

ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE EM ADOBES PRODUZIDOS COM REJEITOS DE MINERAÇÃO

CAPILLARY ABSORPTION IN ADOBES PRODUCED WITH MINING TAILINGS

ABSORCIÓN CAPILAR EN ADOBES PRODUCIDOS CON RESIDUOS MINEROS

JHADE I. C. VIMIEIRO | UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

SOFIA A. L. BESSA, Dra. | UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

LARISSA M. MATIAS | UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

GABRIELLA E. F. BATISTA | UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

DAYANE F. ANDRADE, Me. | UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

RESUMO

Adobe é uma técnica construtiva milenar que emprega blocos maciços de terra moldados em estado plástico e secos ao ar. Apesar das vantagens de conforto e baixa energia incorporada, uma fragilidade em construções com terra é a absorção por capilaridade. Para melhorar a impermeabilização do adobe, adicionar estabilizantes como rejeito e cal hidratada, pode ser pertinente. Este estudo teve como objetivo produzir adobes com diferentes teores de substituição, em massa, do solo por sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF) e analisar a influência da adição de 2% de cal, em massa, na absorção de água por capilaridade (AC) dos adobes. O SRMF foi utilizado nos teores de 50, 60 e 70%. Nas misturas sem adição de cal, a AC aumentou à medida que aumenta o teor de SRMF. Já nas misturas com adição de cal, ocorreu o inverso. Os valores da absorção de água por capilaridade podem ser relacionados à densidade dos adobes.

PALAVRAS-CHAVE

Sedimento de rejeito de minério de ferro; estabilização; método de ensaio.

ABSTRACT

Adobe is an ancient construction technique that uses solid earth blocks molded in a plastic state and dried in the air. Despite the advantages of comfort and low embodied energy, a weakness in adobe constructions is absorption by capillarity. Adding stabilizers such as tailings and hydrated lime is pertinent to improve adobe's waterproofing. This study aims to produce adobes with different levels of mass replacement of soil by iron ore tailings sediment (IOT-S) and to analyze the influence of the addition of 2% lime, by mass, on the capillary water absorption (CWA) of the adobes. IOT-S was used in 50, 60, and 70% content. The CWA increased as the IOTS content increased in the mixtures without added lime. On the other hand, in the mixtures with added lime, the opposite occurred. The values of water absorption by capillarity can be related to density.

KEYWORDS

Iron ore tailings sediment; stabilization; Test Method.

RESUMEN

El adobe es una antigua técnica constructiva que utiliza bloques macizos de tierra moldeados en estado plástico y secados al aire. A pesar de las ventajas en términos de comodidad y bajo consumo energético incorporado, una fragilidad en las construcciones de tierra es la absorción capilar. Para mejorar la



impermeabilización del adobe, debese agregar estabilizadores, como la cal hidratada. Este estudio tuvo como objetivo producir adobes con diferentes proporciones de reemplazo del suelo por residuos de mineral de hierro (RMH) y analizar la influencia de la adición de 2% de cal, en masa, en la capilaridad de los adobes. Se utilizó RMH en proporciones de 50, 60 y 70%. En las mezclas sin adición de cal, los valores de capilaridad aumentó a medida que se aumentó el contenido de RMH. En las mezclas con adición de cal ocurrió lo contrario. Los valores de absorción de agua por capilaridad pueden ser correlacionados con la densidad de los adobes.

PALABRAS CLAVE

Sedimento de estériles de mineral de hierro; estabilización; método de ensayo.

1. INTRODUÇÃO

A absorção por capilaridade é um fenômeno físico que ocorre como consequência da tensão superficial de um líquido em um sistema capilar, o que permite que o líquido penetre em meio aos poros (OHOFUGI *et al.*, 2021). Assim, a ocorrência depende das propriedades físicas e granulométricas do material.

O comportamento da absorção por capilaridade (AC) em componentes construtivos com terra é um dos requisitos normativos essenciais para a realização de uma alvenaria durável (RAIMONDO *et al.*, 2009). Este fato se justifica porque a AC pode alterar algumas propriedades mecânicas do material, uma vez que o acúmulo de umidade em componentes construtivos de terra pode causar deterioração devido ao enfraquecimento hidromecânico pelas mudanças de pressões, alterações na carga hidráulica, e consequente erosão. As patologias relacionadas à umidade são as principais causadoras da deterioração das construções com terra (CIRVINI *et al.*, 2014).

Dentre os componentes construtivos de terra, o adobe é uma técnica milenar de construção que utiliza solo arenoargiloso em estado plástico firme. No processo de produção, o adobe é moldado em formas untadas com areia e desmoldado logo em seguida, para, por fim, ser colocado para secar naturalmente, produzindo blocos maciços (MUNOZ *et al.*, 2020).

Devido ao baixo impacto ambiental agregado ao processo de produção, é uma técnica construtiva importante para diminuir o impacto ambiental negativo da construção civil contemporânea (DEGIRMENCI, 2005).

Uma das vulnerabilidades da técnica do adobe, tal qual outros componentes construtivos de terra, está relacionada aos danos causados pela umidade que podem resultar em uma redução da resistência mecânica. De modo geral, a durabilidade de uma alvenaria de adobe está mais relacionada às características de resistência à água do que à resistência mecânica (BECKETT *et al.*, 2020).

Documentos normativos sugerem que com um projeto arquitetônico adequado, com revestimento e proteção da alvenaria, estes danos não ocorrem (ABNT, 2022a; NZS, 2020). No entanto, para atender às normas aplicadas aos materiais industriais, e para melhorar a competitividade dos componentes construtivos de terra no mercado da construção civil, são esperados critérios de durabilidade mais rigorosos (BUI *et al.*, 2009).

Para melhorar a impermeabilização e, consequentemente, a durabilidade e a resistência mecânica, pode-se realizar a estabilização do solo, que consiste em adicionar

materiais como aglomerantes, produtos químicos ou mesmo outros tipos de solo (MACHADO *et al.*, 2020).

