

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável

Jhade Iane Cunha Vimieiro

**TAIPA DE PILÃO PRODUZIDA COM REJEITOS DA MINERAÇÃO: análises  
mecânicas e de durabilidade**

Belo Horizonte

2024

Jhade lane Cunha Vimieiro

**TAIPA DE PILÃO PRODUZIDA COM REJEITOS DA MINERAÇÃO: análises  
hidráulicas e de durabilidade**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável.

Orientadora: Profa. Dra. Sofia Araújo Lima Bessa

Coorientadora: Profa. Dra. Talita Caroline Miranda

Belo Horizonte

2024

## FICHA CATALOGRÁFICA

V764t

Vimieiro, Jhade lane Cunha.

Taipa de pilão produzida com rejeitos da mineração [recurso eletrônico] : análises mecânicas e de durabilidade / Jhade lane Cunha Vimieiro. - 2024.

1 recurso online (p. 108: il.).

Orientadora: Sofia Araújo Lima Bessa

Coorientadora: Talita Caroline Miranda

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.

1. Resistência de materiais - Teses. 2. Construção de solo-cimento - Teses. I. Bessa, Sofia Araújo Lima. II. Miranda, Talita Caroline. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. VI. Título.

CDD 693.4



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

**"TAIPA DE PILÃO PRODUZIDA COM REJEITOS DA MINERAÇÃO: análises mecânicas e de durabilidade"**

**JHADE IANE CUNHA VIMIEIRO**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia **quinze de agosto de dois mil e vinte e quatro**, pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Prof. Dr. Fernando Cesar Negrini Minto**

Universidade Estadual do Rio de Janeiro/UERJ

**Profa. Dra. Sofia Araujo Lima Bessa - Orientadora**

Escola de Arquitetura/UFMG

**Profa. Dra. Talita Caroline Miranda - Coorientadora**

Escola de Engenharia/UFMG

**Prof. Dr. White José dos Santos**

Escola de Engenharia/UFMG

Belo Horizonte, 15 de agosto de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Sofia Araujo Lima Bessa, Professora do Magistério Superior**, em 19/08/2024, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Talita Caroline Miranda, Professora do Magistério Superior**, em 20/08/2024, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Cesar Negrini Minto, Usuário Externo**, em 26/08/2024, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **White Jose dos Santos, Professor do Magistério Superior**, em 26/08/2024, às 20:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](#), informando o código verificador **3470120** e o código CRC **0EFF94B3**.

**Referência:** Processo nº 23072.246047/2024-55 SEI nº 3470120

## AGRADECIMENTOS

São vários os motivos de agradecimento que fizeram com que esta dissertação chegasse ao ponto em que está. As pessoas ao meu redor me dizem que sou esforçada e determinada, e é por isso que estou concluindo um mestrado. Contudo, eu sei que só fui capaz de concluir esta dissertação devido aos privilégios que encontrei ao longo da vida e nos últimos dois anos.

Eu pude escolher me dedicar exclusivamente à pesquisa de mestrado e receber apenas a bolsa, porque tive familiares que custearam algumas das minhas despesas. Eu pude mergulhar na escrita da pesquisa, porque tive familiares que fizeram comida e me entregaram. Eu pude ficar até tarde da noite no laboratório porque tive a possibilidade de ter um transporte. Tive acesso à laboratórios e pude expandir os ensaios desta pesquisa graças à minha orientadora, que possui uma rede laboratórios parceiros e amigos. Também pude ampliar meu conhecimento além da arquitetura e entender uma pequena parte da geotecnia, porque tive uma coorientadora que me explicou tudo de forma didática e me deu acesso ao laboratório onde passei grande parte das horas de dedicação a esta pesquisa.

Assim, sou grata a cada pessoa que contribuiu e continua contribuindo para minha formação e desenvolvimento como cientista e pesquisadora. Agradeço primeiramente a Deus e toda a espiritualidade amiga pela intuição e bençãos que permitiram que todos esses privilégios se realizassem.

Agradeço mais uma vez à UFMG, por ser esta universidade maravilhosa e por fazer parte da minha vida. Foram oito anos de UFMG, entre graduação, pesquisa e mestrado que impactaram profundamente meu modo de pensar e agir. A UFMG mudou minha vida e sou grata por tudo o que me ofereceu: as amizades, a profissão, a paixão por taipa de pilão, os congressos, os cursos, os almoços no restaurante universitário, a paisagem, o esporte que tanto amo e o conhecimento. Eu tenho muito orgulho de ter feito parte da UFMG. Espero poder contribuir muito ainda.

Agradeço imensamente aos meus familiares, pela compreensão em me ver quase sempre com meu computador à frente. Agradeço à minha mãe pelo encorajamento e lições nos momentos de desânimo e pelo companheirismo nas conversas. Agradeço ao meu pai por todo orgulho, ajuda e incentivo para que eu seguisse o que meu coração desejava. Agradeço à minha irmã por comemorar cada

conquista minha e por me ajudar a olhar com admiração as escolhas que fiz para estar aqui. Agradeço ao meu marido por abrir mão das comemorações dos aniversários de casamento para me alimentar e cuidar para que eu tivesse tudo o que eu precisava para focar quase integralmente na pesquisa.

Agradeço à Profa. Sofia por me orientar na vida, na profissão, na ciência e na carreira, espero poder aprender e trocar muito conhecimento com você ainda. Agradeço à Profa. Talita que me acolheu e me ensinou muito. Agradeço à Lorena, aluna de iniciação científica, que trabalhou como uma formiguinha de um lado para o outro no laboratório, para que eu pudesse ficar parada apenas concentrada na execução dos ensaios (e nas fofocas). Agradeço ao técnico do laboratório de Geotecnia que me auxiliou nos primeiros ensaios e me ensinou algumas dicas que aprimoraram minha execução dos ensaios.

Agradeço à equipe do Núcleo de Pesquisa de Materiais Sustentáveis: à Gabriela, por tantas dicas, tantas conversas e desabafos; à Larissa por todo apoio e conversas, à Dayane, por me ajudar em alguns sufocos, sempre prestativa; e à Ana Carol, que me ajudou no finalzinho da jornada. Somos uma equipe e tanto!

Agradeço à minha turma de mestrado, em especial à Carol, Ingrid e Alex por todo apoio, desabafo, incentivo e ajuda. Aos meus amigos e parceiros de todas as horas, Isa e Marcos, pelas histórias compartilhadas e figurinhas trocadas, sempre com boas perspectivas. À minha amiga Cíntia, pela companhia e pela ajuda fundamental no cálculo das derivadas das equações.

Agradeço aos professores da banca de qualificação, Prof. Fernando Minto e Prof. White dos Santos, que contribuíram cada um com sua área de conhecimento, de forma essencial para esta pesquisa.

Obrigada à CAPES pelo financiamento e por aumentar a bolsa no mês seguinte à minha entrada. E, por fim, agradeço a mim, por todo esforço em aproveitar ao máximo os privilégios encontrados.

## EPÍGRAFE

‘Bom, para você entender o que estamos mostrando aqui, é importante pisar na terra.’ [...] somos educados a pensar que a terra é algo sujo. Como esperar que gerações inteiras que associam terra à sujeira possam se conectar com as questões ambientais e climáticas que são tão emergentes? Essa é uma reflexão global, porque se conecta a muitos contextos. ‘Mas, além disso, é também um convite a pensar a terra enquanto tecnologia ancestral e, ao mesmo tempo, do futuro. Um convite a pensarmos como podemos associar isso com as tecnologias de hoje e construir de forma mais respeitosa com o meio ambiente’ (Gabriela Matos em entrevista ao site Archdaily, 2023<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/1000485/terra-como-tecnologia-ancestral-e-do-futuro-entrevista-com-gabriela-de-matos-e-paulo-tavares>

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e com o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processos APQ-05495-18 e APQ-00172-23.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001", and with financial support of da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), funding codes APQ-05495-18 and APQ-00172-23.

## RESUMO

Taipa de pilão é uma das técnicas construtivas de terra utilizadas no Brasil e uma das técnicas mais utilizadas no mundo. Embora as pesquisas sobre a resistência mecânica do material estejam bem estabelecidas, é a natureza higroscópica do material e os fatores que interferem nesta propriedade que definem a durabilidade da taipa de pilão. Desta forma, em um cenário de eventos climáticos extremos, as paredes de taipa podem ser afetadas. Portanto, para tornar a técnica mais resiliente aos eventos climáticos extremos, a criação de diretrizes sobre como prever a durabilidade do material torna-se primordial. Esta pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento da taipa de pilão, produzida com diferentes teores de rejeito de minério de ferro sedimentado (RMF-S), em contato com a água em diferentes formas de exposição. O solo e o RMF-S foram caracterizados por meio de ensaios físicos, químicos e mineralógicos. As misturas propostas foram divididas em três grupos. O Grupo 1 (G1) foi composto por cinco misturas, das quais, duas serviram como amostras de referência (100% solo e 100% RMF-S), enquanto as outras três consistiram em misturas com 70%, 80% e 90% de RMF-S. O Grupo 2 (G2) foi composto pelas mesmas misturas e a adição de 40% de areia (Solo + RMF-S+ areia). No Grupo 3 (G3), para estabilização das misturas, utilizou-se 2,5% de cimento (Solo + RMF-S+ areia + cimento). As misturas foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão, porosidade, absorção por capilaridade e gotejamento. Como resultado, o cimento diminuiu a resistência à compressão das misturas sem RMF-S de 1,24 MPa para 1,15 MPa. O uso do cimento aumentou a resistência à compressão das misturas com 100% de RMF-S em 22%. A mistura com menor valor de absorção de água foi a 70-AC do G3. No ensaio de gotejamento, as misturas do G2 apresentaram erosão enquanto o G3 não. A partir dos resultados, foi possível concluir que o RMF-S teve um impacto positivo nas misturas, especialmente naquelas com 90% de RMF-S, ao aumentar a densidade e diminuir a porosidade. Com a aplicação de energia modificada de compactação, a resistência à compressão também foi aumentada. Acredita-se que nas misturas com maiores teores de RMF-S, o cimento tenha sido eficaz em reduzir o tamanho dos poros das misturas ao diminuir a erosão por gotejamento, contribuindo assim para a durabilidade das misturas analisadas.

**Palavras-chave:** taipa de pilão; eventos climáticos extremos; absorção por capilaridade; gotejamento.

## **ABSTRACT**

*Rammed earth is one of the earthen construction techniques used in Brazil and is among the most widely used techniques globally. While research on the mechanical strength of the material is well-established, it is the hygroscopic nature of the material and the factors influencing this property that determine the durability of rammed earth. Thus, in a scenario of extreme weather events, rammed earth walls may be adversely affected. Consequently, to make the technique more resilient to extreme climatic events, establishing guidelines on how to predict the material's durability becomes essential. This research aims to analyse the behaviour of rammed earth, produced with varying levels of sedimented iron ore tailings (RMF-S), in contact with water under different exposure conditions. The soil and RMF-S were characterised through physical, chemical, and mineralogical tests. The proposed mixtures were divided into three groups. Group 1 (G1) comprised five mixtures, of which two served as reference samples (100% soil and 100% RMF-S), while the remaining three consisted of mixtures with 70%, 80%, and 90% RMF-S. Group 2 (G2) included the same mixtures with the addition of 40% sand (Soil + RMF-S + sand). In Group 3 (G3), to stabilise the mixtures, 2.5% cement was used (Soil + RMF-S + sand + cement). The mixtures were subjected to compression strength tests, porosity, capillary absorption, and drip tests. As a result, cement decreased the compressive strength of mixtures without RMF-S from 1.24 MPa to 1.15 MPa. Cement use increased the compressive strength of mixtures with 100% RMF-S by 22%. The mixture with the lowest water absorption value was 70-AC from G3. In the drip test, G2 mixtures showed erosion, whereas G3 did not. From these results, it was possible to conclude that RMF-S had a positive impact on the mixtures, especially those with 90% RMF-S, by increasing density and decreasing porosity. With the application of modified compaction energy, compressive strength was also improved. It is believed that in mixtures with higher RMF-S content, cement was effective in reducing pore size within the mixtures by decreasing drip erosion, thereby contributing to the durability of the analysed mixtures.*

**Keywords:** *rammed earth; extreme weather events; capillary absorption; dripping; drip test.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Templo de Ramsés II, Egito.....	21
Figura 2 – A construção com terra no mundo. ....	22
Figura 3- Manuscrito de meados do século XIX, em Serinagar. ....	23
Figura 4 - Mudança de temperatura observada desde 1850.....	34
Figura 5 - Risco de inundação histórica e projetada. ....	36
Figura 6 - Formas de interação da taipa de pilão com a água .....	39
Figura 7 - Interações e ensaios adequados - taipa de pilão versus água. ....	39
Figura 8 – Mapa – Localização dos municípios e do Rio Doce.....	45
Figura 9 – Amostra de solo (esq.) e de RMF-S (dir.).....	45
Figura 10 – Porção retida no peneiramento. ....	46
Figura 11 - Conjunto de peneiras para peneiramento fino (esq.) e porções retidas no peneiramento fino (dir.). ....	50
Figura 12 – Ensaio de plasticidade (esq.), amostra para limite de plasticidade (centro) e aparelho para determinação do limite de liquidez (dir.). ....	51
Figura 13 - Copo dispersor (esq.) e amostra em picnômetro submetida ao vácuo (dir.). ....	57
Figura 14 - Soluções tampão (esq.), leitura do pH com agitador magnético (centro) e limpeza do eletrodo (dir.).....	58
Figura 15 - Homogeneização da amostra (esq.), papel filtro colocado no interior da fôrma (centro) e compactação da mistura (dir.).....	60
Figura 16- Extrator de corpo de prova (esq.), corpo de prova (centro) e teores variados umidade de compactação (dir.) .....	60
Figura 17 - Fôrma cilíndrica (dir.), fôrma, colarinho e soquete grande (centro) e nivelamento da superfície do corpo de prova (esq.).....	62
Figura 18 – a) Aderência da mistura à forma, b) Mistura 0-AC, c) Mistura 70-AC, d) Mistura 80-AC, e) Mistura 90-AC, f) Mistura 100-AC. ....	63
Figura 19 – Aderência da mistura à fôrma (esq.), montagem da fôrma (centro) e	

plastificação da fôrma (dir.) .....	64
Figura 20 – Fôrma, soquete e compactador (esq.) e corpo de prova sendo desmoldado(dir.) .....	64
Figura 21 - Plástico no fundo da fôrma (esq.), fôrma montada com funil (centro) e equipamento para moldagem estática. ....	65
Figura 22 - Régua para aferição da altura (esq.), régua na primeira camada (centro) e régua na segunda camada.....	66
Figura 23 - Resumo dos corpos de prova moldados.....	67
Figura 24- Resumos dos ensaios realizados.....	68
Figura 25 - Neoprene no corpo de prova na energia modificada (esq.) e energia normal (dir.).....	69
Figura 26 - Equipamento analisador de densidade real (esq.) e amostra no equipamento (dir.) .....	69
Figura 27 - Corpo de prova envelopado (esq.) e ensaio de capilaridade (dir.).....	71
Figura 28 - Sistema para gotejamento (esq.), gotejamento (centro) e inclinação do corpo de prova (dir.) .....	73
Figura 29 - Resultado da determinação de matéria orgânica do RMF-S. ....	75
Figura 30 - Corpos de prova com ruptura diagonal.....	92
Figura 31 - Absorção por capilaridade de um corpo de prova.....	93
Figura 32- Sequência fotográfica do processo de ascensão capilar da água em uma mistura. ....	94
Figura 33 - Corpos de prova abertos após ensaio. ....	94
Figura 34 - Erosão final do ensaio de gotejamento – Misturas do Grupo 2.....	97
Figura 35 - Misturas após o ensaio de gotejamento – Misturas do Grupo 3. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio físicos - CII F32. ....	47
Tabela 2 - Ensaio químicos - CII F32. ....	47
Tabela 3 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo e RMF-S. ....	48
Tabela 4 - Classificação do solo segundo a AASHTO. ....	52
Tabela 5 - Misturas e proporção de materiais – Grupo 1. ....	55
Tabela 6 - Misturas e proporção de materiais com correção granulométrica. ....	55
Tabela 7 – Resumo das misturas e proporção de materiais. ....	56
Tabela 8 - Resumo dos ensaios de caracterização das misturas. ....	57
Tabela 9 - Análise química das amostras de solo e RMF-S. ....	75
Tabela 10 - Limites do solo e RMF-S. ....	78
Tabela 11 - Massa específica dos grãos - Solo, RMF-S e areia. ....	80
Tabela 12 - Teor de constituintes inorgânicos lixiviados. ....	80
Tabela 13 - Teor de constituintes inorgânicos solubilizados. ....	81
Tabela 14 - Limites - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2. ....	82
Tabela 15 - Massa específica dos grãos - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2. ....	84
Tabela 16- Resistência à compressão – Misturas do Grupo 2 e 3. ....	89
Tabela 17 - Porosidade e densidade real – Misturas do Grupo 2 e 3. ....	92
Tabela 18 – Erosão por gotejamento - Misturas do Grupo 2. ....	96
Tabela 19 - Erosão por gotejamento - Misturas do Grupo 3. ....	96

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Difratoograma das amostras de solo e RMF-S.....	74
Gráfico 2 - Curva granulométrica do solo.....	76
Gráfico 3 - Curva granulométrica do RMF-S .....	77
Gráfico 4 - Porcentagem de composição granulométrica do solo e RMF-S.....	77
Gráfico 5 - Análise de pH - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2.....	84
Gráfico 6 - Compactação – Misturas do Grupo 1 (solo + RMF-S).....	85
Gráfico 7 - Compactação – Misturas do Grupo 2 (Solo + RMF-S + areia). .....	87
Gráfico 8 - Compactação – Misturas do Grupo 3 (Solo + RMF-S + areia + cimento). .....	87
Gráfico 9 - Comparação da compactação e umidade ótima – Misturas do Grupo 1, 2 e 3. ....	88
Gráfico 10 - Resistência à compressão com energia normal e energia modificada – Grupo 2. ....	90
Gráfico 11 - Resistência à compressão, densidade real – Misturas do Grupo 2 e 3.	91
Gráfico 12 - Absorção por capilaridade – Misturas dos Grupos 2. ....	95
Gráfico 13 - Absorção por capilaridade - Misturas do Grupo 3.....	95

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
DrX	Difração de raios X
DMC	Dimensão máxima característica
Frx	Fluorescência de raios X
IA	Índice de atividade da argila
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MF	Módulo de finura
PIB	Produto Interno Bruto
RMF	Rejeito de minério de ferro
RMF-S	Rejeito de minério de ferro sedimentado
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
GEE	Gases de efeito estufa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
	1.1 Objetivos .....	20
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
	2.1 A Taipa de Pilão.....	21
	2.1.1 A Taipa de Pilão no Brasil.....	25
	2.1.2 Estabilização .....	26
	2.1.3 Correção granulométrica.....	29
	2.1.4 O uso dos rejeitos de mineração na construção civil.....	30
	2.2 As mudanças climáticas.....	33
	2.3. A durabilidade da Taipa de Pilão.....	37
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
	3.1 Materiais.....	44
	3.2 Caracterização dos materiais.....	47
	3.3 Caracterização das misturas.....	53
	3.4 Moldagem dos corpos de prova.....	61
	3.5 Análises mecânica, física e de durabilidade.....	67
	3.5.1 Resistência à compressão.....	68
	3.5.2 Porosidade.....	69
	3.5.3 Absorção por capilaridade.....	71

3.5.4	Gotejamento.....	72
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	74
4.1	Caracterização dos materiais.....	74
4.2	Caracterização das misturas.....	81
4.3.	Análise dos ensaios mecânico, físico e de durabilidade.....	89
4.3.1	Resistência à compressão.....	89
4.3.2	Porosidade.....	92
4.3.3	Absorção por capilaridade.....	93
4.3.4	Gotejamento.....	96
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

A terra como material construtivo existe desde os primeiros povoados, há 10 mil anos, quando os homens construía com terra, pedras e palha. As técnicas empíricas de utilização da terra foram transmitidas por povos conquistadores para outras regiões e transmitidas através de gerações (OLENDER, 2006). Dessa forma, não se sabe ao certo a origem das técnicas construtivas com terra (WEIMER, 2012).

Com o avanço da tecnologia, especialmente após a Revolução Industrial, houve uma diminuição no uso de técnicas de construção com terra, particularmente em países desenvolvidos. Somente na década de 1970, começou a se estabelecer a consciência de que as raízes dos problemas ambientais recorrentes no globo são consequências da forma de desenvolvimento tecnológico e econômico adotados nos últimos 200 anos (GODARD, 2002).

Devido ao fato de a construção civil ser um dos setores industriais mais poluentes do planeta, o uso de sistemas construtivos sustentáveis aponta como uma solução para diminuir o impacto ao ambiente. Neste contexto, as técnicas construtivas com terra oferecem a possibilidade de diminuir os impactos ambientais devido à baixa energia incorporada de construção (BUI *et al.*, 2014; NITO, AMORIM, 2015; THOMPSON, AUGARDE, OSORIO, 2022).

Dentre as técnicas de construção com terra, o foco do presente estudo é a taipa de pilão. A técnica corresponde à compactação de terra umedecida, em camadas sucessivas, verticalmente, dentro de moldes removíveis, com o auxílio de compactador manual ou mecânico (MILANI, MAIA, 2018). É uma das técnicas de construção com terra com mais tradição e projeção futura, e cuja compreensão é essencial para seu uso na construção contemporânea (ÁVILA, PUERTAS, GALLEGRO, 2021).

Essa técnica possui diversas vantagens ambientais. Primordialmente por ter a terra como principal matéria-prima, que é um material ainda disponível e pode reduzir a dependência de importação (GERARD *et al.*, 2015). Além disto, a terra quando compactada, tem massa térmica elevada, que a torna estável a altas temperaturas (CORDEIRO *et al.*, 2020).

Contudo, uma das vulnerabilidades da taipa de pilão, tal qual outras técnicas construtivas 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 taipa de pilão está mais relacionada às características de resistência à água, do que à resistência mecânica (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020).

Documentos normativos sugerem que com um projeto arquitetônico adequado - isto é, com grandes extensões de telhado, a fundação elevada do nível do solo, o revestimento da alvenaria ou a impermeabilização da alvenaria, proteção mecânica, e outras formas de evitar o contato da alvenaria com a água - esses problemas podem ser eliminados (ABNT, 2022a; NZS, 2020). No entanto, para atender às normas aplicadas aos materiais industriais, são esperados da taipa de pilão critérios de durabilidade mais rigorosos (BUI *et al.*, 2009). Ademais, devido ao destaque adquirido pelas paredes de taipa de pilão expostas, por razões estéticas (HOPPE, 2022), tornou-se uma prática usada por construtoras contemporâneas deixar a parede sem revestimento, o que aumenta a exposição e a interação água/alvenaria.

Para tornar a taipa de pilão uma técnica contemporânea, faz-se necessário estar em constante evolução e aprimoramento para aumentar a durabilidade da taipa de pilão em relação aos componentes construtivos industrializados (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020). Para tal, requer melhorias no desempenho mecânico e, principalmente, no que diz respeito ao comportamento em contato com a água (LOSINI *et al.*, 2023a).

Soma-se a isso o fato do Brasil ser um país com intensa exploração mineral, com significativa contribuição do PIB brasileiro (ANM, 2022). Apesar dos altos lucros, uma das principais questões ambientais associadas à extração do ferro é a quantidade de rejeitos gerados durante o processo de beneficiamento e as consequências ambientais ocasionadas por esse procedimento.

Em 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão em um subdistrito do município de Mariana, que armazenava 55 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro. Isso resultou no deslocamento do rejeito através dos rios, onde foi sedimentado (SEMAD, 2016). O rejeito de minério de ferro sedimentado (RMF-S) foi dragado e está disponível para utilização pelas comunidades atingidas pelo desastre,

assim como pelas cidades da região de Mariana, MG.

Portanto, diante do exposto, é possível que a utilização do RMF-S seja adequada à produção da taipa de pilão em relação ao comportamento deste material em contato com a água. As inovações aplicadas à taipa de pilão, dessa forma, poderiam contribuir com duas demandas contemporâneas: i) técnicas construtivas de menor impacto ambiental; e ii) utilização do rejeito dragado do leito dos rios após o acidente em Fundão, que está disponível para uso, na construção civil.

### **1.1 Objetivos**

Portanto, o objetivo geral desta pesquisa é analisar o comportamento da taipa de pilão, produzida ou não com o rejeito de minério de ferro sedimentado (RMF-S), em diferentes situações de exposição de contato com a água.

Como objetivos específicos, tem-se:

- i) Caracterizar as misturas produzidas com RMF-S e solo para a produção da taipa de pilão;
- ii) Analisar a viabilidade de incorporação de estabilizantes à taipa de pilão produzidas com e sem RMF-S;
- iii) Analisar o comportamento da taipa de pilão em contato com a água, produzida com e sem RMF-S, por meio de ensaios de capilaridade e gotejamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

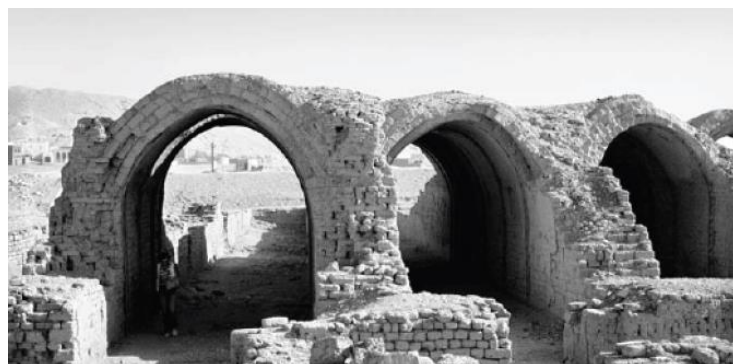
A revisão bibliográfica, apresentada nesta pesquisa, pretendeu abordar assuntos de base pertinentes ao tema central, que é o comportamento da taipa de pilão em contato com água. Para tal, a revisão da bibliografia foi dividida em três eixos, atentando à definição de conceitos necessários. A saber: i) a historiografia da taipa de pilão, da origem ao contemporâneo, ii) as mudanças climáticas e os eventos extremos, e iii) a previsão da durabilidade da taipa de pilão.

### 2.1 A Taipa de Pilão

As construções de terra remontam à origem da agricultura, quando o homem deixou de ser nômade. A mais antiga evidência de construção de terra data de 10.000 a.C (MEBARKIA, BOUZEROURA, CHELOUAH, 2022). Há habitações no atual Turcomenistão à base de blocos de terra datadas entre 8000 a.C. e 6000 a.C. (MINKE, 2006). Na Mesopotâmia ainda é possível encontrar vestígios de edificações em terra com mais de 9000 anos de existência (PACHECO-TORGAL, EIRES, JALALI, 2009).

