

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Arquitetura
Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio
Sustentável

Gabriela Tavares de Lanna Lage

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ESTABILIZAÇÃO DA TAIPA DE PILÃO
COM REJEITOS DE MINERAÇÃO

Belo Horizonte
2023

Gabriela Tavares de Lanna Lage

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ESTABILIZAÇÃO DA TAIPA DE PILÃO
COM REJEITOS DE MINERAÇÃO**

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.

Área de concentração: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável

Orientadora: Profa. Dra. Sofia Araújo Lima Bessa

Belo Horizonte
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

L174a	<p>Lage, Gabriela Tavares de Lanna. Análise da viabilidade técnica da estabilização da taipa de pilão com rejeitos de mineração [manuscrito] / Gabriela Tavares de Lanna Lage. - 2023. 100 f. : il.</p> <p>Orientadora: Sofia Araújo Lima Bessa.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura.</p> <p>1. Arquitetura sustentável - Teses. 2. Minimização de resíduos - Teses. 3. Casas de terra - Teses. 4. Minérios de ferro - Teses. I. Bessa, Sofia Araújo Lima. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Arquitetura. III. Título.</p> <p>CDD 693.2</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AMBIENTE CONSTRUÍDO E PATRIMÔNIO SUSTENTÁVEL

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Análise da viabilidade técnica da estabilização da taipa de pilão com rejeitos de mineração"

GABRIELA TAVARES DE LANNA LAGE

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia **vinte e sete de julho de dois mil e vinte e três**, 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:

Profa. Dra. Ana Paula da Silva Milani

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

Profa. Dra. Giovanna Monique Alelvan

Universidade Federal de Minas Geras (UFMG)

Profa. Dra. Sofia Araujo Lima Bessa - Orientadora

PPG-ACPS/UFMG

Belo Horizonte, 27 de julho de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Giovanna Monique Alelvan, Professora do Magistério Superior**, em 27/07/2023, às 11:11, 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 **Sofia Araujo Lima Bessa, Professora do Magistério Superior**, em 27/07/2023, às 11:11, 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 **Ana Paula da Silva Milani, Usuária Externa**, em 27/07/2023, às 11:11, 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?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2495987** e o código CRC **8D593D8C**.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Ademais, este trabalho faz parte do projeto APQ-05495-18: "Uso sustentável do rejeito sedimentado da bacia do Rio Doce no desenvolvimento de componentes para construção civil" que foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPMIG.

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001. Furthermore, this work is part of the project APQ-05495-18: Sustainable use of sedimented tailings from the Rio Doce basin in the development of components for civil construction – which was funded by the Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Simone e Júnior, por terem como um de seus principais objetivos de vida oferecer a oportunidade do estudo a mim e ao meu irmão, e para isso não mediram esforços.

AGRADECIMENTOS

Seria impossível realizar essa pesquisa sozinha. Agradeço à FAPEMIG e a CAPES pelo financiamento que possibilitou a realização desta pesquisa e a Fundação João Pinheiro por me receber como estagiária de pós-graduação, onde tive a oportunidade de colocar em prática meus aprendizados como pesquisadora.

Agradeço à minha orientadora Profa. Sofia Bessa, por me convidar para participar de um projeto com um tema primordial e pelas tantas orientações e correções de escrita, mesmo tarde da noite ou nos finais de semana.

Agradeço à equipe dos laboratórios de Geotecnia e de Tratamento de Minérios da UFMG, em especial ao técnico Marcus Vinicius, ao técnico Alberto e ao prof. Roberto Galery pela disposição, atenção e ensinamentos.

Ao prof. White José dos Santos, pelos aprendizados proporcionados e discussões realizadas na disciplina de resíduos, essenciais para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao Atelier Muirá, pela execução das formas de taipa de pilão e adobe com tanto capricho.

Às professoras que constituíram minha banca, Profa. Giovanna Monique e Profa. Ana Milani, pela correção atenciosa da qualificação e pela oportunidade de aprendizados e trocas substanciais durante a banca.

À colega de turma de Giana, com quem tive a oportunidade de escrever sobre terra.

À todas as alunas de iniciação científica do NPMS que colocaram a mão na massa para nosso projeto acontecer: Júlia Weber, Júlia Moura, Larissa e Beatriz. Também agradeço a Isabela que vivenciou junto comigo a dificuldade dos primeiros ensaios e primeiros artigos e a Dayane que participou da correria do final. Agradeço a minha querida amiga Jhade, que se tornou minha companheira nesta trajetória acadêmica e que sempre esteve presente para colaborar.

Faço também um agradecimento especial à todas que seguraram as pontas do laboratório quando me ausentei para cuidar da minha saúde.

Não podia deixar de agradecer ao Dr. Breno Teixeira Lino, por seus cuidados dedicados ao meu olho neste período tão sensível. Seu olhar investigativo e atento foi

exemplar. Obrigada pelos ensinamentos sobre a oftalmologia, a ciência e sobre a vida. Ao Dr. André Vasconcellos, agradeço pelo zelo e maestria com que conduziu minha cirurgia, possibilitando minha recuperação e tão logo retorno aos estudos.

Agradeço também a minha coordenadora da FJP Izabel Marques, pelo exemplo de arquiteta e pesquisadora atenta e cuidadosa. Aos meus amigos e colegas estagiários que tenho o prazer de dividir a sala: Nathália, Hisrael e Tomás, obrigada por levarem leveza ao trabalho e por todos os conselhos sobre a formação acadêmica de um pesquisador universitário.

Agradeço aos meus amigos pelos momentos de descontração durante este período, mas especialmente ao Samuel e Marcos Bassolli, pela ajuda com meus cálculos matemáticos.

À Cleir e Warley agradeço pelo exemplo cotidiano que vocês me apresentam de sabedoria e simplicidade.

Agradeço à minha família pelo suporte, especialmente ao meu primo Rafael, minha tia Luiza, minha avó Ivone, meus pais e meu irmão. A estes últimos, Júnior, José Neto e Simone, também agradeço pelo Monte Verde - nosso próprio canteiro experimental, e por acreditarem nos meus sonhos e me ajudarem a alcançá-los.

Agradeço ao meu amor, Arthur Henrique, por ter vivenciado cada página deste trabalho junto comigo, por ser meu maior incentivador e encorajador e por sempre deixar desafios como estes mais leves.

RESUMO

O uso da terra como matéria-prima para construir faz parte de uma tradição milenar. Para que construções com terra compactada, como a taipa de pilão, se tornem mais resistentes, é comum o uso de estabilizantes ao solo para que tenham suas propriedades melhoradas. Entre os estabilizantes mais comuns estão o cimento e a cal. Porém, diversos autores apontam o elevado potencial poluidor em quase todas as fases do processo produtivo do cimento e sua influência no efeito estufa. Sendo assim, a busca por substitutos aos estabilizantes químicos tem sido encorajada. Em Minas Gerais, o elevado volume de rejeitos produzidos pela exploração de minério de ferro na região ainda não tem destinação que não sejam as barragens. Por isso, este trabalho analisou a viabilidade do uso do sedimento rejeito de minério de ferro (SRMF) na estabilização de solos para a produção de taipa de pilão. Por meio da caracterização físico-química do SRMF e do solo observou-se um potencial de estabilização do solo pelo SRMF já que a característica arenosa do deste indica boa interação física com os solos argilosos (grande parte do estado de Minas Gerais). Essa possibilidade foi comprovada por meio de da curva de compactação resultante, que apresentou valores maiores de massa específica aparente seca em amostras com maiores porcentagens de SRMF e os resultados de resistência a compressão, que confirmaram valores de resistência a compressão adequados com a incorporação de 90% de SRMF. Esta pesquisa demonstra a capacidade do uso de um material residual que atualmente está fora da cadeia produtiva e que poderia ser incorporado na construção de paredes de taipa de pilão.

Palavras-chave: arquitetura de terra; mineração; resíduo; sustentabilidade; taipa de pilão.

ABSTRACT

The use of earth as raw material for building is part of an ancient tradition. To make compacted earth constructions, such as rammed earth, more resistant, it is common to use soil stabilizers to improve its properties. Among the most common stabilizers are cement and lime. However, several authors point out the high polluting potential in almost every phase of the production process of these materials. Therefore, the search for substitutes for certain cementitious stabilizers has been encouraged. In Minas Gerais, the volume of tailings produced by iron ore mining in the region is too high, besides being stored in dams with high risk of collapse. Therefore, this work characterized the iron ore tailings sediment (IOTS) and analyzed its viability in soil stabilization for the production of rammed earth. Through the physical-chemical characterization of IOTS and soil it was possible to realize a potential stabilization by particle size substitution, since the sandy tendency of the sediment indicates good suitability for clayey soils (which is the case of most soils in the state of Minas Gerais). This possibility was proven through the resulting compaction curve, which showed higher values of apparent dry unit weight in samples with higher percentages of IOTS and the compressive strength results, which confirmed adequate compressive strength values with the incorporation of 90 % of IOTS. This research demonstrates the ability to use a residual material that is currently outside the production chain and that could be incorporated in the construction of rammed earth walls.

Keywords: rammed earth; earth architecture; residue; iron ore tailings; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Esquema de execução da taipa de pilão tradicional	22
FIGURA 2	Comparação dos diferentes métodos de classificação quanto aos teores de frações de solo	31
FIGURA 3	Mapa de localização dos municípios de Mariana e Barra Longa	34
FIGURA 4	Mapa de localização das cidades limítrofes ao rompimento da barragem	36
FIGURA 5	Localização do ponto de coleta no município de Barra Longa e Rio Doce	45
FIGURA 6	Coleta em Barra Longa	46
FIGURA 7	Coleta em Rio Doce	46
FIGURA 8	Solo de Pedro Leopoldo (MG)	46
FIGURA 9	Mapa de solos da região analisada (adaptado de Embrapa Solos, 2016)	47
FIGURA 10	Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento	49
FIGURA 11	Execução do ensaio de limite de plasticidade (esq) e de limite de liquidez (dir)	50
FIGURA 12	Execução do ensaio de compactação	51
FIGURA 13	Medição do pH das misturas solo-SRMF	54
FIGURA 14	Processo de moldagem de corpos de prova cilíndricos representativos da taipa de pilão	55
FIGURA 15	Execução de golpes para compactação das camadas da amostra	55
FIGURA 16	Corpos de prova com trincas, desagregação e aderência de material na fôrma	56
FIGURA 17	Processos de descanso dos corpos de prova	57
FIGURA 18	Armazenamento das amostras	58
FIGURA 19	Ensaio de resistência a compressão simples não confinada	58
FIGURA 20	Traço SRMF-90-RD embalado no plástico (acima) e após a retirada do plástico (abaixo)	62
FIGURA 21	Difratograma das amostras de sedimento e solo	64
FIGURA 22	Realização do ensaio de plasticidade	67

