rocha. **Ativação alcalina de lamas residuais das minas da Panasqueira incorporando vidro moído**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

FOUCHAL, Fazia *et al.* Experimental evaluation of hydric performances of masonry walls made of earth bricks, geopolymer and wooden frame. **Building and Environment**, v. 87, p. 234-243, 2015.

GANDREAU, D.; DELBOY, L.; JOFFROY, T. **Inventory of Earthen Architecture UNESCO - UNITED NATION'S EDUCATIONAL, S. A. C. O.: World Heritage Earthen Architecture Programme (WHEAP):** 206 p. 2012

GATE (Alemanhã). **Soil block presses.** 1988. Disponível em: <http://www.nzdl.org/gsdImod?e=d-00000-00---off-0hdl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-1l--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0--4----0-0-11-10-OutfZz-8-10&cl=CL1.16&d=HASH4edbf917bee4e6ae86aa2c.24>=2>. Acesso em: 10 abr. 2020.

GRANIZO, M. L. **Activation alcalina de metacaolim: desarrollo de nuevos materiales cementantes.** Tese de doutorado, Universidade autônoma de Madrid, Espanha. 1998.

GIADA, Giuffrida; CAPONETTO, Rosa; NOCERA, Francesco. Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. **Sustainability**, v. 11, n. 19, p. 5342, 2019.

GOMES, Emmily Gersica Santos. **Desempenho térmico de alvenarias: uma alternativa com o uso de blocos EVA.** 2015. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

ILLAMPAS, Rogiros; IOANNOU, Ioannis; CHARMPIS, Dimos C. Adobe bricks under compression: experimental investigation and derivation of stress-strain equation. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 83-90, 2014.

JOHN, Vanderley Moacyr. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio.** 1995. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (PCC-USP), São Paulo - Sp, 1995.

KAFODYA, Innocent; OKONTA, Felix; KLOUKINAS, Panos. Role of fiber inclusion in adobe masonry construction. **Journal of Building Engineering**, v. 26, p. 100904, 2019.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. The comparison between álcali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements. **Cement and Concrete Research**, v. 40, ed. 9, p. 1341-1349, 2010.

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. **Cement and concrete research**, v. 40, n. 9, p. 1341-1349, 2010.

LI, Zhenming *et al.* Chemical deformation of metakaolin based geopolymer. **Cement and Concrete Research**, v. 120, p. 108-118, 2019.

LONGHI, Márlon Augusto. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e silicato de sódio alternativo.** 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Ufrgs, Porto Alegre, 2015.

MA, Chau-Khun; AWANG, Abdullah Zawawi; OMAR, Wahid. Structural and material performance of geopolymers concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 90-102, 2018.

MACCARINI, H. S.. **Desenvolvimento de geopolímero a partir do uso de metacaulim**. 2015. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MACLEOD, Finn. **Manhattan do deserto**: Shibam, a antiga cidade de arranhacéus do Iêmen. 2015. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/771385/manhattan-do-deserto-shibam-a-antiga-cidade-de-arranha-ceus-do-iyemen>. Acesso em: 01 mar. 2020.

MANCILHA, D. B. M.. **Síntese e caracterização de materiais geopoliméricos**. 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Ita, São José dos Campos,, 2012.

MARQUES, Luísa Sant Ana. **Investigação sobre o comportamento térmico do adobe para as necessidades climáticas e normativas brasileiras**. 2018. 71 f. Monografia (Especialização) - Curso de Sistemas Tecnológicos e Sustentabilidade, Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MARTINS, Graciane. **Hiperadobe x Superadobe**. 2016. Disponível em: <http://mcmvconstrucao.blogspot.com/2016/02/hiperadobe-x-superadobe.html>. Acesso em: 08 abr. 2020

MARTINS, Tiago; FERNÁNDEZ, Jaime; VARUM, Humberto. Influence of Moisture on the Mechanical Properties of Load-Bearing Adobe Masonry Walls. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 13, n. 6, p. 841-854, 2019.

MINKE, Gernot. **Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável**. São Paulo: B4 Editores, 225p, 2015.

MUÑOZ, P. *et al.* Improving the thermal transmittance of single-brick walls built of clay bricks lightened with paper pulp. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 171-180, 2013.

MURTA, F.; **Produção de argamassas a partir da ativação alcalina de metacaulim de resíduos de tijolo moído por cales virgem e hidratada**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF (Dissertação de mestrado), 2008.