A adição de cal e de cimento como estabilizantes de componentes construtivos de terra é uma prática comum (LOSINI *et al.*, 2023), contudo o cimento aumenta a energia incorporada da técnica construtiva. Em estudos, a adição de resíduos industriais têm sido avaliada e se apresentam como uma possibilidade na estabilização de adobe (OLACIA *et al.*, 2020).

Alguns autores atestam que a adição da cal pode conferir maior estabilidade dimensional ao adobe e diminuir a absorção de água (MATTOS *et al.*, 2017), principalmente em solos finos e com elevado teor de argila (MANZOOR *et al.*, 2020).

Contudo, a influência da adição de cal na capilaridade tem sido bastante discutida. Alguns pesquisadores defendem que, ao contrário, há um aumento desta propriedade ou não há interferência da cal (MACHADO *et al.*, 2020). Estas discordâncias estão relacionadas à heterogeneidade na composição do solo e às diferenças na estrutura e na formação geológica do solo, além das interações químicas e físicas da mistura estabilizadora (LITTLE *et al.*, 2009).

Ainda que a norma NBR 16814 (ABNT, 2020) trate a respeito da importância da proteção da alvenaria de adobe de maneira que não haja erosão e acúmulo de umidade, não há menção sobre ensaios de absorção de água. Além disto, na literatura, não há consenso do método de ensaio aceito para avaliar a resistência à água do material (BECKETT *et al.*, 2020).

Existem vários ensaios que simulam formas distintas de interação da alvenaria com a água, e mesmo após a escolha do ensaio, ainda há metodologias de ensaio diferentes. Beckett *et al.*, (2020) encontraram que os três ensaios mais realizados para prever a durabilidade de adobes, dentro da revisão da literatura realizada: absorção por capilaridade; absorção por imersão e erosão por escova de arame.

Visto que a capacidade de adobes em absorver água, desempenha um papel significativo em sua durabilidade, avaliar a interação da alvenaria com a água por meio da absorção, é um ensaio primordial (PANAGIOTOU *et al.*, 2022).

Dito isto, existem dois principais tipos de ensaios para avaliar a absorção de água de componentes construtivos de terra: ensaio de absorção total por imersão, onde a amostra é imersa em água por tempo específico; e absorção por capilaridade, onde a face inferior da amostra é imersa em água e sua massa é medida ao longo do tempo.

Contudo, encontrou-se que o ensaio de absorção por imersão é muito agressivo (BECKETT *et al.*, 2020) e não é adequado para adobes apenas com estabilização por

correção granulométrica, pois tendem a se desintegrar ao ser submerso em água. Pesquisas que avaliam a durabilidade de adobes por meio do ensaio de absorção por imersão, utilizam adobes estabilizados com cimento ou solução repelente de água (ALAM; NASEER; SHAH, 2015; SHARMA; MAWAHA; VINAYAK, 2016; OTI; KINUTHIA, 2009).

1.1. A estabilização dos adobes com resíduos

Dentre os resíduos industriais, estudos obtiveram bons resultados no desempenho físico do adobe estabilizado com rejeito de minério de ferro (RMF) em relação ao adobe sem estabilização (SILVA *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2019). O uso de RMF na produção de adobe pode ser justificado pelo fato deste material apresentar características químicas e composição granulométrica semelhante aos solos utilizados na produção de adobe (LI *et al.*, 2019) e por ser um resíduo estocado em grandes volumes e fora da cadeia produtiva, o que torna sua utilização uma opção viável do ponto de vista econômico e sustentável, para a produção de adobe.

Soma-se a isso o fato do Brasil ser um país com intensa exploração mineral. Em 2021, o minério de ferro foi o mineral com maior extração no Brasil, com cerca de 567 milhões de toneladas do material bruto, o que gerou cerca de 250 bilhões de reais (BRASIL, 2023). Apesar dos altos lucros, a quantidade de rejeitos gerados durante o processo de beneficiamento e as consequências ambientais ocasionadas pelo armazenamento inadequado destes são as principais questões ambientais associadas à extração do ferro.

No ano de 2015, um desastre relacionado à mineração ocorreu quando a Barragem de Fundão, que armazenava 55 milhões de metros cúbicos de RMF, rompeu em um sub-districto do município de Mariana/MG. O rompimento provocou o deslocamento de rejeito através de rios por 663 km até o litoral do Espírito Santo.

O rejeito despejado no Rio Doce, e seus afluentes, foi dragado para Áreas de Deposição de Material Excedente (ADME) e encontra-se aguardando uma destinação mais adequada. Uma vez que este material possui semelhança com o solo natural, com o qual foi misturado durante o deslocamento dos rejeitos, passou a ser denominado sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), que não possui as mesmas características dos rejeitos retirados diretamente das barragens, mas ainda possui uma quantidade considerável de ferro (LAGE *et al.*, 2022a).

Ademais, a escolha do adobe está atrelada ao fato de que, nos municípios atingidos pelos rejeitos de minério de ferro, constatou-se a utilização vernácula da terra como material construtivo, pois cerca de 53% dos bens atingidos

pelo rompimento da barragem de Fundão eram construídos com terra, nas técnicas da taipa de pilão, adobe e pau-a-pique (LAGE *et al.*, 2022b).

Portanto, considerando a disponibilidade de SRMF e as propriedades da cal, este estudo teve como objetivo produzir adobes com a incorporação de SRMF e cal hidratada, para analisá-los quanto a absorção por capilaridade.

Esses componentes podem ser a solução para suprir duas lacunas: uma demanda por técnicas construtivas de menor impacto ambiental e a produção de componentes construtivos que estejam de acordo com a tradição construtiva da região de Mariana/MG.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração do ensaio de capilaridade, este estudo foi dividido em quatro etapas: i) coleta dos materiais e caracterização; ii) definição das misturas e produção dos adobes; iii) análise dimensional dos adobes; e iv) análise da absorção por capilaridade.

2.1. Caracterização dos materiais

A amostra de SRMF foi coletada na ADME da cidade de Barra Longa/MG (denominada como BL neste estudo), na qual estava coberta por uma camada de solo para revegetação.