FIGURA 23	Representação granulométrica do solo de Pedro Leopoldo	70
FIGURA 24	Representação granulométrica do SRMF de Barra Longa	70
FIGURA 25	Representação granulométrica do SRMF de Rio Doce	71
FIGURA 26	Detalhe da curva granulométrica na faixa ente silte e areia. SRMF BL (esq.) SRMF RD (dir.)	74
FIGURA 27	Fissuras nas amostras com 60% de SRMG-RD	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Recomendações relativas aos teores das frações do solo	30
Tabela 2	Resíduos e a estabilização física para a taipa de pilão	32
Tabela 3	Critérios para levantamento de dados sobre o rejeito de minério de ferro	44
Tabela 4	Misturas e quantidade de cal utilizadas, em massa	56
Tabela 5	Idade de ensaio e tipo de energia de compactação adotada - corpos de prova representativos de taipa de pilão com adição de cal	59
Tabela 6	Método de secagem adotado por autores que moldaram corpos de prova representativos de taipa de pilão com adição de cal	61
Tabela 7	Análise química das amostras por Fluorescência de raios X, em %	65
Tabela 8	Resumo - caracterização física	65
Tabela 9	Resultados - Área superficial específica e porosimetria	66
Tabela 10	Valores de Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade das amostras	67
Tabela 11	Classificação do solo quanto a fração granulométrica segundo NBR e AASHTO	72
Tabela 12	Adição de SRMF e a granulometria das misturas, segundo NBR 6502	73
Tabela 13	Adição de SRMF e a granulometria das misturas, segundo D3282	73
Tabela 14	Granulometria das amostras Versus Bibliografia analisada	75
Tabela 15	Relação entre composição das misturas, o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca	77
Tabela 16	Relação entre o teor de cale o pH das misturas	81
Tabela 17	Valores de resistência à compressão aos 31 dias	71
Tabela 18	Dados gerais - características das amostras analisadas	85

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1	Distribuições dos teores de solo em diferentes porcentagens de substituição de SRMF-BL	52
GRÁFICO 2	Distribuições dos teores de solo em diferentes porcentagens de substituição de SRMF-RD	52
GRÁFICO 3	Curva de distribuição granulométrica do solo adquirido na RMBH	68
GRÁFICO 4	Curva de distribuição granulométrica do SRMF de Barra Longa	68
GRÁFICO 5	Curva de distribuição granulométrica do SRMF de Rio Doce	69
GRÁFICO 6	Relação entre quantidade de sedimento e composição granulométrica (SRMF-BL)	77
GRÁFICO 7	Relação entre quantidade de sedimento e composição granulométrica (SRMF-RD)	78
GRÁFICO 8	Curva de compactação das misturas com proporções diferentes entre solo e SRMF-BL	78
GRÁFICO 9	Curva de compactação das misturas com proporções diferentes entre solo e SRMF-RD	79
GRÁFICO 10	Relação entre SRMF-BL, teor de umidade ótima e massa específica aparente seca.	79
GRÁFICO 11	Relação entre SRMF-RD, teor de umidade ótima e massa específica aparente seca.	80
GRÁFICO 12	Relação entre a variação do pH por adição de cal nas misturas analisadas	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADME	Área de Deposição de Material Excedente
AASTHO	Associação Americana de Funcionários de Rodovias e Transportes Estaduais
BL	Barra Longa
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DRM	Desvio Relativo Máximo
DrX	Difração de Raios X
MG	Minas Gerais
Min	minutos
mm	milímetros
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NPMS	Núcleo de Pesquisa em Materiais Sustentáveis
ICOMOS	Conselho Internacional de Monumentos e Sítios
IP	Índice de Plasticidade
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
Kg	quilogramas
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
RD	Rio Doce
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMF	Rejeito de Minério de Ferro
SRMF	Sedimento de Rejeito de Minério de Ferro
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TTAC	Termo de Transação e Ajustamento de Conduta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	18
1.1	Objetivos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	A taipa de pilão	21
2.1.1	Aparecimento, desaparecimento e retomada da taipa de pilão no Brasil	23
2.2	A estabilização da taipa de pilão	25
2.2.1	O uso de resíduos como estabilizantes da taipa de pilão	28
2.2.2	A estabilização por correção granulométrica	29
2.3	A mineração na região de Mariana: histórico e desastres recentes	33
2.4	Uso de rejeitos de mineração na construção civil	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Revisão bibliográfica sobre o tema	43
3.2	Materiais	44
3.3	Caracterização do solo e do SRMF	47
3.4	Curva de compactação das misturas	50
3.5	Determinação do teor ótimo de cal	53
3.6	Moldagem e produção de corpos de prova	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Caracterização do solo e do SRMF	63
4.2	Curva de compactação	76
4.3	Análise do teor ótimo de cal	81
4.4	Ensaio de resistência à compressão simples nos corpos de prova cilíndricos	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

O uso da terra para construção é relatado desde a pré-história. Porém, embora considerado um material milenar, a terra nunca deixou de ser utilizada. Atualmente as construções com terra contabilizam um terço das moradias no mundo (HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011). De acordo com Corrêa (2006), a terra como material construtivo pode ser entre diversas formas, escavada, empilhada, apiloada e ainda pode ser usada como cobertura, enchimento.

Entre os diversos sistemas construtivos com terra, tem-se a taipa de pilão, que foi difundida no período colonial do Brasil e é caracterizada por ser uma técnica construtiva com terra compactada que necessita de poucos materiais para ser executada. Apesar disso, a técnica foi perdendo espaço dentro do mercado construtivo brasileiro, aproximando-se da extinção. Nos últimos anos a taipa de pilão tem sido resgatada principalmente por meio de pesquisas científicas e em algumas empresas da construção civil (CALDAS; MARTINS; TOLEDO FILHO, 2021).

Em paralelo a esse fato, tem-se que o Brasil é um país de intensa produção minerária com elevada geração de rejeitos de mineração. No estado de Minas Gerais encontra-se o “quadrilátero ferrífero”, maior complexo siderúrgico latino-americano (ROCHA NETO, 2020). No período colonial, diversas cidades se originaram com o objetivo de estabelecer pontos estratégicos voltados à exploração do minério. As condições geológicas propícias à exploração do minério de ferro foi o ponto principal para que indústrias como a Vale, a Samarco e a Alcan se estabelecessem na região, em períodos mais recentes (SILVA, 2005).

Foi diante desse cenário de intensa ocupação territorial por grandes mineradoras que, na data de 05/11/2015, uma das barragens que armazenava rejeito de minério de ferro colapsou em Bento Rodrigues, subdistrito do município de Mariana, e provocou o deslocamento do rejeito através dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, por 663 km até o litoral (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017).

Os impactos gerados pelo desastre foram complexos e difíceis de serem mensurados. O volume de rejeito de minério de ferro estocado na barragem de Fundão que causou o maior desastre ambiental no Brasil foi de 55 milhões de metros cúbicos (MINAS

GERAIS, 2016b). O rejeito se misturou ao solo e aos rios e pode ser considerado, depois disso, como um sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF).

Nos últimos seis anos, esforços foram feitos para dragar esse grande volume de material, restabelecer a paisagem natural e recuperar as cidades afetadas. Contudo, a maior parte desse sedimento encontra-se estocado e aguarda uma melhor destinação. Sendo assim, maiores investigações acerca do uso desse material estão sendo feitas no sentido de evitar que continuem a ser estocadas em barragens.

Diante da lacuna de conteúdo sobre a evolução tecnológica da taipa de pilão e da construção com terra contemporânea do Brasil, além do pouco conhecimento sobre a taipa de pilão no ambiente acadêmico, considera-se importante uma investigação aprofundada acerca do tema, de maneira a fomentar a discussão relativa à diversidade de técnicas alternativas às construções convencionais (MENDES E BESSA, 2021).

Considera-se também relevante o estudo do material em laboratório, de forma a investigar as características potenciais da taipa de pilão caso seja produzida com adição de resíduos. O uso de resíduos tem a sua justificativa ampliada num cenário de busca por uma redução de aglomerantes industrializados de elevado impacto ambiental relacionados à sua produção. A possibilidade de utilização do SRMF ainda emprega um material que está fora do ciclo produtivo e que é estocado em barragens sujeitas a rompimentos e, conseqüentemente, a desastres ambientais de alto impacto, de forma a colaborar com um desenvolvimento sustentável dentro de uma economia circular.

Levando estes fatos em consideração, pesquisas nessa área podem promover questionamentos acerca de que tipo matéria-prima vem sendo utilizada na construção civil e ressaltar como as construções com terra podem contribuir para espaços mais sensíveis ao seu contexto geográfico e cultural, à qualidade de edificações, à sustentabilidade e ao possível resgate de técnicas construtivas tradicionais que se perderam ao longo do tempo.

A promoção da construção com uso de materiais locais colabora, ainda, com a menor emissão de poluentes e geração de resíduos, apontando ao mercado da construção civil uma alternativa com baixa energia incorporada. Tal como, a investigação com

diferentes tipos de estabilizantes para a taipa de pilão pode apresentar opções viáveis a diversas regiões.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar a viabilidade técnica para aplicação do sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), coletado na região atingida pelo rompimento da Barragem de Fundão, para produção da taipa de pilão, com a finalidade de analisar a viabilidade técnica.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Analisar as amostras de SRMF e o solo da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) quanto às características físicas e químicas;
- b) Analisar a viabilidade técnica do uso SRMF na mistura com o solo para a produção da taipa de pilão;
- c) Analisar o comportamento mecânico da taipa de pilão produzida com e sem SRMF por meio de corpos de prova representativos;

Portanto, esta pesquisa apresenta um estudo das características do SRMF e do solo da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e uma análise da viabilidade técnica da incorporação de sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF) no solo para a produção da taipa de pilão.

Para isto, este trabalho começa com uma revisão bibliográfica abrangente sobre os conteúdos pertinentes ao tema - inicialmente são abordados desde o contexto da taipa de pilão no Brasil até seus avanços técnicos e utilização de resíduos como estabilizantes. Além disso, é apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito da mineração de ferro e a utilização do resíduo proveniente desta atividade na construção civil. Em sequência, são expostos os métodos e materiais empregados durante a pesquisa para então apresentar os resultados e discussões referentes a análise do comportamento mecânico do solo com incorporação de diferentes porcentagens de SRMF e cal.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

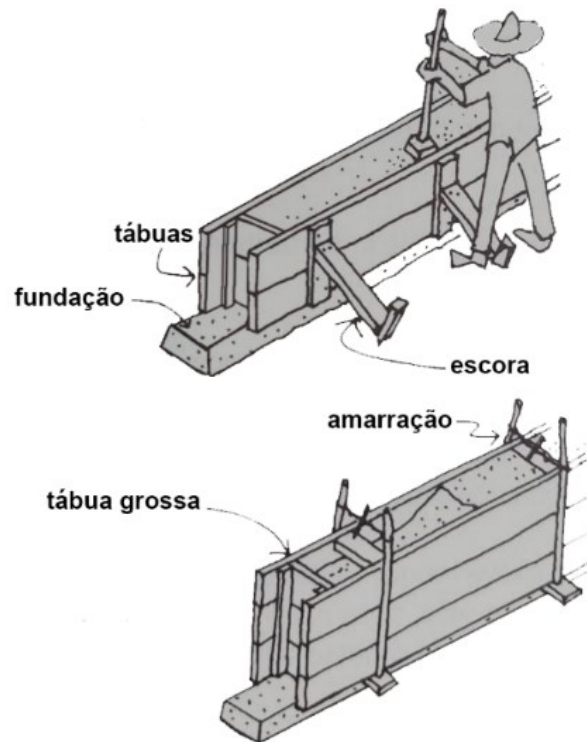
A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho foi estruturada com o objetivo de analisar as principais interfaces relacionadas à aplicação dos rejeitos de mineração na produção da taipa de pilão no Brasil; a estabilização da taipa de pilão e o uso de resíduos; a origem e o desenvolvimento da Região de Mariana e Barra Longa e a tradição minerária; e o uso dos rejeitos de mineração na construção civil. No tópico 3.1, do Capítulo 3, são apresentados, de forma mais detalhada, os métodos adotados para este capítulo.