MUSEU DE CACULE (Caculé). **Construção em Adobe**. 2016. Disponível em: <https://museudecacule.wordpress.com/2016/03/01/construcao-em-adobe/>. Acesso em: 13 dez. 2019.

NAVARRO, Rômulo Feitosa. A evolução dos materiais. parte1: da pré-história ao início da era moderna. **Revista eletrônica de materiais e processos**, v. 1, n. 1, p. 01-11, 2006.

OLIVEIRA, Leandro Santos de. **Estabilização de blocos de terra crua através de ativação alcalina**. 2015. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa,

2015. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/9129?locale=pt_BR. Acesso em: 02 ago. 2019.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, Said. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and building materials**, v. 29, p. 512-519, 2012.

PACHECO-TORGAL, Fernando; CASTRO-GOMES, Joao; JALALI, Said. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1305-1314, 2008.

PALOMO, Angel; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and concrete research**, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PARAJULI, Rishi Ram; FURUKAWA, Aiko; GAUTAM, Dipendra. Experimental characterization of monumental brick masonry in Nepal. In: **Structures**. Elsevier, 2020. p. 1314-1321.

PELISSER, F. *et al.* Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 3, p. 535-543, 2018.

PEREIRA, A. P. dos S.; RAMOS, F. J. H. T. V.; SILVA, M. H. P.. Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria LD e escória de aciaria LF com KOH. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 3, 2020.

PIANI, T. Li *et al.* Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: The role of fibres and water content at various loading rates. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 117038, 2020.

PINTO, A. T. Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Ativação Alcalina (Geopolimerização). **Construção Magazine**, 2002.

PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3ª edição. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2006.

PREIRA, D. S. de T. *et al.* Comparative analysis between proprieties and microstructures of geopolymeric concrete and Portland concrete. **Journal of materials research and technology**. v. 7, n. 4, p. 606-611, 2018.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110-125, 2015.

PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jan Stephanus Jakob (Ed.). **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Elsevier, 2009.

QUAGLIARINI, Enrico; LENCI, Stefano. The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks. **Journal of Cultural Heritage**, v. 11, n. 3, p. 309-314, 2010.

REDE GLOBO. **Mal de Chagas: Brasil tem cerca de dois milhões de portadores da doença**: Doença foi descoberta há 105 anos pelo brasileiro Carlos Chagas. 2014. Disponível em: <http://glo.bo/Qv5xyh>. Acesso em: 05 abr. 2020

RÉNOVER & CONSTRUIRE EN PISÉ. **La technique du pisé**. Disponível em: <http://pise-livradois-forez.org/spip.php?page=expo4>. Acesso em: 06 abr. 2020.

RODRIGUES, Alessandro Roger *et al.* **Desenho Técnico Mecânico**: projeto e fabricação no desenvolvimento de produtos industriais. São Paulo - Sp: Elsevier Brasil, 2015. 512 p.

RODRÍGUEZ-MARISCAL, J. D.; SOLÍS, M. Hacia una metodología para la caracterización experimental del comportamiento a compresión de la mampostería de adobe. **Informes de la Construcción**, v. 72, n. 557, p. e332-e332, 2020.

ROVNANÍK, P.. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and building materials**, v. 24, n. 7, p. 1176-1183, 2010.

RYU, Gum Sung *et al.* The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 409-418, 2013.

SAMPAIO, Elsa. **Mineralogia do Solo**. Evora: Universidade de Évora, 2011. 21 p. Disponível em: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/4499>. Acesso em: 24 abr. 2020.

SEVERO, C. G. S. *et al.* Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, p. 55-67, 2013.

SILVA, Amanda Meira da. **Caracterização química e mineralógica de zeólitas naturais com potencial para aplicação em tratamentos de efluentes**. 2016. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Departamento Acadêmico de Química - DAQUI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ufpr, Pato Branco, 2016.

SILVA, Fernanda Monique da. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER INSATURADO REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES ORIENTAÇÕES UTILIZANDO CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/2199>. Acesso em: 03 jul. 2021.

SILVA, M. L. S *et al.* Análise de geopolímeros a partir de diferentes ativadores alcalinos. In: **Encontro de engenharia, ciência de materiais e inovação do estado do rio de janeiro**, 1. Anais... Nova Friburgo, 2015.

SILVEIRA, Dora *et al.* Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 36-44, 2012.

SILVEIRA, Dora et al. Mechanical properties and behavior of traditional adobe wall panels of the Aveiro district. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 04014253, 2015.