Por isso, a amostra de SRMF foi coletada entre 60 e 80 cm de profundidade. O solo para produção dos adobes foi coletado na cidade de Pedro Leopoldo, que faz parte da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG.

As amostras de SRMF e de solo foram caracterizadas por meio de ensaios físicos, a saber: granulometria, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016a); limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), de acordo com a NBR 6459 e NBR 7180 respectivamente (ABNT, 2016b; 2016c); massa específica, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017); massa unitária e volume de vazios, conforme descrito na NBR 16972 (ABNT, 2021), e absorção de água de acordo com a NBR NM 30 (ABNT, 2000) (Tabela 01).

A cal hidratada utilizada neste estudo é do tipo CH-I que atende os requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), e possui ampla disponibilidade no mercado regional.

2.2. Definição das misturas, moldagem dos adobes e análise dimensional

A proporção granulométrica do solo para produção de adobe, recomendado pela NBR 16814 (ABNT, 2020), é diferente da proporção recomendada pela da norma peruana E.080 (NTE,

Amostra	Granulometria (%)		Índice de plasticidade (%)	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)	Índice de vazios (%)	Absorção de água (%)
	Argila	Areia					
Solo	55,50	28,00	22	2340	1012	57,50	21,28
SRMF	9,50	41,50	-	2790	1368	64,20	7,52

Tabela 01: Caracterização física das amostras de solo e de SRMF.

Fonte: Autoras.

Norma de adobe brasileira	Norma de adobe peruana
areia: entre 45 % e 65 %;	areia: entre 55 % e 70 %;
argila: entre 25 % e 35 %;	argila: entre 10 % e 20 %;

Tabela 02: Proporção de areia e argila – normas de adobe brasileira e peruana.

Fonte: NBR16814 (ABNT, 2020) e E.080 (NTE, 2000).

2000), conforme pode ser observado na Tabela 02.

A norma brasileira não apresenta qual a norma utilizada para a classificação do solo. Dessa forma, utilizou-se a classificação de areia e argila da NBR 6502 (ABNT, 2022b). A norma peruana não cita como deve ser realizada a análise granulométrica do solo.

Para esta pesquisa, utilizou-se a classificação de solos de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2022), a qual classifica a argila como partículas com dimensões menores que 0,002 mm e a areia com partículas de diâmetros entre 0,06 mm e 2,00 mm.

Em trabalhos anteriores, foi utilizada a faixa granulométrica da NBR 16814 (ABNT, 2022) como referência, porém os adobes não apresentaram valores adequados no ensaio de resistência à compressão (VIMIEIRO *et al.*, 2022).

A norma peruana é mais antiga e consolidada no meio

científico, Sánchez *et al.*, (2022) apresentam que 44% dos artigos analisados usam a norma peruana como referência para produção de adobe. No entanto, não se pode descartar as características do solo, que possui teor elevado de caulinita, uma argila de baixa atividade. Por esses fatores, os valores da norma peruana foram usados como referência para a proporção granulométrica na produção dos adobe na nova etapa de análises.

Por conta do teor elevado de argila do solo, foi necessário acrescentar partículas arenosas à mistura. O solo de referência foi, portanto, misturado ao SRMF e, posteriormente, corrigido ainda com areia natural para que fossem atingidos os valores de areia e de argila observados na norma peruana. Em paralelo, foram moldados adobes com os mesmos teores de solo, SRMF e areia, e com adição de 2% de cal hidratada tipo CH-I, em massa (Tabela 03).

Os adobes foram moldados em fôrmas de madeira com dimensões de 10x10x20 cm (altura, largura, comprimento) e permaneceram em ambiente de laboratório por 28 dias para a execução do ensaio. O teor de água variou em função da umidade natural do solo e do SRMF e da

Proporção dos materiais (%)			Teor de cal (%)	Granulometria - antes da correção com areia natural (%)		Areia natural para correção (em relação a 100% de solo)	Granulometria - após a correção com areia natural (%)	
Misturas	Solo	SRMF		% argila	% areia		% argila	% areia
REF	100	0	0,00	55,50	28,00	1,40	23,13	70,00
BL-50	50	50		32,25	40,00	0,90	16,97	68,42
BL-60	40	60		27,60	42,40	0,80	15,33	68,00
BL-70	30	70		22,95	44,80	0,70	13,50	67,53
REF-C	100	0	2,00	55,50	28,00	1,40	23,13	70,00
BL-50-C	50	50		32,25	40,00	0,90	16,97	68,42
BL-60-C	40	60		27,60	42,40	0,80	15,33	68,00
BL-70-C	30	70		22,95	44,80	0,70	13,50	67,53

Tabela 03: Traços e proporções dos materiais.

Fonte: Autoras.

consistência ideal de moldagem, que foi aferida em ensaio após a moldagem. Após os 28 dias de cura, foi realizada análise dimensional dos adobes de acordo com a NBR 16814 (ABNT, 2020). Foram aferidas as médias dos valores de altura, largura, comprimento, massa, volume e densidade dos oito adobes moldados para cada mistura.

Absorção de água por capilaridade

O método de ensaio, a formulação e a análise dos resultados obtidos foram definidas em função da especificidade e das características do material e das práticas correntes de ensaio, apoiando os métodos em ensaios na literatura e adaptados de outras áreas de conhecimento.

Dito isto, optou-se por seguir o método de ensaio da norma NBR 9779 (ABNT, 2012) que normatiza o ensaio de absorção por capilaridade em argamassas e concretos, com algumas adaptações, por estas autoras, por se tratar de componente de terra.

Segundo a norma NBR 9779 (ABNT, 2012), a absorção por capilaridade é calculada de acordo com a seguinte Equação 01:

$$C = \frac{Msat - Ms}{s} \quad (01)$$

Sendo C a absorção de água por capilaridade expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm^2); Msat é a massa saturada do corpo de prova em gramas (g); Ms é a massa do corpo de prova seco em gramas (g); e S é a área de seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm^2).