2.1 A taipa de pilão

A taipa de pilão é uma das técnicas de construção com terra que se suporta por meio do solo compactado. Esse tipo de construção é feito com camadas de solo úmido, altura média entre 10 a 15 cm e espessuras de aproximadamente 10% da altura das paredes (podendo ser mais delgadas quando utilizado estabilizantes) e que são, então, socadas com pilões manuais ou compactadores mecânicos, dentro de fôrmas laterais de madeira ou metal denominadas de taipais e são postas de forma paralela, amarradas por vigas perpendiculares. Assim que terminado um setor, as fôrmas são então deslocadas horizontalmente para dar continuidade ao processo construtivo da parede até sua finalização (HOFFMANN, 2017; MINKE, 2022; RÍOS *et al.*, 1994; VAN LENGEN, 2021; WEIMER, 2012) (Figura 1).

O solo para a produção da taipa é removido de uma certa profundidade, de maneira a evitar impurezas, como materiais orgânicos, uma vez que esses podem prejudicar a resistência do material (PISANI, 2004). Logo após sua moldagem, as fôrmas são retiradas e a estrutura já se torna resistente a cargas (WEIMER, 2012).

Figura 1 - Esquema de execução da taipa de pilão tradicional.



Fonte: Adaptado pela autora de VAN LEGEN, 2021

Há dúvidas a respeito da origem da taipa de pilão, visto que é uma técnica construtiva milenar e que utiliza poucos materiais e que estão amplamente disponíveis ao redor do mundo, além da necessidade de pouca água (WEIMER, 2012; TORRALBA; EIRE; JALALI, 2009). Já existiam muralhas de taipa na Mongólia e China em V a.C, relatadas por Marco Polo em suas explorações no século XIII (VASCONCELLOS, 1979). Weimer (2012) aponta uma possível origem aos celtas, porém, menciona estudos mais abrangentes que associam sua procedência ao norte da África.

No continente Europeu, a taipa de pilão se desenvolveu com a adição de aglomerantes como o gesso e a cal. Porém, foi em território francês que a técnica ganhou uma grande impulsão, a partir da publicação de manuais de construção na chamada Revolução Construtiva do século XVIII. Após a disseminação e a tradução do manual desenvolvido por *François Coignereux*, a técnica alcançou países como o Reino Unido, Alemanha e Austrália (FERNANDES, 2013).

Em Portugal, a taipa de pilão chegou por influências árabes, principalmente na região de Algarve (PEIXOTO; SOUZA; REZENDE, 2017) região ao sul do país característica

por seu clima seco, fator que favoreceu a adaptação da técnica, visto que as paredes de taipa de pilão têm grande vulnerabilidade à umidade (BUI *et al.*, 2014; WEIMER, 2012). Para a América do Sul, a taipa de pilão foi levada tanto pelos espanhóis quanto pelos portugueses (FERNANDES, 2013).

2.1.1 Aparecimento, desaparecimento e retomada da taipa de pilão no Brasil

De acordo com Vasconcellos (1979), a taipa de pilão apareceu com frequência no Brasil durante o início do período colonial, mas desapareceu quase por completo no século XVIII. A introdução da taipa de pilão no Brasil se deu em um meio complexo, visto que foi uma técnica transferida de outro continente e adotada em um ambiente que não lhe oferecia as melhores condições de difusão. As paredes foram primeiro utilizadas na região da Bahia, com o objetivo de construções de muros e fortes, porém parou de ser utilizada pelas condições de grande umidade da região, que tornavam as paredes frágeis para a função predeterminada (EIJK; SOUZA, 2006).

Lemos (1989) afirma que a taipa foi praticamente inexistente no litoral brasileiro. Segundo o autor, esta ausência relaciona-se principalmente aos elevados índices pluviométricos próprios do litoral, configurando um meio desfavorável para as paredes de taipa de pilão, e ao fato de solos litorâneos serem impróprios à compressão (por não apresentar quantidade mínima de silte e argila), principal esforço ao qual as paredes de taipa são submetidas.

Ao contrário do Nordeste brasileiro, a técnica da taipa de pilão teve maior êxito no Sudeste do país, embora mesmo assim não tenha sido tão popularizada. Em São Paulo e em Goiás a técnica foi mais disseminada. Devido à escassez de pedras, calcário e madeira nessa região, a prática construtiva da taipa de pilão se consolidou ao longo dos anos ao ponto de os paulistas já considerarem tradicional construir com taipa de pilão (LEMOS, 1985).

Lemos (1985) associa a continuidade da escolha pela taipa, apesar de suas limitações, principalmente ao relevo relativamente plano da cidade, característica topográfica que facilita seu emprego. Na zona rural, a taipa veio a caracterizar, juntamente com outros elementos, a “tipologia bandeirista” (PEIXOTO, SOUZA E REZENDE, 2016), e constitui parte relevante do Patrimônio Cultural paulista (LEMOS,

1985).

A taipa de pilão também foi empregada em Minas Gerais, porém teve pouca adoção devido ao relevo acidentado da região, já que as paredes espessas exigiam maior área livre, além do seu custo de produção mais elevado. Dessa forma, no estado, existem apenas remanescentes coloniais de igrejas e grandes casarões, construídos por famílias com maior poder aquisitivo (VASCONCELLOS, 1979).

A partir do século XIX, iniciou-se um processo histórico multifatorial que transformou as práticas e o estilo de vida no território brasileiro, especialmente nos centros urbanos. Além da chegada dos imigrantes europeus, o Brasil também foi introduzido a novas técnicas de construção civil materiais, influenciados pela Revolução Industrial (LELIS, 2022).

Neste período, as técnicas artesanais de construção com solo, pedra e madeira, predominantes até a metade do século XIX no Brasil (VASCONCELLOS, 1979), foram gradualmente substituídos por materiais ascendentes, ditos convencionais, como o bloco cerâmico, o concreto e o aço. Neste contexto, a taipa de pilão, que já sofria dificuldades para se estabelecer no país devido a condições de relevo, fragilidades quanto à umidade e chuvas, além de demandar mais recursos para a época, acabou quase se extinguindo do cenário construtivo brasileiro.

A terra enquanto material de construção só retornou à pauta dentro do ambiente científico pelo viés da tecnologia na década de 1970, e teve a sua popularidade aumentada devido à, principalmente, dois fatores:

- a) Crescimento do debate acerca da agenda ambientalista, que levou à busca por materiais com menor impacto ambiental (LELIS, 2022). Neste contexto a utilização da taipa de pilão foi favorecida, visto que é uma tecnologia de baixo consumo energético (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019; MELLAIKHAFI et al., 2021) que utiliza como matéria-prima o solo, que pode ser retirado do próprio canteiro de obras se a característica do solo for apropriada, evitando a emissão de poluentes associados ao seu transporte. Além disso, a terra é natural, predominantemente atóxica e consegue absorver compostos voláteis. Caso não haja estabilização do tipo química ou cimentícia, a construção pode ser totalmente reaproveitada. Ademais são dispensáveis os

gastos revestimento e pintura, já que a parede pode ser deixada exposta (BECKETT; CIANCIO, 2013). A taipa de pilão também contribui para a agenda ambientalista pois possui conforto térmico característico de construções com terra (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019), que possuem a capacidade de equilibrar a umidade e a temperatura interior do ambiente (MINKE, 2022), uma característica que pode auxiliar no melhor controle do conforto térmico das edificações (MELLAIKHAFI *et al.*, 2021)

- b) Importância atribuída à discussão em torno da questão da habitação social, a qual busca materiais de baixo custo e de fácil aplicação por parte de auto construtores (JOAQUIM, 2016) (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019), uma vez que estes tenham sido capacitados.

Dessa forma, ao redor do mundo, movimentos de resgate das técnicas tradicionais com terra foram reiniciados, adaptadas para os contextos atuais e com aplicações diversas, como na construção de habitações sociais para comunidades tradicionais ou, ainda, em edificações que visam alcançar altos índices de sustentabilidade, por exemplo (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019). Segundo Joaquim (2016), o crescimento dos apelos para com as questões ambientais foi um grande impulsionador para a volta da terra como material de construção no contexto das classes dominantes.

Assim, a fim de sistematizar os processos da taipa de pilão à realidade construtiva contemporânea, alguns países têm elaborado normas regulamentadoras, como os códigos de construção da Nova Zelândia: NZS 4299 (NZS, 2020); Austrália: HB 195 (WALKER; AUSTRALIA, 2002); Peru: E.080 (RNE, 2017), Alemanha: DIN 18951 (DIN, 1971) e Zimbábue: SADC ZD HS 983 (SADCSTAN, 2014) e mais recentemente o Brasil: NBR 17014 (ABNT, 2022), além da mecanização dos processos construtivos, de ensaios mais precisos para caracterização dos solos e investigações acerca de estabilizantes que elevem as características da taipa de pilão (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019).

2.2 A estabilização da taipa de pilão

A estabilização da taipa de pilão visa melhorar a resistência e a durabilidade, sendo uma prática frequente nos países desenvolvidos que utilizam a técnica (HALL;

ALLINSON, 2009).

A estabilização de solos pode ser entendida como uma ação físico/químico/mecânica, como por exemplo a correção granulométrica do solo (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019; HALL; ALLINSON, 2008; NEVES *et al.*, 2010).

Dentro das opções possíveis de estabilização estão, segundo NEVES *et al.*, (2010):

- a) Por correção granulométrica: mescla de diferentes tipos de solo para se obter proporções mais adequadas que torne o grau de compactação mais elevado.
- b) Por cimentação: adição de material que atua por meio da solidificação dos grãos de areia e argila, “de forma a obter um esqueleto interno que faça oposição à capacidade de absorção de água pela argila” (NEVES *et al.*, 2010, p. 13). São exemplos de estabilizantes cimentícios o cimento Portland, a cal e ainda mistura de cal com cinzas;
- c) Por armação: adição de material com fins de coesão, como fibras. Estas atuam firmando as argilas por meio da fricção. Este tipo de estabilização reduz a resistência, porém eleva a durabilidade e a estabilidade da construção;
- d) Por tratamento químico: este poder ser feito com o objetivo de formar camada impermeável à construção, protegendo-a das intempéries (por meio do uso de asfalto, seiva de plantas resíduos de óleos e látex, por exemplo) ou de forma a adicionar aos solos substâncias que interagem com a argila, formando compostos estáveis, dependendo da composição química da argila, para elevar sua durabilidade e resistência.