Ainda que milenares, há casos de construções em terra que conseguiram perdurar no século XXI, como o Templo de Ramsés II (Figura 1), que foi construído há 3200 anos e ainda é possível percorrer sua ruína, e a Grande Muralha da China, que teve a construção iniciada há 3000 anos (PACHECO-TORGAL, EIRES, JALALI, 2009).

Figura 1- Templo de Ramsés II, Egito

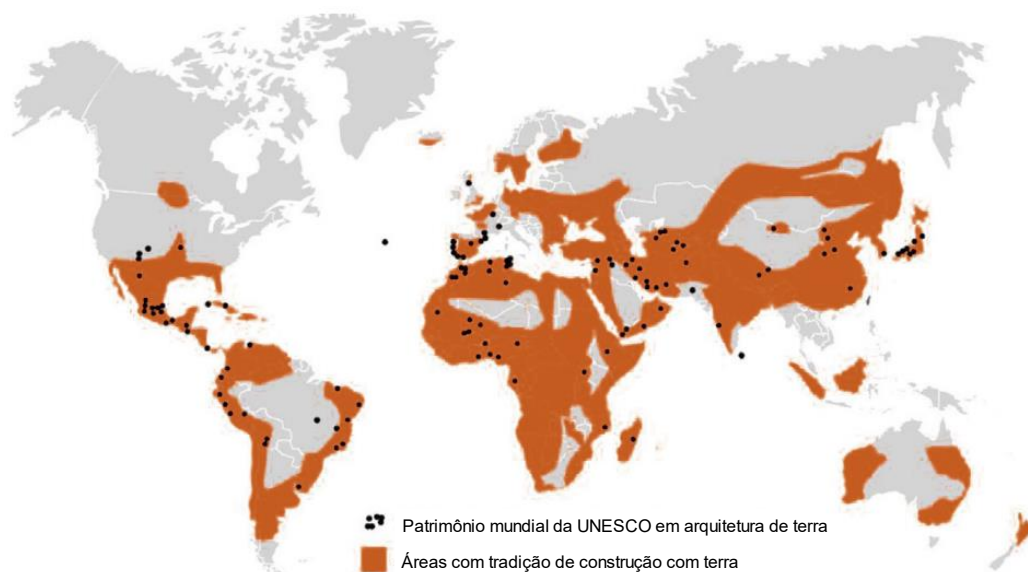


Fonte: MINKE, 2006.

As técnicas de construção com terra foram desenvolvidas quando o homem utilizava de materiais locais, abundantes em cada região e adequava o material às condições climáticas e culturais em que a edificação era construída (CORDEIRO *et al.*, 2019). É possível que as técnicas construtivas de terra tenham sido desenvolvidas independentemente em diferentes partes do mundo (JAQUIN, PAUL, 2012), uma vez que todos os continentes e quase todos os países possuem uma rica herança de construção com terra (ÁVILA, PUERTAS, GALLEGRO, 2021; MINKE, 2006), conforme pode ser visto na Figura 2.

Alguns autores afirmam que um terço ou um quarto da população humana viva em edificações de terra (HOUBEN, GUILLARD, 1994; THOMPSON, AUGARDE, OSORIO, 2022).

Figura 2 – A construção com terra no mundo.



Fonte: Adaptado de CRATerre, 2020<sup>2</sup>.

Dentre as técnicas construtivas de terra, a taipa de pilão é uma técnica encontrada em todos os continentes e em diversas culturas (FERNANDES, 2008; JAQUIN, PAUL, 2012). Não se sabe ao certo quando e onde a construção com terra desenvolveu para originar a técnica da taipa de pilão. Weimer (2012) aponta estudos

<sup>2</sup> Disponível em: [http://craterre.org/accueil:galerie-des-images/default/gallery/38/image/471/gallery\\_view/CraterreImage](http://craterre.org/accueil:galerie-des-images/default/gallery/38/image/471/gallery_view/CraterreImage)

que indicam uma possível origem aos celtas entre 1200 a.C e 900 a.C., e outros estudos que associam seu aparecimento ao norte da África. Jaquin *et al.* (2012) afirmam que a técnica na antiguidade (entre 4000 a.C. e 476 d.C) era encontrada em todo o Mediterrâneo e, na mesma latitude, no Irã, Paquistão, Índia e China e no período de grandes colonizações, a taipa de pilão foi levada para a América do Sul.

A forma de construção da taipa de pilão remonta às civilizações mais antigas, como o antigo Egito. É possível observar, na Figura 3, um manuscrito em farsi, parte de uma coleção da Biblioteca Britânica, desenhado em meados do século XIX, descrevendo o modo de construção em taipa de pilão.

Figura 3- Manuscrito de meados do século XIX, em Serinagar.



Fonte: British Library, Londres (*apud* JAQUIN *et al.*, 2012).

A taipa de pilão consiste na compressão de camadas sucessivas de terra dentro de fôrmas, em cofragens verticais para criar uma parede monolítica (LOSINI *et al.*, 2022). Esta técnica deve a sua resistência ao esforço de compactação que aumenta a resistência mecânica do material.

Para construir uma parede de taipa de pilão, monta-se uma fôrma horizontais postas paralelamente e apoiadas em estruturas verticais que delimitam a cofragem. O solo utilizado para a construção é comumente retirado do local e se necessário, peneirado e lançado na fôrma com camadas de aproximadamente 30 cm e compactadas ao ponto de reduzir a altura das camadas para 15 cm. Após a correta

compactação, uma nova camada de solo é adicionada e o processo é repetido até que a cofragem esteja completa, para atingir a altura desejada da alvenaria (JAQUIN, PAUL, 2012).

Com o desenvolvimento tecnológico dos materiais industriais, nos últimos séculos, a arquitetura e o estilo arquitetônico passaram a exigir maior esbeltez, resistência e maiores vãos, e a taipa de pilão, como outras técnicas construtivas de terra não acompanharam esta evolução. Após a Revolução Industrial, houve um aumento do uso de meios de construção industrializados (CORDEIRO *et al.*, 2019).

Apenas em 1972 ocorreu uma mudança neste paradigma, na Conferência das Nações Unidas em Estocolmo, em que se atentou “à necessidade de um critério e de princípios comuns que ofereçam aos povos do mundo inspiração e guia para preservar e melhorar o meio ambiente humano.”<sup>3</sup> Com o objetivo de encontrar alternativas de menor impacto ambiental para a indústria da construção, as técnicas construtivas de terra voltam a atrair interesse dos profissionais e da população civil (LOSINI *et al.*, 2022).

A partir de então, as diversas ações foram desenvolvidas para aprimorar e divulgar a arquitetura de terra, como a fundação francesa CRATerre em 1979, um centro de pesquisa, formação e construção de novos projetos com arquitetura de terra (FERNANDES, 2008). O CRAterre é, até os dias atuais, uma referência internacional em pesquisa e difusão da arquitetura de terra. A Austrália tem liderado no contexto da produção de taipa de pilão contemporânea, tendo fomentado a criação de normas e diretrizes de construção específicas para essas técnicas, o que ajudou na consolidação dessa técnica construtiva no país (FERNANDES, 2008).

A Austrália, os Estados Unidos, a Turquia, a Alemanha e a Suíça também se destacam na pesquisa e construção de taipa de pilão contemporânea com tecnologia e mecanização do sistema construtivo (GOMAA *et al.*, 2023).

---

<sup>3</sup> Tradução livre por CETESBE, 2013.

### **2.1.1 A Taipa de Pilão no Brasil**

No Brasil, a taipa de pilão começou a ser empregada após a chegada dos Portugueses, em 1500. Os povos indígenas do Brasil não construíam com materiais minerais, ao contrário, construíam com materiais de origem vegetal, como madeira e palha (SILVA, 2000). Apenas quando os colonizadores europeus chegaram ao Brasil, as técnicas construtivas de terra foram introduzidas ao modo de construir e posteriormente houve contribuição dos povos africanos trazidos ao Brasil como escravos.

No Período Colonial começaram as primeiras construções de taipa de pilão no Brasil para edificações de casas nos núcleos de colonização. Posteriormente começou-se a construção de taipa de pilão para fins militares com intuito de proteger as terras invadidas pelos portugueses contra rivais europeus e povos indígenas (EIJK, SOUZA, 2006). A terra era extraída a uma profundidade específica, isenta de folhas e galhos (MENDES, BESSA, 2021).

A taipa de pilão para fins religiosos foi largamente utilizada no país durante os períodos de Brasil Colônia, Brasil Império, e em menor grau, na época de Brasil República. A técnica foi utilizada para construir igrejas e numerosas outras edificações religiosas com destaque para os estados de São Paulo e Goiás (EIJK, SOUZA, 2006).

Com o fim do Período Colonial e a Proclamação da República, surgiu um movimento de rejeição às técnicas construtivas portuguesas predominantes no período anterior, incluindo a aversão às práticas construtivas com terra. Esse movimento representava a busca pelo progresso e o início de uma nova fase na recém proclamada república (REIS FILHO, 2000).

A Revolução Industrial possibilitou a concretização desse movimento de progresso idealizado. Com a instalação de fábricas e indústrias no Brasil, tornou-se viável uma produção em larga escala de tijolos, impulsionando a ascensão da construção em alvenaria de tijolo cerâmico (REIS FILHO, 2000). Dessa forma, a taipa de pilão e outras técnicas construtivas de terra foram gradualmente substituídas por materiais industriais, como o bloco cerâmico, o concreto e o aço.

Neste contexto, a taipa de pilão sofreu grande declínio. Somente na década de

1970, seguindo uma tendência global, a taipa de pilão volta como uma possibilidade construtiva (FERNANDES, 2008).

Nos últimos anos, tem havido um aumento no interesse de acadêmicos por taipa de pilão e outras técnicas construtivas de terra no Brasil. Esse interesse é evidenciado pela criação de organizações, redes de pesquisa e eventos especializados dedicados ao tema, como a Rede TerraBrasil e a publicação de duas normas de construção com terra (ABNT, 2020, 2022a). Embora a demanda por construções de taipa de pilão tenha aumentado, essa técnica construtiva ainda não está consolidada no Brasil e não é atualmente uma prática comum no mercado. Assim, torna-se essencial a constante divulgação e aprimoramento da técnica, preparando o campo científico, técnico e profissional brasileiro para sua aplicação quando houver maior procura, acompanhando a tendência mundial.

### **2.1.2 Estabilização**

O conceito de estabilização das técnicas construtivas de terra, permanece em debate na literatura acadêmica. Segundo Minke (2006), a estabilização pode ser considerada como uma modificação física ou mecânica nos parâmetros da terra, que melhora uma ou mais características do material.

Alguns autores definem que taipa de pilão pode ser estabilizada por meio de estabilização física, mecânica e química. A estabilização física é alcançada adicionando materiais para uma melhor distribuição granulométrica das partículas (CIANCIO, JAQUIN, WALKER, 2013). A estabilização mecânica é alcançada por compactação pneumática, e a estabilização química é alcançada com a adição de algum agente químico como cimento, cal ou outro aditivo que melhore as propriedades do solo (KARIYAWASAM, JAYASINGHE, 2016).

De forma contrária, alguns autores defendem que a taipa de pilão deve ser composta por areia, silte e aglutinante, e quando o único aglutinante utilizado é a argila, obtém-se taipa de pilão não estabilizada. Quando um aglutinante ou cimentante é utilizado, tem-se taipa de pilão estabilizada (BUI et al., 2014; JAQUIN et al., 2009; KOSARIMOVAAHED, TOUFIGH, 2020; MEBARKIA, BOUZEROURA, CHELOUAH, 2022; TOUFIGH, KIANFAR, 2019). Este conceito é o adotado para esta pesquisa.

A estabilização tende a elevar a durabilidade e o comportamento mecânico da taipa de pilão. Contudo, estabilizantes podem aumentar o impacto ambiental da edificação (BUI *et al.*, 2014), devido ao processo de extração ou de produção do material adicionado (MENDES, BESSA, 2021).

Quando há necessidade, vários estabilizantes têm sido utilizados ao longo dos anos.

#### a) Estabilizantes cimentícios

A estabilização da taipa de pilão com cimento tem sido utilizada para a construção de edifícios desde as últimas seis ou sete décadas em vários países no mundo, incluindo Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos e alguns países da África e Europa. A estabilização com cimento ganhou popularidade devido ao ganho de resistência, à durabilidade e a possibilidade de obter propriedades aceitáveis com baixa porcentagem de cimento, especialmente em solos lateríticos (KARIYAWASAM, JAYASINGHE, 2016).

Arrigoni *et al.* (2017) e Guettala *et al.* (2006) constataram que o cimento contribuiu positivamente para a durabilidade da taipa de pilão, o que se deve ao fato de que o cimento interfere na coesão dos minerais da argila. Segundo Minke (2015), o cimento acrescenta resultados satisfatórios como estabilizante de solos com pouca argila. Guettala *et al.* (2006) concluíram que a mistura com 5% de cimento obteve resultado satisfatório na resistência à compressão e durabilidade de blocos de terra.

Toufigh e Kianfar (2019) utilizaram cimento em teores de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% para estabilizar taipa de pilão com solo arenoso. Os autores concluíram que a mistura com 2,5% de cimento aumentou a resistência à compressão em 26% em relação a mistura não estabilizada, resultando em 2,80 MPa. A adição de 7,5% de cimento à mistura não interferiu na densidade, e a resistência à compressão em estado úmido aumentou três vezes (de 1,25 MPa para 3,75 MPa).

Zami *et al.* (2022) utilizaram cimento e cal, para estabilizar solos arenoargilosos, em teores de 2,5%, 5%, 7,5%, 10% e 15%. Os autores encontraram que todos os teores de cimento contribuíram para aumentar a resistência à compressão. O teor de 2,5% de cimento atingiu 1,82 MPa, um resultado 23,5% maior em relação a misturas sem cimento. A mistura com 15% de cimento atingiu 6,3 MPa,

excedendo o valor mínimo de 2 MPa exigido pela norma adotada pelos autores. Enquanto nas misturas com cal, o valor máximo chegou a 1,46 MPa (10% de cal), o que comprovou a eficiência da estabilização do cimento sobre a cal em solos arenoargilosos.

O uso de pó residual de cimento foi investigado na produção de bloco de terra comprimida (MEBARKIA, BOUZEROURA, CHELOUAH, 2022). Os autores constataram uma tendência em aumentar a resistência à compressão, diminuição da capilaridade e aumento da resistência à abrasão nas misturas em até 25% de substituição do solo por pó residual de cimento.

Já a cal possui a propriedade de estabilizar melhor solos ricos em argila, mais suscetíveis à retração (CIANCIO, BECKETT, CARRARO, 2014). Pesquisas apontam a cal também pode ser utilizada como estabilizante para solos lateríticos, com diminuição no teor ótimo de umidade e aumento do índice de plasticidade e durabilidade (BUI *et al.*, 2009; OLA, 1977).

É relevante ressaltar que a estabilização com materiais cimentícios, em geral, não é uma técnica ambientalmente adequada, por causa do impacto ambiental gerado no processo da fabricação desses materiais (KOUTOUS, HILALI, 2019). Por esse motivo, o uso de resíduos industriais têm sido avaliados e se apresentam como uma possibilidade na estabilização da taipa de pilão (OLACIA *et al.*, 2020; PACHECO-TORGAL, JALALI, 2012; REDDY, KUMAR, 2010). A utilização de resíduos é particularmente justificada em um cenário que demanda a redução de aglomerantes industrializados com elevado impacto ambiental. Assim, a utilização de resíduos industriais cimentícios, pozolânicos ou resinas é preferida.

#### b) Estabilizantes pozolânicos

Dentre os resíduos industriais pozolânicos, Arrigoni *et al.* (2019) utilizaram cinzas volantes da combustão de carvão e resíduo de carboneto de cálcio da produção de acetileno. A partir dos resultados encontrados, concluíram que após 56 dias de cura as amostras apresentaram aumento da resistência à compressão.

Kosarimovahhed e Toufigh (2020) também utilizaram cinzas volantes e concluíram que 7,5% deste resíduo pode contribuir positivamente nos valores de resistência à compressão e densidade da taipa de pilão obtendo resultados mais

elevados do que as amostras com 7,5% de cimento.

Toufigh *et al.* (2019) analisaram os resultados da pozolana, cimento e goma guar para estabilizar a taipa de pilão, com adição de fibra de vidro para correção granulométrica. Os autores concluíram que a pozolana pode ser mais eficiente do que o cimento, quando se considera o equilíbrio entre eficácia versus impacto ambiental.

#### c) Estabilização com resinas

Uma larga seleção de biopolímeros têm sido avaliados com bons resultados (LOSINI *et al.*, 2022; LOSINI *et al.*, 2023a; NGO *et al.*, 2022), principalmente sulfato de lignina, fibras de lã de ovelha e tanino. Losini *et al.* (2023b) relataram que utilização de biopolímeros de lã aumentou a resistência à compressão em 6%. Biopolímeros de sulfonato de lignina e o tanino aumentaram a resistência à compressão em 38% e 13%, respectivamente, a também houve redução da área de superfície específica e do volume de poros.

Em síntese, ao se analisar a literatura, é possível encontrar uma diversidade de estudos sobre diversos estabilizantes. No processo de seleção do estabilizante apropriado, deve-se considerar as características e a granulometria do solo e, adotando uma abordagem de menor impacto ambiental, é preferível a escolha de estabilizantes amplamente disponíveis e próximos do local de estudo. Assim, é possível uma perspectiva consonante com a premissa da minimização do impacto ambiental em práticas construtivas.

### **2.1.3 Correção granulométrica**

Além da estabilização para melhorar a impermeabilização e, conseqüentemente, a durabilidade e a resistência mecânica, pode-se realizar a correção granulométrica do solo (MACHADO *et al.*, 2020). Segundo alguns autores, solos com continuidade granulométrica, contendo argila, silte, areias e pedregulho são mais adequados para o uso da taipa de pilão (GERARD *et al.*, 2015; HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011; KOUTOUS, HILALI, 2019). Isto por que, solos com continuidade granulométrica, tendem a diminuir o índice de vazios, aumentar densidade da mistura compactada e aumentar a coesão dos grãos quando compactados (LOSINI *et al.*, 2022).

Usualmente, solos com continuidade granulométrica e com características arenosas podem não necessitar de estabilizante (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011). Por isso, para determinar a necessidade e o tipo de estabilizante adequado ao solo, torna-se essencial analisar a coesão do solo em conjunto com a distribuição granulométrica.

Neste contexto, a correção do solo tem como objetivo deixar a mistura com continuidade granulométrica de modo a ser possível realizar os ajustes necessários. Pode-se remover, pelo peneiramento, a fração granular em excesso ou adicionar a fração granular insuficiente (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011). Uma outra possibilidade é adicionar um ou mais solos com distribuição granulométrica diferente, ou adicionar argila (quando esta fração é insuficiente) e areia (quando esta fração é insuficiente).

Contudo, o solo é um material complexo e natural. Solos com a mesma proporção granulométrica podem não gerar resultados similares em termos de resistência mecânica e coesão (KOUTOUS, HILALI, 2019), o que se deve principalmente às características mineralógicas presente nas argilas (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011).

Meek *et al.* (2021) utilizaram tijolo reciclado e concreto para correção granulométrica da mistura para taipa de pilão, obtiveram resultados satisfatórios de resistência à compressão. Koutous e Hilali (2019) e Mellaikhafi *et al.* (2021) obtiveram resultados satisfatórios na adição de areia em um solo fino. Houve um aumento na compactação e na resistência à compressão.

#### **2.1.4 O uso dos rejeitos de mineração na construção civil**

Os recursos naturais têm sido explorados de forma excessiva no planeta. A extração de minerais, em particular, frequentemente resulta em degradação ambiental significativa. Os resíduos provenientes das indústrias extrativas e de beneficiamento de minério desempenham um papel crucial na poluição ambiental (KURNIATI, PEDERSON, KIM, 2023).

Rejeitos de minérios são os resíduos resultantes da extração e do beneficiamento do mineral. Após a trituração e a moagem das rochas minerais são

aplicados processos físicos e químicos para extrair o mineral útil à indústria. Ao final, obtém-se o mineral de interesse, enquanto o que sobra, é o rejeito (SINIR, 2016).

Os rejeitos de mineração correspondem a uma suspensão residual composta de lama e arenoso fino que são geralmente depositados em barragens, em forma de lama. Devido à significativa geração e demanda de espaço para disposição de rejeitos na indústria de mineração, a adoção de tecnologias que utilizem esses resíduos pode ser benéfica. Essa abordagem não apenas reduziria a poluição, mas também estenderia a vida útil de barragens de rejeitos, resultando em economia nos custos operacionais da mineração em geral (GARCIA-TRONCOSO *et al.*, 2022).

Uma das preocupações no uso de rejeitos de mineração é quanto a presença de metais pesados. Kurniati, Pederson e Kim (2023), em uma revisão a respeito da aplicação dos rejeitos de mineração em materiais de construção, analisaram 13 estudos em que a presença de metais pesados foi avaliada através da análise de dados de ensaios de lixiviação. Como resultado, a maioria dos estudos encontraram teor de metais pesados lixiviados abaixo de padrões específicos. O mesmo pode ser visto em outro trabalho com utilização de rejeito de minério de ferro (MENDES, 2019).

Garcia-Troncoso *et al.* (2022) relatam que obtiveram resultados de resistência à compressão semelhantes para misturas com o concreto convencional e misturas em que a areia é substituída por 5% de rejeitos de mineração de ouro.

Kurniati, Pederson e Kim (2023) encontraram que a escória de aço, a escória de siderurgia, e os resíduos de mineração de cobre têm se mostrado promissores no uso na construção civil. Segundo os autores, esses resíduos industriais podem ser usados para aumentar as propriedades mecânicas específicas do concreto quando usado como substituição parcial do agregado fino.

Os rejeitos de minério de ferro (RMF) são um dos resíduos industriais mais comuns no mundo e, em geral, desencadeiam desafios econômicos e ambientais em numerosos países (WEISHI *et al.*, 2018). No Brasil, em 2021, o minério de ferro foi o mineral com maior extração, atingindo aproximadamente 567 milhões de toneladas do material bruto, o que gerou cerca de 250 bilhões de reais (ANM, 2022). Apenas no estado de Minas Gerais, dos mais de 360 milhões de toneladas de minério de ferro bruto extraído, foram gerados 177 milhões de toneladas de rejeito (ANM, 2022).

Devido ao volume expressivo, os rejeitos de minério de ferro devem ser armazenados de forma ambientalmente responsável, o que demanda extensas áreas e implica em elevados custos operacionais e de gestão (WEISHI *et al.*, 2018). Mesmo com esforços para um armazenamento responsável, há riscos de poluição e danos.

Minas Gerais é o estado brasileiro com maior número de barragens e possui 29 barragens classificadas como de alto risco pelo sistema de Categoria de Risco (CRI), 21 barragens classificadas como de médio risco e 154 barragens classificadas como de baixo risco (ANM, 2023). Em Minas Gerais, por exemplo, duas barragens romperam nos últimos anos. A barragem de Fundão em 2015, como já citado anteriormente e a barragem na Mina Córrego do Feijão, que rompeu em 2019, em Brumadinho.

Portanto, a utilização do rejeito de minério de ferro pode ser uma opção importante para diminuir os impactos gerados pela exploração e pelo beneficiamento deste mineral (LI *et al.*, 2019).

Li *et al.* (2019) analisaram a possibilidade de utilização de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos porosos para ser aplicado na construção de materiais de isolamento térmico e filtro de gases residuais industriais. A partir dos resultados de resistência à compressão encontrados, o uso do rejeito se mostrou positivo.

Weishi *et al.* (2018) concluíram que a utilização de RMF para a fabricação de tijolos contribuiu positivamente para a resistência à compressão dos tijolos. Shettima *et al.* (2018) utilizaram o RMF como substituto total e parcial da areia para concreto. Os autores indicam que 50% de substituição da areia por cimento obteve a maior resistência à compressão e a flexão.

Almada *et al.* (2023) estudaram a influência de 40% de RMF como adição mineral em argamassas estruturais. Os autores relatam aumento da resistência à compressão e a melhora nos indicadores de durabilidade, em relação as argamassas sem adição de RMF.

Mendes (2019) avaliou a possibilidade de utilização do RMF deslocado da barragem de Fundão na produção de blocos cerâmicos. A partir dos resultados obtidos os autores mostraram que a incorporação do RMF nos blocos cerâmicos contribuiu positivamente para o aumento da resistência à compressão.

Bessa *et al.* (2018) avaliaram a viabilidade do uso do RMF calcinado e *in natura* em argamassas para revestimento como substituto parcial do cimento Portland. Os autores estabeleceram que a substituição em até 60% não alterou as propriedades da argamassa, sendo compatíveis com argamassas padrão.

Morais *et al.* (2021) avaliaram as propriedades mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento produzidas com RMF calcinado e *in natura*, em substituição ao cimento. Os autores concluíram que a resistência à compressão e à flexão não foram afetadas pela substituição. No entanto, houve maior absorção solar nas amostras calcinadas.

Vimieiro *et al.* (2023) avaliaram a possibilidade de produção de adobe com substituição em massa do solo por RMF sedimentado da barragem de Fundão. Os autores concluíram que a absorção por capilaridade dos adobes diminuiu à medida que adicionou rejeito de minério de ferro sedimentado. A retração por capilaridade também diminuiu com a adição do rejeito.

De acordo com Lage, Santos e Bessa (2023), o uso do RMF em misturas para a taipa de pilão foi adequado. As autoras concluíram que o uso de RMF sedimentado contribuiu para o melhor empacotamento das partículas da mistura para taipa de pilão.

Há uma tendência de que os resultados apresentados pelas pesquisas indiquem a viabilidade no uso de rejeitos minerais na construção civil, desde o uso na fabricação de tijolos porosos, em argamassas e em concretos, como para a produção de arquitetura de terra. Essa prática não apenas reduz a dependência de recursos naturais, mas também contribui para minimizar os impactos ambientais do setor, diminuindo os custos operacionais e ambientais ligados ao armazenamento responsável de grandes volumes de rejeitos.