Os adobes foram secos em ambiente de laboratório por 28 dias e a massa seca foi registrada. Os adobes foram envelopados com filme de plástico, seguindo recomendação da literatura (TAALLAH *et al.*, 2016; MACHADO *et al.*, 2020), com exceção da face inferior, para que a absorção ocorresse exclusivamente por esta face, conforme Figura 01.

Pela normativa utilizada (ABNT, 2012) e como encontrado

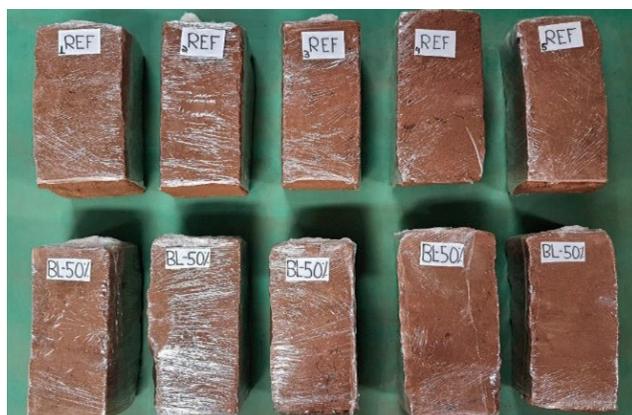


Figura 01: Corpo de prova envelopado em plástico antes da execução do ensaio.
Fonte: Autoras.

em pesquisas (BECKETT *et al.*, 2020), deve-se colocar água em um recipiente e apoiar os adobes sobre bases que os mantenham afastados do fundo do recipiente e que permitam um contato efetivo entre sua face inferior do adobe e a água. Como base, nesta pesquisa, foi utilizado espuma de baixa densidade em uma bandeja com água constante.

O adobe ficou apoiado na espuma verticalmente. Com intuito de garantir a constância de 5 mm de lâmina de água no adobe, uma régua foi fixada na amostra por meio de elástico. A régua também foi necessária para aferir a ascensão da capilaridade no adobe, conforme Figura 02.

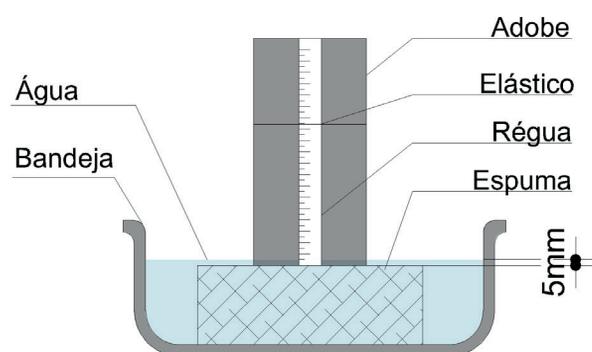


Figura 02: Desenho do sistema para ensaio de absorção por capilaridade.
Fonte: Autoras.

Segundo a norma NBR 9779 (ABNT, 2012), após a colocação dos adobes em contato com a água, deve-se aferir a massa saturada de cada adobe em intervalos definidos até que se complete 72 horas. Contudo, por se tratar de um componente de terra, os intervalos foram adaptados e o ensaio foi realizado até que se completassem quatro horas, em concordância com estudo anterior que também utilizaram componentes de terra (INDEKEU *et al.*, 2021). Após a última aferição, foi realizada a medição da altura da camada de água no interior e no exterior do adobe.

A NBR 9779 (ABNT, 2012) não especifica critérios de aceitação ou reprovação das amostras quanto ao resultado de absorção por capilaridade. Segundo Beckett *et al.*, (2020), o ensaio de capilaridade é um ensaio comparativo, quanto menor a taxa de absorção, melhor o desempenho.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio da análise granulométrica, observou-se que o solo apresenta maior quantidade de partículas finas e elevado teor de argila, o que indica que a estabilização com

cal pode ser adequada (MANZOOR *et al.*, 2020).

O ensaio de LL e LP são importantes para determinar a consistência das amostras. O índice de plasticidade do solo e do SRMF é dado pela subtração do LL pelo LP. O solo apresentou LL de 53% e LP de 31%, portanto apresentou um índice de plasticidade de 22%.

Como o SRMF não apresentou plasticidade, não sendo possível concluir o ensaio, foi então classificado como não plástico. A NBR 16814 (ABNT, 2020) não especifica resultados adequados de índice de plasticidade para produção de adobe. Na literatura consultada foi encontrado a recomendação índice de plasticidade 16% e 33% (HOUBEN; GUILLAUD, 1994).

A atividade de uma argila é, primariamente, atribuída ao mineral de argila a partir do qual se origina. Essa atividade pode ser avaliada por meio do índice de atividade (IA), como proposto por Skempton (1953), o qual é calculado usando a razão entre o índice de plasticidade dividido pela fração de argila presente na amostra do solo, conforme equação 02:

De acordo com Skempton (1953), IA menor do que 0,75 são classificados como argila inativa.

O SRMF apresentou massa específica próxima à da areia, que é de 2650 kg/cm³, o que possibilita a utilização em misturas, com diferentes teores, para se obter um solo mais adequado para produção de adobes, com maior teor de areia. O caráter arenoso do SRMF pode estar associado à composição dos rejeitos que estavam depositados na

$$IA = \frac{IP}{\% \text{ argila}} \therefore \frac{22}{54} \therefore 0,40 \quad (02)$$

Barragem de Fundão, que era um misto de rejeitos arenosos e lama (FIGUEIREDO *et al.*, 2020).

Em estudo prévio (VIMIEIRO *et al.*, 2022), com a análise da composição mineralógica, pôde-se constatar que não foram encontrados minerais argilosos expansivos na amostra de solo, apenas caulinita foi encontrada, esta considerada uma argila não expansível, o que confirma o achado de índice de atividade da argila classificada como inativa. Na amostra de SRMF notou-se a predominância de quartzo (SiO₂) e hematita (Fe₂O₃) e não possui características pozolânicas, uma vez que não se percebe formação de halo amorfo no difratograma (Figura 03).