A estabilização do tipo cimentícia na taipa de pilão vem sendo amplamente utilizada nos últimos anos como forma de melhorar a durabilidade. O uso de cimento ou cal como estabilizantes colaboram com o aumento da resistência da taipa de pilão, além de reduzirem a retração e a desagregação das paredes (ARRIGONI *et al.*, 2017a).

O uso do cimento também demonstra ter eficácia maior em paredes de taipa reforçadas com aço (MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2021), evitando a corrosão do reforço estrutural. De acordo com alguns autores (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016) teores acima de 4% de cimento são desejáveis para construção da taipa de pilão em climas tropicais e, ainda apontam, que o uso de até 10% de cimento como estabilizante para a taipa de pilão torna a energia incorporada da técnica menor que

a observada em construção com tijolos cerâmicos.

Segundo um estudo de caso sobre a energia incorporada na construção de taipa de pilão estabilizada com cimento (VENKATARAMA REDDY; LEUZINGER; SREERAM, 2014) constatou-se que esta representa um terço da energia incorporada de uma construção de alvenaria convencional e menos de um quarto da energia incorporada em uma construção de concreto armado. Portanto, a taipa de pilão com baixa adição de cimento pode ser considerada uma opção de construção sustentável (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016).

Segundo Arrigoni *et al.*, (2017a), a incorporação de cimento como estabilizante eleva a durabilidade da taipa de pilão. Entretanto, a análise de ciclo de vida realizada pelos autores revelou um aumento significativo do impacto ambiental da técnica construtiva quando o cimento, principalmente com conteúdo de clínquer, foi utilizado como estabilizante.

Desta forma, os autores recomendam o uso de materiais alternativos ao cimento para atuar como estabilizantes da taipa de pilão, para alcançar valores ainda mais baixos de energia incorporada à técnica (ARRIGONI *et al.*, 2017a) já que os materiais alternativos tendem a reduzir a energia incorporada da técnica entre 50 e 100% (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019).

A redução da adição de cimento pode significar a diminuição do pH das misturas. Conforme Ciancio, Beckett e Carraro (2014), misturas para taipa de pilão se beneficiam de pH mais elevados, acima de 12, uma vez que podem ser utilizados reforços em aço que devem estar inseridos em matrizes alcalinas. Por tanto é interessante que solos ácidos sejam corrigidos de alguma forma com o objetivo de elevar o pH da mistura para a taipa de pilão.

2.2.1 O uso de resíduos como estabilizantes da taipa de pilão

Em relação ao uso dos resíduos na mistura para a taipa de pilão, há estudos que indicam que os impactos ambientais são semelhantes entre a taipa de pilão não estabilizada e a taipa de pilão estabilizada com resíduos, quando o solo local não era apropriado para uso isoladamente (ARRIGONI *et al.*, 2017a).

Arrigoni *et al.*, (2017a) realizaram análise de ciclo de vida da taipa de pilão com um solo inadequado por si só, estabilizado com cimento, agregado de concreto reciclado e cinzas volantes. A investigação realizada demonstrou que a incorporação de 6% de agregado de concreto reciclado e 25% de cinzas volantes, por exemplo, elevou a durabilidade e a resistência da taipa de pilão e evitou quantidade considerável do impacto ambiental que seria causado caso a estabilização acontecesse com porcentagens acima de 5% de cimento (ARRIGONI *et al.*, 2017a).

Kosarimovahhed e Toufigh, (2020) e Giuffrida, Caponetto e Cuomo (2019) enfatizam a importância do uso de resíduos para a estabilização de solos para execução da taipa de pilão, afim de não alterar o menor impacto causado pela técnica. Ademais, o uso de resíduos como forma de melhorar as propriedades da taipa de pilão já foi apresentado por vários autores, entre os encontrados na literatura tem-se as cinzas volantes, carboneto de cálcio e escórias de aço (KOSARIMOVAHHED; TOUFIGH, 2020; LIU *et al.*, 2018; SIDDIQUA; BARRETO, 2018). Além de guar e fibra de vidro (TOUFIGH; KIANFAR, 2019) e cinzas da casca do arroz (MILANI; LABAKI, 2012).

Siddiqua e Barreto (2018) utilizaram os subprodutos carbonato de cálcio e cinzas volantes como estabilizantes químicos e alcançaram valores acima de 3 MPa no ensaio de resistência à compressão. O uso de cinzas volantes em solos também foi analisado por Rocha, Consoli e Johann (2014), associada à cal hidratada, para estabilização de solo na região de Porto Alegre. Os autores demonstram relação direta entre maior uso de cinzas volantes com menor uso da cal, então sugerem teores do resíduo em torno de 30% e baixo teor de cal (3%), para alcançar resultados satisfatórios (em torno de 1,3 MPa), em período de cura de 90 dias.

O uso desses resíduos também foi estudo por Arrigoni *et al.*, (2017b) com o propósito de elevar o desempenho ambiental do produto e atingiram resultados acima do

adequados pelas normas Neozelandesa (NZS 4298) de 0,5 MPa e Australiana (HB 195) de 2,0 MPa. (KOSARIMOVAHED; TOUFIGH, 2020) analisaram o uso de cinzas volantes e cimento para alcançar resultados satisfatórios de resistência à compressão, em uma mistura de 0,7% de cimento e 6,5% de cinzas volantes

Liu *et al.* (2018) testaram amostras de escórias de aço em diferentes proporções como estabilizantes da taipa de pilão. Seus estudos apontam um aumento na resistência à compressão proporcionalmente ao aumento da porção de escórias, sendo o valor máximo utilizado 25%. Essa adição fez com a resistência da amostra dobrasse seu valor, de 3MPa a 6 MPa em 28 dias de cura.

Além dos autores citados, Toufigh e Kianfar (2019) também testaram a goma de guar, fibra de vidro, pozolana e microssílica, junto a porções de 5,0% 7,5% e 10% de cimento Portland como estabilizantes alternativos, com valores de resistência a compressão variando de 1,15 MPa a 5,19 MPa. Em outro estudo, o uso de resíduo de cinza da casca do arroz foi aplicado em teores de 7,5% a 13% de cimento para melhorar as propriedades de solos arenosos para a taipa de pilão (MILANI; LABAKI, 2012).

2.2.2 A estabilização por correção granulométrica

A maioria dos resíduos empregados como estabilizantes para a taipa de pilão, na literatura analisada, são estabilizantes químicos ou cimentícios. Além dessas duas possibilidades de estabilização, pode-se corrigir a granulometria do solo, se necessário, com uma mescla de diferentes materiais para se obter proporções mais adequadas entre as dimensões dos grãos (NEVES *et al.*, 2010).

A granulometria indica as proporções dos componentes presentes nos solos (MINKE, 2022). Esses componentes são representados pelas dimensões de suas partículas e são divididos entre argila, silte, areia (fina, média e grossa), pedregulho, pedra e fragmentos de rocha (ABNT, 1995). A distribuição granulométrica e o empacotamento adequado das partículas são características essenciais para a produção de taipa de pilão e outras construções com terra, pois afetam diretamente a densidade e a resistência das paredes (HALL; ALLINSON, 2008; LIN *et al.*, 2017).

Entretanto, é consenso de que o tamanho do grão não é o único fator físico que

interfere na qualidade das paredes de taipa de pilão. Também é necessário levar em consideração as características plásticas, a rugosidade, o ângulo/forma e a aspereza dos grãos (KOUTOUS; HILALI, 2019; SILVA *et al.*, 2013).

Uma das formas constantemente recomendadas de estabilização de solos argilosos para a taipa de pilão por meio da correção granulométrica é a adição de areia (ABNT, 2022; HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011; KOUTOUS; HILALI, 2019; MELLAIKHAFI *et al.*, 2021; NEVES *et al.*, 2010).

Essa circunstância se dá pelo fato de que, para uma boa execução da técnica se faz necessário solos mais arenosos, mas com coesão, de modo a alcançar uma compactação adequada sem que haja desagregação das paredes ao remover a fôrma e o surgimento de fissuras. Autores sugerem frações de solos para a taipa de pilão, assim como é possível encontrar sugestão de teores em algumas normas técnicas (Tabela 1).

Tabela 1 - Recomendações relativas às frações do solo*

FONTE		ARGILA (%)	SILTE (%)	AREIA (%)	CASCALHO (%)
Artigos	Walker <i>et al.</i> , 2005	5 a 20	10 a 30	45 a 80	
	Delgado e Guerrero, 2007	10 a 15	10 a 25	-	-
Documentos técnicos	IS 2110 ^a	-	-	<35	-
	SADAC 983	5 a 15	15 a 30	50 a 70	
	IETcc ^b	10 a 40	20 a 40	10 a 40	10 a 20
	HB 195	5 a 20	10 a 30	45 a 75	
	NBR 17014 ^c	20 a 35		50 a 80	-
	CRATerre	15 a 25	20 a 35	40 a 50	0 a 15

Fonte: Elaborada pela autora com base em WALKER *et al.*, 2005; DELGADO E GUERREIRO, 2007; ABNT, 2022; DOAT, 1979; SADCSTAN, 2014; WALKER E AUSTRALIA, 2002;

Nota: *A determinação das frações dos solos que representam teor de argila, silte, areia e cascalho podem variar a depender do tipo de classificação adotada.

^a Areia 0,0 – 5,0 mm;

^b Areia = passante na 0,435 mm e retida na 75 mm.

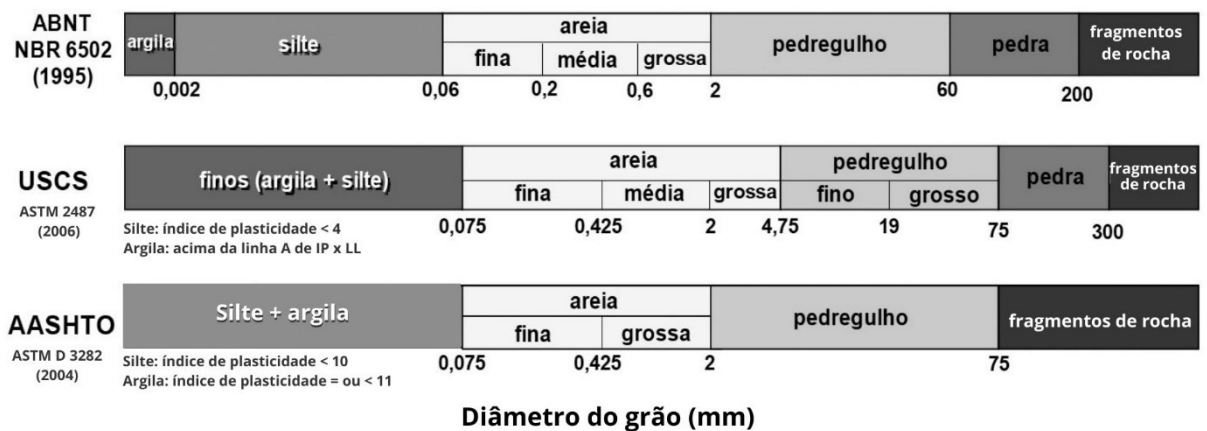
^c Classificação de acordo com a ABNT NBR 6502 (1995);

Há uma enorme variação em relação às frações, o que deve ser por conta de as características dos solos serem muito diversas, visto ser um material natural

(DELGADO; GUERRERO, 2007).