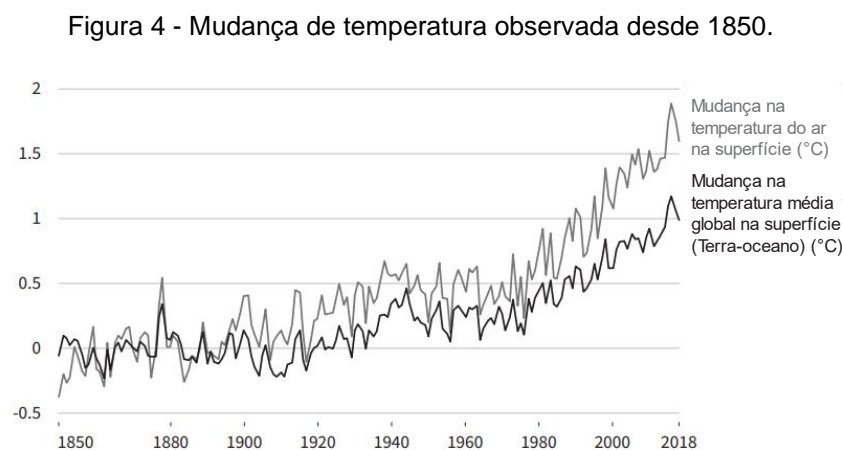
## **2.2 As mudanças climáticas**

O aumento global da temperatura representa uma indicação significativa das mudanças climáticas atuais. No entanto, outras evidências também corroboram com esse fenômeno (IPCC, 2022). As mudanças climáticas são evidenciadas por mudanças graduais na temperatura, na precipitação, na umidade atmosférica e na intensidade do vento, e além, no aumento do nível do mar, e podem influenciar a

frequência e a intensidade de fenômenos críticos, como secas, inundações e deslizamentos de terra.

Os sucessivos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) têm reiterado a evidência do aquecimento global, apontando as emissões de CO<sub>2</sub>, pela atividade humana, como a provável causa das consequências notadas desde o século XX. Dentre as consequências, destacam-se o aquecimento da temperatura dos mares, do ar e do solo, o aumento da acidificação das águas superficiais, bem como a subida média global do nível dos mares (IPCC, 2022).

Na Figura 4, é possível observar as médias de temperatura do ar e da superfície da Terra e do oceano registradas desde 1850. Nota-se o aumento gradual da temperatura, até a década de 1970, seguido por um aumento expressivo após este período.



Fonte: adaptado de (IPCC, 2022).

Para reduzir o impacto das mudanças climáticas que já estão em curso no planeta, faz-se necessário reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de forma significativa. O setor da construção civil desempenha um papel significativo nas emissões de GEE mundial, é estimado que o setor seja responsável por 21 a 30% de todas as emissões globais de gases de efeito estufa, desde os processos de extração de matéria prima, beneficiamento, transporte, até a construção (CABEZA *et al.*, 2021, PACHECO-TORGAL, JALALI, 2012). Esse número pode ser ainda maior se incluir as emissões indiretas como eletricidade para conforto térmico nas edificações (UNEP, 2023).

Além disso, o setor polui por meio de resíduos gerados em demolições (LOSINI *et al.*, 2022). Estes dados evidenciam que o setor da construção civil é insustentável da forma como vem sendo organizado.

Para encontrar técnicas construtivas e materiais com menor impacto ambiental, diversos artigos foram publicados com soluções possíveis para mitigar e reduzir estes impactos (PACHECO-TORGAL, JALALI, 2012). Este interesse resultou em um aumento exponencial no número de artigos sobre a taipa de pilão (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020). Isso significa que há um esforço dos pesquisadores em apostar em temas ligados à construção com terra.

A taipa de pilão, como outras técnicas construtivas de terra, possui uma vantagem ambiental que a torna extremamente competitiva quando em comparação com materiais e técnicas de construção convencionais (PACHECO-TORGAL, JALALI, 2012). Contudo, com o crescimento significativo da escala e frequência de eventos extremos, a mudança climática no paradigma mundial tem grande impacto na construção com terra devido à característica higroscópica do material (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020; DRDÁCKY, 2010), visto que as manifestações patológicas relacionadas à umidade são as principais causadoras da deterioração destas construções (CIRVINI, GÓMEZ VOLTAN, 2014). Brimblecombe *et al.* (2008) relatam que as mudanças climáticas já têm impactado os patrimônios culturais de construção com terra ao redor do planeta.

A importância da mudança climática e os impactos na civilização humana são agora amplamente reconhecidos e têm sido objeto de trabalho em nível internacional de vários pesquisadores. Porém, apesar da relevância, há um hiato de pesquisa em um eixo sensível às mudanças climáticas, no eixo do comportamento das técnicas construtivas de terra em contato com a água (LOSINI *et al.*, 2023b).

Sesana *et al.* (2021) fizeram uma revisão bibliográfica e encontraram que os principais impactos de estresse climático em técnicas construtivas de terra estão relacionados com os seguintes fatores climáticos:

- Temperatura: uma maior amplitude térmica tem como consequência dilatação e retração dos materiais, que pode causar desgaste e erosão;
- Precipitação: altera a umidade relativa do solo e com o acúmulo de

umidade na parede, pela ação da absorção por capilaridade ascendente da fundação ou até de incidência de chuva dirigida, pode gerar salinização, corrosão e crescimento biológico.

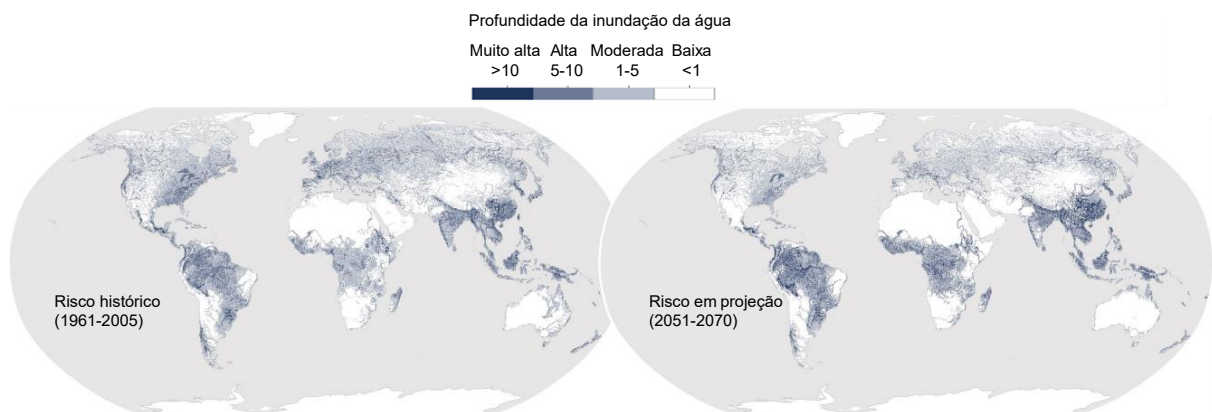
- Vento: a chuva de vento dirigido pode gerar erosão do material.

Lu *et al.* (2020) observaram que quando ocorre chuva, o fluxo da água subterrânea sobe. Caso a água acumulada entre em contato com a edificação de taipa de pilão, ocorre a ascensão capilar da água em meio aos poros do solo em direção ao topo da alvenaria. O gradiente salino combinado com a temperatura e a mudança de umidade pode afetar o comportamento dos sais solúveis e, em seguida, mudança de volume e a erosão da alvenaria.

Rodrigues *et al.* (2023) pesquisaram a respeito de possíveis soluções para mitigar os riscos ambientais identificados em regiões com clima tropical, como em várias regiões do Brasil. Um dos riscos identificados pelos autores foi a probabilidade de chuvas extremas, o que evidenciou a necessidade de propor soluções nas construções que mitiguem estes riscos.

Hirabayashy *et al.* (2021) fizeram uma projeção mundial acerca do risco de inundação, como pode ser visto na Figura 5. É possível perceber que, no Brasil, há previsão de aumento na intensidade e profundidade do risco de inundação. As estimativas dos autores foram baseadas em projeções de modelos climáticos e o risco de inundação foi projetado para ser proporcional ao grau de aquecimento do planeta.

Figura 5 - Risco de inundação histórica e projetada.



Fonte: adaptado de (HIRABAYASHI *et al.*, 2021)

Diante do cenário de urgência na redução de emissão dos GEE, a taipa de pilão

pode ser uma técnica construtiva utilizada amplamente no mundo em detrimento de outras técnicas construtivas de alta energia incorporada e elevada emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, considera-se essencial avaliar os desafios associados às mudanças climáticas, como o aumento do risco de inundação e chuvas extremas, que pode afetar a durabilidade e estabilidade dessas estruturas. Assim, é crucial integrar considerações climáticas em pesquisas para desenvolver possíveis soluções resilientes que enfrentem os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

### **2.3A durabilidade da Taipa de Pilão**

Por conta das alterações climáticas das últimas décadas, com possibilidade de alterações no regime de chuvas e no aumento das temperaturas em todo o planeta, as edificações precisam ser projetadas e construídas para ter resiliência frente a essas mudanças. Dessa forma, precisam ser dotadas de características que as tornem mais duráveis num cenário com maior incidência de eventos extremos.

A NBR 15575 (ABNT, 2021) define durabilidade como a capacidade de uma edificação manter a funcionalidade ao longo do tempo, perante condições de uso e manutenção especificadas. A durabilidade pode ser, ainda, definida como a capacidade para resistir ao desgaste ambiental ou antropogênico, dano ou deterioração (HALL, LINDSAY, KRAYENHOFF, 2012). No caso da taipa de pilão, a durabilidade está predominantemente associada à resistência à água, por causa das características dos argilominerais (LUO *et al.*, 2020).

O solo é um material poroso, com elevada capacidade de absorção e liberação de moléculas de água por meio de uma rede porosa, sobretudo devido à presença de partículas de argila (LOSINI *et al.*, 2023a). Devido a isso, as alvenarias de taipa de pilão têm a capacidade de regulação higroscópica e tendem a manter o equilíbrio com as condições externas quando não revestidas ou impermeabilizadas. Ao mesmo tempo, a elevada sensibilidade à água representa um fator de risco quando o teor de umidade no material se eleva acima de um determinado nível (CHAUHAN *et al.*, 2019).

Grande parte das pesquisas atestam que a taipa de pilão, em contato com a água, possui elevada vulnerabilidade (BUI *et al.*, 2014), contudo, ainda se observa que o comportamento da taipa de pilão, em contato com a água, é uma propriedade

ainda pouco estudada.

Isso se deve em parte à falta de ensaios universalmente aceitos com metodologias específicas para avaliar a durabilidade do material (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020; HOPPE, 2022). À vista disso, é indispensável entender o estado da arte sobre o comportamento da taipa de pilão em contato com a água, partindo desde a compreensão das formas de interação água/taipa de pilão, quanto entendimento dos ensaios adequados.

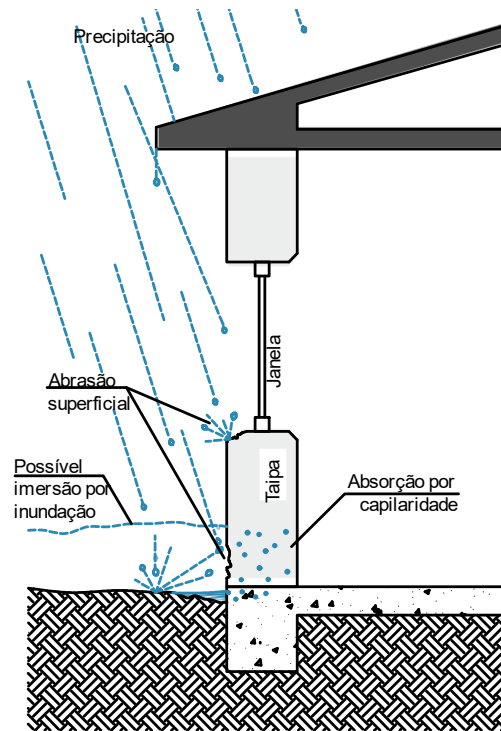
Segundo alguns autores, os primeiros ensaios de avaliação da durabilidade que foram propostos eram severos e não condizentes com a realidade (GUETTALA, ABIBSI, 2006; OGUNYE, BOUSSABAIN, 2002). Este fato acarretou um abandono da taipa de pilão sem estabilização por não obter resultados satisfatórios nestes ensaios. Assim, novos ensaios condizentes com a realidade foram estudados e propostos.

Beckett, Jaquin e Morel (2020), apresentam em uma pesquisa bibliográfica, ensaios que podem avaliar a durabilidade de materiais terrosos com base em fenômenos e interações percebidas de contato com a água. Foram identificadas as situações passíveis de serem ocasionadas pelos fatores climáticos e que geram interações da taipa de pilão com a água, conforme pode ser visto na Figura 6.

Os autores observaram que os ensaios de absorção por capilaridade, erosão por envelhecimento acelerado e gotejamento, estão entre os ensaios mais usuais para avaliação da durabilidade da taipa de pilão. Assim, é crucial integrar considerações climáticas em pesquisas para desenvolver possíveis soluções resilientes que enfrentem os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

De forma similar, Panagiotou *et al.* (2022) realizaram uma pesquisa a respeito das interações da água com as técnicas construtivas de terra durante a vida útil e quais ensaios podem quantificar esta interação. Foi identificado que a absorção por capilaridade, a erosão por abrasão ou por envelhecimento acelerado e a razão entre a resistência seca e a resistência úmida, são as principais formas de avaliar a interação da água com a taipa de pilão.

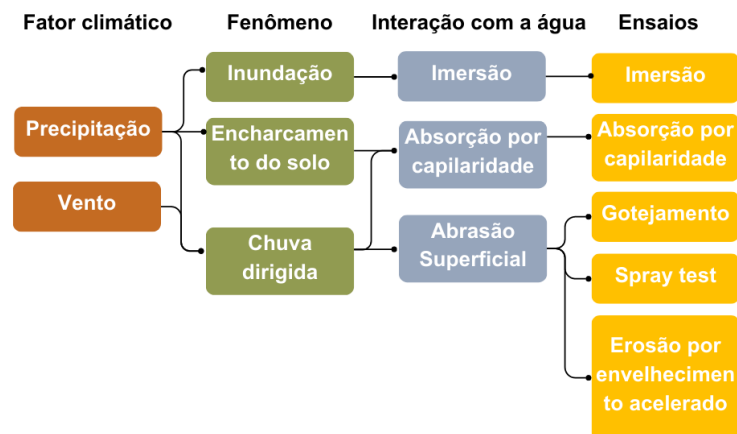
Figura 6 - Formas de interação da taipa de pilão com a água



Fonte: Adaptado de Beckett *et al.*, 2020.

A fim de associar os fenômenos, as interações e os ensaios propostos pelos autores, relativamente à interação da taipa de pilão com a água, foi proposto um fluxograma (Figura 7).

Figura 7 - Interações e ensaios adequados - taipa de pilão versus água.



Fonte: Autora.

A absorção por capilaridade é uma interação física 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 dessa interação depende das propriedades físicas e granulométricas do material.

O comportamento da absorção por capilaridade das técnicas construtivas de terra é um dos requisitos normativos essenciais para a realização de uma alvenaria durável (RAIMONDO *et al.*, 2009). Este requisito se justifica uma vez que o acúmulo de umidade pode alterar algumas propriedades mecânicas do componente construtivo, provocando a deterioração do material devido ao enfraquecimento hidromecânico pelas mudanças de pressões, alteração na carga hidráulica e consequente erosão.

Luo *et al.* (2019a) concluíram que a ascensão capilar da água na alvenaria causou principalmente o aumento do grau de salinidade e os sais podem dissolver, mover ou precipitar. Então a diminuição da resistência mecânica dos corpos de prova analisados, apareceu após o ataque dos sais.

A capilaridade da taipa de pilão pode estar relacionada às características microestruturais e, principalmente, pela quantidade, tamanho e forma dos poros (RAIMONDO, STEFANIZZI, DONDI, 2004). Algumas pesquisas correlacionaram a absorção por capilaridade com a superfície específica do poro, a porosidade total e o tamanho médio dos poros (ŠVEDA, 2007). Para a maioria dos autores, a densidade aparente é a forma mais eficiente de prever a característica higroscópica de materiais argilosos (RAIMONDO, STEFANIZZI, DONDI, 2005; TOUFIGH, GHASEMALIZADEH, KARAMIAN, 2022).

Na literatura, há alguns estudos que analisaram o comportamento da taipa de pilão, e outras técnicas construtivas com terra, em contato com a água ao adicionar material para correção granulométrica:

Mebarkia *et al.* (2022) obtiveram resultados satisfatórios na adição de 10% em massa de pó residual de cimento na produção de bloco de terra comprimida. Este pó residual foi retirado da limpeza de fornos e dutos de fábricas de cimento. Acredita-se que o pó adicionado contribuiu para o preenchimento dos poros, minimizando a porosidade e aumentando a densidade. Por ser um material cimentante, promoveu a adesão entre as partículas. Como consequência, diminuiu a absorção por

capilaridade, aumentou a resistência à abrasão e houve aumento também na resistência à compressão em 28 e 60 dias. Estes resultados apontam que o pó de forno de cimento contribuiu para um aumento na durabilidade e na resistência mecânica.

Panagiotou *et al.* (2022) constataram que a adição de areia melhorou o comportamento de blocos de terra comprimida em contato com a água, reduzindo em 33% o coeficiente de absorção por capilaridade, em relação a blocos de terra comprimidos sem estabilização, e diminuindo a erosão em até 72%. Os resultados obtidos apontaram que a composição granulométrica do solo e da areia desempenham uma função significativa no comportamento do componente.

A influência da adição de cal na capilaridade tem sido bastante discutida nos últimos anos com o aumento das pesquisas em construção com terra. Alguns autores atestam que a adição da cal pode diminuir a absorção por capilaridade (MANZOR, YOUSUF, 2020; MATTOS, MARGARETE, GONÇALVES, 2017). Um grupo de pesquisadores defendem que, ao contrário, há um aumento desta propriedade ou não há interferência da cal (MACHADO *et al.*, 2020). Estas discordâncias podem estar 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 estabilizante.

A quantificação da absorção por capilaridade pode ser determinada sem o uso de técnicas experimentais de elevado custo. Por meio da revisão realizada, foi possível encontrar pesquisas que executaram o ensaio de forma simples. Em uma destas, os autores enveloparam cinco faces da amostra retangular em material plástico a fim de restringir apenas uma superfície de contato com água (sem o envelope), para absorção. Para uniformizar o contato da face inferior da amostra com a água, a amostra fica sobre um material absorvente com maior porosidade que a amostra de taipa de pilão e este material fica imerso em água. É este material que distribui uniformemente a água para a face inferior da taipa de pilão (INDEKEU, JANSSEN, WOLOSZYN, 2022; MEBARKIA, BOUZEROURA, CHELOUAH, 2022; PANAGIOTOU *et al.*, 2022).

A abrasão superficial é uma interação física que acarreta a desagregação do

material. O problema é provocado pelo efeito abrasivo do vento e o desgaste por atrito. Como mencionado anteriormente, na taipa de pilão exposta, a abrasão pode ser provocada por meio de chuva de vento dirigida.

Bui *et al.* (2009) analisaram a abrasão superficial por estereofotogrametria em muros de taipa de pilão expostos por 20 anos às condições climáticas do oeste da França. Na pesquisa pôde ser constatado que a profundidade média da erosão em muros não estabilizados foi de 1,6% (6,4 mm) da parede e 0,5% (2,0 mm) em muros estabilizados com 5% de óleo hidráulico em massa. A pesquisa evidenciou também uma heterogeneidade da erosão, nas partes superiores das amostras, que são protegidas da chuva pelo telhado erodiam menos.

Toufigh e Kianfar (2019) tentaram avaliar a abrasão superficial por meio dos ensaios de imersão e abrasão por escova de aço. Concluíram que apenas misturas com mais de 5% de cimento puderam resistir aos ciclos dos ensaios, sendo que a maioria das 16 misturas realizadas colapsaram quando foram submersas por alguns minutos. Em paralelo, foi realizado o ensaio de compressão úmida em que os corpos de prova foram submetidos à compressão após cura de 28 dias em ambiente de laboratório e 14 dias em ambiente com temperatura controlada a 30°C e 90% de umidade. Após obter resultados satisfatórios com o ensaio de resistência à compressão úmida, inferiram que este método pode substituir a erosão acelerada e a escova de aço, método considerado mais severo (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020; GUETTALA, ABIBSI, 2006).

Luo *et al.* (2019b) analisaram a abrasão superficial de uma edificação histórica de taipa de pilão construída no século XII e listada como patrimônio mundial, por seis anos, através de método do pino de erosão. Foram monitoradas a velocidade do vento, a precipitação e a inclinação da chuva e do vento. O método do pino consistiu em anexar 24 pinos (0,5 cm de diâmetro e 10,0 cm de comprimento) perpendicular à alvenaria com 2,0 cm de saliência. Realizou-se a leitura da saliência uma vez por mês por 6 anos, utilizando um profundímetro digital com precisão de 0,02 mm. Segundo os autores, a erosão variou no tempo e no espaço em concordância com as estações climáticas e direção do vento, concluíram que o método de pino pode ser eficaz para medição de erosão de alvenarias de taipa de pilão.

O ensaio de gotejamento segundo alguns autores, pode simular chuvas indiretas na superfície da alvenaria (PANAGIOTOU *et al.*, 2022). Existem diferentes adaptações deste ensaio. Um método difundido na literatura é colocar o corpo de prova inclinado em 27°, à 400 mm de distância de um pavio do qual 100 ml de água pingam por 20 a 60 minutos. A penetração da água no ponto de impacto não pode exceder 15 mm (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020).

Panagiotou *et al.* (2022) realizaram o ensaio de gotejamento e *spray test* com adição de 50% de areia e sem adição de areia. Os autores constataram que foi possível realizar o ensaio mesmo nas amostras sem correção granulométrica. As amostras com areia apresentaram menor erosão do que as amostras sem areia.

Saranya, Sharma e Anand (2018) analisaram a durabilidade da taipa de pilão com 18% de cinzas inferiores, 12% de cinzas volantes, 3% de cimento. O ensaio foi realizado sem que as amostras estivessem inclinadas e foi realizado uma adaptação com uma válvula hidráulica que regula a vazão de água. As amostras obtiveram menos de 10,0 mm de erosão.

Frente às evidências apresentadas, a necessidade de tornar as edificações resilientes a eventos climáticos torna-se crucial. Embora alguns métodos de avaliação de durabilidade da taipa de pilão careçam de padronização, há ampla aceitação na literatura em relação à eficácia de determinadas abordagens para avaliar e quantificar a durabilidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos, e de acordo com a revisão da literatura, esta pesquisa foi dividida em quatro etapas:

- Etapa 1: coleta, caracterização e análise dos materiais por meio de ensaios físicos, químicos e mineralógicos;
- Etapa 2: análise de misturas para a taipa de pilão com e sem adição de RMF-S e de cimento: compactação e massa específica aparente seca;
- Etapa 3: análise da resistência à compressão de corpos de prova representativos de misturas para a taipa de pilão;
- Etapa 4: análise das misturas de taipa de pilão em contato com a água: absorção por capilaridade e gotejamento.

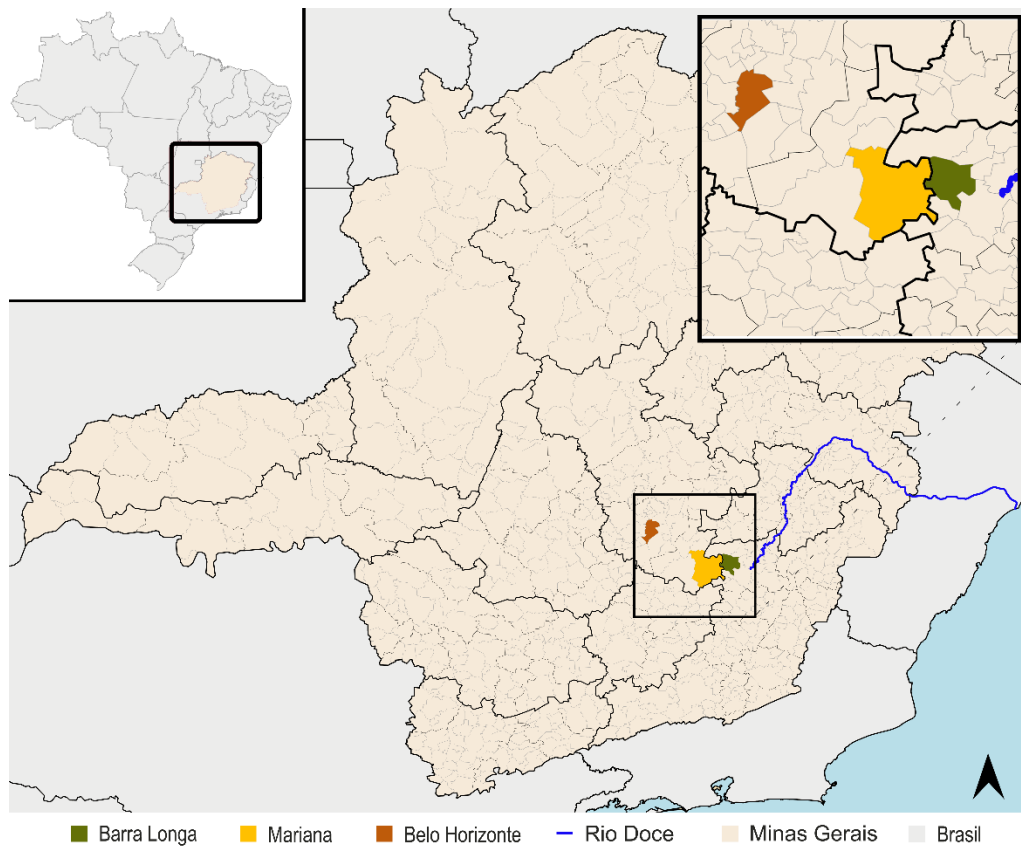
#### 3.1 Materiais

Para produzir os corpos de prova representativos de taipa de pilão, foram utilizados os seguintes materiais: i) solo; ii) rejeito de minério de ferro sedimentado (RMF-S); iii) areia natural quartzosa; e iv) cimento Portland.

As amostras de solo foram coletadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. Após a coleta, foram armazenadas ao ar livre, expostas ao clima e, de acordo com a demanda requerida, uma porção do solo foi transportado para o ambiente de laboratório no qual permaneceu protegida do clima até atingir a umidade higroscópica (Figura 8).

As amostras de RMF-S foram coletadas na cidade de Barra Longa, MG (Figura 8). Após o rompimento da barragem de Fundão, os rejeitos se deslocaram pelo Rio Doce e os seus afluentes e sedimentou no leito do rio, tendo sido dragados e depositados em Áreas de Deposição de Material Excedente (ADME). Na ADME de Barra Longa, o RMF-S foi coberto por uma camada de solo para revegetação do local. Por isto, a amostra de RMF-S foi coletada entre 60 e 80 cm de profundidade.

Figura 8 – Mapa – Localização dos municípios e do Rio Doce.



Fonte: Autora.