SINGH, B. *et al.* Geopolymer concrete: A review of some recent developments. **Construction and building materials**, v. 85, p. 78-90, 2015.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, v. 1, 2a Ed., Ed. Edgard Blücher Ltda, 1989.

SUN, Z.; VOLLPRACHT, A. One year geopolymerisation of sodium silicate activated fly ash and metakaolin geopolymers. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 98-110, 2019.

TEMUJJIN, J.; WILLIAMS, R. P.; VAN RIESSEN, A. Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. **Journal of materials processing technology**, v. 209, n. 12-13, p. 5276-5280, 2009.

VASSALO, E. A. de S.. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

VARUM, Humberto et al. Mechanical characterization of adobe masonry walls. In: **Proceedings of the 13th conference of sociedade portuguesa de materiais and IV international materials symposium—a materials science forum [CD-ROM]**, Porto, Portugal. 2007.

WEBER, Willi; YANNAS, Simos. **Lessons from Vernacular Architecture**. Abingdon: Routledge, 2014. 240 p.

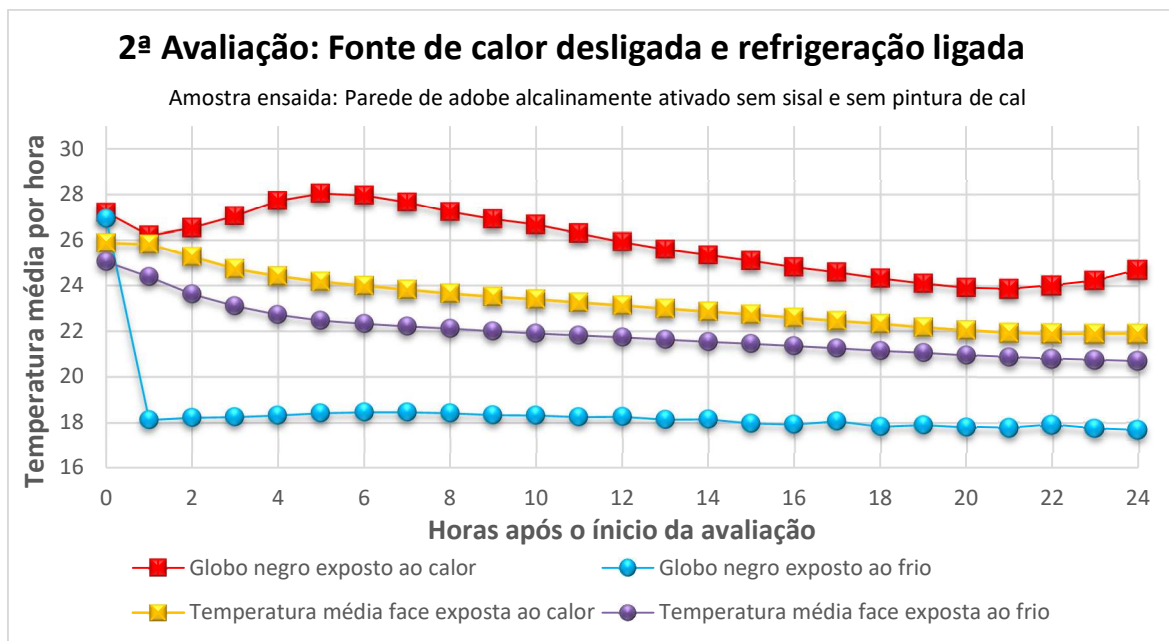
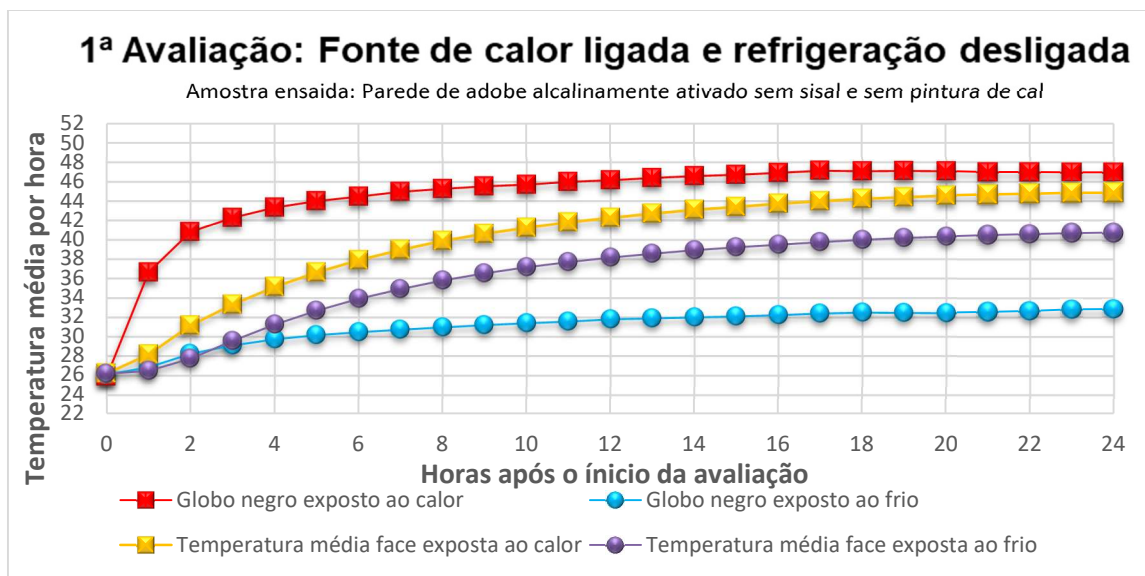
WU, Feng et al. Strength and stress–strain characteristics of traditional adobe block and masonry. **Materials and structures**, v. 46, n. 9, p. 1449-1457, 2013.