Apesar de válida, a comparação de recomendações relativas aos teores de frações no solo para taipa de pilão é arriscada, visto que há discordâncias internacionais sobre as frações granulométricas (Figura 2) e cada documento utiliza um método diferente. Muitas vezes não fica claro qual método de classificação foi utilizado ou sugere-se, em alguns casos, o uso de duas frações de solo combinados (DELGADO; GUERRERO, 2007).

Figura 2 - Comparação dos diferentes métodos de classificação quanto aos teores de frações de solo



Fonte: Suporte Solos. Adaptado pela autora.

Um mínimo teor de argila é necessário pois adiciona coesão à terra, entretanto seu excesso está relacionado ao aumento da retração, à dificuldade de trabalhabilidade (HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011) e ao aumento na demanda de água. Elevados teores de areia são importantes para reduzir o teor de umidade, aumentar a densidade seca da mistura e ainda tem a capacidade de melhorar a resistência da taipa de pilão (KOUTOUS; HILALI, 2019).

Ao se discutir o grau de compactação e a distribuição granulométrica, deve ser levada em consideração uma fração equilibrada de argila, silte, areia e cascalho. Evidentemente que a sugestão de uma faixa granulométrica padrão é frequentemente mencionado na literatura, de modo a alcançar as já mencionadas características proporcionadas pela argila e areia. Porém, outro objetivo para o equilíbrio de diferentes dimensões de grãos na realização da parede de taipa de pilão é se atingir um bom preenchimento de vazios, a fim de alcançar um eficiente empacotamento de partículas (HALL; ALLINSON, 2009), uma propriedade pouco explorada na bibliografia

analisada.

Tendo em vista as características necessárias para um solo adequado para a taipa de pilão é possível investigar materiais complementares que atuam, entre outros, como estabilizantes físicos da técnica por meio de um melhor grau de empacotamento. Entretanto, foram encontrados apenas algumas poucas pesquisas que apresentaram análises do uso de resíduos com esta finalidade (Tabela 2), sendo os resíduos mais frequentemente encontrados os decorrentes da demolição de concreto e de tijolos (ARRIGONI *et al.*, 2018; JAYASINGHE; FONSEKA; ABEYGUNAWARDHENE, 2016; MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2020; SHAABAN, 2021).

Tabela 2 - Resíduos e a estabilização física para a taipa de pilão

Resíduo	Autores	Proporção	f_c (MPa)*
Solo vulcânico residual	(LIN <i>et al.</i> , 2017)	solo residual: 1	2,18
Granito completamente decomposto (GCD)	(LIN <i>et al.</i> , 2017)	granito decomposto:1	0,54
Agregado de concreto reciclado (ACR)	(ARRIGONI <i>et al.</i> , 2018)	ACR: 1; cimento: 0,05; cinza volante: 0,05	6,70
Agregado de concreto reciclado (ACR)	(JAYASINGHE; FONSEKA; ABEYGUNAWARDHENE, 2016)	solo: 1; ACR: 1; cimento: 0,2	6,30
Tijolo e concreto reciclado (TCR)	(MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2021)	TCR: 1; 0,5 cimento	8,90
Tijolo vermelho triturado (TVT)	(SHAABAN, 2021)	1 solo: 1; TVT: 0,66	0,97

Fonte: Elaborado pela autora com base em LIN *et al.*, 2017; ARRIGONI *et al.*, 2018; JAYASINGHE; FONSEKA; ABEYGUNAWARDHENE, 2016; MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2021; SHAABAN, 2021.

Nota: * f_c corresponde a resistência à compressão aos 28 dias de secagem para todas as amostras

Os teores de resíduos nas misturas encontradas são consideráveis (a partir de 44%), o que é um indicativo de que o emprego de resíduos pode promover a destinação de considerável volume destes materiais, considerando as particularidades dos solos usados em cada estudo. Além disso a maioria dos traços apresentados atingiram valores de resistência à compressão satisfatórios de acordo com os valores recomendados pela literatura, entre 1,0 e 2,0 Mpa (ABNT, 2022; ARRIGONI *et al.*, 2017a; SADCSTAN, 2014; WALKER; AUSTRALIA, 2002).

As pesquisas analisadas reiteram a importância da distribuição granulométrica para adequada produção de construções com terra, visto que a curva granulométrica das

amostras foi o único dado de caracterização em comum apresentado em todos os trabalhos analisados. A maioria dos materiais foi incorporado atuando como material arenoso e inerte, já que foi observado que a maior demanda em termos granulométricos da taipa de pilão é justamente a areia (Tabela 1). Além disso, é necessário compreender a morfologia das partículas de resíduo acrescentado a mistura, visto que em uma estabilização física, a estrutura dos grãos interfere na resistência mecânica das paredes de taipa.

2.3 A mineração na região de Mariana: histórico e desastres recentes

A cidade de Mariana, fundada em 1696, como Vila do Ribeirão do Carmo, foi a vila pioneira no estado de Minas Gerais. A motivação inicial para a ocupação da região próxima ao Ribeirão do Carmo foi a exploração do ouro, durante a expedição do Coronel Salvador Fernandes Furtado de Mendonça. Em 1745 a vila se tornou oficialmente uma cidade e no mesmo evento foi renomeada de Mariana (CALDEIRA; LARA, 2006).

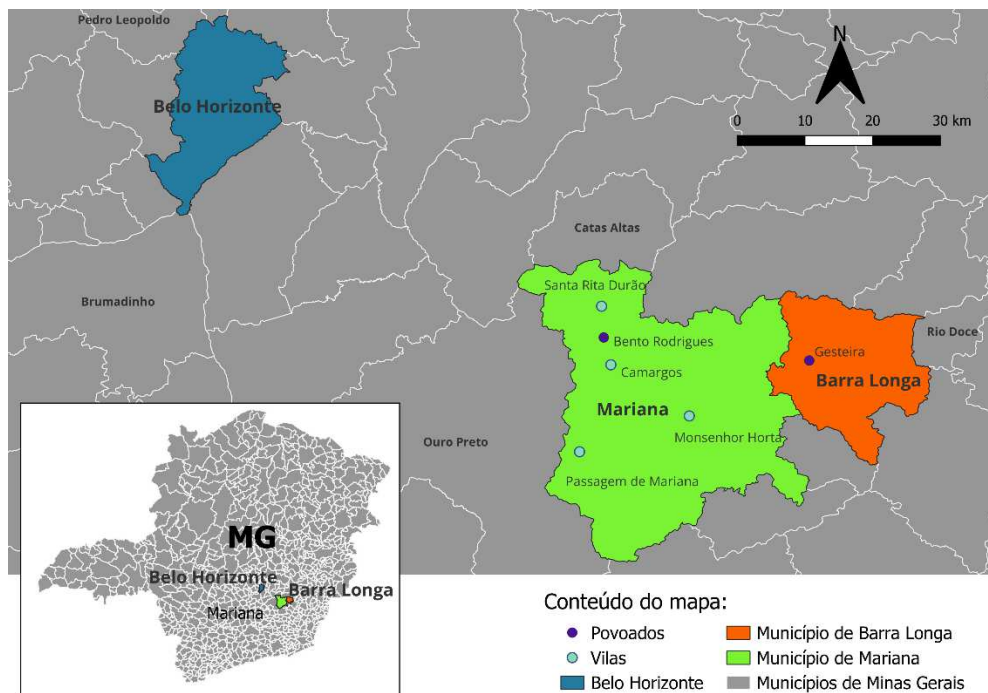
Em relação ao estado de Minas Gerais, boa parte de sua ocupação surgiu a partir do século XVII. Até o final do período colonial, início do século XIX, a exploração de minérios era majoritariamente em relação ao garimpo de ouro e foi nessa época que houve um grande aumento populacional causado por essa atividade (PAULA, 2007).

Por meio da exploração do ouro na região de Minas Gerais se definiu boa parte da ocupação do território, os fluxos migratórios, o elevado contingente de escravos, o dinamismo, a mercantilização da economia mineira e, por último, a implantação da máquina estatal na colônia de Portugal (PAULA, 2007).

A cidade de Mariana se estabeleceu, na época, como referência de poder religioso da Igreja Católica (SILVA, 2005) e se tornou sede do primeiro Bispado do Estado. Sua arquitetura reflete, até os tempos atuais, seu desenvolvimento em torno da Igreja e seu acervo arquitetônico, artístico e paisagístico segue intimamente associado à religião católica (IPHAN, 2007). A cidade recebeu o título de Monumento Nacional, em 1945, pelo seu significativo Acervo Arquitetônico e Paisagístico, o que marca um período de grande relevância para o Estado (CALDEIRA; LARA, 2006).

A arquitetura dos primeiros séculos do Brasil é muito reconhecida pelas construções religiosas, que são frequentemente reconhecidas como patrimônio imóvel pelo IPHAN (WEIMER, 2012). Estas edificações construídas entre o século XVII até o início do século XX tiveram, como um dos principais materiais na construção, a terra. As técnicas construtivas com terra presentes no território variaram entre a taipa de pilão, o adobe e o pau-a-pique.

Figura 3 - Mapa de localização dos municípios de Mariana e Barra Longa



Fonte: Da autora, 2023.

Já o município de Barra Longa, localizada no interior do estado de Minas Gerais (Figura 3), nasceu de uma fazenda instalada na região, a Fazenda dos Fidalgos, construída em 1711 pelo Coronel Matias da Silva Barbosa, que chegava ao território a pedido do governador, com o objetivo de combater os indígenas Botocudos e Acaiacas, obtendo como recompensa grandes extensões de terra (MINAS GERAIS, 2016a). Dessa maneira, formou-se um arraial de nome Barra de Matias Barbosa ao redor da Fazenda dos Fidalgos e dos rios Carmo e Gualaxo do Norte. No século XVIII o arraial foi reconhecido como distrito de Barra Longa (MINAS GERAIS, 2016a).

O foco na extração de minério fez com que a população tivesse pouco interesse pelo cultivo de terras no início da formação de Barra Longa, que possuía como principais atividades econômicas a exploração do ouro de aluvião, proveniente dos rios.

Sucessivamente, com a decadência do ouro, a agricultura passou a ser desenvolvida. A cidade foi urbanizada durante o período colonial e atualmente ainda existem edifícios que mantêm essas características, como a Igreja Matriz de São José e a Capela de Nossa Senhora do Rosário (MINAS GERAIS, 2016a).