Na Figura 9 podem-se observar o aspecto das amostras de solo e de RMF-S, ambas representadas com umidade higroscópica e com a granulometria natural, apresentando torrões.

Figura 9 – Amostra de solo (esq.) e de RMF-S (dir.).



Fonte: Autora.

A areia utilizada foi adquirida comercialmente em Belo Horizonte, MG, e

armazenada em ambiente de laboratório em umidade higroscópica. A determinação do módulo de finura (MF) e da dimensão máxima característica (DMC) da areia são realizados de acordo com a NM 248 (ABNT, 2001b) (Figura 10). O valor de dimensão máxima característica (DMC) da areia é 2,36 mm e o módulo de finura (MF) é 2,44. A partir desse módulo de finura, fica evidenciado que a areia é areia média ( $2,4 < MF < 3,9$ ) (LUZ, ALMEIDA, 2010).

Figura 10 – Porção retida no peneiramento.



Fonte: Autora

O cimento utilizado foi do tipo CII F 32 (cimento composto por fíler calcário) e foi adquirido comercialmente em Belo Horizonte, MG, e armazenado de forma a não receber umidade. A Tabela 1 e 2 apresentam as análises física e química do cimento, respectivamente, fornecidas pelo fabricante e em acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018b).

A água utilizada para as moldagens foi proveniente da rede de abastecimento público. A água destilada e a água deionizada foram utilizadas para a realização de ensaios específicos, quando exigidas em norma.

Tabela 1 - Ensaio físicos - CII F32.

<b>Ensaio físicos</b>	Unidade	Valor
Blaine	(cm <sup>2</sup> /g)	>2600
Tempo de início de pega	(h:min)	>1
Tempo de fim de pega	(h:min)	<10
Finura na peneira # 200	(%)	<12,0
Finura na peneira # 325	(%)	–
Expansibilidade a quente	(mm)	<5,0
Consistência normal	(%)	–
Resistência à compressão 1 dia	(MPa)	–
Resistência à compressão 3 dias	(MPa)	>10,0
Resistência à compressão 7 dias	(MPa)	>20,0
Resistência à compressão 28 dias	(MPa)	>32,0

Fonte: InterCement<sup>4</sup>.

Tabela 2 - Ensaio químicos - CII F32.

<b>Ensaio químicos</b>	Unidade	Valor
Perda ao fogo	(%)	<6,5
Resíduo insolúvel	(%)	<2,5
Trióxido de enxofre – SO <sub>3</sub>	(%)	<4,0
Óxido de cálcio livre – CaO Livre	(%)	–
Óxido de magnésio – MgO	(%)	<6,5
Óxido de alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	–
Óxido de silício – SiO <sub>2</sub>	(%)	–
Óxido de ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	–
Óxido de cálcio – CaO	(%)	–
Equivalente alcalino	(%)	–

Fonte: InterCement<sup>4</sup>.

### 3.2 Caracterização dos materiais

Nas amostras de solo e de RMF-S foram realizados ensaios de caracterização:

<sup>4</sup> <https://brasil.intercement.com/produto/cimento-caue-uso-geral/>

i) mineralógica, por meio do ensaio de Difração de raios X (DrX); ii) química, por meio dos ensaios de Fluorescência de raios X (FrX); iii) teor de impurezas orgânicas; iv) caracterização física pelos ensaios de granulometria, Limites de Atterberg; e v) massa específica dos grãos. O RMF-S passou, ainda, por análise de lixiviação e de solubilização para classificar quanto à periculosidade em acordo com a NBR 10004, 10005 e 10006 (ABNT, 2004c, b, a). A Tabela 3 apresenta os ensaios realizados e o método correspondente.

Tabela 3 - Resumo dos ensaios de caracterização do solo e RMF-S.

<b>Amostra</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>
<b>Solo e RMF-S</b>	DrX	Difratometria de raios X
	FrX	Espectrofotômetro de fluorescência de raios X
	Impurezas orgânicas	NM 49 (2001)
	Granulometria	NBR 7181 (2016), análise conjunta de peneiramento e sedimentação
	Limites de Atterberg	NBR 6459 (2016) NBR 7180 (2016)
	Massa específica dos grãos	Analisador de densidade real
	Lixiviação e solubilização	NBR 10004, 10005, e 10006 (2004)

Fonte: Autora.

O ensaio de Difração de raios X foi utilizado para identificar as fases minerais presentes nas amostras de solo e de RMF-S. O equipamento utilizado foi um difratômetro Panalytical da Philips, sistema 1710. As condições utilizadas foram: Radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,54$ ), faixas de varredura  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em ângulo  $2\theta$  ( $\theta$ ).

Na caracterização química por Fluorescência de raios X das amostras de solo e RMF-S, foi utilizado o equipamento espectrômetro WDS e foram aplicadas nove condições diferentes de leitura dos elementos, variando a voltagem de 4 kV até 50 kV para a varredura completa da tabela periódica nos materiais analisados.

Segundo a NBR 17014 (ABNT, 2022a) o solo utilizado para taipa de pilão não pode apresentar matéria orgânica. Em função disto, foi realizado o ensaio de determinação de impurezas orgânicas de acordo com a NM 49 (ABNT, 2001a). As amostras de solo e RMF-S foram preparadas por meio do quarteamento em divisor

de rifles e mantendo a umidade higroscópica do material a fim de evitar a segregação da fração pulverulenta. O ensaio de determinação de impurezas orgânicas apenas compara o teor de impurezas orgânicas de uma amostra em comparação com uma solução padrão, sendo, portanto, um ensaio qualitativo.

O ensaio de análise granulométrica conjunta tem como função determinar a distribuição das dimensões dos grãos de um material e obter a curva de distribuição, em porcentagem, do diâmetro dos grãos do solo e do RMF-S. O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016d). As amostras de solo e RMF-S passaram por preparação prévia conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016a).

Após a secagem das amostras até a umidade higroscópica, as amostras foram destorroadas, quarteadas e passadas pela peneira de 4,8 mm. Uma porção de 1,0 kg de amostra de solo e RMF-S foi passada também pela peneira de 2,0 mm para separar pedregulho das areias, silte e argila. A porção retida na peneira de 2,0 mm foi submetida ao peneiramento grosso com peneiras de malhas determinadas pela norma e a porção passante destinou-se para a sedimentação e o peneiramento fino.

Para a etapa de sedimentação, utilizou-se 70 g das amostras com solução de defloculante em repouso por 12 horas, para correta separação das partículas aglomeradas. Após repouso, agitou-se as amostras no copo dispersor e então a mistura foi transferida para uma proveta com água destilada, novamente agitada e em sequência, iniciou-se a leitura da etapa de sedimentação.

Foi realizada a leitura de densidade e de temperatura das amostras de solo e RMF-S com os intervalos descritos em norma. Após a última leitura, verteu-se a mistura na peneira de 0,075mm. O material retido na peneira foi lavado e, em seguida, levado para a estufa para secagem até atingir a constância de massa. Após a secagem, realizou-se o peneiramento fino utilizando peneiras com malhas especificadas pela norma, ver

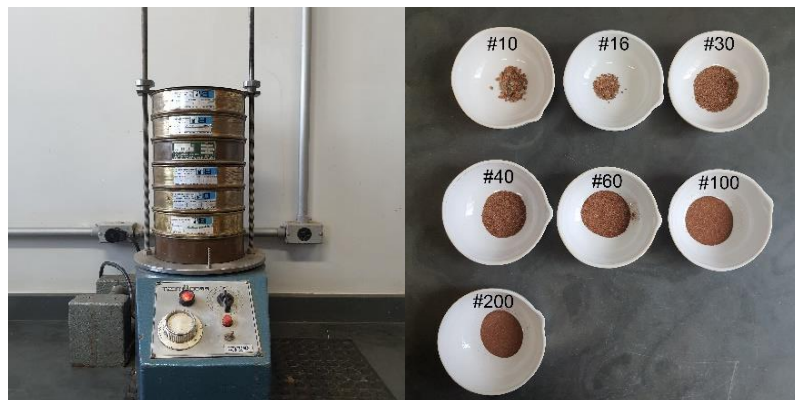
O ensaio para determinação dos Limites de Atterberg são importantes para determinar o limite de consistência das misturas para a taipa de pilão, que está relacionado ao estado físico. Os estados físicos podem ser sólido, semissólido, plástico ou líquido e os teores de umidade com os quais o solo muda seu estado físico, são chamados de Limites. O Limite de Plasticidade (LP) é o que determina a mudança

do estado semissólido para o plástico e o Limite de Liquidez (LL) é a mudança do estado plástico para o estado líquido.

Figura 11.

O ensaio para determinação dos Limites de Atterberg são importantes para determinar o limite de consistência das misturas para a taipa de pilão, que está relacionado ao estado físico. Os estados físicos podem ser sólido, semissólido, plástico ou líquido e os teores de umidade com os quais o solo muda seu estado físico, são chamados de Limites. O Limite de Plasticidade (LP) é o que determina a mudança do estado semissólido para o plástico e o Limite de Liquidez (LL) é a mudança do estado plástico para o estado líquido.

Figura 11 - Conjunto de peneiras para peneiramento fino (esq.) e porções retidas no peneiramento fino (dir.).



Fonte: Autora.

O ensaio de LL foi realizado de acordo com a norma 6459 (ABNT, 2016b). Pesou-se 200 g das amostras e adicionou-se água destilada,volvendo a mistura por alguns minutos. As amostras umedecidas foram então colocadas no aparelho de Casa Grande golpeadas em umidades diferentes, a fim de obter a reta de teor de umidade correspondente a 25 golpes. O resultado do ensaio foi calculado com ao menos cinco amostras adequadas.

O ensaio de LP foi realizado de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016c). As amostras foram preparadas conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016a). Pesou-se 100 g das amostras e adicionou-se água destiladavolvendo a mistura por alguns minutos. Pegou-se a amostra e formou-se uma bola que foi rolada sobre uma placa de vidro para lhe dar forma de cilindro. Aferiu-se a umidade do cilindro quando se

atingiu a espessura do gabarito e começou a aparecer fissuras, conforme

Figura 12. O resultado do ensaio foi calculado com ao menos três amostras adequadas.

Figura 12 – Ensaio de plasticidade (esq.), amostra para limite de plasticidade (centro) e aparelho para determinação do limite de liquidez (dir.).



Fonte: Autora.

Mais importante que a caracterização física do solo é o entendimento do comportamento e das suas propriedades. Solos diferentes com propriedades similares podem ser classificados em grupos e subgrupos de acordo com seu comportamento. De acordo com Das (2007), “Os sistemas de classificação fornecem uma linguagem comum para se expressar concisamente, sem descrições detalhadas, as características gerais dos solos”. Assim, o solo e o RMF-S foram classificados pelos

dois principais sistemas de classificação de solo: AASHTO e USCS.

- Sistema de Classificação da AASHTO

O sistema de classificação do solo *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) foi desenvolvido em 1929 para solos aplicados em vias e rodovias (Tabela 4). Este sistema divide os solos em sete grupos principais de A1 a A7 tendo como base os seguintes critérios:

- Tamanho dos grãos; pedregulho, areia e silte;
- Plasticidade; entre siltoso e argiloso a depender do IP;
- Se há presença de seixos e pedras.

Deve-se aplicar os dados de ensaios da esquerda para a direita por eliminação até encontrar a classificação que corresponda aos dados, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do solo segundo a AASHTO.

Classificação Geral	Materiais argilo-siltosos (mais de 35% da amostra total passa na N° 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Classificação do grupo	A-4	A-5	A-6	A-7
Ensaio de peneiramento (% passante na peneira N° 200)	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Limite de liquidez	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidade	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipos usuais de materiais constituintes significativos	Solos siltosos		Solos argilosos	
Qualidade geral como subleito	Satisfatória a deficiente			

Fonte: Adaptado de (DAS, 2007)

- Sistema de Classificação da USCS

O sistema de classificação da *Unified Soil Classification System* (USCS) foi proposto em 1942 e classifica os solos em duas grandes categorias:

- Solos de grãos grosso com menos de 50% de material passando pela peneira de 0,075mm de abertura. Com o prefixo G que representa

pedregulho e S que representa areia;

- ii) Solos de grãos finos com mais de 50% de material passando pela peneira de 0,075mm de abertura. Com prefixo M que representa silte inorgânico, C, que representa argila inorgânica e O que representa siltes e argilas orgânicos.

Outros símbolos que são usados por este sistema de classificação são: W (bem graduado); P (mal graduado); L (baixa plasticidade); H (alta plasticidade).

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado no equipamento analisador de densidade real da marca *ACP Instruments*. Este equipamento é um picnômetro automático que caracteriza a densidade real dos materiais. Para a medição, foi preenchido um terço do recipiente analisador com a amostra a ser analisada. O equipamento realizou até cinco ciclos de leituras até obter um desvio padrão igual ou inferior a 0,003%.

A amostra de RMF-S foi submetida aos ensaios de lixiviação e de solubilização, de acordo com as NBR 10005 e 10006 (ABNT, 2004c, b), respectivamente. Para essa análise, a amostra foi seca em estufa a 100 °C por 24 horas. Após esse período, foi separada 2500g da amostra e enviada a um laboratório acreditado para análise e classificação segundo NBR 10004 (ABNT, 2004a).

### 3.3 Caracterização das misturas

As misturas produzidas com substituição do solo por RMF-S, em massa, foram determinadas com base nos resultados obtidos na caracterização dos materiais, para atender os requisitos da NBR 17014 (ABNT, 2022a). Conforme os requisitos definidos por esta norma, as misturas devem satisfazer as seguintes características:

- a) 50 % a 80 % de material retido entre as peneiras com abertura de malha de 0,075 mm e 2,0 mm;
- b) 20 % a 35 % de material que passe na peneira com abertura de malha 0,075 mm.

Por causa destes requisitos, pode-se inferir que a NBR 17014 (ABNT, 2022a) classifica a fração de argila e silte até a granulometria de 0,075 mm e a areia entre a

granulometria de 0,075 mm até 2,0 mm. Devido a isso, considerou-se, para a definição das misturas, que a argila é classificada como todas as partículas com  $\varnothing \leq 0,002$  mm. O silte está compreendido entre 0,002 mm e 0,075 mm. A areia está no intervalo entre 0,075 e 2 mm.

Considerando os requisitos da NBR 17014 (ABNT, 2022a), definiu-se o **Grupo 1**: cinco misturas, das quais duas amostras de referência (100% solo e 100% RMF-S), enquanto as outras três consistiram em misturas de solo e RMF-S. As misturas foram numeradas conforme o teor de substituição do solo pelo RMF-S. Mesmo com elevados teores de substituição de solo por RMF-S, observa-se que ainda não foi possível atingir os valores de “argila + silte”, especificados pela NBR 17014 (ABNT, 2022a), como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Misturas e proporção de materiais – Grupo 1.

Misturas	Solo (%)	RMF-S (%)	Argila + Silte (%)	Areia (%)
0	100	0	74,05	25,72
70	30	70	57,87	39,00
80	20	80	50,01	46,18
90	10	90	46,82	49,18
100	0	100	44,00	52,00

Fonte: Autora.

Em razão do elevado teor de finos do solo e do RMF-S, o **Grupo 2** foi definido com a adição de areia natural visando a correção granulométrica das misturas propostas (Grupo 1), uma prática recomendada pela NBR 17014 (ABNT, 2022a). A fim de diferenciar as misturas que foram corrigidas com a adição de areia (em massa), foi adicionado a letra 'A' à nomenclatura da mistura. Na Tabela 6, podem ser observadas nomeações utilizadas e a proporção dos materiais.

Tabela 6 - Misturas e proporção de materiais com correção granulométrica.

Misturas	Solo (%)	RMF-S (%)	Areia (40%)	Argila+Silte (%)	Areia total (%)
0-A	100	0	40	52,89	46,94
70-A	30	70	40	37,87	60,28
80-A	20	80	40	35,72	61,96
90-A	10	90	40	33,58	63,84
100-A	0	100	40	31,43	65,71

Fonte: Autora.

Além da correção granulométrica com areia, para estabilizar a mistura, foi definido o **Grupo 3**. Visando analisar o impacto na durabilidade e no comportamento mecânico das misturas, foi adicionado 2,5% de cimento, em massa, às misturas do Grupo 2. O teor de cimento foi escolhido de modo buscar os benefícios de estabilização com o menor teor de cimento, devido ao elevado impacto ambiental do material. Esse teor foi definido após análise da literatura (ARRIGONI *et al.*, 2017; TOUFIGH; KIANFAR, 2019; ZAMI *et al.*, 2022). A fim de diferenciar as misturas que foram corrigidas com a adição de areia e de cimento, foi adicionado a letra 'AC' à

nomenclatura da mistura.

Na

Tabela 7, apresenta-se um resumo dos grupos e as nomenclaturas utilizadas e a proporção dos materiais.

Tabela 7 – Resumo das misturas e proporção de materiais.

Misturas		Solo (%)	RMF-S (%)	Areia (%)	Cimento (%)	
Solo + RMF-S	Grupo 1	0	100	0		
		70	40	60		
		80	30	70	-	-
		90	20	80		
		100	0	100		
Solo + RMF-S + areia	Grupo 2	0-A	100	0		
		70-A	40	60		
		80-A	30	70	40	-
		90-A	20	80		
		100-A	0	100		
Solo + RMF-S + areia + cimento	Grupo 3	0-AC	100	0		
		70-AC	40	60		
		80-AC	30	70	40	2,5
		90-AC	20	80		
		100-AC	0	100		

Fonte: Autora.

Para fins de comparação, as misturas dos **Grupo 1** e do **Grupo 2** foram caracterizadas por meio de ensaios físicos: limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), massa específica dos grãos, análise de pH e compactação (Tabela 8), embora as misturas do **Grupo 1** estejam fora da granulometria recomendada pela NBR 17014 (ABNT, 2022a).

Tabela 8 - Resumo dos ensaios de caracterização das misturas.

	<b>Ensaio</b>	<b>Método</b>
<b>Grupo 1</b>	LL	NBR 6459 (2016)
	LP	NBR 7180 (2016)
<b>Grupo 2</b>	Massa Específica	NBR 6458 (2017)
	pH	pHmetro de bancada e solução padrão
<b>Grupo 3</b>	Compactação	NBR 7182 (2018)

Fonte: Autora.

No entanto, os demais ensaios e aspectos da pesquisa não prosseguiram com as misturas do Grupo 1, devido à compreensão de que essas misturas não se mostraram adequadas para a utilização em taipa de pilão. As misturas do Grupo 3, portanto, foram caracterizadas apenas pelo ensaio de compactação.

Os ensaios de LL e LP das misturas foram realizados conforme descrito no item 3.2. Para o ensaio de determinação de massa específica dos grãos, foi utilizado o método B (para solos que passam na peneira de abertura 4,8 mm), conforme a NBR 6458 (ABNT, 2017). Com as amostras preparadas, separou-se 50 g de cada mistura e adicionou-se água destilada até completa imersão. Após repouso de 24 horas, a solução foi agitada em copo dispersor por 15 minutos e, então, transferida para o picnômetro com água destilada e aplicou-se vácuo em duas etapas, conforme Figura 13. Realizou-se a leitura da temperatura e massa do picnômetro com a solução para calcular a massa específica dos grãos.

Figura 13 - Copo dispersor (esq.) e amostra em picnômetro submetida ao vácuo (dir.).



Fonte: Autora.

A análise de pH foi realizada com pHmetro de bancada digital da marca MS Tecnopon Instrumentação. Primeiramente, solubilizou-se 40 g das amostras em 80 ml de água deionizada. Com auxílio do agitador magnético, a mostra ficou constantemente em solubilização sem decantar durante a leitura do pH. O pHmetro havia sido previamente calibrado com as soluções tampão com pH de 4, 7 e 10. Entre uma leitura e outra, o eletrodo do pHmetro foi cuidadosamente lavado com água deionizada, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 - Soluções tampão (esq.), leitura do pH com agitador magnético (centro) e limpeza do eletrodo (dir.).



Fonte: Autora.

O ensaio de compactação, que determina o teor de umidade em que um solo pode ser compactado para atingir uma massa específica seca máxima em relação a energia de compactação, foi realizado em conformidade com a norma NBR 7182 (ABNT, 2018a).

Foi utilizado o cilindro de Proctor pequeno com volume de 938,56 cm<sup>3</sup> e massa de 2050 g. O soquete utilizado foi o soquete pequeno de 2500 g, com três camadas de 26 golpes por camada, como previsto na norma, para a energia normal de compactação. A amostra foi homogeneizada com auxílio de espátulas. Para prevenir que a mistura úmida aderisse ao fundo do Proctor, um papel filtro foi posicionado no interior da fôrma (

Figura 15). O papel filtro foi utilizado devido à indisponibilidade, no laboratório, de um plástico que resistisse ao ensaio.

Figura 15 - Homogeneização da amostra (esq.), papel filtro colocado no interior da fôrma (centro) e compactação da mistura (dir.).



Fonte: Autora.

Após a compactação, o corpo de prova foi extraído com auxílio do extrator (Figura 16), uma amostra foi retirada do centro do corpo de prova para aferir a umidade, a fim de obter a curva de compactação.

Figura 16- Extrator de corpo de prova (esq.), corpo de prova (centro) e teores variados umidade de compactação (dir.)



Fonte: Autora.

Por meio da curva de compactação, é possível determinar a massa específica aparente seca e a umidade ótima de compactação. De acordo com a NBR 17014 (ABNT, 2022a), a mistura deve atender ao valor de massa específica aparente seca maior ou igual a  $1750 \text{ kg/m}^3$ , o valor condiz com o estabelecido em pesquisas realizadas em outros países (ÁVILA, PUERTAS, GALLEGO, 2021; LOSINI *et al.*, 2022).

### 3.4 Moldagem dos corpos de prova

Após a definição e caracterização das misturas, foram moldados os corpos de prova com tamanhos e formatos diferentes com objetivo de avaliar a resistência à compressão e a durabilidade das misturas. Foram adotados os métodos de compactação dinâmica e de compactação estática, mantendo-se a umidade ótima de compactação e a massa específica aparente seca. Esses parâmetros foram determinados através da curva de compactação de cada mistura, no ensaio de compactação de Proctor, exceto quando descrito.

- *Compactação dinâmica*

A compactação dinâmica é a aplicação repetida de impactos usando o soquete com peso e alturas determinadas. Para energia modificada de compactação utilizou-se o soquete grande com 5 kg, caindo de uma altura de 45 cm, conforme descrito na NBR 7182 (ABNT, 2018a). A energia modificada é utilizada quando o objetivo é se obter valores de densidade mais elevados, tendo em vista obter estabilidade e resistência a longo prazo. Segundo Burroughs (2010), a energia modificada de compactação proporciona uma simulação mais próxima da compactação realizada com o equipamento de obra.

A fôrma cilíndrica metálica utilizada tem o diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, isso resulta em um índice de esbeltez de 2. Um papel filtro foi colocado no fundo da fôrma para evitar aderência da mistura (Figura 17). Antes da moldagem, aplicou-se desmoldante na fôrma. Foi utilizado a energia modificada de compactação, aumentando assim a densidade obtida no ensaio de compactação e Proctor. Para a energia modificada, os corpos de prova foram moldados em cinco camadas com 27 golpes cada, com o soquete grande, como descrito na NBR 7182 (ABNT, 2018a). O nivelamento da última camada foi realizado com o auxílio de uma régua (Figura 17).

Figura 17 - Fôrma cilíndrica (dir.), fôrma, colarinho e soquete grande (centro) e nivelamento da superfície do corpo de prova (esq.).

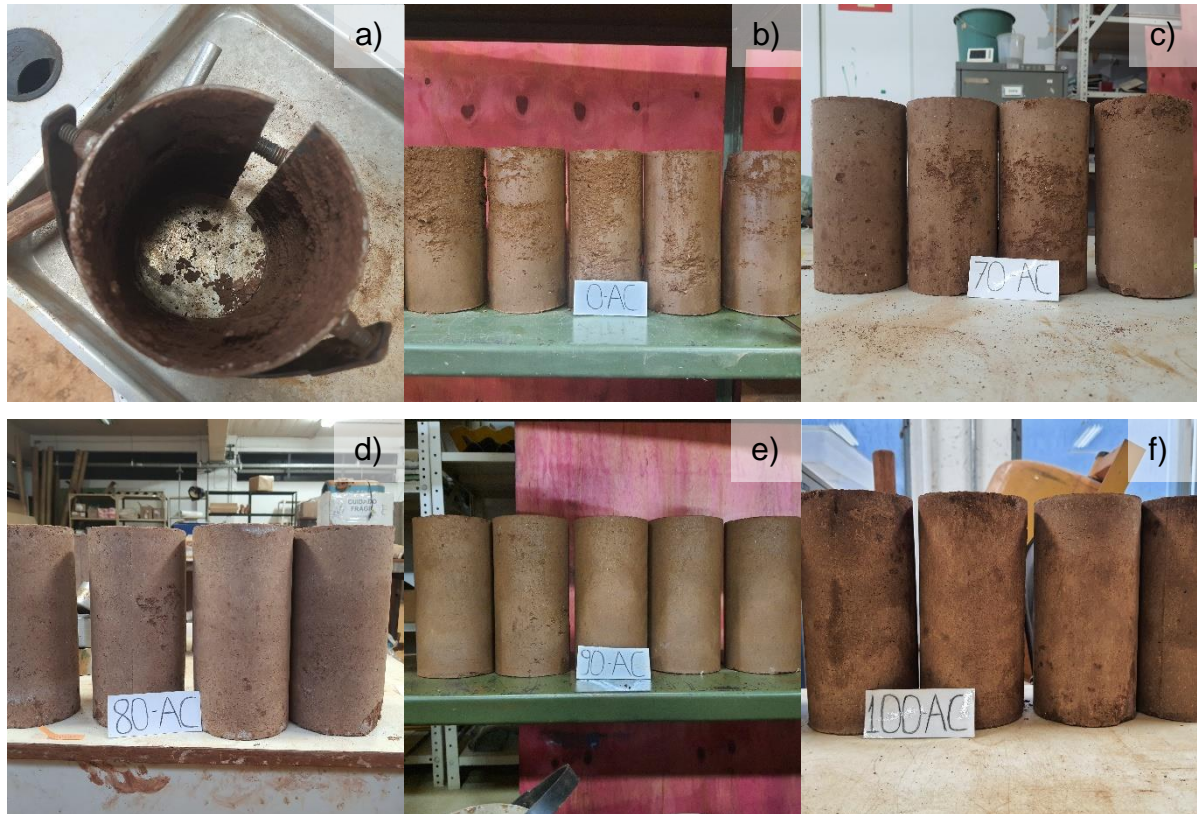


Fonte: Autora.