ZOROWICH, Ana Clara. **Taipa de mão ou Pau a Pique**. Disponível em: <<http://www.ecoeficientes.com.br/taipa-de-mao-ou-pau-a-pique/>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

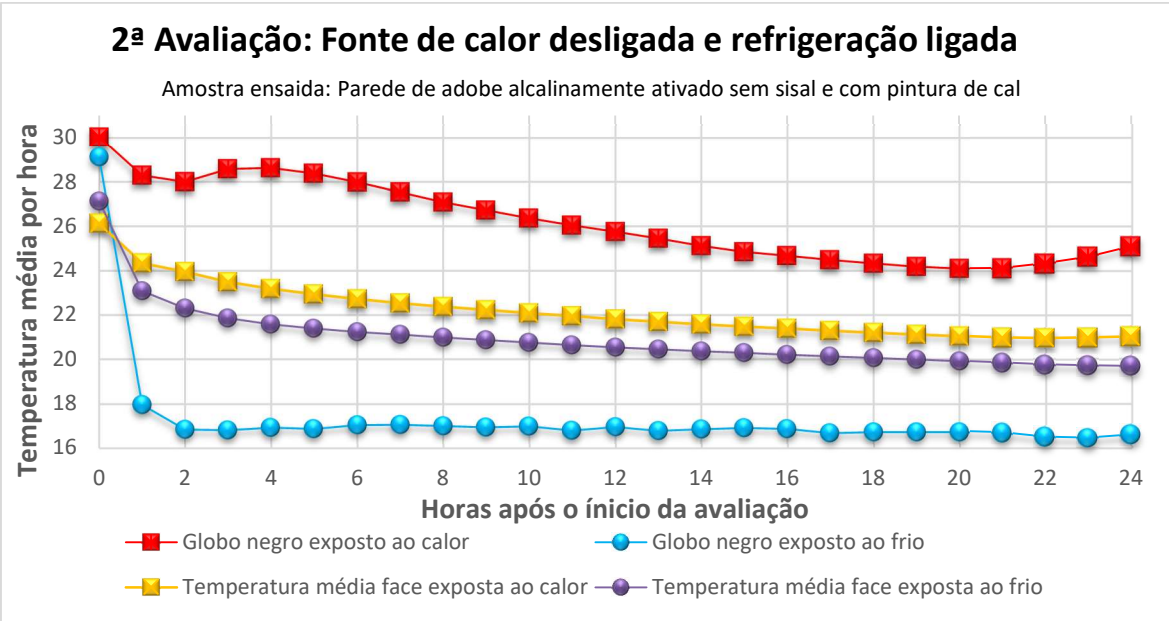
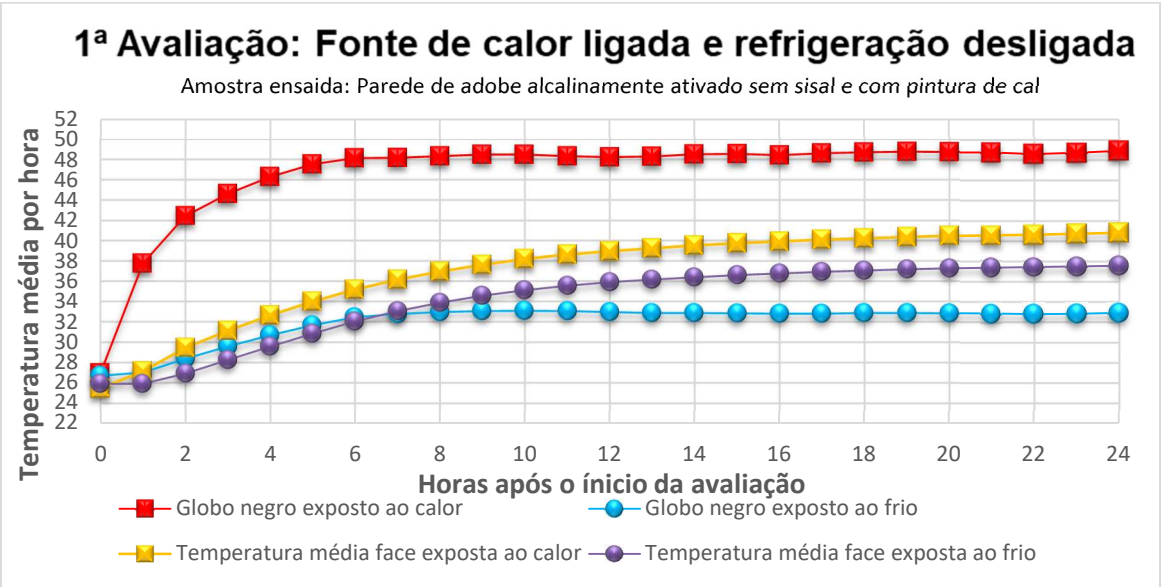
APÊNDICES