Após a decadência do ciclo do ouro, embora o estado tenha conseguido diversificar a sua matriz econômica, a extração de minério de ferro, a partir do século XX, foi o ponto primordial para que indústrias como a Vale, a Samarco e a Alcan se estabelecessem na região, de forma a ocupar e urbanizar intensamente diversos municípios e estimular o setor terciário (SILVA, 2005)

A presença da atividade mineradora em Minas Gerais, segundo Rocha Neto (2020), impacta profundamente o estilo de vida das populações tradicionais locais desde a sua origem. A relação da região de Mariana e de Barra Longa com a atividade minerária é evidente na paisagem: desde as modificações topográficas, o estilo de ocupação da terra, o arruamento dos povoados até a arquitetura das casas, igrejas e capelas, características do período colonial. Visto que a operação demanda intensa ocupação espacial em grandes áreas, o uso de recursos naturais e ainda uma reorganização socioespacial.

Nesse cenário, ocorreu um dos maiores desastres ambientais do Brasil, com o rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015 que provocou o deslocamento dos rejeitos por 663 km até o litoral. Esses rejeitos se misturaram aos solos e aos rios, por onde passaram, tornando-se sedimentos (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017).

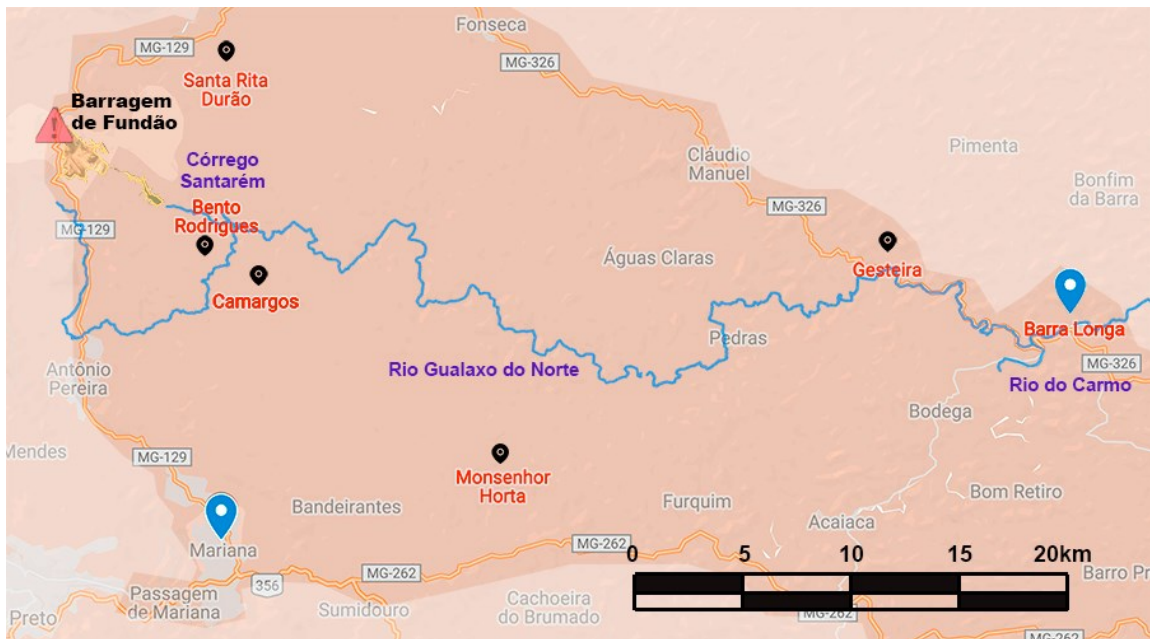
A Barragem de Fundão se localizava um pouco antes de Bento Rodrigues, distrito de Santa Rita Durão e subdistrito do município de Mariana, o município mais imediatamente afetado, junto com o município de Barra Longa (Figura 4).

O subdistrito de Bento Rodrigues faz parte da região do Quadrilátero Ferrífero, está a 32 km de Mariana e era constituído por aproximadamente 600 habitantes antes do rompimento da barragem. O Rio que corta a região é o Rio Gualaxo do Norte (ICOMOS, 2019).

É possível afirmar que as comunidades próximas ao local do rompimento da

barragem, como Bento Rodrigues, tinham em seu território característica das antigas vilas que foram povoadas desde o período colonial, com vistas à extração do ouro, e apresentavam resquícios dos diferentes ciclos de mineração em Minas Gerais (ICOMOS, 2019).

Figura 4 - Mapa de localização das cidades limítrofes ao rompimento da barragem



Fonte: Da autora, 2022.

Além disso, povoados setecentistas mineiros apresentavam, como técnica construtiva de suas edificações, algumas técnicas construtivas com terra, como a taipa de pilão, o adobe e o pau-a-pique (PAULA, 2007) As técnicas construtivas com terra ainda representam mais de 50% do patrimônio construído em diversos distritos de Mariana e Barra Longa, ainda que nem sempre em bom estado de conservação (LAGE *et al.*, 2022).

As tradições construtivas são elementos importantes na constituição das paisagens culturais - neste caso, em especial as técnicas de construção com terra afinal, segundo Weimer (2012, p. 250) “durante quatro quintos da história de nosso país a terra se constituiu como material de construção mais importante”. A tradição construtiva com terra sofreu um enfraquecimento em todo o território brasileiro, produto de um processo histórico que envolve principalmente a industrialização dos materiais de construção, a modernização dos modos de vida e a associação da terra à um material rudimentar e precário, ficando restrita à populações rurais que não

tinham acesso aos materiais industrializados (JOAQUIM, 2016).

Neste processo, que se estendeu do final do século XIX até o início do século XX, as técnicas tradicionais de construção com terra foram gradualmente desaparecendo, dando lugar aos materiais industrializados. As técnicas de construção com terra já não eram mais compatíveis com o ritmo de produção das cidades modernas e ainda pode ser considerada uma manifestação ameaçada pelas transformações do espaço e da sociedade (TOFANI; BRUSADIN, 2020), já que exige uma produção de certa forma artesanal com tempos diferentes para construção.

Diferentemente de Mariana e Ouro Preto, que assumem um papel de importância no cenário de preservação do patrimônio histórico e artístico mineiro, atestada pelos títulos de Patrimônio Nacional (Mariana) e Patrimônio Mundial (Ouro Preto) (SILVA, 2005), Bento Rodrigues e outras comunidades menores, até o rompimento da barragem, eram, de certa forma, povoados praticamente anônimos. Tal fato se verifica pela lacuna documental acerca do estado de conservação anterior ao desastre dos registros arquitetônicos das tradições construtivas em terra, mencionada anteriormente, o que acentua a perda ocasionada pelo desastre.

Dessa forma, o rompimento da Barragem de Fundão causou a perda de vasto patrimônio construído com terra. Ainda que a arquitetura religiosa tenha desempenhado um papel proeminente na cultura de Minas Gerais, resultando em um maior número de inventários e patrimônio tombado relacionado a esse tema, as construções populares e residenciais feitas com terra, que não recebem a mesma valorização, não possuía acervo e catalogação e há uma escassez de documentações e registros sobre elas.

A ocupação da região de Mariana e de Barra Longa iniciou no século XVII e a presença intensa da mineração teve um impacto devastador desde o início, destruindo o patrimônio e a identidade locais. O valor histórico das capelas presentes nestes povoados, por exemplo, era imensurável e não há como recuperar o patrimônio cultural perdido pelo desastre (SUNER; LAIA; SUÑER, 2015)

Portanto, a transformação da paisagem cultural de Bento Rodrigues e adjacências, em consequência ao rompimento da Barragem de Fundão, representou também o aceleração da perda da memória construtiva e do patrimônio construído com terra,

que já estava em curso na região.

Pesquisas de desenvolvimento tecnológico sobre usos alternativos ao rejeito de minério de ferro são importantes para buscar formas de aproveitar o rejeito já sedimentado e evitar novos estoques de grandes volumes deste material em barragens. Para mais, o uso deste material pode reduzir o impacto ambiental gerado pela extração mineral (SCHATZMAYR *et al.*, 2022). Além disso, incentivos ao uso deste rejeito em construções com terra são uma tentativa de valorização desta técnica construtiva em contrapartida às perdas nas paisagens afetadas pela cultura minerária brasileira.

2.4 Uso de rejeitos de mineração na construção civil

Durante os processos de extração e beneficiamento de minérios grandes quantidades de resíduos são produzidos. Os rejeitos são um dos principais resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais, pois é o que sobra quando se usa a via úmida para separar o minério de ferro do material que não tem valor comercial (IPEA, 2012).

Estima-se que para cada tonelada de minério de ferro processada no Brasil, são gerados cerca de 400 kg de rejeito (IPT, 2016). Segundo a Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2021), o produto mais exportado em Minas Gerais, em 2020, foi o minério de ferro e os seus concentrados (37%). Desde a Revolução industrial há uma demanda cada vez maior de minerais e consequentemente de rejeitos também (SCHATZMAYR *et al.*, 2022). Uma das formas mais utilizadas na destinação desses rejeitos é a construção de barragens de mineração, onde esses materiais ficam dispostos na forma de polpa ou lama (IPEA, 2012). No Brasil, há cerca de 870 barragens de mineração e destas, apenas 50% estão inseridas na política nacional de segurança de barragens (ANM, 2020).

Além do considerável volume de rejeitos produzido no país, a forma de estocagem do RMF tem provocado ameaças ao ambiente e à população. A deposição de RMF em barragens tornou-se uma preocupação constante devido a gestão ineficaz, incapaz de prever grandes acidentes com a precisão e antecipação necessárias.

Além do rompimento da Barragem de Fundão, em 2015, o rompimento da Barragem

B1, na mina do Córrego do Feijão, em 2019, provocou a morte de mais de 270 pessoas (COSTA *et al.*, 2021). Devido a novas ameaças de desastres, a preocupação com o estoque do resíduo vem crescendo. Sendo assim, maiores investigações acerca do uso desse material estão sendo feitas no sentido de evitar que continuem a ser estocados em barragens.

Por conta do colapso da Barragem de Fundão, o material que foi derramado no meio ambiente passou a ser considerado como sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), já que o processo fez com que o rejeito deslocado se misturasse à matéria orgânica presente nos cursos d'água e nos solos da região, por exemplo.

Faz parte do Plano de Manejo de Rejeito, elaborado por meio do TTAC (Termo de Transação e Ajustamento de Conduta), a remoção e a readequação do SRMF pela Fundação Renova, de forma a diminuir o impacto causado pelo deslocamento do material durante o desastre. Uma das ações do Plano foi despejar o SRMF em ADME (Área de Deposição de Material Excedente) após a obtenção de licenciamento ambiental permitindo tal atividade (CT-GRSA, 2018).

Paralelamente, há o fato de que o setor da construção civil é reconhecido como um dos principais geradores de impacto ambiental no mundo. Segundo Cabral *et al.*, (2008) as técnicas de construção convencionais do século XXI necessitam de grande quantidade de material inerte, que é extraído de sedimentos aluviais e de formações rochosas e causam alterações drásticas no meio ambiente, além de materiais com elevado conteúdo energético incorporado (JOHN, 2001; ZAMI *et al.*, 2022). Ademais, a construção civil é o principal setor de geração de resíduos, que tem grande potencial poluidor agregado, já que estes frequentemente são gerenciados de maneira incorreta e descartados no meio ambiente (GOMES *et al.*, 2014).