Em relação a análise dimensional, na Tabela 04, estão apresentados os valores médios das dimensões relativos à altura, largura e comprimento dos adobes, além dos valores médios de massa, volume e densidade.

Os adobes tiveram o desvio das dimensões menor ou igual a 5 mm, como recomenda a NBR 16814 (ABNT, 2020).

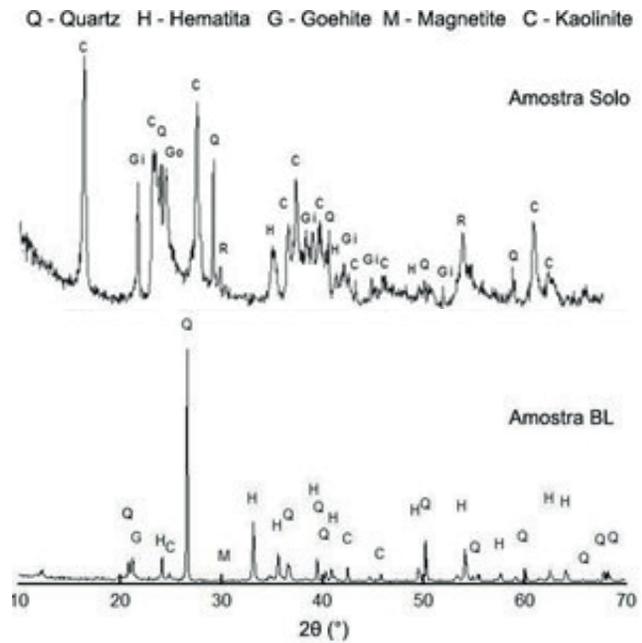


Figura 03: Difratograma das amostras de solo e SRMF de Barra Longa (BL).
 Fonte: Autoras.

Mistura	Altura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (kg/m ³)
REF	9,60	9,58	19,78	3.296,4	1.819,8	1.811,42
BL-50	9,75	9,78	19,90	3.577,0	1.901,1	1.881,47
BL-60	9,55	10,00	19,53	3.524,5	1.855,8	1.899,14
BL-70	9,55	10,00	19,53	3.645,5	1.855,8	1.964,34
REF-C	9,80	9,78	20,23	3.260,3	1.957,3	1.665,68
BL-50-C	9,93	9,90	20,20	3.426,8	1.984,4	1.726,83
BL-60-C	10,00	9,95	20,13	3.535,5	2.002,2	1.765,75
BL-70-C	9,93	9,90	20,13	3.575,9	1.944,5	1.838,96

Tabela 04: Análise física e dimensional dos adobes.
 Fonte: Autoras.

Foi possível perceber que a mistura com adição de cal, no geral, apresentou menores valores de densidade aos 28 dias. Em destaque, o valor de densidade obtido pela mistura REF-C que apresentou a menor densidade média. A densidade aparente dos adobes REF-C ficou em 8,05% menor que a média dos adobes REF, que não tem adição de cal.

De acordo com Machado *et al.*, (2020), devido às reações da cal, o tamanho do grão aumenta, levando a um aumento do vazio e uma subsequente diminuição da densidade máxima seca. Este achado corrobora com os resultados obtidos neste estudo, uma vez que as misturas com cal tiveram resultados de densidade menores que as misturas sem cal. Todavia, o aumento do grão e consequente aumento de vazios pode permitir que líquidos penetrem em meio aos poros e aumentar a absorção por capilaridade.

Em relação ao desenvolvimento do ensaio de absorção de água por capilaridade, realizou-se o registro fotográfico de cada intervalo de medição conforme apresentado na Figura 04. Da esquerda para a direita, a

primeira imagem é o adobe antes do contato com a água e, na sequência, o mesmo adobe nos intervalos de 10, 20, 40, 80, 120 e 240 minutos após o contato com a água, respectivamente.



Figura 04: Sequência fotográfica do processo de ascensão capilar da água no mesmo adobe.
Fonte: Autoras.

Cada mistura analisada obteve ao menos quatro resultados significativos. Na Figura 05, pode-se verificar os quatro adobes da mesma mistura (BL-70-C). A fotografia foi feita após o último intervalo de 240 minutos e a altura e o formato da absorção de água, pertinente aos intervalos anteriores foram marcados em cores diferentes com base em registros fotográficos realizados após o respectivo intervalo.



Figura 05: Sequência fotográfica do processo de ascensão capilar da água em uma mistura de adobe.
Fonte: Autoras.

Dessa forma, é possível observar que a ascensão ocorreu de forma homogênea em relação ao tempo dentro de um mesmo grupo, uma vez que as alturas da ascensão se mantiveram similares entre os blocos de adobe.

Com os Gráficos 01 e 02, é possível analisar comparativamente os resultados da absorção de água por capilaridade nos adobes produzidos sem e com a adição de cal, respectivamente. O valor do coeficiente de AC variou entre 1,22 e 2,38 g/cm² nos adobes sem adição de cal, enquanto o valor para adobe com adição de cal, variou entre 2,08 e 4,81 g/cm², com destaque para os adobes REF-C.

Assim, nos adobes sem cal, percebeu-se que o aumento nos teores de SRMF foi diretamente proporcional ao aumento da AC, com exceção da elevada absorção da mistura BL-60. Por outro lado, nas misturas com adição de cal, observou-se justamente o contrário, apresentou diminuição da AC à medida que aumentou os teores de SRMF.

Os valores da AC nos adobes do grupo REF-C estão em acordo com a menor densidade observada nos adobes

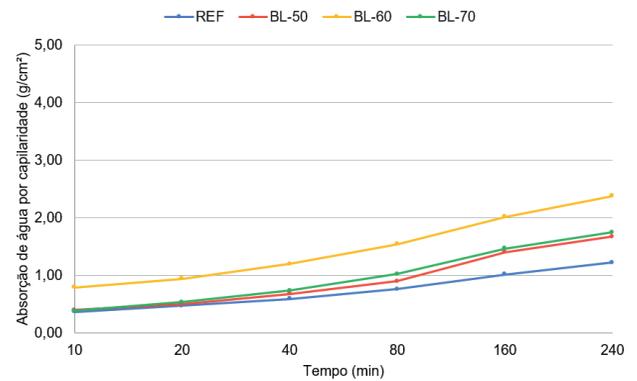


Gráfico 01: Absorção por capilaridade dos adobes sem adição de cal.
Fonte: Autoras.