APÊNDICE A – Calibração das câmaras térmicas

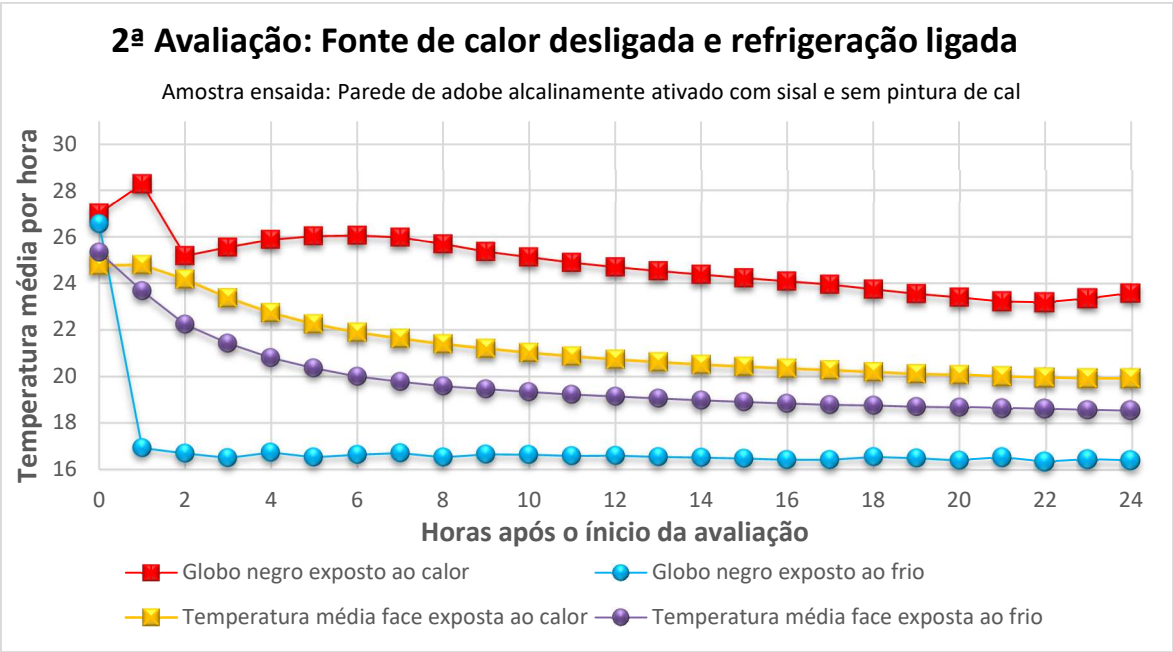
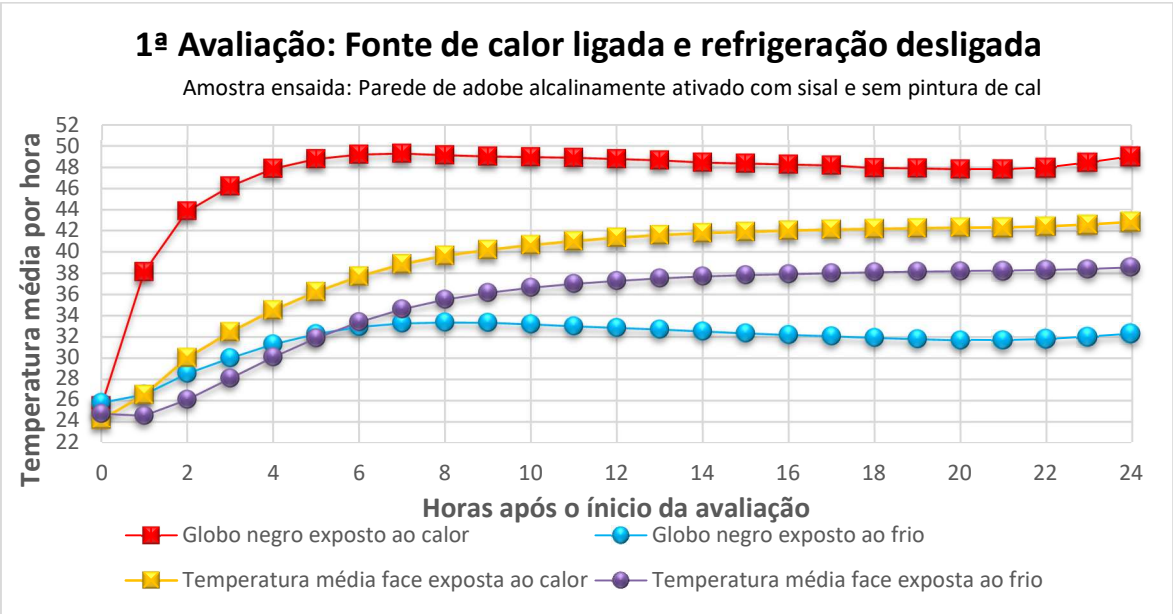
1.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada sem sisal e sem pintura de cal