Dentro do setor da construção civil o uso do RMF já vem sendo estudado e empregado com diversas finalidades:

- 1 - Como substituto parcial do cimento;
- 2 - Como areia para agregado de concreto;
- 3 - Na produção de tijolos cerâmicos;
- 3 - Como pigmento de tintas;
- 4 - Como agregado de argamassa de revestimento;

- 5 - Como estabilizante de blocos de terra comprimida; e
- 6 - Como estabilizante para pavimentação.

O uso de RMF como estabilizante para a pavimentação foi analisado em teores entre 10 e 20% e foi possível obter resultados adequados de resistência do pavimento, quase assemelharam com amostras equivalentes ao solo-cimento para a pavimentação (SCHATZMAYR *et al.*, 2022). Segundo os autores, os valores satisfatórios podem estar relacionados à nova distribuição granulométrica e, conseqüentemente, a um melhor empacotamento das partículas (SCHATZMAYR *et al.*, 2022).

Chen *et al.*, (2022) analisaram os efeitos da incorporação de cinzas da casca de arroz como substituto do cimento e RMF como substituto a areia natural no concreto. Os autores alcançaram valores satisfatórios com substituições de 10% de casca de arroz no lugar do cimento e 40% de RMF em substituição à areia. As substituições realizadas colaboraram com a diminuição dos poros no concreto, além da superfície rugosa do RMF facilitar a obstrução entre os agregados, colaborando com a melhoria das propriedades mecânicas do concreto (CHEN *et al.*, 2022).

Já Protásio *et al.*, (2021) utilizaram o RMF da Barragem de Germano, em Santa Rita Durão, distrito de Mariana, MG, adjacente a Barragem de Fundão. O estudo apontou que é possível incorporar até 30% de RMF em substituição a areia natural no concreto. Essa substituição reduziu a trabalhabilidade do concreto, mas aprimorou a densidade do concreto, contribuindo para diminuição dos poros. Os autores não observaram grandes diferenças de características entre a areia e o RMF utilizado no objetivo de produção de concreto, com exceção de tamanho de partículas um pouco maior e maior densidade do RMF devido a maiores teores de ferro em sua composição (PROTASIO *et al.*, 2021).

O estudo de Mendes *et al.*, (2019) demonstrou bom desempenho térmico para argamassas produzidas com RMF (na proporção de 12,5% de cimento, 12,5% de cal e 75% de rejeito) devido a sua baixa condutividade térmica e alta densidade. Além disso Carrasco *et al.*, (2017) demonstra ser possível o uso de RMF em substituição a areia em diferentes porcentagens para argamassa de revestimento de alta resistência com bom desempenho fissuração e deformidade. Já Fontes *et al.*, (2016) propôs

valores de até 20% de RMF como substituto da cal na produção de argamassa de revestimento e assentamento de tijolos e os resultados demonstraram maior densidade e melhor desempenho mecânico nas amostras com RMF, porém uma maior absorção de água.

Já Galvão *et al.*, (2018) utilizaram até 50% de RMF com resina PVA na elaboração de tintas e obtiveram adequada resistência à abrasão e às intempéries. Além disso, os autores ressaltaram vantagens econômicas no uso do RMF como pigmento.

Souza; Vieira; Monteiro (2008) indicaram que o acréscimo de até 10% de RMF na argila para a produção de tijolos cerâmicos, o que aumenta a coloração avermelhada do produto e pode reduzir a porosidade do material.

Outros estudos demonstram, entre diversas características do RMF, o comportamento inerte, com formato de partículas angulares e irregulares, superfície porosa e rugosa e presença relevante de minerais como o ferro (SHETTIMA *et al.*, 2018; ZHAO; FAN; SUN, 2014). Além disso, apesar da composição granulométrica do RMF variar de acordo com a origem, o mais comum é encontrar o RMF com diâmetros semelhantes a areia, areia fina ou silte.

Na aplicação do RMF como estabilizante na produção de blocos de terra comprimida e na pavimentação, os estudos analisaram apresentam a possível compatibilidade entre o rejeito e o solo (NAVARRO *et al.*, 2019), o que pode ser devido ao fato de que ambos são advindos de processos de decomposição das rochas com composição mineral muito semelhante.

Entretanto, apesar da análise granulométrica ser um indicativo inicial de que as características do RMF podem ser compatíveis com solos argilosos, para a taipa de pilão, considera-se essencial que outras análises, como os limites de Atterberg, sejam realizados (CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013; KOUTOUS, AHMED; HILALI, 2019). Os limites de Atterberg são indicadores do estado de consistência do solo (MINKE, 2022). Por meio de ensaios é possível encontrar o de Limite de Liquidez: “Teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado de consistência limite entre os estados líquido e plástico” (ABNT, 1995, p. 14) e o e Limite de Plasticidade: “Teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado de consistência limite entre os estados plástico e semissólido” (ABNT, 1995, p. 14). O índice de plasticidade

é um “Parâmetro definido como a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade” (ABNT, 1995, p. 15) e por meio destes valores é possível complementar a caracterização física de um solo.

Ainda assim, ressalta-se que estudos sobre o comportamento dos materiais usados para a produção da taipa de pilão ainda são muito escassos e frequentemente distintos dos ensaios realizados para análise da aplicação de um material na construção civil, uma vez que a maioria dos ensaios com solos são baseados em estudos da geotecnia e nem sempre são os mais adequados para se analisar as propriedades da taipa de pilão (CIANCIO *et al.*, 2015) e insuficientes para se obter dados adequados sobre estabilização com novos materiais (resíduos).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: a) o solo coletado na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH); b) amostras de SRMF coletadas nas cidades de Barra Longa e Rio Doce, MG; e c) cal hidratada tipo CH-I.

O método proposto para o desenvolvimento deste trabalho foi dividido em seis etapas, a saber: i) Revisão bibliográfica sobre o tema; ii) Coleta do solo e de amostras de sedimento de rejeito de mineração; iii) Caracterização físico-química do SRMF e do solo; e iv) Análise da curva de compactação e do teor de umidade ótimo do solo com e sem SRMF por meio de corpos de prova; v) Determinação do teor de cal das misturas selecionadas de solo-SRMF; e vi) Análise físico-mecânica de misturas de solo-SRMF em corpos de prova representativos da taipa de pilão.

3.1 Revisão bibliográfica sobre o tema

A revisão bibliográfica desta pesquisa foi predominantemente narrativa, exceto nos tópicos 2.2.1. O uso de resíduos como estabilizantes da taipa de pilão; 2.2.2 A estabilização por correção granulométrica e 2.4. Uso de rejeitos de mineração na construção civil, nos quais foi adotada uma abordagem sistemática. É importante apresentar o método desta revisão em questão, visto que a lacuna desta investigação foi identificada a partir destes dados, e a revisão sistemática consegue alcançar um rigor maior em relação aos dados disponíveis sobre estabilização da taipa de pilão com rejeito de minério de ferro.

Os critérios presentes na tabela 3 foram empregados para obter informações capazes de responder à indagação “É possível utilizar o rejeito de minério de ferro associado ao solo para a produção de taipa de pilão?”. Dado que, até o momento desta revisão, não foram encontrados artigos publicados que estabeleçam uma relação entre o rejeito de minério de ferro e o solo para a produção de taipa de pilão, foi necessário realizar duas buscas sistemáticas: a primeira sobre as características do rejeito de minério de ferro e a segunda sobre a incorporação de resíduos em solos para a produção de taipa de pilão. Para a segunda busca, realizou-se uma seleção posterior dos artigos cujos autores utilizaram resíduos como substitutos granulométricos do solo para a taipa de pilão (estes trabalhos estão listados na tabela 2).

Com os dados obtidos separadamente, foi possível confrontar as informações acerca das características do RMF e sua utilização na construção civil, com outros resíduos já utilizados na taipa de pilão, de maneira a buscar semelhanças entre os resíduos já utilizados e o RMF. Os achados desta revisão foram apresentados no capítulo 2 desta dissertação.

Tabela 3 - Critérios para levantamento de dados sobre o rejeito de minério de ferro

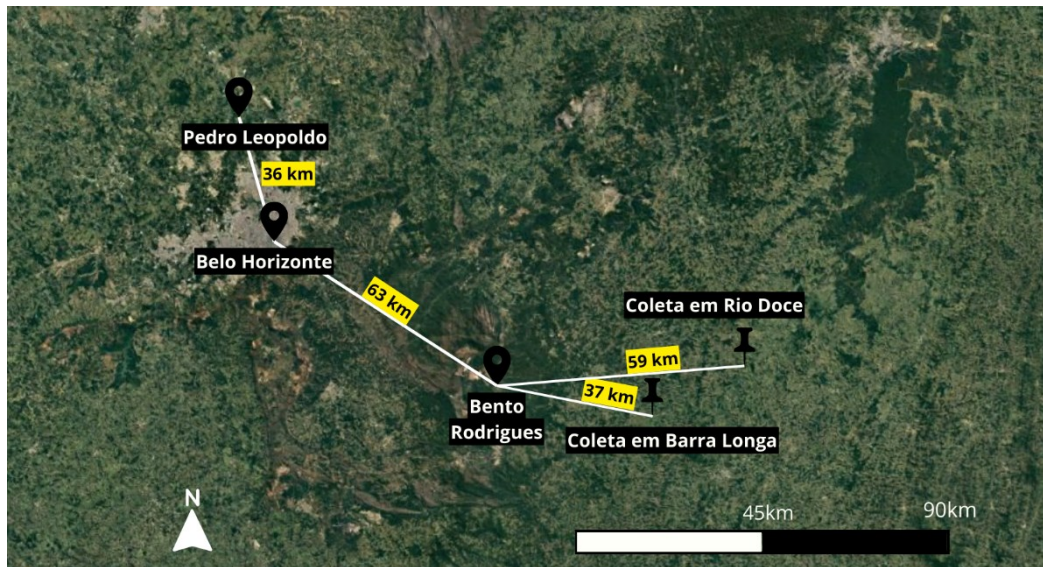
Foco	Critério	Condições
Rejeito de minério de ferro	Data de publicação	Período entre 2013-2021
	Palavras-chave	“Iron ore tailings” ou “IOT” e “Waste” e “Civil construction” ou “Soil stabilization”
	Tipo de documento	Artigos de periódicos ou anais de eventos
	Idioma	Inglês, português ou espanhol
Taipa de pilão	Data de publicação	Período entre 2013-2021
	Palavras-chave	“Rammed Earth” e “Residue” ou “Waste” ou “Recycling” ou “Particle size distribution”
	Tipo de documento	Artigos de periódicos ou anais de eventos
	Idioma	Inglês, português ou espanhol

Fonte: Da autora, 2023.

3.2 Materiais

As amostras de SRMF utilizadas nesta pesquisa foram coletadas nas cidades de Barra Longa e Rio Doce, ambas situadas no caminho percorrido pelo rejeito após o colapso da Barragem de Fundão (Figura 5).

Figura 5 - Localização do ponto de coleta no município de Barra Longa e Rio Doce



. Fonte: Adaptado pela autora com base em GOOGLE EARTH, 2023.