Mesmo utilizando desmoldante nas fôrmas, os corpos de prova aderiram às laterais (Figura 18). Esta aderência possivelmente está relacionada à elevada umidade de compactação. A mesma dificuldade de desmoldagem, devido a aderência na fôrma, foi reportada por Lage *et al.* (2023).

Por esse motivo, os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem, o que facilitou o processo de desmoldagem e as misturas aderiram menos às laterais da fôrma. Por meio da Figura 18, é possível perceber que as misturas com maior teor de substituição de solo por RMF-S aderiram menos a fôrma, foram mais fáceis de desmoldar e tiveram aspecto visual mais adequado do que a mistura sem RMF-S (0-AC).

Figura 18 – a) Aderência da mistura à forma, b) Mistura 0-AC, c) Mistura 70-AC, d) Mistura 80-AC, e) Mistura 90-AC, f) Mistura 100-AC.



Fonte: Autora

A fôrma prismática utilizada possui dimensões de 15 x 15 x 15 cm mas não possui colarinho. O colarinho auxilia na compactação da última camada, garantindo um acabamento adequado. Portanto, os corpos de prova foram compactados até a altura de 12 cm, deixando os últimos 3 cm de altura da fôrma para servir como colarinho. Assim, foram moldados corpos de prova com dimensões de 15 x 15 x 12 cm (comprimento, largura, altura). Toda fôrma foi plastificada para evitar aderência de massa à fôrma. Na Figura 19, é possível observar a aderência da mistura na fôrma que não foi utilizado plástico para revestimento.

Figura 19 – Aderência da mistura à fôrma (esq.), montagem da fôrma (centro) e plastificação da fôrma (dir.).



Fonte: Autora.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos, foi utilizada a energia modificada de compactação, com a finalidade de aumentara densidade obtida no ensaio de compactação e Proctor. Para a energia modificada, foi necessário fazer modificações ao parâmetros estabelecido na NBR 7182 (ABNT, 2018a), visto que o formato e área da fôrma prismática é diferente da referência na norma.

Em função da maior área de superfície e menor altura, os corpos de prova foram moldados em três camadas, com 77 golpes cada, utilizando o soquete grande. O nivelamento da última camada foi realizado com o auxílio de um compactador de base quadrada (Figura 20). Por causa da envoltória plástica, os corpos de prova puderam ser desmoldados em seguida.

Figura 20 – Fôrma, soquete e compactador (esq.) e corpo de prova sendo desmoldado(dir.).



Fonte: Autora.

Para evitar a aderência da mistura à fôrma, a literatura recomenda moldar com

a umidade de 0,5% a 1% abaixo da umidade ótima de compactação (MEEK *et al.*, 2021). No entanto, para esta pesquisa, decidiu-se manter a umidade ótima de compactação durante a moldagem e plastificar as fôrmas. Esse método se mostrou eficaz em reduzir a aderência.

- *Compactação estática*

Diferente da compactação dinâmica, na compactação estática o solo é compactado por uma força estática aplicada gradualmente. Na prática, o solo é colocado na fôrma e a compactação é obtida pelo movimento gradual de um soquete. Este método foi desenvolvido por Reddy, Jagadish (1993) e igualmente aplicado em Chauhan *et al.* (2019). Segundo Reddy, Jagadish (1993), este método de moldagem permite uma amostra com densidade mais homogênea em relação ao método de compactação dinâmica, pois há melhor controle da pressão de compactação e as amostras apresentam maior repetibilidade.

A fôrma cilíndrica utilizada nesta etapa tem altura de 7 cm e o diâmetro de 3,5 cm, dando ao corpo de prova um índice de esbeltez de 2. Um plástico foi colocado no fundo da fôrma para que não houvesse aderência da mistura na fôrma (Figura 21). As misturas foram colocadas em camadas na fôrma com o auxílio de um funil. Cada camada foi calculada para manter a densidade em relação ao volume obtida no ensaio de compactação

Figura 21 - Plástico no fundo da fôrma (esq.), fôrma montada com funil (centro) e equipamento para moldagem estática.



Fonte: Autora.

Foi aplicada a energia de compactação até que se atingisse a altura correspondente de cada camada. Uma régua molde foi utilizada para aferir a altura

correta de cada camada (Figura 22). As superfícies entre camadas foram escarificadas, conforme procedimento da NBR 17014 (ABNT, 2022a). A altura da última camada é dada pelo fim da altura da fôrma.

Figura 22 - Régua para aferição da altura (esq.), régua na primeira camada (centro) e régua na segunda camada.



Fonte: Autora.

Independentemente do método de compactação, um mínimo de três amostras de cada mistura foi moldada para cada ensaio, e a boa reprodutibilidade dos corpos de prova foi mensurada pelo desvio padrão menor do que 5%, conforme sugerido pelo “*Guide de bonnes pratiques de la Construction enterre crue*”<sup>5</sup>. Todas as misturas do Grupo 3, para os ensaios de resistência à compressão, porosidade e gotejamento, foram envelopadas com plástico filme para manter a umidade por 14 dias, para permitir as condições adequadas de cura do cimento, este procedimento também foi adotado por Toufigh, Kianfar (2019).

Após este período, o plástico foi retirado e as amostras permaneceram em ambiente de laboratório (umidade relativa entre 40-65% e temperatura média de 21-30°C) por 28 dias no total, para completar a cura e se equilibrarem às condições ambientais.

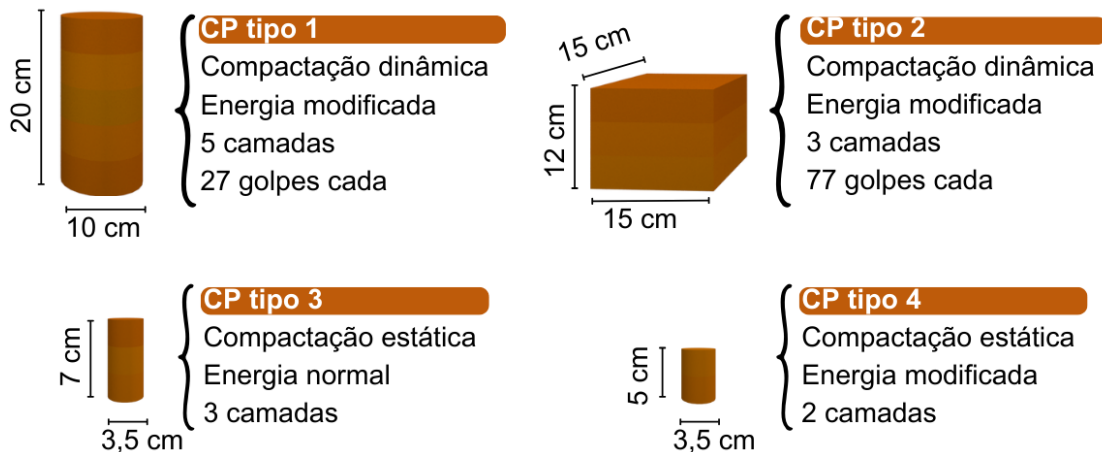
Na Figura 23, pode-se observar um resumo dos corpos de prova moldados. Para facilitar a compressão, cada tipo de corpo de prova foi nomeado com a sigla CP e numerado. Os corpos de prova foram moldados de acordo com as necessidades de

---

<sup>5</sup> <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/guide-des-bonnes-pratiques-la-construction-en-terre-crue>.

formato e dimensões requeridas para a realização de cada ensaio, conforme as normas de cada ensaio, e adaptando-se às limitações laboratoriais, quando descrito.

Figura 23 - Resumo dos corpos de prova moldados.



Fonte: Autora.

Essa sistematização permitiu manter a umidade ótima de compactação (nos ensaios que utilizaram a energia normal de compactação) e a densidade máxima obtidas pelo ensaio de Proctor, correspondente à cada mistura de cada grupo. A densidade foi aumentada de forma uniforme, apenas nos ensaios que utilizaram energia modificada de compactação. Dessa forma, assegurou-se a reprodutibilidade do processo de moldagem dos corpos de prova, possibilitando a comparação das misturas mesmo quando métodos de moldagem diferentes foram utilizados, ao manter a umidade e apresentar a densidade conforme o ensaio de compactação e a densidade aumentada pela energia modificada de compactação nos ensaios indicados.

### 3.5 Análises mecânica, física e de durabilidade

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, foram realizadas análises mecânicas, física e de durabilidade.

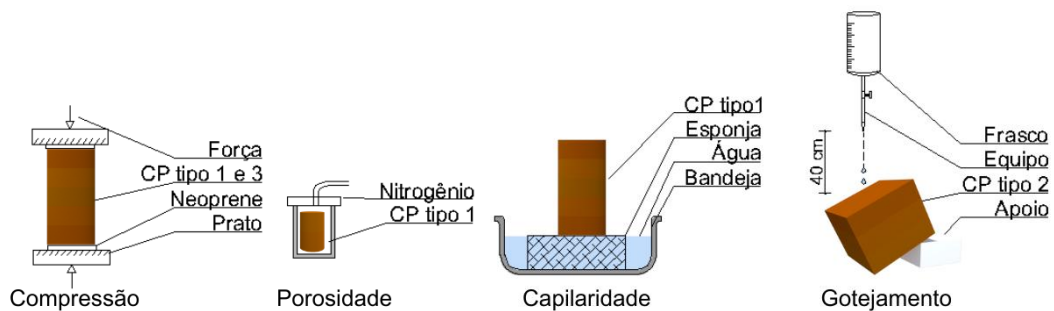
A análise mecânica por meio do ensaio de resistência à compressão permite determinar a capacidade do material suportar cargas ao longo da sua vida útil. Em materiais frágeis, especialmente aqueles de baixa coesão, a resistência à compressão é o principal parâmetro para caracterizar o comportamento mecânico. Isso se aplica

também à taipa de pilão (ÁVILA, PUERTAS, GALLEGO, 2021).

A análise física realizada foi por meio da aferição da porosidade por nitrogênio. O conhecimento da porosidade pode prever as propriedades de absorção e de retenção de água (LOSINI et al., 2023).

Os ensaios de durabilidade por contato com a água realizados englobam o ensaio de absorção por capilaridade e o ensaio de gotejamento. Conforme detalhado no item 2.3, o ensaio de absorção por capilaridade pode quantificar a interação da taipa de pilão com a água absorvida após encharcamento do solo e/ou da fundação. Por outro lado, o ensaio de gotejamento analisa a interação da parede de taipa de pilão com a água por meio de abrasão superficial, simulando uma situação de chuva de vento dirigida. Na Figura 24 apresenta-se um resumo dos ensaios realizados.

Figura 24- Resumos dos ensaios realizados.



Fonte: Autora.

### 3.5.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme indicado pela NBR 17014 (ABNT, 2022a). A prensa utilizada para aplicação de força e leitura da resistência à compressão foi a prensa universal para tração e compressão da marca Contenco. Para comparação da influência da energia de compactação, foram utilizados dois corpos de prova diferentes. Primeiramente foi utilizado o corpo de prova moldado com a energia normal de compactação (3,5 x 7,0 cm - CP tipo 3) e depois foi utilizado o corpo de prova com energia modificada de compactação (10,0 x 20,0 cm - CP tipo 1) - (Figura 23).

Foi utilizada uma folha de Neoprene na face de aplicação da carga e de apoio, para apresentar capas planas e uniformes no momento do ensaio (Figura 25). O

ensaio foi realizado a uma velocidade constante de 0,5 mm/min (NBR 17014).

Figura 25 - Neoprene no corpo de prova na energia modificada (esq.) e energia normal (dir.).



Fonte: Autora.

### **3.5.2 Porosidade**

Para mensurar a porosidade do corpo de prova representativo de taipa de pilão, utilizou-se um equipamento analisador de densidade real da marca ACP Instruments. Este equipamento é um picnômetro automático que caracteriza a densidade real e o volume real de materiais porosos (

Figura 26). Para a medição, o equipamento emprega o princípio da alteração de pressão resultante do deslocamento de gás nitrogênio, que penetra nos poros abertos, até os mais finos. O gás nitrogênio foi escolhido para a realização deste ensaio devido à sua capacidade de penetrar em poros de dimensões muito reduzidas e como alternativa segura à porosimetria por intrusão de mercúrio, cujo uso é evitado por sua elevada toxicidade. Além dos poros, o equipamento calcula a densidade real do corpo de prova.

Figura 26 - Equipamento analisador de densidade real (esq.) e amostra no equipamento (dir.).



Fonte: Autora.

Devido ao limite de altura do equipamento, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 3,5 x 5,0 cm (CP tipo 4). Assim, os corpos de prova foram moldados em duas camadas de 2,5 cm cada pelo método de compactação estática.

Após o tempo de cura, as dimensões dos corpos de prova foram aferidas com um paquímetro para obter o volume aparente. Em seguida, foram pesados e então colocadas no equipamento para medição. O equipamento realizou até cinco ciclos de leituras até obter um desvio padrão igual ou inferior a 0,003%. Após a leitura, o equipamento calculou o volume e a densidade real dos corpos de prova. O cálculo de volume dos poros foi realizado a partir da Equação 1.

$$V_{por} = V_{ap} - V_{real}$$

(1)

Em que:  $V_{por}$  é o volume de poros;

$V_{ap}$  é o volume aparente e;

$V_{real}$  é o volume real.

O cálculo de porcentagem de poros se deu a partir da Equação 2.

$$\%por = \frac{V_{por}}{V_{ap}}$$

(2)

Em que: % por é a porcentagem de poros

$V_{por}$  é o volume de poros e;

$V_{ap}$  é o volume aparente.

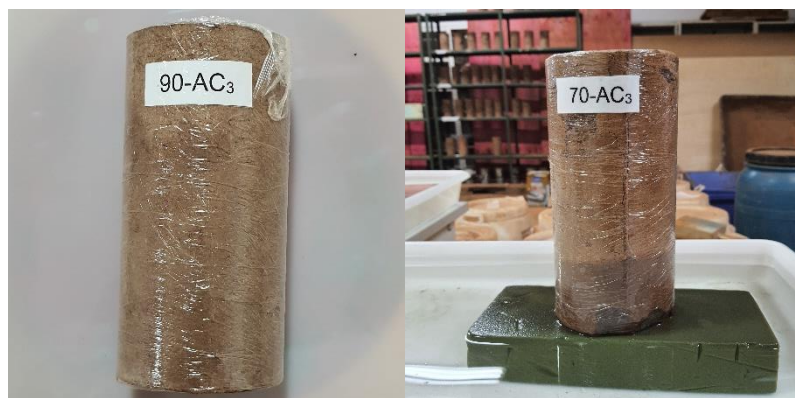
### 3.5.3 Absorção por capilaridade

Para o ensaio de capilaridade, utilizou-se o corpo de prova cilíndrico de 10 x 20 cm (CP tipo 1). Embora a NBR 17014 (ABNT, 2022a) estabeleça a necessidade da proteção da base da alvenaria de taipa de pilão para impedir a ascensão de água por capilaridade, a norma não menciona o ensaio de capilaridade. Além disto, não há consenso na literatura sobre o método de ensaio mais adequado para o ensaio de absorção por capilaridade das técnicas construtivas de terra (BECKETT; JAQUIN; MOREL, 2020).

Portanto, o método de ensaio, a formulação e a análise dos resultados obtidos foram definidas de acordo com a especificidade e as características do material, além das práticas correntes de ensaio, adaptando métodos de outras áreas de conhecimento. Uma referência utilizada foi a NBR 9779 (ABNT, 2012) que normatiza o ensaio de absorção por capilaridade em argamassas e concretos.

Conforme está na normativa, os corpos de prova devem ser colocados em um recipiente com água, apoiados sobre bases que os mantenham afastados do fundo do recipiente e que permitam um contato efetivo entre sua face inferior e uma superfície umedecida, sem que o corpo de prova tenha contato direto com a água. Utilizou-se como base uma espuma floral em uma bandeja com água constante (Figura 27). Os corpos de prova foram envelopados com filme de plástico com exceção da face inferior, para que a absorção ocorresse exclusivamente por esta face, que ficou em contato com a espuma molhada (MACHADO *et al.*, 2020; TAALLAH, GUETTALA, 2016).

Figura 27 - Corpo de prova envelopado (esq.) e ensaio de capilaridade (dir.).



Fonte: Autora.

Segundo a NBR 9779 (ABNT, 2012), após o início do ensaio, deve-se aferir a massa saturada de cada corpo de prova em intervalos definidos até que se complete 72 horas. No entanto, como se trata de um material de terra que tende a se liquefazer e expandir ao entrar em contato com a água, o método e os intervalos foram adaptados, e o ensaio foi realizado por quatro horas, conforme proposto por Indekeu *et al.* (2021). A proposta pelos autores é uma das últimas referências com êxito na conclusão e foi igualmente aplicada à outras pesquisas com materiais terrosos (LI *et al.*, 2023; PANAGIOTOU *et al.* 2022).

As leituras foram realizadas em 10, 20, 40, 80, 160 e 240 minutos. Após a última aferição, foi realizada a medição da altura da camada de água no interior e no exterior do corpo de prova.

Segundo a norma NBR 9779 (ABNT, 2012), a absorção por capilaridade é calculada de acordo com a Equação 03:

$$C = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{S} \quad (3)$$

Em que: C a absorção de água por capilaridade expressa em gramas por centímetro quadrado (g/cm<sup>2</sup>);

$M_{\text{sat}}$  é a massa saturada do corpo de prova em gramas (g);

$M_s$  é a massa do corpo de prova seco em gramas (g); e,

S é a área de seção transversal, expressa em centímetros quadrados (cm<sup>2</sup>).

### 3.5.4 Gotejamento

O ensaio de gotejamento foi realizado seguindo duas normas com procedimentos similares: o Anexo B da NBR 17014 (ABNT, 2022a) e a norma neozelandesa NZS 4298 (NZS, 1998), amplamente referenciada por outros autores (BECKETT, JAQUIN, MOREL, 2020; MEEK *et al.*, 2021; PANAGIOTOU *et al.*, 2022).

Para a execução do ensaio, foi necessária uma adaptação em relação ao tamanho do corpo de prova. Utilizou-se uma fôrma prismática mantendo-se a base quadrada do prisma, porém com dimensões diferentes, no tamanho de 15 x 15 x 12 cm (CP tipo 2), como é demonstrado na Figura 23.

Conforme ambas as normas, uma quantidade de 100 ml de água deve gotejar de uma altura de 40 cm do corpo de prova, que deve estar posicionado com uma inclinação de 1:2 (altura: largura). Na

Figura 28, é possível observar a inclinação do corpo de prova. Foi utilizado frasco e equipo para gotejamento. O tempo de ensaio ficou em 36 min (+- 2 min). Para o escoamento da água gotejada, toda a estrutura de ensaio foi montada sobre uma grade perfurada.

Figura 28 - Sistema para gotejamento (esq.), gotejamento (centro) e inclinação do corpo de prova (dir.).



Fonte: Autora.

A expressão dos resultados é dada a partir dos valores médios dos três corpos de prova representativos de cada mistura, considerando a profundidade máxima da erosão do gotejamento ( $P_{er}$ ), da  $p$  da penetração da água ( $P_{pa}$ ) e a maior dimensão da área erodida ( $P_{ar}$ ) no corpo de prova, todos expressos em milímetros.

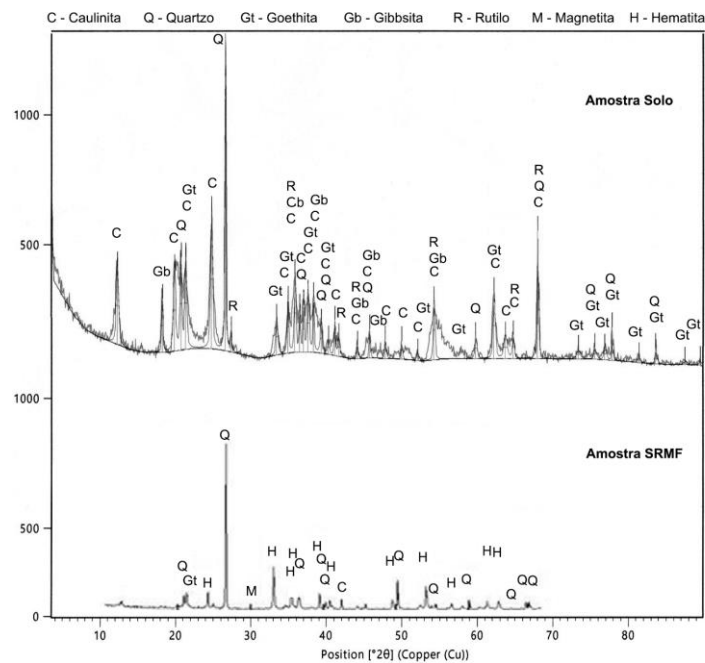
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

Os resultados da análise por Difração de raio X podem ser observadas no Gráfico 1. A amostra de solo apresentou predominância de caulinita, que é uma argila não expansiva. A presença de argila pouco expansiva é frequente em solos lateríticos em regiões de clima tropical, como é o caso de Minas Gerais, no qual a laterização é condicionada pela lixiviação do solo (VALE, 2020).

Segundo Castro *et al.* (2022), os solos lateríticos são constituídos basicamente de hematita, quartzo e alumina, o que condiz com os resultados encontrados na análise de difratometria do solo. Araújo e Farias, Araújo e Rodrigues (2023), em concordância, constataram a presença de caulinita quartzo, hematita e gibbsita em solos lateríticos brasileiros.

Gráfico 1 - Difratograma das amostras de solo e RMF-S.



Fonte: Autora

Por outro lado, a amostra de RMF-S apresentou quartzo e hematita. Essas descobertas sugerem que, mesmo após o rejeito ter sedimentado e se misturado no meio ambiente, ele ainda manteve características semelhantes ao rejeito de minério de ferro encontrado em barragens.

O resultado da análise química por FrX pode ser observado na Tabela 9. Esses resultados complementam e corroboram com os resultados obtidos na difratometria.

Tabela 9 - Análise química das amostras de solo e RMF-S

<b>Amostra</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
<b>Solo</b>	40,44	35,32	19,96	0,79	2,43	0,29	0,23
<b>RMF-S</b>	6,39	67,05	9,57	-	0,67	0,21	0,62

Fonte: Autora

Tanto na amostra de solo quanto na amostra de RMF-S, foram identificadas proporções significativas dos minerais alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), sílica (SiO<sub>2</sub>) e hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Este último também foi encontrado na difratometria. Tais minerais são comumente encontrados em outros solos com coloração alaranjada (WAHAB *et al.*, 2021; ZAMI *et al.*, 2022), sendo a alumina um dos componentes de óxido metálico mais presentes em solos naturais (PHAM *et al.*, 2019).

Os elementos silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe) são os constituintes básicos do processo de laterização e podem ser indicativos de solos lateríticos (ARAÚJO e FARIAS, ARAÚJO e RODRIGUES, 2023). No solo estudado, esses elementos estão presentes em minerais que corroboram a evidência de solo laterítico. O dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) observado na análise química está em acordo com a presença do rutilo observado pelo DrX. O rutilo é um mineral frequente da classe dos óxidos e hidróxidos com a composição química de dióxido de titânio.

O resultado da análise das impurezas orgânicas pode ser visualizado na Figura 29. Tanto o solo quanto o RMF-S apresentaram coloração igual (ou ligeiramente mais clara) do que a solução padrão (Figura 29), o que indica que a presença de matéria orgânica está dentro do limite adequado, como estabelecido pela NM 49 (ABNT, 2001a).

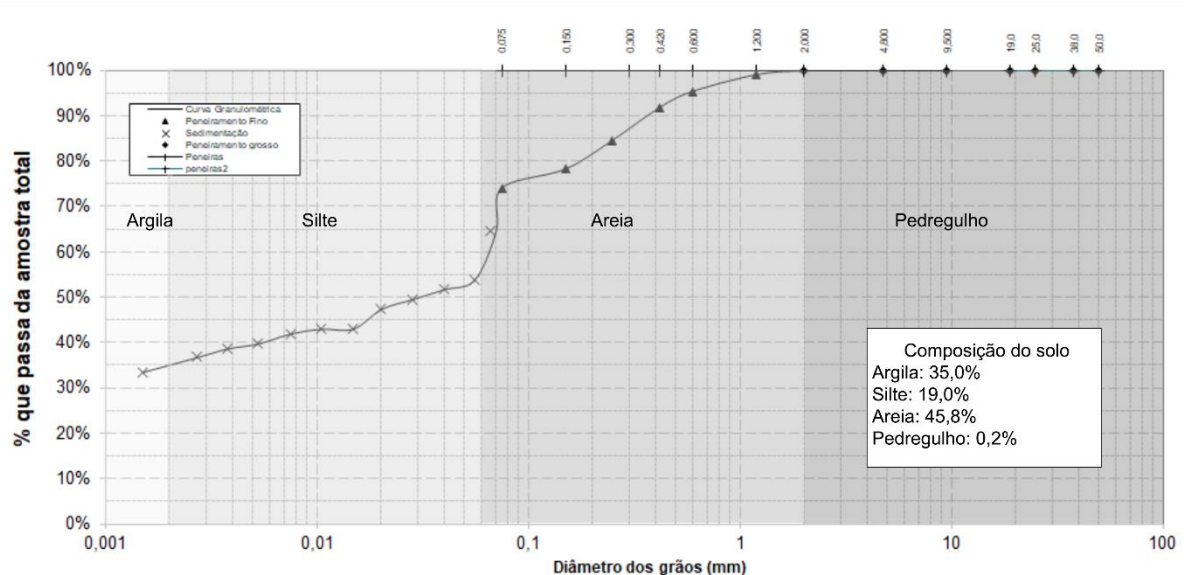


Fonte: Autora.

A partir da leitura da curva granulométrica, em consonância com a NBR 6502 (ABNT, 2022b), obteve-se a composição granulométrica do solo que apresentou 35,0% de argila, 19,0% de silte, 45,8% de areia e 0,2% de pedregulho (Gráfico 2).

A distribuição granulométrica e os argilominerais presentes influenciam diretamente as propriedades do solo (TOUFIGH, KIANFAR, 2019). O comportamento do solo será, portanto, largamente influenciado pela fração mais fina, argila e silte, que juntos representam mais da metade da composição do solo.