2.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativado sem sisal e com pintura de cal



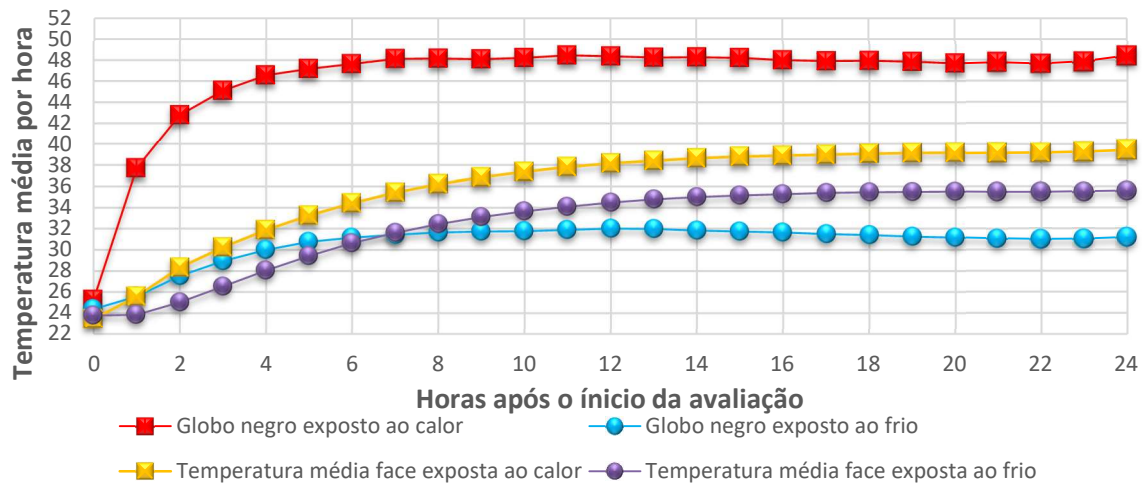
3.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e sem pintura de cal