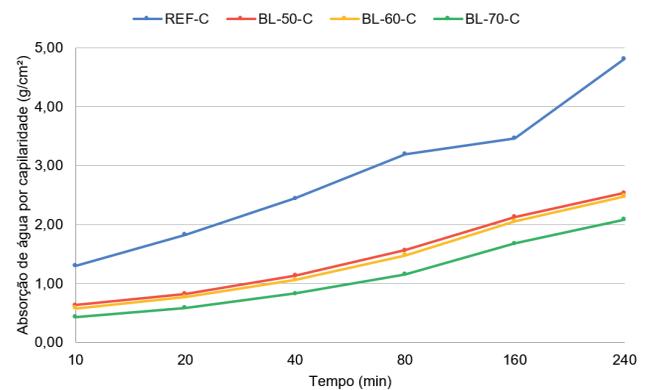


Gráfico 02: Absorção por capilaridade dos adobes com adição de cal.
Fonte: Autoras.

deste grupo. Por exemplo, a mistura REF-C teve a menor densidade e apresentou a maior absorção por capilaridade. A diminuição da densidade resulta em um aumento de vazios na mistura e pode ser o motivo do aumento da AC. A interação solo-sedimento foi melhor no empacotamento das partículas, melhor na densidade e melhor nos índices de vazios da mistura.

Desta forma, é possível considerar que a adição de cal foi positiva na interação solo-sedimento para diminuir a absorção por capilaridade dos adobes na medida em que aumentou os teores de SRMF na mistura. Esta ocorrência pode estar vinculada ao fato de que o SRMF possui alto teor de quartzo e misturas com maior teor de sílica reagem melhor com a cal (BELL, 1989).

Porém, considerando as misturas sem adição de cal que obtiveram resultados de AC menores que as misturas com adição de cal, conclui-se que o teor de 2% de cal na idade analisada, não influenciou de maneira positiva, pois pode ter aumentado os vazios da mistura.

Segundo Minke (2022), a cal interfere na coesão dos minerais da argila e por isso quanto mais argila presente no solo, maior deve ser a porcentagem de cal na mistura. Assim, um maior teor de cal pode beneficiar solos argilosos.

Outro fator significativo é a não identificação de

pozolanicidade do SRMF na caracterização, visto que as pozolanas conferem maior impermeabilidade à mistura. Segundo Little *et al.*, (2009) o processo de estabilização do solo com cal está relacionado, entre outras reações, com a pozolanicidade.

Enfatiza-se que uma melhor estabilização com a cal ocorre com proporções de 2 a 10% (MACHADO *et al.*, 2020). Tendo em vista que o presente estudo utilizou 2% de adição de cal em massa, maiores teores de cal podem obter resultados diferentes do que foi encontrado nesta pesquisa.

O ensaio de AC aplicado nesta pesquisa é uma aproximação razoável do que acontece na realidade, em que a umidade advinda da fundação pode ascender por capilaridade na alvenaria, seja esta de adobes ou não. Contudo, o estudo da durabilidade engloba também ensaios de erosão e abrasão dos adobes. Danso *et al.*, (2015) relataram a possibilidade de avaliar a durabilidade de tijolos de adobe com ensaio de abrasão ou erosão.

Por estas razões, mostra-se relevante analisar a erosão para entender o comportamento dos adobes frente às chuvas intensas que ocorrem particularmente em Minas Gerais no verão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo foi conduzido para investigar as diferenças na absorção de água por capilaridade entre adobes estabilizados com e sem cal e utilizando o SRMF na mistura para corrigir os teores de areia/argila do solo. O SRMF foi utilizado por sua disponibilidade e por suas características muito semelhantes ao solo da região, uma vez que os rejeitos da Barragem de Fundão foram misturados aos sedimentos do Rio Doce (e de seus afluentes) após o acidente de 2015.

No entanto, algumas conclusões podem ser levantadas:

I) As propriedades granulométricas do solo utilizado mostraram grande teor de argila, porém pouco expansiva, o que o torna favorável à correção granulométrica e à estabilização química para a produção de adobes.

II) As normas, brasileira e peruana, utilizadas como referência nesta pesquisa, sugerem a proporção granulométrica, contudo não classificam ou indicam a classificação da granulométrica do solo. Esse fato apresenta-se como uma falha nas normas, visto que há discordâncias internacionais sobre as frações granulométricas.

III) O método de ensaio de absorção de água por capilaridade se mostrou adequado para componentes construtivos de terra, obteve resultados uniformes

entre adobes da mesma mistura e valores proporcionais ao tempo de contato com a água.

IV) Os valores da absorção de água por capilaridade podem ser relacionados à densidade aparente dos adobes, na idade de ensaio.

V) Os adobes sem adição de cal, mas com incorporação de SRMF, apresentaram valores menores de absorção em relação aos adobes com cal. No teor de 2% na idade analisada, a cal não influenciou positivamente na absorção de água por capilaridade dos adobes.

Dessa forma, estudos futuros podem ser necessários para analisar a interação mais adequada entre o solo argiloso, a cal e os SRMF.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez:** 2016c.

NBR 6502: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro: 2022b.

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

NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade: 2016b.

NBR 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: 2016a.

NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: 2012.

NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: 2017.

NBR 16814: Adobe - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: 2020.

NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: 2021.

NBR 17014: Taipa de pilão — Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro: 2022a.

ALAM I. A.; NASEER A, A.; SHAH, A.A. Economical

stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone áreas. **Construction and Building Materials**. V.77, p. 154- 159. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046>. Acesso em: 30 jul. 2023.