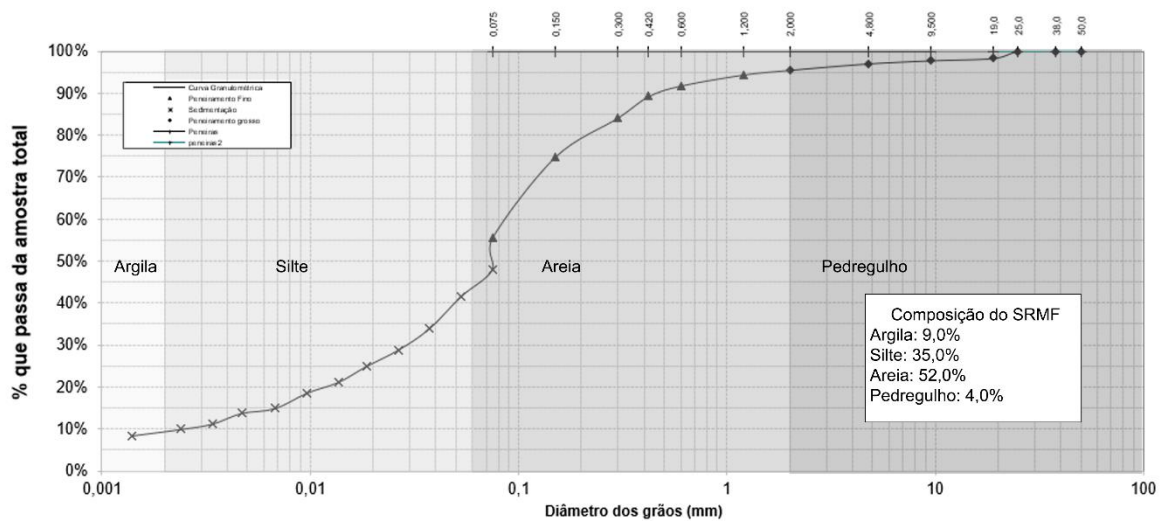
Gráfico 2 - Curva granulométrica do solo.



Fonte: Autora

No Gráfico 3, pode ser observada a curva granulométrica da amostra de RFM-S, que apresentou 9,0% de argila, 35,0% de silte, 52,0% de areia e 4,0% de pedregulho na composição granulométrica.

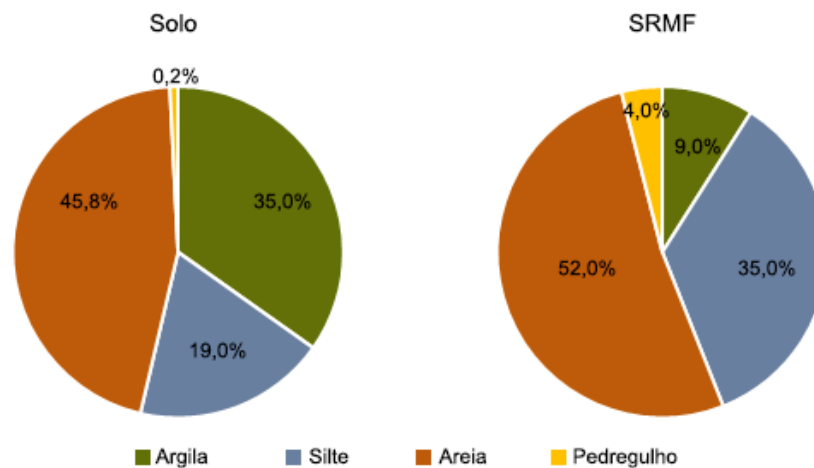
Gráfico 3 - Curva granulométrica do RMF-S



Fonte: Autora

Para fácil visualização, foi também elaborado um gráfico comparativo entre a composição granulométrica do solo e RMF-S (Gráfico 4). É possível perceber que o solo tem característica arenoargilosa e o RMF-S é mais arenosiltoso.

Gráfico 4 - Porcentagem de composição granulométrica do solo e RMF-S



Fonte: Autora

Na Tabela 10, é possível observar o índice de plasticidade (IP) do solo e do RMF-S. O IP é obtido pela subtração do limite de liquidez pelo limite de plasticidade. A amostra de solo apresentou IP de 2% e, pela NBR 17014 (ABNT, 2022a) encontra-se a informação de que o IP deve ser menor que 25%. Portanto, a amostra de solo está dentro dos parâmetros normativos. Além disso, foi possível constatar a não plasticidade do RMF-S devido à baixa presença de argila em sua granulometria, uma

vez que não foi possível realizar o ensaio de plasticidade, sendo classificado como Não Plástico (NP).

Tabela 10 - Limites do solo e RMF-S.

<b>Amostra</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>
<b>Solo</b>	41	39	2
<b>RMF-S</b>	20	NP	-

Fonte: Autora.

A atividade da argila influencia na plasticidade do solo. Observou-se que o solo utilizado nas misturas possui elevado teor de argila, mas apresenta baixa plasticidade devido ao tipo da argila, a caulinita (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011). Dessa forma, o índice de atividade (IA) das argilas foi calculado, como propôs Skempton (1953), pela razão entre o IP e o percentual da fração argila encontrada na leitura da curva granulométrica, conforme Equação 4.

$$IA = \frac{IP}{\% \text{ argila}} \therefore \frac{2}{35} \therefore 0,06$$

(4)

Em que: IA é índice de atividade das argilas;

IP é índice de plasticidade, e;

% argila é a fração de argila

Sendo o IP do solo igual a 2% e fração de argila igual a 35%, o IA da argila do solo ficou em 0,06%. São consideradas argilas inativas quando o valor do IA for menor que 0,75%, o que confirma os resultados encontrados na análise de DrX e FrX, que apresentou predominância de caulinita que é uma argila de baixa atividade (SKEMPTON, 1953). Apresentar baixa atividade de argila indica maior estabilidade do solo diante de variações no teor de água, ou seja, apresenta menos alterações de volume quando úmido e menos encolhimento quando seco, em comparação com materiais que possuem maior atividade de argila (KOUTOUS, HILALI, 2019).

Este método de calcular o IA foi igualmente aplicado em outras pesquisas (CHAUHAN et al., 2019; KOUTOUS, HILALI, 2019; PANAGIOTOU et al., 2022; LUCIANO et al., 2012). Não foi possível desenvolver o mesmo cálculo para o RMF-S por não possuir IP.

Na classificação AASHTO, por causa do valor de 41% aferido no limite de liquidez (Tabela 10), o solo foi classificado como A-5. Já o RMF-S, por não ter apresentado plasticidade, foi classificado como A-4. Tanto o solo como o RMF-S foram classificados como solos siltosos, em conformidade com outro achado da literatura para solo laterítico (FARO, CONSOLI, SCHNAID, 2017).

Na classificação USCS, o solo e o RMF-S foram classificados como ML, caracterizados como silte inorgânico de baixa plasticidade. Esta classificação está em concordância com os resultados obtidos nos ensaios de índice de atividade de argila, índice de plasticidade e análise granulométrica realizados neste estudo.

As classificações da AASHTO e da USCS são compatíveis entre si conforme afirmado por Das (2007), uma vez que o solo A-4 e A-5 da AASHTO correspondem ao solo ML da USCS.

Embora a AASHTO seja primariamente destinada à classificação de solos para estradas, a classificação do solo de acordo com as propriedades é fundamental para comparar com solos de outras pesquisas que classificam por este sistema (ARRIGONI et al., 2017; KOUTOUS, HILALI, 2019).

Entretanto, tais sistemas de classificação, consideradas tradicionais, quando aplicadas para os solos típicos de climas tropicais, podem resultar em inconsistências relativas às suas propriedades mecânicas e hídricas (ARAÚJO e FARIAS; ARAÚJO; RODRIGUES, 2023). Essas divergências ocorrem devido às particularidades dos solos tropicais, que frequentemente apresentam comportamento diferentes dos solos de regiões temperadas, devido ao processo de laterização sofrido.

No ensaio de massa específica dos grãos, como pode ser visto na Tabela 11, o RMF-S apresentou a massa específica dos grãos 4,1% maior do que em relação ao solo e 12,7% maior do que a areia.

Tabela 11 - Massa específica dos grãos - Solo, RMF-S e areia.

<b>Amostra</b>	<b>Massa específica dos grãos (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coef. variação (%)</b>
Solo	2868	0,003	0,088
RMF-S	2992	0,003	0,084
Areia	2612	0,002	0,080

Fonte: Autora.

Para classificar as amostras de RMF-S quanto à periculosidade, foram realizados ensaios de lixiviação e solubilização em acordo com a NBR 10004, 10005 e 10006 (2004).

Na Tabela 12, são apresentados os valores dos constituintes inorgânicos lixiviados, em acordo com a NBR 10005 (ABNT, 2004). É possível observar que a amostra de RMF-S apresentou valores abaixo dos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004a). Por tanto, por este ensaio, o RMF-S pode ser classificado como Resíduo Não-perigoso.

Tabela 12 - Teor de constituintes inorgânicos lixiviados.

<b>Constituinte</b>	<b>Unidade</b>	<b>RMF-S</b>	<b>Limite máximo NBR 10005</b>
Arsênio	mg.l-1	< 0,003	1,0
Bário	mg.l-1	1,67	70,0
Cádmio	mg.l-1	0,001	0,5
Chumbo	mg.l-1	0,009	1,0
Cromo	mg.l-1	< 0,007	5,0
Prata	mg.l-1	< 0,004	5,0
Selênio	mg.l-1	0,006	1,0
Mercúrio	mg.l-1	< 0,005	0,1
Fluoreto	mg.l-1	0,18	150,0
pH	-	4,96	-

Fonte: relatório de pesquisa, FAPEMIG APQ05495-18.

Na Tabela 13, são apresentados os valores do ensaio de solubilização, em acordo com a NBR 10006 (2004) A amostra de RMF-S apresentou teores de alumínio e ferro mais de 12 e 29 vezes superiores, respectivamente, aos limites estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004c).

Tabela 13 - Teor de constituintes inorgânicos solubilizados.

<b>Constituinte</b>	<b>Unidade</b>	<b>RMF-S</b>	<b>Limite máximo NBR 10006</b>
Cianeto	mg.L-1	< 0,010	0,01
Sulfato	mg.L-1	34,62	250
Fluoreto	mg.L-1	0,83	1,5
Cloreto	mg.L-1	3,5	250
Nitrato	mg.L-1	0,91	10
Alumínio	mg.L-1	<b>2,567</b>	0,2
Arsênio	mg.L-1	< 0,003	0,01
Bário	mg.L-1	0,181	0,70
Cádmio	mg.L-1	0,002	0,005
Cobre	mg.L-1	< 0,004	2
Ferro	mg.L-1	<b>8,754</b>	0,3
Zinco	mg.L-1	0,178	5
Prata	mg.L-1	< 0,004	0,05
Selênio	mg.L-1	0,007	0,01
Sódio	mg.L-1	4,883	200
Cromo	mg.L-1	0,008	0,05
Manganês	mg.L-1	0,004	0,1
Chumbo	mg.L-1	< 0,005	0,01
Mercúrio	mg.L-1	< 0,00005	0,001
pH	-	6,31	-

Fonte: relatório de pesquisa, APQ05495-18.

Dessa forma, o RMF-S pode ser classificada como Classe II B – Não Perigoso Não Inerte, de acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004a), por conter ferro e alumínio em teores acima do limite estabelecido pela NBR 10004 (ABNT, 2004a).

#### **4.2 Caracterização das misturas**

Neste item, são apresentados os resultados relativos aos ensaios físicos realizados nas misturas para taipa de pilão com e sem RMF-S. Na Tabela 14 são apresentados os valores de LL, LP e IP das misturas avaliadas. Conforme observado,

as misturas 100, 70-A, 80-A, 90-A e 100-A não apresentaram plasticidade (NP) e por isso não foi realizado o ensaio de LL. Esta ausência de plasticidade pode ser explicada pelo fato de o solo utilizado apresentar apenas 2% de IP e o RMF-S não apresentar plasticidade alguma. Portanto, a ausência de plasticidade na mistura pode ser atribuída à presença predominante de RMF-S e areia, que são materiais não plásticos.

Tabela 14 - Limites - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2.

	<b>Misturas</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<b>Grupo 1</b>	0	41	39	2
	70	27	26	1
	80	25	24	1
	90	19	18	1
	100	-	NP	-
<b>Grupo 2</b>	0-A	37	32	5
	70-A	-	NP	-
	80-A	-	NP	-
	90-A	-	NP	-
	100-A	-	NP	-

Fonte: Autora.

A análise dos resultados do ensaio de massa específica dos grãos, apresentada na

Tabela 15, mostra que a adição de areia teve um impacto pouco significativo na massa específica dos grãos das misturas, resultando em uma leve diminuição. Isso se deve ao fato de a areia ter apresentado uma massa específica dos grãos 8,9% menor do que o solo e 12,7% menor do que RMF-S, conforme Tabela 11.

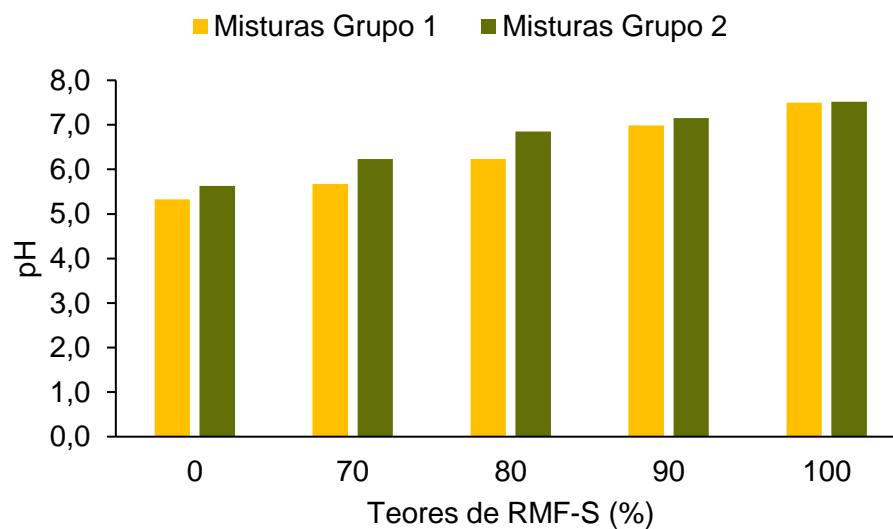
Os valores de pH das misturas, do Grupo 1 e do Grupo 2, podem ser vistos no Gráfico 5. Observa-se que os valores de pH das misturas aumentam à medida em que se o teor de RMF-S na mistura é elevado, indicando a acidez do solo. Este resultado condiz com outro achado da literatura, que também identificaram solos lateríticos de regiões de clima tropical como ácidos (CHOTPANTARAT et al., 2011; KUMAR et al., 2022).

Tabela 15 - Massa específica dos grãos - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2.

	Misturas	Massa específica dos grãos (kg/m <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)
<b>Grupo 1</b>	0	2600	20,82	0,80
	70	2650	18,93	0,71
	80	2680	17,32	0,64
	90	2690	10,00	0,37
	100	2790	5,77	0,21
<b>Grupo 2</b>	0-A	2520	15,28	0,60
	70-A	2670	15,28	0,57
	80-A	2680	15,28	0,57
	90-A	2680	15,28	0,57
	100-A	2710	5,77	0,21

Fonte: Autora.

Gráfico 5 - Análise de pH - Misturas do Grupo 1 e do Grupo 2.



Fonte: Autora.

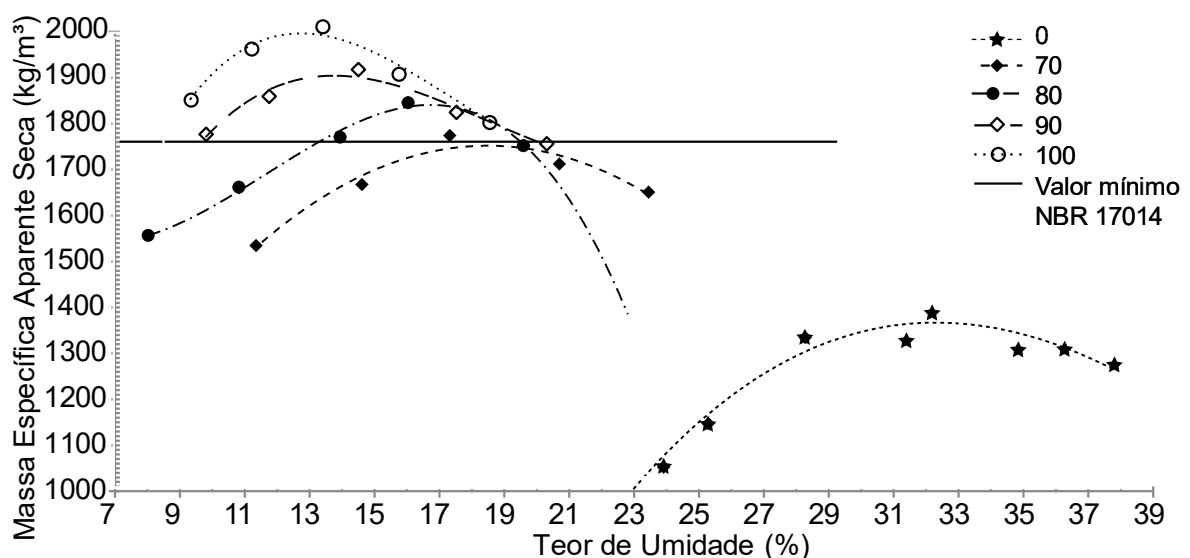
A análise do pH das misturas destinadas à produção de taipa de pilão torna-se imperativa em um contexto contemporâneo, no qual o uso de reforços em aço nesse tipo de construção é uma prática comum. É essencial que o aço esteja inserido em matrizes alcalinas, com pH em torno de 12,45, para prevenir a corrosão.

Nesse sentido, a correção de solos inicialmente ácidos torna-se uma medida relevante, visando elevar o pH da mistura destinada e assegurando as condições

adequadas para a interação efetiva entre o aço utilizado como reforço e a matriz da mistura (CIANCIO, BECKETT, CARRARO, 2014). No entanto, quando o cimento é adicionado à mistura, essa preocupação se torna desnecessária, pois o próprio cimento eleva o pH e a depender do teor de cimento, pode proporcionar as condições necessárias para a durabilidade do aço de reforço e da estrutura como um todo.

O ensaio de compactação foi realizado com as misturas dos Grupos 1 a 3. No Gráfico 6 é possível observar o resultado do ensaio de compactação das misturas do Grupo 1. As misturas 0 e 70 não atingiram o valor de massa específica aparente seca mínima (ABNT, 2022a) e apresentou elevada umidade ótima de compactação.

Gráfico 6 - Compactação – Misturas do Grupo 1 (solo + RMF-S).



Fonte: Autora.

A elevada umidade de compactação do solo pode ser atribuída, em parte, a alta porcentagem de alumina ( $Al_2O_3$ ) presente no solo, como indicado na Tabela 9. A alumina atua como um adsorvente natural com propriedade de reter líquidos em sua superfície (PHAM *et al.*, 2019).

Se as misturas representativas para a taipa de pilão necessitam de uma elevada umidade ótima de compactação, pode-se observar quatro desvantagens principais: i) contemporaneamente, devido ao recurso de água limitado (ZAMI *et al.*, 2022); ii) o elevado teor de água pode gerar retração e deformação na taipa de pilão durante o processo de secagem e evaporação da água (KOUTOUS, HILALI, 2019);

iii) a umidade excessiva do solo pode resultar na aderência deste às formas e a outros equipamentos de trabalho durante a moldagem da taipa de pilão (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011); e iv) a resistência mecânica tende a aumentar com a redução da umidade ótima de compactação (CHAUHAN et al., 2019; JAQUIN et al., 2009).

No entanto, é importante compreender que o ensaio de compactação Proctor não aplica a mesma energia que o equipamento compactador utilizado em obras. Isso significa que a umidade ótima de compactação determinada pelo ensaio pode ser excessivamente elevada (MESBAH, MOREL, OLIVER, 1999).

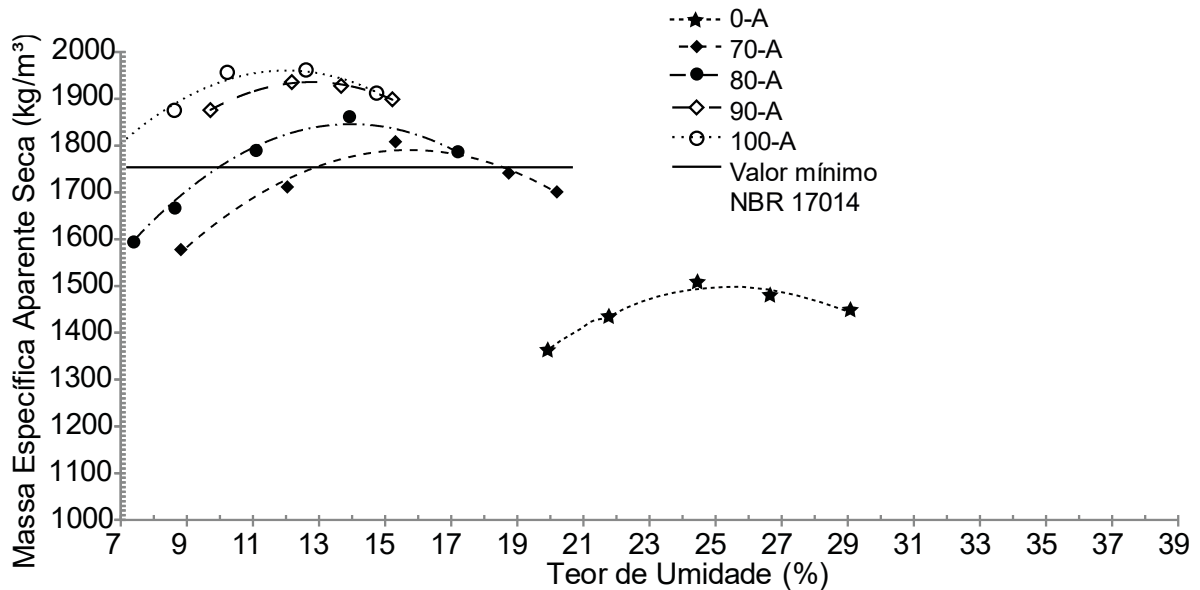
Nas misturas 80, 90 e 100, houve um aumento gradativo da massa específica à medida que aumentou a proporção de RMF-S na mistura. Ávila, Puertas e Gallego (2021) demonstraram que a massa específica aparente seca é importante para determinar o comportamento mecânico da taipa de pilão, o que indica que as misturas 0 e 70 podem não obter resultados satisfatórios no ensaio de resistência à compressão.

As misturas do Grupo 2 apresentaram valores de massa específica aparente seca mínima a partir da mistura 70-A (Gráfico 7).

A adição de areia resultou na redução da umidade ótima de compactação em todas as misturas. A mistura 0-A apresentou o maior impacto da adição de areia, com uma diminuição de 22% na umidade ótima de compactação, em relação a mistura 0 do Grupo 1.

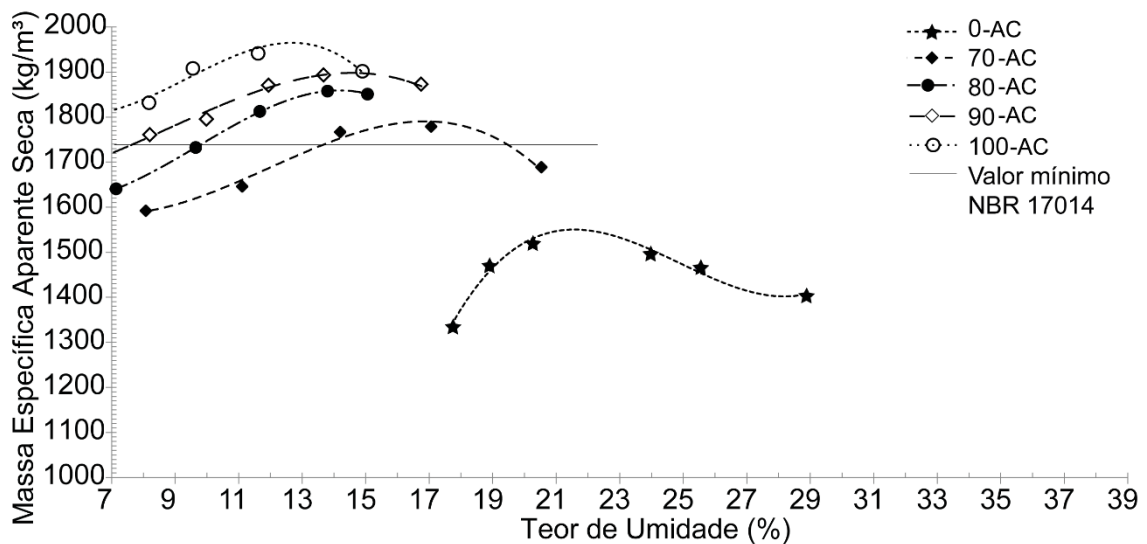
As misturas do Grupo 3, apresentaram a maior massa específica, em relação às misturas do Grupo 1 e do Grupo 2 (Gráfico 8).

Gráfico 7 - Compactação – Misturas do Grupo 2 (Solo + RMF-S + areia).



Fonte: Autora

Gráfico 8 - Compactação – Misturas do Grupo 3 (Solo + RMF-S + areia + cimento).



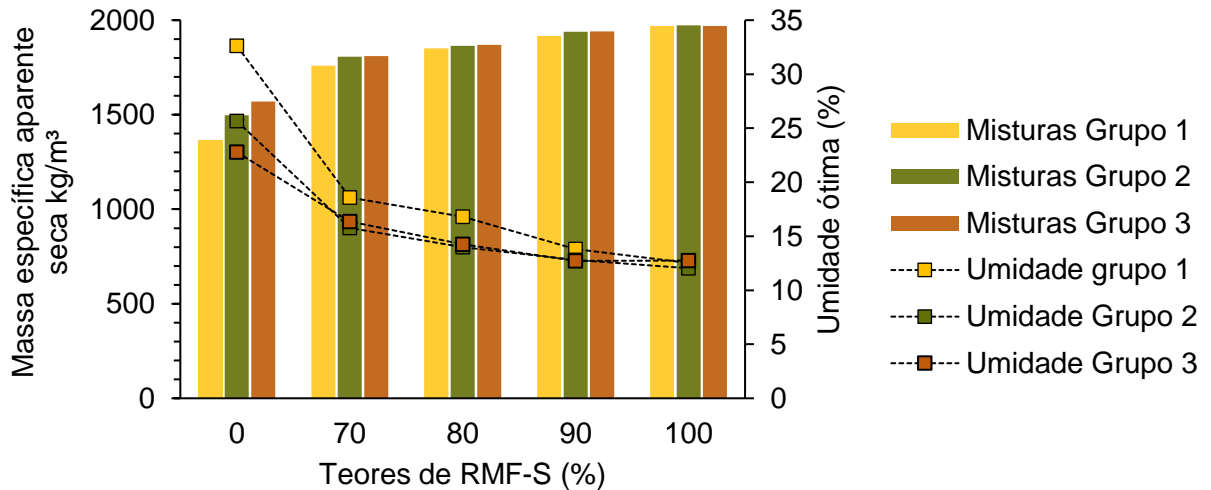
Fonte: Autora.