4.0 Amostra: Parede de adobe alcalinamente ativada com sisal e com pintura de cal

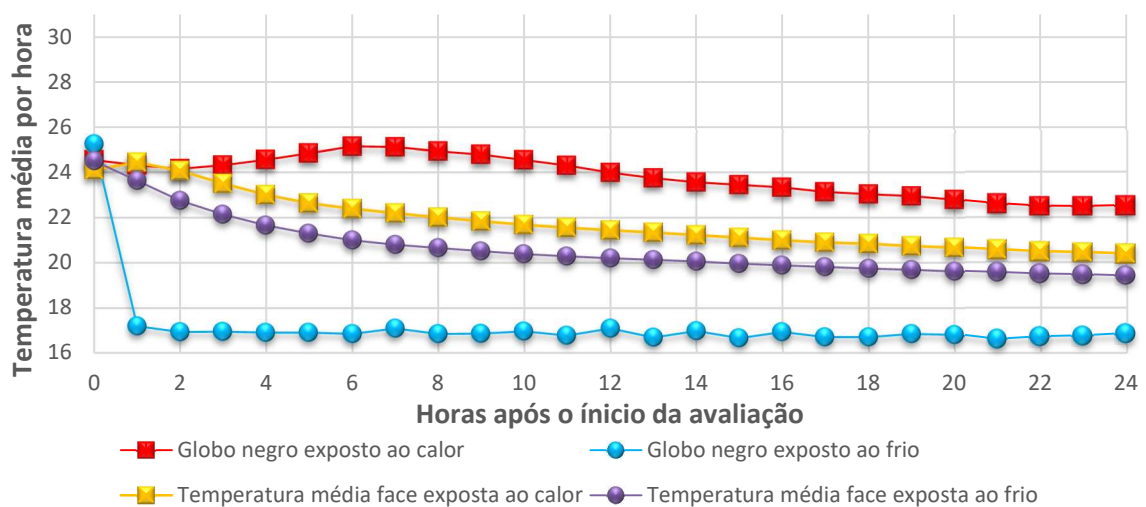
1ª Avaliação: Fonte de calor ligada e refrigeração desligada

Amostra ensada: Parede de adobe alcalinamente ativado com sisal e com pintura de cal



2ª Avaliação: Fonte de calor desligada e refrigeração ligada

Amostra ensada: Parede de adobe alcalinamente ativado com sisal e com pintura de cal



APÊNDICE B - Memória de cálculo do ensaio de desempenho térmico

1.0 Parede de adobe sem sisal

Devido aos adobes e a argamassa serem do mesmo material, a parede foi considerada como homogênea.

Dados iniciais:

| Amostra | Densidade - ρ - ($\frac{kg}{m^3}$) | Condutividade térmica ¹ - λ - ($\frac{W}{m \cdot K}$) | Calor específico ¹ ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) | Altura - h - (m) | Espessura - e - (m) |
|--|--|---|--|---------------------|------------------------|
| Parede sem sisal | 1801,9 | 0,52 | 0,84 | 1,05 | 0,125 |
| ¹ Referência da NBR15220-2003 | | | | | |

a) Resistência térmica de superfície a superfície:

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,125}{0,52} = 0,24$$

b) Resistência térmica de ambiente a ambiente:

$$R_T = R_t + R_{se} + R_{si} = 0,24 + 0,04 + 0,13 = 0,41 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

→ R_{se} e R_{si} obtidos via tabela A.2 da NBR15220-2003

c) Resistência térmica de ambiente a ambiente:

$$C_T = \sum_{i=1}^n e \cdot c \cdot \rho = 0,125 \cdot 0,84 \cdot 1801,9 = 189,2 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

d) Atraso térmico

$$j = 0,7284 \sqrt{R_t \cdot C_T} = 0,7284 \sqrt{0,24 \cdot 189,2} = 6,42 \text{ horas}$$

e) Fator de ganho solar:

1. Parede não pintada de cal

$$FS_0 = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 100 \cdot 2,4367 \cdot 0,80 \cdot 0,04 = 7,80\%$$

Sendo:

→ U : Transmitância térmica, expresso por: $\frac{1}{RT} = 2,4367 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$;

→ α : Absortância à radiação solar, via tabela B.2 NBR15220-2003.