BELL, F. G. Lime stabilisation of clay soils. **Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**. R. Vol. 39, 1989. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/bf0259257>. Acesso em: 30 jul. 2023.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2023.

BECKETT, C. T.S.; JAQUIN, P. A.; MOREL, J. C. Weathering the storm: a framework to assess the resistance of earthen structures to water damage. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 1-12, 21 jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820301033?via=ihub>. Acesso em: 30 jul. 2023.

BUI, Quoc Bao; MOREL, J.C.; REDDY, B. V. Venkatarama; GHAYAD, W. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. **Building and Environment**, v. 44, n. 5, p. 912-919, maio 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230800156X>. Acesso em: 30 jul. 2023. =S0254-07702014000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 30 jul. 2023.

CIRVINI, Silvia A.; VOLTAN J. A. G. Test and device to evaluate the capillary absorption in soil specimens of adobe and rammed earth . **Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia**. Venezuela, v.37, n.1, p.3-10. 2014. Disponível em: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0254-07702014000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 30 jul. 2023.

DANSO, H.; MARTINSON, D. B.; ALI M.; WILLIAMS, J. B. **Effect of Sugarcane Bagasse Fibre on the Strength Properties of Soil Blocks**. In: 1st int conf bio-based build mater. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280625221_Effect_of_sugarcane_baggasse_fibre_on_the_strength_properties_of_soil_blocks#fullTextFileContent. Acesso em: 30 jul. 2023.

net/publication/280625221_Effect_of_sugarcane_baggasse_fibre_on_the_strength_properties_of_soil_blocks#fullTextFileContent. Acesso em: 30 jul. 2023.

DEGIRMENCI, N. The use of industrial wastes in adobe stabilization. **Journal of Science**, 505 - 515. ISSN 1303-9709. 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332014310_THE_USE_OF_INDUSTRIAL_WASTES_IN_ADOBE_STABILIZATION. Acesso em: 30 jul. 2023.

FIGUEIREDO, M.; LAMEIRAS, F.; ARDISSON, J.; ARAÚJO, M. H.; TEIXEIRA, A. P. de C. Tailings from Fundão Tragedy: physical chemical properties of the material that remains by candonga dam. **Integrated Environmental Assessment and Management**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 636-642, 10 jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4227>. Acesso em: 30 jul. 2023.

INDEKEU, Margaux L.; JANSSEN, Hans; WOLOSZYN, Monika.W. Determination of the moisture diffusivity of rammed earth from transient capillary absorption moisture content profiles. **Construction and Building Materials**, v. 318, 7 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125978>. Acesso em: 30 jul. 2023.

LAGE, G. L. T.; MENDONÇA, I. K. NOGUEIRA, J. W. BESSA, S. A. L. **Análise mecânica de solo estabilizado com sedimento da barragem de Fundão**. Rede Terra Brasil. 2022a. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358501186_Analise_mecanica_de_solo_estabilizado_com_sedimento_da_Barragem_de_Fundao#fullTextFileContent. Acesso em: 30 jul. 2023.

LAGE, G. L. T.; VIMIEIRO, J. I. C.; MATIAS, L. M.; COSTA, J. M.; BATISTA, G. E. F.; BESSA, S. A. L. **Caracterização do sedimento de rejeito de minério de ferro para uso como estabilizante da taipa de pilão**. 4º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis. 2022b. Disponível em: <https://clbmcs2020.uefs.br/anais-do-evento> Acesso em: 30 jul. 2023.

LITTLE, D. N., NAIR, S. Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials. National Academies of Sciences, **Engineering, and Medicine**. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/22999>. Acesso em: 30 jul. 2023.

LI, R.; ZHOU, Y.; LI, C.; LI, S.; HUANG, Z. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 213, p. 43-50, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>. Acesso em: 30 jul. 2023.

LOSINI, Alessia Emanuela *et al.* Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale. **Building and Environment**, v. 233, p. 110087, abr. 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132323001142>. Acesso em: 30 jul. 2023.

MACHADO, I. C. M.; BORGES, A. N.; SOUZA, J. C.; GITIRANA Jr., G. F. N.; REZENDE, L. R. Influência da Cal na Curva Característica Solo-água de um Solo Tropical. In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2020, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas, Galoá, 2020. Disponível em: <https://proceedings.science/p/150131>. Acesso em: 30 jul. 2023.

MANZOOR, S.O.; YOUSUF, A. Stabilisation of Soils with Lime: A Review. **Journal of Materials and Environmental Science**. Volume 11, Issue 9, Page 1538-1551. ISSN: 2028-2508 2020. Disponível em: <http://www.jmaterenvironsci.com/>. Acesso em: 30 jul. 2023.

MATTOS, F. C.; GONÇALVES, M. R. F. Influência do teor de finos das areias no coeficiente de capilaridade das argamassas de cal expostas ao ambiente marinho. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. Curitiba, PR, v.2, n.1,25, jan. / jun., 2017. Disponível em: [10.21575/25254782rmetg2017vol2n1333](https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2017vol2n1333). Acesso em: 30 jul. 2023.

MINKE, Gernot. **Manual de construção com terra: a terra como material de construção e seu uso na arquitetura**. [S.l.]: Solisluna Editora, 2022. v. 1.

MUNOZ, P.; LETELIER, V. MUNOZ, L.; BUSTAMANTE. Adobe bricks reinforced with paper e pulp wastes improving thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>. Acesso em: 30 jul. 2023.

NORMA TÉCNICA DE EDIFICACION. **NTE E.080: Adobe**. Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. 2000.

OHOFUGI, N. G.; GÓIS, M. S.; COSTA, K. R. C. B. da; CAVALCANTE, A. L. B. Instrumentação de Baixo Custo em Coluna de Solo para Monitoramento Time-Lapse da Ascensão Capilar / Low Cost Soil Column Instrumentation for Time-Lapse Monitoring of Rising Damp. **Brazilian Applied Science Review**, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 226–240, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv5n1-014>. Acesso em: 30 jul. 2023.