Para comparação e melhor entendimento do impacto das adições nas misturas, foi elaborado o Gráfico 9.

Vale ressaltar que a correção granulométrica com areia tem um impacto significativamente maior e positivo nas misturas que não contém RMF-S ou que possuem uma proporção menor de RMF-S. Isto ocorre porque tanto a areia quanto o

RMF-S atuam de forma similar.

Gráfico 9 - Comparação da compactação e umidade ótima – Misturas do Grupo 1, 2 e 3.



Fonte: Autora.

Assim, nas misturas produzidas apenas com RMF-S, a areia e o cimento praticamente não afetam a umidade ótima e a massa específica aparente seca. O aumento da massa específica aparente seca nas misturas com areia e cimento pode ser explicado pela contribuição da areia para uma distribuição granulométrica uniforme (HOFFMANN, MINTO, HEISE, 2011). Há, ainda, uma tendência de que a massa específica aparente seca das misturas aumente à medida que aumenta o teor de RMF-S.

### 4.3 Análise dos ensaios mecânico, físico e de durabilidade

#### 4.3.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão, para comparação, foi realizado nos Grupos 2 e 3. Na Tabela 16, são apresentados os resultados de resistência à compressão.

Tabela 16- Resistência à compressão – Misturas do Grupo 2 e 3.

	Energia de compactação	Misturas	Resist. compressão (MPa)	Desvio padrão	Coef. variação (%)
<b>Grupo 2</b>	Normal	0-A	1,80	0,11	6,17
		70-A	1,34	0,02	1,24
		80-A	1,28	0,04	3,36
		90-A	1,29	0,08	6,43
		100-A	1,02	0,06	6,13
<b>Grupo 2</b>	Modificada	0-A	1,24	0,09	7,34
		70-A	1,40	0,08	5,38
		80-A	1,22	0,08	6,94
		90-A	1,84	0,19	10,50
		100-A	1,30	0,07	6,66
<b>Grupo 3</b>	Modificada	0-AC	1,15	0,09	7,83
		70-AC	0,94	0,02	2,19
		80-AC	1,23	0,10	7,77
		90-AC	1,64	0,10	5,97
		100-AC	1,30	0,07	5,71

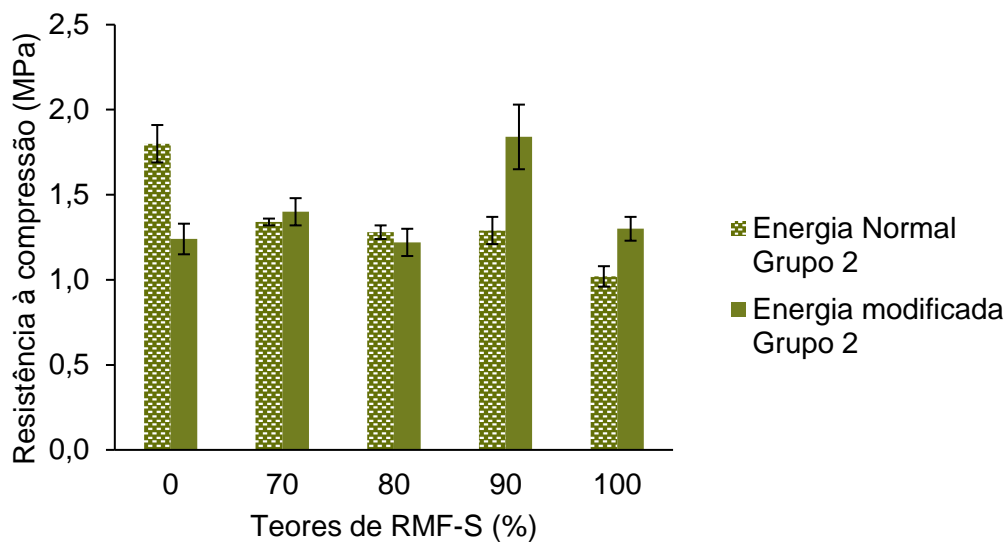
Fonte: Autora.

Observa-se que esses resultados estão dentro da faixa de resultados médios encontrados na literatura, que variam de 1,0 a 2,5 MPa (ÁVILA, PUERTAS, GALLEGOS, 2021), exceto a mistura 70-AC que apresentou 0,94 MPa.

O Gráfico 10 apresenta uma comparação entre a energia normal e a energia modificada de compactação do Grupo 2. Observa-se que a energia modificada de compactação é eficaz nas misturas com maiores teores de RMF-S, mas ineficaz nas misturas com menor teor. Verifica-se uma correlação entre a energia de compactação

e a presença de argila: enquanto as misturas com maior presença de argila não demonstraram bom desempenho ao aumentar a energia de compactação, as misturas com maior teor de RMF-S e baixa quantidade de argila apresentaram aumento na resistência à compressão com o uso da energia modificada de compactação. As misturas com compactação com energia modificada, devido ao menor teor de água, apresentaram falha frágil. Em contrapartida, a compactação com energia normal, com maior teor de água e melhor ativação da argila, apresentou falha dúctil.

Gráfico 10 - Resistência à compressão com energia normal e energia modificada – Grupo 2.



Fonte: Autora.

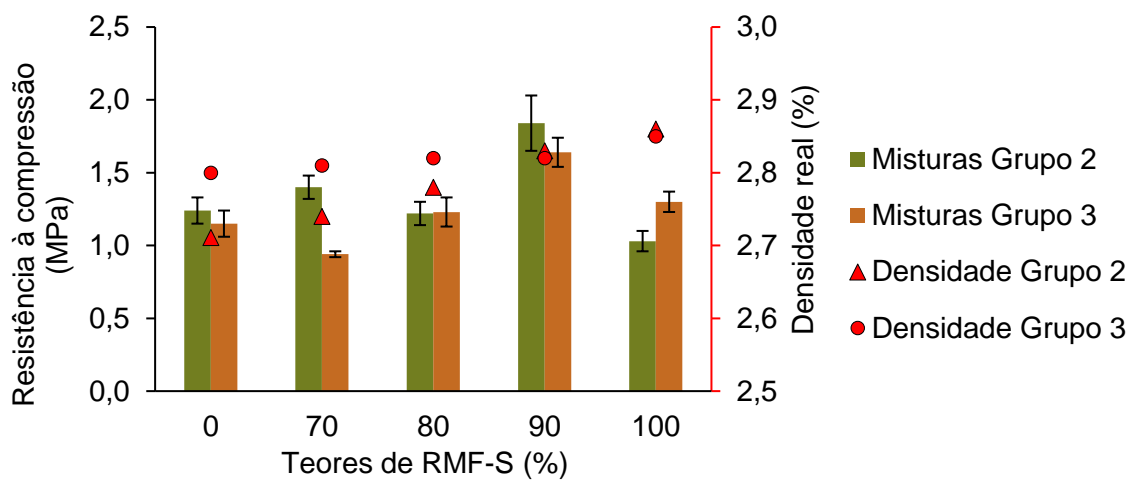
No Gráfico 11 é apresentado um comparativo entre o Grupo 2 e 3, ambos com energia modificada de compactação. No Grupo 2, as misturas 70-A, 90-A, assim como no Grupo 3, as misturas, 90-AC e 100-AC, superaram o valor mínimo de 1,3 MPa - NBR 17014 (ABNT, 2022a). Em particular, as misturas 90-A e 90-AC apresentaram os valores mais elevados de resistência à compressão, os maiores valores de densidade e o menor valor de umidade ótima de compactação.

Em relação ao aspecto mecânico, a adição de cimento não se mostrou necessária. Acredita-se que um dos motivos seja que, durante o ensaio de compactação, em que é obtido a umidade ótima de compactação, o cimento é analisado como grão fino, ainda não hidratado. Assim, a quantidade de água utilizada pode ser insuficiente para a completa hidratação do cimento.

Este resultado corrobora os achados de Toufigh e Kianfar (2019), em que a

mistura não estabilizada já apresentou resistência à compressão satisfatória, embora eles tenham observado um aumento de 26% com a adição de 2,5% de cimento. Zami *et al.* (2022) também precisaram utilizar cimento para alcançar os valores mínimos de resistência à compressão exigidos pelas normas. Em seus estudos, a adição de 2,5% de cimento em solo arenoargiloso resultou em um aumento de 23,5% na resistência à compressão, em comparação com a mistura não estabilizada.

Gráfico 11 - Resistência à compressão, densidade real – Misturas do Grupo 2 e 3.



Fonte: Autora.

Durante os ensaios de resistência à compressão, notou-se que alguns corpos de prova das diferentes misturas apresentaram ruptura na diagonal. Esse comportamento ocorre porque o corpo de prova, sob compressão, falha devido ao desenvolvimento de rachaduras de cisalhamento, resultando, em última análise, em uma falha frágil (REDDY, RATHOD, 2022).

Figura 30 - Corpos de prova com ruptura diagonal.



Fonte: Autora.

### 4.3.2 Porosidade

Os resultados do ensaio de porosidade, podem ser observados na Tabela 17.

Tabela 17 - Porosidade e densidade real – Misturas do Grupo 2 e 3.

	Misturas	Porosidade real (%)	Des. Padrão	Coe. Variação (%)	Densidade real (kg/m <sup>3</sup> )	Des. Padrão	Coe. Variação (%)
<b>Grupo 2</b>	0-A	41,55	2,64	6,36	2710	98,86	3,65
	70-A	32,03	0,41	1,29	2740	84,91	3,10
	80-A	27,44	1,33	4,83	2790	88,57	3,17
	90-A	31,59	1,48	4,67	2830	88,63	3,13
	100-A	27,29	1,36	4,97	2860	89,69	3,14
<b>Grupo 3</b>	0-AC	40,15	0,53	1,31	2800	30,95	1,10
	70-AC	34,83	0,96	2,76	2810	38,07	1,35
	80-AC	34,22	1,09	3,19	2820	45,17	1,60
	90-AC	31,51	0,52	1,66	2820	32,11	1,14
	100-AC	30,95	0,15	0,47	2850	24,52	0,86

Fonte: Autora.

A utilização de RMF-S nas misturas diminuiu a porosidade (quantidade de poros) além de aumentar a densidade das misturas à medida que o RMF-S foi incorporado, em ambos os grupos. No Grupo 2 a adição de RMF diminuiu a porosidade em 34% da mistura 0-A para a mistura 100-A. No Grupo 3, adição de RMF diminuiu a porosidade em 23% da mistura 0-AC para a mistura 100-AC. Isso demonstra a capacidade do RMF-S de preencher os vazios ao promover uma melhor distribuição

granulométrica da mistura. Esta redução da porosidade, em um cenário de alta umidade do ar, absorve menos água e pode ter maior resistência.

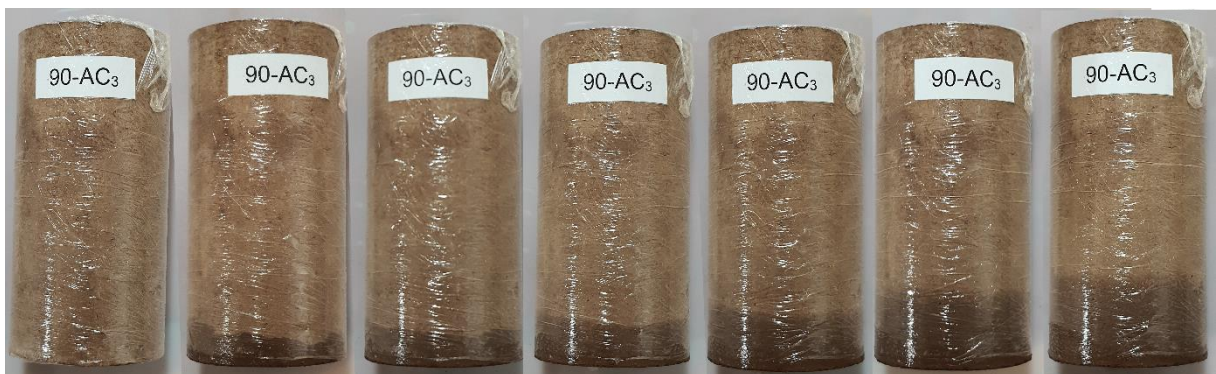
Em relação as misturas do Grupo 2 e 3, observa-se que a adição de cimento teve pouco impacto na porosidade das misturas com maiores teores de RMF-S. Este resultado corrobora os dados de massa específica aparente seca obtidos no ensaio de compactação de Proctor (Gráfico 9).

Losini *et al.* (2023b) moldaram um corpo de prova representativo de taipa de pilão feito com solo arenoso estabilizado com lignina e obtiveram 23% de porosidade. Hall e Djerbib (2004), em solos arenosos, encontraram de 25% a 30% de porosidade em corpos de prova representativos de taipa de pilão.

#### 4.3.3 Absorção por capilaridade

Realizou-se o registro fotográfico dos intervalos de medição durante o ensaio de capilaridade (Figura 31). Da esquerda para a direita, a primeira imagem é o corpo de prova antes do contato com a água e, na sequência, o mesmo corpo de prova nos intervalos de 10, 20, 40, 80, 120 e 240 minutos após o contato com a água, respectivamente.

Figura 31 - Absorção por capilaridade de um corpo de prova.



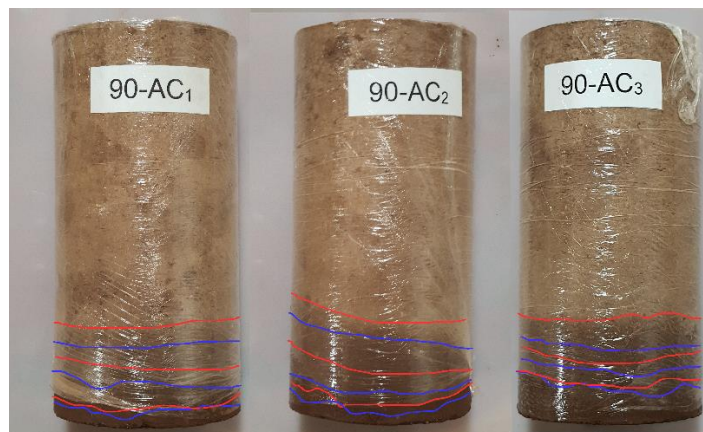
Fonte: Autora.

Na Figura 32, observam-se os três corpos de prova, da mesma mistura, após o último intervalo de 240 minutos. A imagem evidencia a altura e o formato da absorção de água, com marcações em cores distintas para cada intervalo anterior, baseadas em registros fotográficos realizados após cada respectivo intervalo. Essas marcações permitem uma comparação visual precisa do progresso da absorção de

água ao longo do tempo, facilitando a análise do comportamento dos materiais testados.

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 corpos de prova.

Figura 32- Sequência fotográfica do processo de ascensão capilar da água em uma mistura.



Fonte: Autora.

Após a última leitura, os corpos de prova foram abertos para aferir a absorção por capilaridade interna. A partir da Figura 33, é visto que a altura de ascensão interna foi similar entre os corpos de prova de uma mesma mistura.

Figura 33 - Corpos de prova abertos após ensaio.

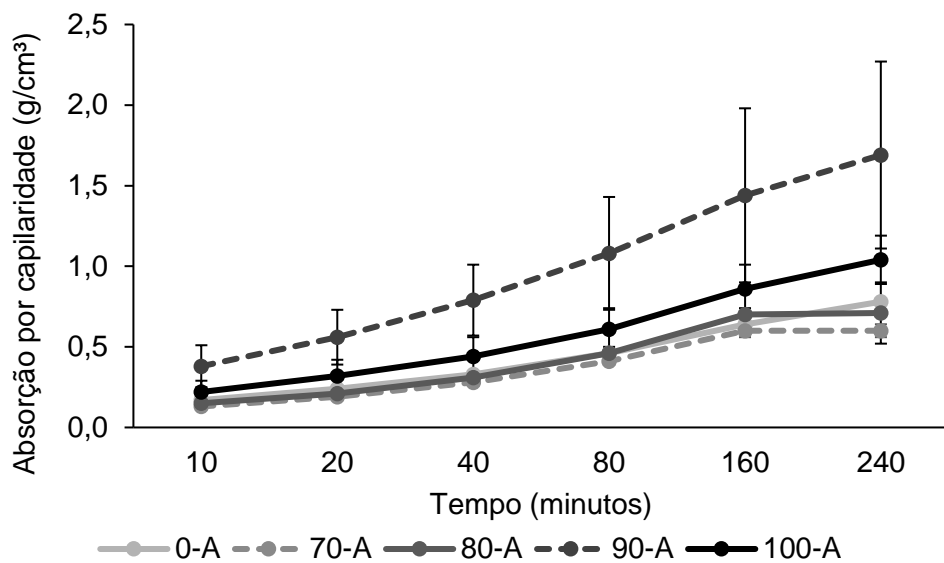


Fonte: Autora.

Com os Gráfico 12 e 14, é possível analisar comparativamente os resultados da absorção de água por capilaridade nos grupos com e sem cimento. O valor do coeficiente de absorção por capilaridade variou entre 0,60 e 1,69 g/cm<sup>2</sup> no Grupo 2, enquanto no Grupo 3 variou entre 1,06 e 2,16 g/cm<sup>2</sup>.

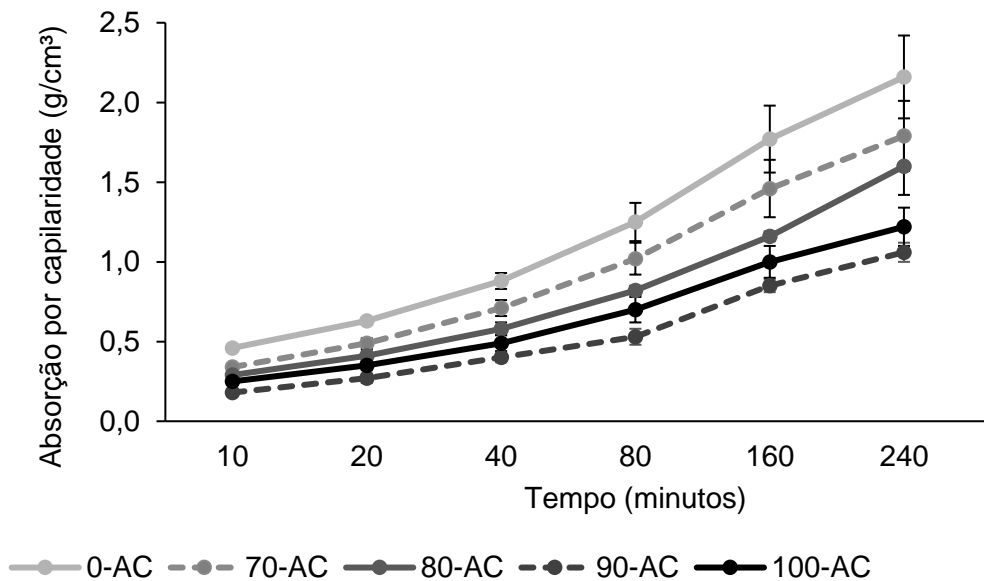
Enquanto as misturas com 90 e 100% de RMF-S obtiveram valores de porosidade (volume total de poros) similares nos grupos com e sem cimento, a adição de cimento diminuiu a absorção por capilaridade dessas misturas. Esse comportamento pode ser devido ao refinamento do tamanho dos poros ou a redução da interconexão entre estes. No entanto, análises adicionais de microscopia seriam necessários para evidenciar a estrutura da rede de poros.

Gráfico 12 - Absorção por capilaridade – Misturas dos Grupos 2.



Fonte: Autora.

Gráfico 13 - Absorção por capilaridade - Misturas do Grupo 3.



Nas misturas com maiores teores de RMF-S o cimento influenciou de forma positiva a absorção por capilaridade, assim como o aposto também aconteceu. Nas misturas com menor teor RMF-S, a adição de cimento aumentou a absorção por capilaridade. No entanto, o comportamento da mistura com 90% de RMF-S foi inverso entre os dois grupos, evidenciando que neste caso a adição do cimento foi decisiva para a diminuição da absorção por capilaridade. Talvez esse comportamento seja o indício de uma melhor interação entre o cimento e as matrizes mais arenosas levando ao refinamento ou tamponamento dos capilares, o que já é evidenciado por outros autores.

Por se tratar de um ensaio comparativo, não há um critério específico de aprovação ou reprovação da absorção por capilaridade, quanto menor a absorção por capilaridade, melhor será o desempenho. No entanto, os resultados de Hall e Djerbib (2004) indicam que uma absorção de 0,04 g/cm<sup>2</sup>min é um limite adequado para taipa de pilão não estabilizada. Todas as misturas, do Grupo 2 e 3, obtiveram uma absorção por capilaridade inferior a 0,04 g/cm<sup>2</sup>min.

#### 4.3.4 Gotejamento

Em relação ao ensaio de gotejamento, a profundidade máxima da erosão do gotejamento (Per), a profundidade da penetração da água (Ppa) e a maior dimensão da área erodida (Par) no corpo de prova, das misturas do Grupo 2 e Grupo 3 são apresentadas nas Tabela 18 e 19, respectivamente.

Tabela 18 – Erosão por gotejamento - Misturas do Grupo 2

<b>Misturas</b>	<b>Per (mm)</b>	<b>Ppa (mm)</b>	<b>Par (mm)</b>
<b>0-A</b>	4,0	14,0	35,2
<b>70-A</b>	3,0	16,1	33,1
<b>80-A</b>	3,0	14,2	32,2
<b>90-A</b>	2,5	14,7	30,6
<b>100-A</b>	4,0	16,1	35,0

Obs.: Per é a profundidade máxima da erosão do gotejamento; Ppa é a profundidade da penetração da água; Par é a maior dimensão da área erodida.

Fonte: Autora.

Tabela 19 - Erosão por gotejamento - Misturas do Grupo 3.

Misturas	Per (mm)	Ppa (mm)	Par (mm)
<b>0-AC</b>	-	21,3	-
<b>70-AC</b>	-	21,3	-
<b>80-AC</b>	-	20,5	-
<b>90-AC</b>	-	21,3	-
<b>100-AC</b>	-	21,3	-

Obs.: Ppa é a profundidade da penetração da água; Par é a maior dimensão da área erodida.

Fonte: Autora.

As misturas do Grupo 2 apresentaram maior erosão do que o Grupo 3, porém menor profundidade de penetração da mancha d'água. Na Figura 34, observa-se o ponto de erosão gerado pelo gotejamento em diferentes corpos de prova do Grupo 2.

Figura 34 - Erosão final do ensaio de gotejamento – Misturas do Grupo 2.



Fonte: Autora.

As misturas do Grupo 3 (com cimento) não apresentaram erosão após o ensaio de gotejamento, mas apresentaram maior penetração de água em comparação com o Grupo 2. O ensaio de gotejamento complementa o ensaio de absorção por capilaridade, indicando que, apesar de ter maior absorção por capilaridade, essa absorção não resulta em erosão significativa, ao contrário do observado nas misturas do Grupo 1. Na

Figura 35, é observado que os corpos de prova do Grupo 3 ao final do ensaio de gotejamento não apresentaram erosão.

Figura 35 - Misturas após o ensaio de gotejamento – Misturas do Grupo 3.



Fonte: Autora

De acordo com a NZS 4298 (NZS, 1998), a falha no ensaio ocorre quando a profundidade de penetração da água atinge 120 mm em um corpo de prova de 125 mm de altura. Considerando que a altura do corpo de prova da presente pesquisa é de 120 mm, a profundidade da penetração da água pode atingir até 115 mm.

De forma similar, a NBR 17014 (ABNT, 2022a) determina que a profundidade de penetração da água deve ser igual ou menor que 120 mm em um corpo de prova de 150 mm de altura. Ponderando em relação à altura do corpo de prova, a profundidade de penetração da água, neste caso, poderia ser de até 96 mm, profundidade da erosão deve ser igual ou menor que 15 mm e a maior dimensão da área erodida deve ser igual ou menor a 50 mm. Todos os teores das misturas analisadas atendem a esses critérios.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa, as propriedades mecânicas e a durabilidade da taipa de pilão estabilizada e não estabilizada foram avaliados, considerando o efeito das condições ambientais. Mais de 200 corpos de prova foram moldados com diferentes teores de sedimento de rejeito de minério de ferro (RMF-S) e solo laterítico.

Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- i) A adição de areia para correção granulométrica nas misturas reduziu a umidade ótima de compactação sem afetar significativamente a massa específica aparente seca das misturas com maior teor de RMF-S;
- ii) O uso do RMF-S impactou positivamente para as misturas, uma vez que há uma tendência de que a massa específica aparente seca das misturas aumente à medida que aumenta o teor de RMF-S;
- iii) O uso do RMF-S nas misturas elevou a massa específica aparente seca das misturas, sem o qual, não estaria de acordo com a norma brasileira de taipa de pilão;
- iv) O uso do RMF-S nas misturas elevou o pH, embora ainda de forma insuficiente para promover um ambiente alcalino;
- v) O uso do RMF-S aumentou a densidade real e reduziu a porosidade das misturas com e sem cimento;
- vi) Em geral, a absorção por capilaridade foi maior no grupo com cimento, o que acompanha a maior penetração de água no ensaio de gotejamento; no entanto, as misturas com cimento não apresentaram erosão superficial.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: amostras de solo: preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa específica aparente seca e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: Desempenho. Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814**: adobe: requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17014**: taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 66502**: solos e rochas: terminologia. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49**: agregado fino: determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: agragados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.
- ALMADA, Bruna S.; FAJARDO, Abner A.; PRADO, Dyala F.; SILVEIRA NETO,

Henrique da S.; SILVA, Silvia R.; SANTOS, White. Propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade de argamassas com adição de rejeito de minério de ferro. *In: XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2022, Canela. Anais Eletrônicos...Canela. 2023. p. 1–11. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/entac.v19i1.2018>. Acesso em: 20 jul. 2024.*

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Anuário mineral brasileiro**: principais substâncias metálicas. Brasília, 2022. 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: 20 jul. 2024.

ANM. Agência Nacional de Mineração. **Report mensal barragens de mineração**. Brasília, 2023. Disponível em: <https://app.dnmp.gov.br/Sigbm/publico>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ARAÚJO E FARIAS, Manoel L.; ARAÚJO, Henrique A.; RODRIGUES, John K. Análise da aplicabilidade de sistema de classificação universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos. **Transportes**, v. 31, n. 1, p. 2750, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2750>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ARRIGONI, Alessandro; SIMONI, G.; DOTELLI, Giovanni.; PELOSATO, R.; CARUSO, M. Rammed Earth stabilised with waste materials: a sustainable and resistant solution. **IOP Conference Series: earth and environmental science**, v. 822, p. 012042, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/296/1/012019>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ARRIGONI, Alessandro; BECKETT, Christopher; CIANCIO, Daniela; DOTTELI, Giovanni. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 128–136, 1 jul. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>. Acesso em: 20 jul. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 3282**. Standard Practice for Classification of Soils and Soil: aggregate mixtures for highway construction purposes. Pensilvânica, 2015.