2. Parede pintada de cal

$$F_{s0} = 100 * U * \alpha * R_{se} = 100 * 2,4367 * 0,135 * 0,04 = 1,32\%$$

Sendo:

→ U : Transmitância térmica, expresso por: $\frac{1}{RT} = 2,4367 \left(\frac{W}{m^2 * K} \right)$;

→ α : Absortância à radiação solar, via tabela B.2 NBR15220-2003.

f) Densidade do fluxo de calor:

Dados comuns as paredes:

$$\rightarrow R_T = 0,41 \frac{m^2 * K}{W};$$

$$\rightarrow A (\text{Área da parede exposta}) = 1,00 m^2$$

1. Parede não pintada de cal

ΔT = Diferença de temperatura entre as duas faces da parede em Kelvin: $7,4^\circ C + 273^\circ C = 280,4 K$

$$Q = \frac{\Delta T * R_T * A * \lambda}{e} = \frac{280,4 * 0,41 * 1,00 * 0,52}{0,125} = 1166,46 W$$

2. Parede pintada de cal

ΔT = Diferença de temperatura entre as duas faces da parede em Kelvin: $6,0^\circ C + 273^\circ C = 279,0 K$

$$Q = \frac{\Delta T * R_T * A * \lambda}{e} = \frac{279 * 0,41 * 1,00 * 0,52}{0,125} = 1160,64 W$$

2.0 Parede de adobe com sisal

Devido aos adobes e a argamassa serem do mesmo material, a parede foi considerada como homogênea.

Dados iniciais:

| Amostra | Densidade - ρ - ($\frac{kg}{m^3}$) | Condutividade térmica ¹ - λ - ($\frac{W}{m \cdot K}$) | Calor específico ¹ ($\frac{kJ}{kg \cdot K}$) | Altura - h - (m) | Espessura - e - (m) |
|------------------|--|---|--|---------------------|------------------------|
| Parede sem sisal | 1778,3 | 0,52 | 0,84 | 1,05 | 0,125 |

¹ Referência da NBR15220-2003

g) Resistência térmica de superfície a superfície:

$$R_t = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,125}{0,52} = 0,24$$

h) Resistência térmica de ambiente a ambiente:

$$R_T = R_t + R_{se} + R_{si} = 0,24 + 0,04 + 0,13 = 0,41 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

→ R_{se} e R_{si} obtidos via tabela A.2 da NBR15220-2003

i) Resistência térmica de ambiente a ambiente:

$$C_T = \sum_{i=1}^n e \cdot c \cdot \rho = 0,125 \cdot 0,84 \cdot 1778,3 = 186,72 \frac{kJ}{m^2 \cdot K}$$

j) Atraso térmico

$$j = 0,7284 \sqrt{R_t \cdot C_T} = 0,7284 \sqrt{0,24 \cdot 186,72} = 6,38 \text{ horas}$$

k) Fator de ganho solar:

3. Parede não pintada de cal

$$F_{s0} = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 100 \cdot 2,4367 \cdot 0,80 \cdot 0,04 = 7,80\%$$

Sendo:

→ U : Transmitância térmica, expresso por: $\frac{1}{R_T} = 2,4367 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$;

→ α : Absortância à radiação solar, via tabela B.2 NBR15220-2003.

4. Parede pintada de cal

$$F_{s0} = 100 \cdot U \cdot \alpha \cdot R_{se} = 100 \cdot 2,4367 \cdot 0,135 \cdot 0,04 = 1,32\%$$

Sendo:

→ U : Transmitância térmica, expresso por: $\frac{1}{RT} = 2,4367 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$;

→ α : Absortância à radiação solar, via tabela B.2 NBR15220-2003.

l) Densidade do fluxo de calor:

Dados comuns as paredes:

→ $R_T = 0,41 \frac{m^2 \cdot K}{W}$;

→ A (Área da parede exposta) = $1,00 m^2$

3. Parede não pintada de cal

ΔT = Diferença de temperatura entre as duas faces da parede em Kelvin: $7,0^\circ C + 273^\circ C = 280,0 K$

$$Q = \frac{\Delta T \cdot R_T \cdot A \cdot \lambda}{e} = \frac{280,0 \cdot 0,41 \cdot 1,00 \cdot 0,52}{0,125} = 1164,80 W$$

4. Parede pintada de cal

ΔT = Diferença de temperatura entre as duas faces da parede em Kelvin: $6,6^\circ C + 273^\circ C = 279,6 K$

$$Q = \frac{\Delta T \cdot R_T \cdot A \cdot \lambda}{e} = \frac{279 \cdot 0,41 \cdot 1,00 \cdot 0,52}{0,125} = 1163,14 W$$