OLACIA, E.; PISELLO, A. L.; CHIODO, V.; MAISANO, S.; FRAZZICA, A.; CABEZA, L. F.. Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 239, p. 117669, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>. Acesso em: 30 jul. 2023.

OTI, J.E.; KINUTHIA, J.M.; BAI, J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. **Engineering Geology**. v.107, p.130-139. 2009. Disponível em: [10.1016/j.enggeo.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.002). Acesso em: 30 jul. 2023.

PANAGIOTOU, R.; KYRIAKIDES, M. A.; ILLAMPAS, R.; IOANNOU, I. An experimental approach for the investigation of the performance of non-stabilized Compressed Earth Blocks (CEBs) against water-mediated weathering. **Journal of Cultural Heritage**, v. 57, p. 184–193, 1 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.08.009>. Acesso em: 30 jul. 2023.

RAIMONDO, M.; DONDI, M.; GARDINI, D.; GUARINI, G.; MAZZANTI, R. Predisting the initial rate of water absorption in clay bricks. **Construction and Building Materials**. Volume 23, Issue 7, July 2009, Pages 2623-2630. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009>. Acesso em: 30 jul. 2023.

SÁNCHEZ, A.; VARUM, H.; MARTINS, T.; FERNANDEZ, J. Mechanical properties of adobe masonry for the rehabilitation of buildings. **Construction and Building Materials**. Volume 333, 23 May 2022, 127330. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127330>. Acesso em: 30 jul. 2023.

SHARMA, A. Vandna; MARWAHA, Bhanu M.; VINAYAK, Hemant K. Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. **International Journal of Sustainable Built Environment**. v.5, p. 141-155. 2016. Disponível em: <http://>

[dx.doi.org/10.1016/j.jijsbe.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.jijsbe.2016.03.004). Acesso em: 30 jul. 2023.

SILVA, F. L. da; ARAÚJO, F. G.; TEIXEIRA, M. P.; GOMES, R. C.; VON KRÜGER, F. L. Study of the recovery and recycling of tailings from the concentration of iron ore for the production of ceramic. **Ceramics International**, [S.L.], v. 40, n. 10, p. 16085-16089, dez. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.07.145>. Acesso em: 30 jul. 2023.

SKEMPTON, A. W. The Colloidal "Activity" of Clays: l'activité colloïdale des argiles. 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Suíça. **International society for soil mechanics and geotechnical engineering**, 1953. p. 57-61. Disponível em: <https://www.issmge.org/publications/online-library>. Acesso em: 24 jun. 2023.

STANDARDS NEW ZEALAND. **NZS 4299: Earth buildings not requiring specific engineering design**. New Zealand. 2020.

TAALLAH, B.; GUETTALA, A. The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers. **Construction and Building Materials**. Volume 104, 1 February 2016, Pages 52-62. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>. Acesso em: 30 jul. 2023.

VIMIEIRO, J. I. C.; LAGE, G. T. de L.; MATIAS, L. M.; BATISTA, G. E. F.; COSTA, J. M.; BESSA, S. A. L. **Análises físicas e mecânicas de adobes produzidos com sedimento de rejeito de minério de ferro**. 4º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis Salvador, 9-11 de novembro. 2022. Disponível em: <https://clbmcs2020.uefs.br/anais-do-evento> Acesso em: 30 jul. 2023.

AGRADECIMENTOS

As autoras gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pelo financiamento desta pesquisa (Projeto APQ05495-18).

AUTORES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8494-3038>

JHADE IANE CUNHA VIMIEIRO, MESTRANDA EM AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL | Universidade Federal de Minas Gerais | Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: (Av Marco Túlio Isaac, 9285, Nova Baden, Betim, MG, 32065-335) | E-mail: jhadevimieiro@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1883-1251>

SOFIA ARAUJO LIMA BESSA, Doutora em Engenharia Urbana | Universidade Federal de Minas Gerais | Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: (Rua Paraíba, 697, Savassi, Belo Horizonte, MG, 30130-141) | E-mail: sofiabessa@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5225-6162>

LARISSA MOREIRA MATIAS, Graduanda em Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Minas Gerais | Arquitetura e Urbanismo | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: (Rua Luiz Advincula Reis, 30, ceu azul, Belo Horizonte, MG, 31545-270) | E-mail: arq.larissamatias@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1777-0767>

GABRIELLA EDUARDA FREITAS BATISTA, Graduanda em Arquitetura e Urbanismo | Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: (Rua dos Goitacazes, 318, Apartamento 701, Centro, Belo Horizonte, MG, 30190050) | E-mail: gabriellaefb@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1069-6627>

DAYANE FELIX ANDRADE, MESTRE. | Universidade Federal de Minas Gerais | Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: Av. Augusto de Lima, 550, AP9 - Centro, Belo Horizonte - MG, 30190-006 | E-mail: dayanefelixarq@gmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

VIMIEIRO, Jhade Iane Cunha; BESSA, Sofia Araújo Lima; MATIAS, Larissa Moreira; BATISTA, Gabriella Eduarda Freitas; ANDRADE, Dayane Felix de. MIX Sustentável, v. 9, n. 4, p. 195-207, 2023. ISSN 2447-3073. Disponível em: <http://www.nexos.ufsc>

br/index.php/mixsustentavel>. Acesso em: _/_/_.
doi: <<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n4.195-207>>.

SUBMETIDO EM: 01/06/2023

ACEITO EM: 01/07/2023

PUBLICADO EM: 30/08/2023

EDITORES RESPONSÁVEIS: Lisiane Ilha Librelotto e Paulo Cesar Machado Ferroli.

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

JICV: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, supervisão, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão & edição.

SALB: conceituação, curadoria de dados, análise formal, aquisição de financiamento, investigação, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - rascunho original, escrita - revisão & edição.

LMM: investigação, metodologia, visualização.

GEFB: investigação, metodologia, visualização.

DFA: validação, escrita - rascunho original, escrita - revisão & edição.

Declaração de conflito: nada foi declarado.