AVILA, Fernando; PUERTAS, Esther; GALLEGO, Rafael. Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: a review. **Construction and Building Materials**, v. 270, p. 121435-121446, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>. Acesso em: 20 jul. 2024.

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, 10 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118098>. Acesso em: 20 jul. 2024.

BESSA, Sofia A. L.; MENDONÇA, Isabela K.; VIMIEIRO, Jhade I. C; GURGEL Gleidson; MAGALHÃES, Luciano; BEZERRA, Augusto. Análises de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro. *In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 17., 2018. Anais [...]. Porto*

Alegre: ANTAC, 2018. p. 2765–2772. Disponível em:

<https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/1687>. Acesso em: 20 jul. 2024.

BRIMBLECOMBE, Peter; BONAZZA, Alessandra; BROOKS, Nicks; GROSSI, Carlota M.; HARRIS, Ian; SABBIONI, Cristina. Impact of climate change on earthen buildings. In: Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage. 10., 2008. Proceedings of Terra 2008: The 10th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage. Bamako: Getty Conservation Institute and the Mali Ministry of Culture, 2008. Disponível em:

[https://books.google.com.br/books?hl=pt-](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=gUZkh_C1_jYC&oi=fnd&pg=PA278&dq=Impact+of+Climate+Change+on+Earthen+Buildings+In+Rainier&ots=0V3dloUS3f&sig=4LvLdmtJl3UzLm4cJuL33BjO-CQ#v=onepage&q&f=false)

[BR&lr=&id=gUZkh\\_C1\\_jYC&oi=fnd&pg=PA278&dq=Impact+of+Climate+Change+on+Earthen+Buildings+In+Rainier&ots=0V3dloUS3f&sig=4LvLdmtJl3UzLm4cJuL33BjO-CQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=gUZkh_C1_jYC&oi=fnd&pg=PA278&dq=Impact+of+Climate+Change+on+Earthen+Buildings+In+Rainier&ots=0V3dloUS3f&sig=4LvLdmtJl3UzLm4cJuL33BjO-CQ#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 20 jul. 2024.

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://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.001>. Acesso em: 20 jul. 2024.

BUI, T.T.; BUI, Q. B.; LIMAM, A.; MAXIMILIEN, S. Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 295 – 302, 2014. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.053>. Acesso em: 10 ago. 2024.

BUI, Quoc Bao; MOREL, J.C.; HANS, Stéphane; WALKER, Peter. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. **Building and Environment**, v. 54, n. 5, p. 163-169, mar. 2014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>. Acesso em: 20 jul. 2024.

BURROUGHS, Steve. Recommendations for the selection, stabilization, and compaction of soil for rammed earth wall construction. [S.l.], 2010. Disponível em: [https://meridian.allenpress.com/jgb/article-](https://meridian.allenpress.com/jgb/article-pdf/5/1/101/1770053/jgb_5_1_101.pdf?__cf_chl_tk=EY7thhJK3xpFyOmcPW5L0RvIUJgYakukeELQoW8W8vi-1721247647-0.0.1.1-4223)

[pdf/5/1/101/1770053/jgb\\_5\\_1\\_101.pdf?\\_\\_cf\\_chl\\_tk=EY7thhJK3xpFyOmcPW5L0RvIUJgYakukeELQoW8W8vi-1721247647-0.0.1.1-4223](https://meridian.allenpress.com/jgb/article-pdf/5/1/101/1770053/jgb_5_1_101.pdf?__cf_chl_tk=EY7thhJK3xpFyOmcPW5L0RvIUJgYakukeELQoW8W8vi-1721247647-0.0.1.1-4223). Acesso em: 20 jul. 2024.

CABEZA, Luisa; BOQUERA, Laura; CHAFER, Marta; VEREZ, David. Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: worldwide progress and barriers through literature map analysis. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 1-26, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>. Acesso em: 20 jul. 2024.

CASTRO, Marcus D.; OLIVEIRA, Vinícius N.; MASCARENHA, Márcia M.A.; GITIRANA JUNIOR, Gilson de F.N.; LUZ, Marta P. Análise das curvas características solo-água de amostras remoldada e indeformada de um solo laterítico não saturado. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2020. **Anais** [...]. Campinas, 2020. Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/362144568\\_Analise\\_das\\_curvas\\_caracteristicas\\_solo-agua\\_de\\_amostras\\_remoldada\\_e\\_indeformada\\_de\\_um\\_solo\\_lateritico\\_nao\\_saturado](https://www.researchgate.net/publication/362144568_Analise_das_curvas_caracteristicas_solo-agua_de_amostras_remoldada_e_indeformada_de_um_solo_lateritico_nao_saturado). Acesso em: 20 jul. 2024.

- CHAUHAN, Parul; HAJJAR, Ahmad El; PRIME, Noémie; PLÉ, Oliver. Unsaturated behavior of rammed earth: experimentation towards numerical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 1-12, 10 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.027>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- CHOTPANTARAT, Srilert; ONG, Say K.; SUTTHIRAT, Chakkaphan; OSATHAPHAN, Khemarath. Effect of pH on transport of Pb<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> through lateritic soil: Column experiments and transport modeling. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 4, p. 640–648, abr. 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60417-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60417-2). Acesso em: 20 jul. 2024.
- CIANCIO, D.; BECKETT, C. T.S.; CARRARO, J. A.H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 59–65, 28 fev. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- 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](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0254-07702014000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 20 jul. 2024.
- CORDEIRO, Carol C. M.; BRANDÃO, Douglas Q.; DURANTE, Luciane C.; CALLEJAS, Ivan J.A.; CAMPOS, Caio A.B. de. Caracterização termofísica de solo laterítico para produção de taipa. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0889>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- CORDEIRO, Carol C. M. BRANDÃO, Douglas Q.; DURANTE, Luciane C.; CALLEJAS, Ivan J.A.; CAMPOS, Caio A.B. de. Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. 1-18, jan. 2019. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8651212>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thompson, 2007.
- DRDÁCKY, Milos F. Flood Damage to Historic Buildings and Structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. v. n. 24, 5 p. 439–445, 10 jul. 2010. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000065>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- EIJK, Dries Van; SOUZA, Vicente Custódio Moreira De. Surgimento, desenvolvimento e desaparecimento da técnica taipa de pilão no Brasil. **Conservar Patrimônio**, v. 3–4, p. 17–24, dez. 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5136/513653427002.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- FARO, Vítor; CONSOLI, Nilo; SCHNAID, Fernando. Laterally loaded deep

- foundations associated with treated soils. 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 1953, Suíça. **International society for soil mechanics and geotechnical engineering**, 2016. Disponível em: <https://www.issmge.org/uploads/publications/48/49/foundations-i-2.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- FERNANDES, Maria. A taipa no mundo. *In*: Seminário Construção e Recuperação de edifícios em taipa. **Anais [...]** Almodôvar, Portugal. 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.14195/2182-844X\\_1\\_2](https://doi.org/10.14195/2182-844X_1_2). Acesso em: 20 jul. 2024.
- GARCIA-TRONCOSO, Natividad; BAYKARA, Haci; CORNEJO, Mauricio H.; RIOFRIO, Ariel; TINOCO-HIDALGO, Marco; FLORES-RADA, Jorge. Comparative mechanical properties of conventional concrete mixture and concrete incorporating mining tailings sands. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, 1 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01031>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- GERARD, Pierre; MAHDAD, Mohamed; MCCARMACK, Alexandre R.; FRANÇOIS, Bertrand. A unified failure criterion for unstabilized rammed earth materials upon varying relative humidity conditions. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 437–447, 25 jul. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.100>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- GODARD, O. A gestão integrada dos recursos naturais e do meio ambiente: conceitos, instituições e desafios de legitimação. *In*: VIEIRA, P. F.; WEBER, J. (orgs.) **Gestão de recursos naturais renováveis e desenvolvimento**: novos desafios para a pesquisa ambiental. 3. ed. São Paulo: Cortez, 2002. p. 38–74.
- GOMAA, Mohamed; SCHADE, Sascha; BAO, Ding, W.; XIE, Yi, M. Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect. **Journal of Cleaner Production**. 20 abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- GUETTALA, A.; ABIBSI, A. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 3, p. 119–127, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.001>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- HALL, Matthew; DJERBIB, Youcef. Moisture ingress in rammed earth: part 1 - the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 4, p. 269–280, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2003.11.002>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- HALL, Matthew; LINDSAY, Rick; KRAYENHOFF, Meror. Overview of modern earth building. **Modern earth buildings**: materials, engineering, constructions and applications, p. 3–16. 2012.
- HIRABAYASHI, Yukiko; MASAHIRO, Tanoue; ORIE, Sasaki; XUDONG, Zhou; DAI, YANAZAKI. Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83279-w>. Acesso em: 20 jul. 2024.
- HOFFMANN, Márcio; MINTO, Fernando; HEISE, André. Taipa de pilão. *In*: NEVES, Célia; FARIA, Obede Borges (org.). Técnicas de construção com terra.

Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 1–79. *E-book*. Disponível em: [www.redprotterra.org](http://www.redprotterra.org). Acesso em: 22 nov. 2023.

HOPPE P. Steered Erosion – A differentiated approach on Weather protection for exposed rammed earth walls. **IOP Conference Series: earth and environmental science**, v. 1078, p. 12064- 12074. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012064>. Acesso em: 20 jul. 2024.

Houben, Hugo; Guillard, Hubert. *Earth Construction: a comprehensive guide*. United Kingdom: Intermediate Technology Publications, 1994.

INDEKEU, Margaux L.; FENG, C.; JANSSEN, Hans; WOLOSZYN, Monika. W. Experimental study on the capillary absorption characteristics of rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 283, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125978>. Acesso em: 20 jul. 2024.

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.2021.122689>. Acesso em: 20 jul. 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL CLIMATE CHANGE. **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge University Press, 2022. p. 37–74. Disponível em: [https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_FullReport.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf). Acesso em: 20 jul. 2024.

JAQUIN, Paul. Influence of Arabic and Chinese rammed earth techniques in the himalayan region. **Sustainability**, v. 4, n. 10, p. 2650–2660, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su4102650>. Acesso em: 20 jul. 2024.

JAQUIN, Paul A.; AUGARDE, Charles; GALLIPOLI, Domenico; TOLL, David G. The strength of unstabilised rammed earth materials. **Géotechnique**. Inst of Civil Engineers Pub, 2009, v. 59, n. 5, p. 487–490, maio 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/geot.2007.00129>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KARIYAWASAM, K. K.G.K.D.; JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 519–527, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KOSARIMOVAAHED, Mohammadhossein; TOUFIGH, Vahab. Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, 20 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123279>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KOUTOUS, Ahmed; HILALI, El Mokhtar. A Proposed Experimental Method for the Preparation of Rammed Earth Material. **International Journal of Engineering Research & Technology**, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV8IS070140>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KURNIATI, Eka Oktavia; PEDERSON, Federico; KIM, Hee Jeong. Application of steel slags, ferronickel slags, and copper mining waste as construction materials: a review. **Resources, Conservation and Recycling**, 1 nov. 2023. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107175>. Acesso em: 20 jul. 2024.

KUMAR, Santa G.; SAINI, P. K.; DEOLIYA, R. MISHRA, K. Characterization of laterite soil and its use in construction applications: A review. **Resources, Conservation and Recycling Advances**, v. 16, n. 200120, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200120>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LAGE, Gabriela T. de L.; BESSA, Sofia, A. L.; SANTOS, Beatriz F. A. dos; MATIAS, L. M. GALERY, Roberto. Potencial de estabilização da taipa de pilão com rejeitos de mineração e cal. 11 nov. 2023, [S.l.]: ANTAC, p. 1–6, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/375578606>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LAGE, Gabriela T. de L.; WHITE, José dos S.; BESSA, Sofia A. L. Uso do rejeito de mineração de ferro para uso em taipa de pilão: análise da literatura. In: XI Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/247082>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LI, Runfeng; ZHOU, Yang; LI Cuiwei; LI Shibo; HUANG Zhenying. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 43–50, 20 jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LI, X.; ZHONG, Q.; TANG, M.. GAO, Y.; FENG, C. Experimental and numerical analysis of the hygric performance of earthen buildings after façade hydrophobization treatment. **Case Studies in Construction Materials**, n. 19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02217>. Acesso em: 20 jul. 2024

LOSINI, Alessia E.; GRILLET, Anne-Cecile; VO, Linh; DOTELLI, Giovanni; WOLOSZYN, Monika. Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: from material to building scale. **Building and Environment**, v. 233, 1 abr. 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110087>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LOSINI, Alessia E.; GRILLET, Anne-Cecile; WOLOSZYN, Monika; LAVRIK, Liudmila; MOLETTI, Chiara; DOTELLI, Giovanni; CARUSO, Marco. Mechanical and microstructural characterization of rammed earth stabilized with five biopolymers. **Materials**, v. 15, n. 9, 1 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15093136>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LOSINI, Alessa; WOLOSZYN, Monika; CHITIMBO, Taini; PELÈ-PELTIER, Antoine; OUERTANI, Sahabi; DOYA, Maxime; GAILLARD, David. Extended hygrothermal characterization of unstabilized rammed earth for modern construction. **Construction and Building Materials**, v. 409, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133904>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LOSINI, Alessa; CHITIMBO, Taini; LETEVE, Laura; WOLOSZYN, Monika; GRILLET, Anne C.; PRIME, Noemie. Hygrothermal characterization of rammed earth according to humidity variations. **Construction and Building Materials**, v. 409, n. 133904, 2023c. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133904>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LUCIANO, Rodrigo V.; Albuquerque, Adriano J.; COSTA, André; BATISTELLA, Bruno; Warmling, Maria T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1733 – 1744, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LUO, Yi; YIN, Botao; PENG, Xinqian; XU, Yuye; ZHANG, Lei. Wind-rain erosion of Fujian Tulou Hakka Earth Buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 50. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101666>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LUO, Yi; ZHOU, Peisong; NI, Pengpeng; PENG, Xingqian; YE, Junjie. Degradation of rammed earth under soluble salts attack and drying-wetting cycles: The case of Fujian Tulou, China. **Applied Clay Science**, v. 212. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106202>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LUO, Yi; YANG, Mengqi; NI, Pengpeng; PENG, Xingqian; YUAN, Xiaxia. Degradation of rammed earth under wind-driven rain: The case of Fujian Tulou, China. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 1-10. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119989>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LUZ, Adão B.; ALMEIDA, Salvador. L. M. Usos e especificações. *In*: Manual de agregados para a construção civil. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.6. p.103-123.

MACHADO, Isabela C. M.; BORGES, Angelina N.; SOUZA, Jaqueline C.; Influência da cal na curva característica solo-água de um solo tropical. *In*: XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/p/150131>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MANZOOR, Omer S.; YOUSUF, Aadil. Stabilisation of soils with lime: a review. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 11, n. 9, p. 1538–1551, 2020. Disponível em: <http://www.jmaterenvironsci.com/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MATTOS, Flávia C.; GONÇALVES, Margarete 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, v.2, n.1, 2017. Disponível em: [10.21575/25254782rmetg2017vol2n1333](https://doi.org/10.21575/25254782rmetg2017vol2n1333). Acesso em: 20 jul. 2024.

MEBARKIA, Rahma; BOUZEROURA, Mansour; CHELOUAH, Nasser. Study of the effect of cement kiln dust on the mechanical, thermal and durability properties of compressed earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 349, 26 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128707>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MEEK, Alexandra H.; ELCHALAKANI, Mohamed; BECKETT, Christopher T.S.; DONG Minhao. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: a study of mechanical properties, flexure and bond strength. **Construction and Building Materials**, v. 277, 29 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122303>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MELLAIKHAFI, Abdellah; TILIOUA, Amine; SOULI, Hanène; GAROUM Mohammed; HAMDY, Moulay A.A. Characterization of different earthen construction materials in oasis of south-eastern Morocco (Errachidia Province). **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00496>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MENDES, Beatriz C. Reaproveitamento do rejeito de minério de ferro liberado no desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão na produção de blocos cerâmicos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/25135/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MENDES, Ludmila Cardoso Fagundes; BESSA, Sofia Araújo Lima. Análise da evolução tecnológica da taipa de pilão. **MIX Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 66–77, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n1.66-77>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MILANI, Ana Paula S.; MAIA, Murilo M. Uso de aditivos químicos para redução de energia de compactação na execução de taipa de pilão. *In*: VII Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil, 7., 2018, Rio de Janeiro. **Território e trabalho**: a produção da arquitetura com terra no Brasil. Rio de Janeiro: Terra Brasil, 2018. p. 68–74. Disponível em: <https://redeterrabrasil.net.br/publicacoes/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MINKE, Gernot. **Building with Earth**: design and technology of a sustainable architecture. Basel · Berlin · Boston: Publishers for Architecture, 2006.

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

MORAIS, Camila F.; BELO, Bárbara R.; BEZERRA, Augusto; MOURA, Rejane M.; PORTO, M. P.; BESSA, Sofia A. L. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121073>. Acesso em: 20 jul. 2024.

New Zealand. **NZS 4298**: Materials and workmanship for earth buildings. Wellington, 20 oct. 1998.

New Zealand. **NZS 4299**: Earth buildings not requiring specific engineering design. Wellington, 20 oct. 1998.

NGO, Thanh Phong; BUI, Quoc-Bao; PHAN, Vu T. A.; TRAN, Huu-Bang. Durability of geopolymer stabilised compacted earth exposed to wetting–drying cycles at different conditions of pH and salt. **SSRN**, v. 329, 25 abr. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3987648>. Acesso em: 20 jul. 2024.

NITO, Mariana K. S.; AMORIM, Anália. M. M. C. Sistemas construtivos em terra crua: panorama da América Latina nos últimos 30 anos e suas referências técnicas históricas. *In*: CASTRO, Ana; ASSAL, Marianna R. B. A. **Revista cadernos de pesquisa da escola da cidade**. São Paulo: Editora da Cidade, 2015. p. 11-18. Disponível em: <https://silo.tips/download/artigos-arquitetura-tecnica-e-contexto-o-canteiro-e-a-producao-habitacional-no-br>. Acesso em: 20 jul.

2024.

OGUNYE, F O; BOUSSABAIN, H. Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. **Construction and Building Materials**, v 16, n. 3, p. 163-172. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00004-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00004-1). Acesso em: 20 jul. 2024.

OHOFUGI, Nicolas G.; GÓIS, Manuelle S.; COSTA, Katherin R. C.; CAVALCANTE, André 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**, Curitiba v. 5, n. 1, p. 226–240, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv5n1-014>. Acesso em: 20 jul. 2024.

OLA, Samuel Akinlabi. The potentials of lime stabilization of lateritic soils. **Engineering Geology**, v 11, n. 4, p. 305-317. 1977. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(77\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(77)90036-9). Acesso em: 20 jul. 2024.

OLACIA, Elena; PISELLO, Anna L.; CHIODO, Vitaliano; MAISANO, Susanna; FRAZZICA, Andrea; CABEZA, Luisa F. Sustainable adobe bricks with seagrass fibres. Mechanical and thermal properties characterization. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 1–8, 10 abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PACHECO-TORGAL, F.; EIRES, Rute M. G.; JALALI, Said. Construção em Terra. TecMinho ed. Guimarães: Universidade do Minho, 2009.

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, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>. Acesso em: 20 jul. 2024.

PANAGIOTOU, R.; KYRIAKIDES, M.A.; ILLAMPAS, R.; LOANNOU, 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: 20 jul. 2024.

PHAM, Tien Duc; TRAN, Thi T.; LE, Van, A.; PHAM, Thu T.; DAO, Thi H.; LE Thanh S.L. Adsorption characteristics of molecular oxytetracycline onto alumina particles: The role of surface modification with an anionic surfactant. **Journal of Molecular Liquids**, v. 287, 1 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110900>. Acesso em: 20 jul. 2024.

RAIMONDO, Mariarosa; DONDI, Michele; MAZZANTI F.; STEFANIZZI, Pietro. Equilibrium moisture content of clay bricks. **Key Engineering Materials**, v. 264–268, p. 1483–1486, 2004. Disponível em: [10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.1483](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.264-268.1483). Acesso em: 20 jul. 2024.

RAIMONDO, Mariarosa; DONDI, Michele; GARDINI, Davide; GUARINI, Guia; MAZZANTI, Francesca. Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2623–2630, jul. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.009>. Acesso em: 20 jul. 2024.

RAJ S., Saranya; SHARMA, Anil Kumar; ANAND, K. B. Performance appraisal of coal ash stabilized rammed earth. **Journal of Building Engineering**, v. 18, p. 51–57, 1 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.03.001>. Acesso em: 20 jul. 2024.

REDDY; JAGADISH, K. S. The static compaction of soils. **Geotechnique**, v. 43, n. 2, p. 337–341, 1993. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/245410978>. Acesso em: 20 jul. 2024.

REDDY, B. V. Venkatarama; KUMAR, P. Prasanna. Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 3, p. 380–385, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.005>. Acesso em: 20 jul. 2024.

REDDY; RATHOD, R. Sri Bhanupratap. Influence of interlayer shear studs on the behaviour of cement stabilised rammed earth under compression, tension and shear. **Journal of Building Engineering**, v. 49, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104096>. Acesso em: 20 jul. 2024.

REIS FILHO, Nestor Goulart. **Quadro da arquitetura no Brasil**. São Paulo: Editora Perspectiva S.A, 2000.

RODRIGUES, Bruno Noronha; MOLINA JUNIOR, Vitor Eduardo; CANTERAS, Felipe Benavente. Green Infrastructure as a solution to mitigate the effects of climate change in a coastal area of social vulnerability in Fortaleza (Brazil). **Environmental Advances**, v. 13, 1 out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100398>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SEMAD. **Desastre Ambiental em Mariana e Recuperação do Rio Doce**. Disponível em: <https://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/2879-desastre-ambiental-em-mariana-e-recuperacao-da-bacia-do-rio-doce>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SESANA, Elena; GAGNON, Alexandre S.; CIANTELLI, Chiara; CASSAR, Joann; HUGHES, John J. Climate change impacts on cultural heritage: a literature review. **Wiley Interdisciplinary Reviews: climate change**, v. 12, n. 4, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.710>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SILVA, Cláudia G. T. Conceitos e preconceitos relativos às construções em terra crua. 2000. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/4736>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Resíduos de Mineração**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-de-mineracao/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SHETTIMA, Ali U.; AHMAD, Yusof; HUSSIN, Mohd; MUHAMMAD, Nasiru; BABATUDE, Ogunbode. Strength and microstructure of concrete with iron ore tailings as replacement for river sand. In: E3S Web of Conferences, 2018, EDP Sciences. **Anais eletrônicos...Cenviron**, 2018. Disponível em: [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/09/e3sconf\\_cenviron2018\\_01003.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/09/e3sconf_cenviron2018_01003.pdf).

Acesso em: 20 jul. 2024.

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: 20 jul. 2024.

ŠVEDA, Mikuláš. Mathematical correlations between properties of brick / at various equilibrium humidity content (Part 2). *Materials Science*, v. 13, n. 1, 2007. Disponível em: <https://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/26284>. Acesso em: 20 jul. 2024.

TAALLAH, Bachir; GUETTALA, Abdelhamid. 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**, v. 104, p. 52–62, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.007>. Acesso em: 20 jul. 2024.

THOMPSON, David; AUGARDE, Charles; OSORIO, Juan P. A review of current construction guidelines to inform the design of rammed earth houses in seismically active zones. **Journal of Building Engineering**, v. 54, p. 104666, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104666>. Acesso em: 20 jul. 2024.

TOUFIGH, Vahab; GHASEMALIZADEH, Saeid; KARAMIAN, MohammadHossein. Experimental Investigation of Mixture Design and Durability Performance of Alkali-Activated Rammed Earth. **International Journal of Geomechanics**, v. 22, n. 4, abr. 2022. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002316). Acesso em: 20 jul. 2024.

TOUFIGH, Vahab; KIANFAR, Ehsan. The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 616-629. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050>. Acesso em: 20 jul. 2024.

United Nations Environment Programme. **Global Status Report for Buildings and Construction** 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/annualreport/2023>. Acesso em: 20 jul. 2024.

VALE, Jaqueline Leite Ribeiro. Seleção de solos tropicais para a produção de adobe: a utilização do ensaio azul de metileno. Tese (Doutorado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura UFMG, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: [https://sites.arq.ufmg.br/pos/ambienteconstruido/wp-content/uploads/2021/06/SELECAO-DE-SOLOS-TROPICAIS-PARA-PRODUCAO-DE-ADOBE\\_-a-utilizacao-do-ensaio-de-azul-de-metileno.pdf](https://sites.arq.ufmg.br/pos/ambienteconstruido/wp-content/uploads/2021/06/SELECAO-DE-SOLOS-TROPICAIS-PARA-PRODUCAO-DE-ADOBE_-a-utilizacao-do-ensaio-de-azul-de-metileno.pdf). Acesso em: 20 jul. 2024.

VIMIEIRO, Jhade I. C.; MOREIRA, Larissa M.; BATISTA, Gabriella E. F.; ANDRADE, Dayane F.; Bessa, Sofia A. L. Influência da cal na absorção por capilaridade em adobes produzidos com sedimento de RMF. **Mix Sustentável**, v. 9, n.4, p. 195-207. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447->

3073.MIX2023.v9.n4.195-207. Acesso em: 20 jul. 2024.

WAHAB, Norshakila A. ROSHAN, Mohammad J.; RASHID, Ahmad S.A.; HEZMI, Muhammad A.; JUSOH, Siti N.; NORSYAHARIATI, Nik D.; TAMASSOKI, Sakina. Strength and durability of cement-treated lateritic soil. **Sustainability** (Switzerland), v. 13, n. 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13116430>. Acesso em: 20 jul. 2024.

WEIMER, Gunter. **Arquitetura popular brasileira**. 2. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2012.

WEISHI, Li; GUOYUAN, Lei; YA, Xu; QIFEI, Huang. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, v. 204, p. 685–692, 10 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.309>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ZAMI, Mohammed S.; EWEBAJO, Adeoluwa O.; AL-AMOUDI, Omar S.B.; AL-OSTA, Mohammed A.; MUSTAFA, Yassir M.H. Compressive strength and wetting–drying cycles of Al-Hofuf "Hamrah" soil stabilized with cement and lime. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 47, p. 13249- 13264, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06576-0>. Acesso em: 20 jul. 2024.