Em Barra Longa, o material coletado estava em uma Área de Depósito de Material Excedente (ADME) localizada na Fazenda Alta Floresta, na margem do Rio Gualaxo do Norte, de onde o material foi drenado após o desastre. Neste local, os sedimentos foram cobertos com uma camada de solo para revegetação. Por conta disso, as amostras de SRMF foram coletadas entre 60 e 80 cm de profundidade (Figura 6). Este local de deposição está dentro do Trecho 9 do Plano de Manejo de Rejeito, na qual foi retirado o SRMF da calha do Rio Gualaxo do Norte e da área urbana de Barra Longa e proximidades (CT-GRSA, 2018).

Na segunda coleta, as amostras de SRMF foram retiradas da ADME Fazenda Floresta, que fica na cidade de Rio Doce, MG. Neste local, o rejeito estava envelopado em lonas de borracha para melhorar a deposição e estabilizar os finos (Figura 7).

O solo foi coletado em Pedro Leopoldo (MG), cidade da RMBH, distante 40 km da capital mineira (Figura 8). De acordo com a (EMBRAPA SOLOS, 2016), a área de coleta em Pedro Leopoldo possui como solo principal o argissolo vermelho eutrófico, tal como em Barra Longa. Além do argissolo, a cidade apresenta o latossolo vermelho-amarelo distrófico em algumas localidades (Figura 9). Os argissolos têm como característica elevado teor de argila, que podem ser de alta ou baixa reatividade (REATTO *et al.*, 2008).

Figura 6 - Coleta em Barra Longa



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Nota: Presença de vegetação rasteira (superior esq.); retirada da camada superficial do material (superior dir.); retirada de material das camadas mais profundas (inferior esq.); diferença entre uma porção de solo e sedimento que estavam no local (inferior dir.)

Figura 7 - Coleta em Rio Doce



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Nota: Envelopes contendo o SRMF (primeira); retirada do rejeito (segunda e terceira).

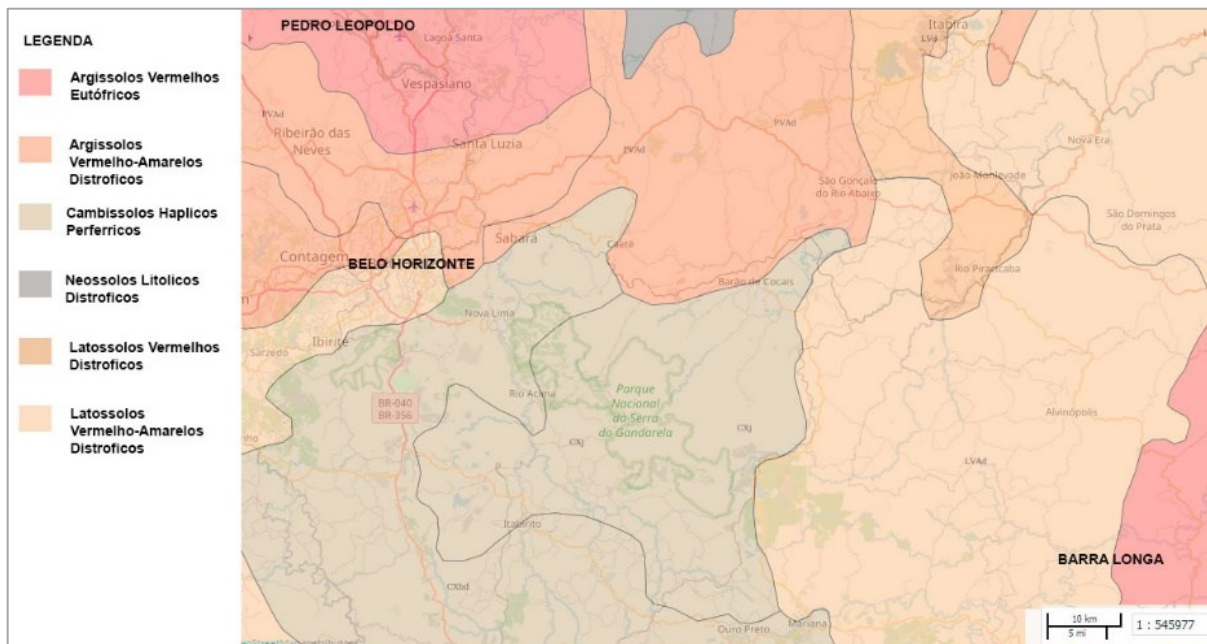
Figura 8 - Solo de Pedro Leopoldo (MG)



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Todas as amostras coletadas foram acondicionadas em recipientes fechados para o transporte. Antes de serem analisadas, foram secas em estufa por 24 horas, para a retirada de umidade, e quarteadas, usando um divisor de rifles, para se obter melhor representatividade.

Figura 9 - Mapa de solos da região analisada



Fonte: Elaborado pela autora com base em EMBRAPA SOLOS, 2016.

A cal hidratada utilizada neste estudo é do tipo CH-I que atende os requisitos técnicos da norma NBR 7175 (ABNT, 2003), e foi escolhida por possuir ampla disponibilidade no mercado regional além de ter pureza mais elevada com a cal tipo CH-II.

3.3 Caracterização do solo e do SRMF

As amostras de SRMF coletadas em Barra Longa e Rio Doce foram submetidas a análises química, físicas e mineralógicas com o objetivo de aferir as propriedades após cinco anos de permanência no meio ambiente. Além disso, o solo também foi caracterizado para obter informações acerca de suas propriedades.

Os ensaios realizados nas amostras de solo e SRMF foram: i) Caracterização mineralógica, por meio de difração de raios X (DrX); ii) Análise química por fluorescência de raios X; iii) Massa específica, massa unitária, volume de vazios e absorção de água; iv) área superficial e porosimetria v) análise granulométrica por

sedimentação; e vi) Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade do solo.

Para identificar as fases minerais presentes nas amostras de SRMF e do solo, realizou-se a análise de Difração de raios X (DrX). O equipamento utilizado foi um difratômetro Panalytical da Philips, sistema 1710. As condições utilizadas foram: Radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,54$), passo de $0,06^\circ/\text{s}$ entre as faixas de varredura 10° a 90° em ângulo 2θ (θ). Os dados obtidos foram trabalhados no software *Search Match*. Neste *software*, a identificação das fases foi realizada observando os padrões de difração característicos de cada mineral e a intensidade relativa, utilizando-se a base de dados PDF-2 do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Para validar a caracterização química das amostras, foi utilizada a análise por Fluorescência de raios X. O equipamento utilizado foi um espectrômetro WDS e foram utilizados para esse teste 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.

Para o ensaio de determinação da massa específica do solo e do SRMF, foram adotados os procedimentos estabelecidos na NBR 16605 (ABNT, 2017). O preparo das amostras foi iniciado com o quarteamento por meio de divisor de rifles, seguido da secagem em estufa a temperatura de 45°C , por 24 h, e retirada da matéria orgânica por meio de peneiramento (peneira # 1,18 mm). Para o ensaio, foram utilizados 60 g de material, utilizando-se querosene como líquido não reagente. Não foi necessário o uso de banho termorregulador devido ao curto espaço de tempo entre os ensaios realizados com o mesmo material.

Para o ensaio de determinação da massa unitária e do volume de vazios, utilizou-se a NBR 16972 (ABNT, 2021). O preparo das amostras foi feito com a secagem de, aproximadamente, 5,0 kg de cada material em estufa a temperatura de 45°C por 24h. A quantidade de material necessária para preencher o recipiente estipulado pela norma (10 dm^3) foi adaptada utilizando-se um recipiente de 3 dm^3 . Além disso, realizou-se o ensaio de massa específica segundo a NBR NM 23 (ABNT, 2000a) e a absorção de água segundo a norma NBR NM 30 (ABNT, 2000b).

Análises da superfície específica e da porosidade foram realizadas utilizando o equipamento *Quantachrome*. Inicialmente foi feita a desgaseificação do material. O

método utilizado foi o BET (adsorção de N_2 a 77 K), que consiste em determinar o volume de gás adsorvido a partir da isoterma de adsorção física, determinada experimentalmente. A partir da curva de adsorção de nitrogênio, obteve-se a área superficial (método BET) e a partir da isoterma de dessorção obteve-se a distribuição e o tamanho de poros (BJH).

A realização da análise granulométrica seguiu as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2018) por meio da combinação entre o método de peneiramento e de sedimentação (Figura 10). Primeiramente, coletou-se 1,5 kg de cada amostra, que foi passada pela peneira de 2,0 mm, lavada e secada na estufa a 105 °C. Tomou-se 120 g das amostras de SRMF e 70 g para a amostra de solo para a realização do ensaio. O defloculante utilizado neste ensaio foi o hexametáfosfato de sódio.

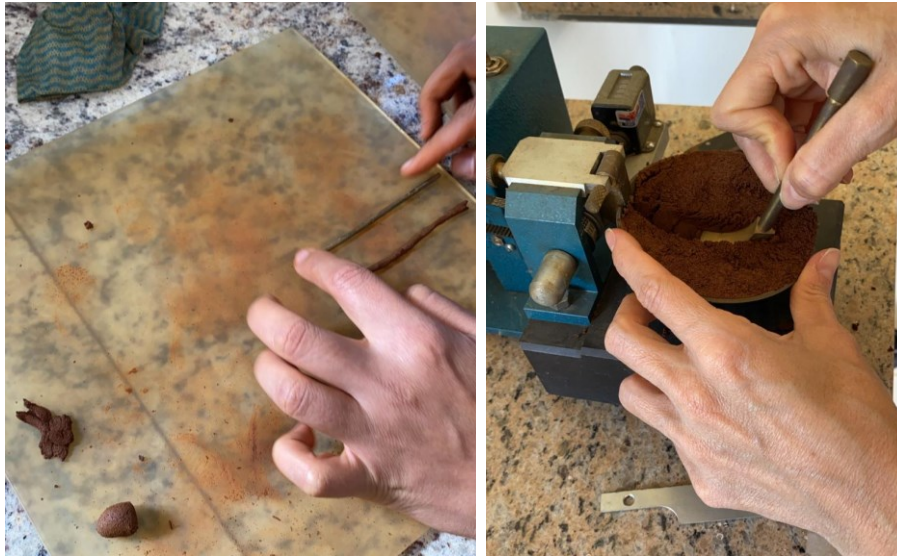
Para a determinação do limite de liquidez do solo, foi utilizado o procedimento estabelecido na NBR 6459 (ABNT, 2016a) e a determinação do limite e do índice de plasticidade seguiu os procedimentos da NBR 7180 (ABNT, 2016b) (Figura 11).

Figura 10 - Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Figura 11 - Execução do ensaio de limite de plasticidade (esq) e de limite de liquidez (dir).



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Com os resultados da caracterização do solo foi possível classificá-lo por meio dos métodos segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), AASTHO (ASTM, 2015) e SUCS (ASTM, 2017).

3.4 Curva de compactação das misturas

O ensaio de compactação determina a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos, segundo a NBR 7182 (ABNT, 2016c), na qual o teor ótimo de água pode promover um arranjo das partículas que resultam em valores de densidade maiores (MINKE, 2022). Para a realização deste ensaio foi utilizado o cilindro de Proctor pequeno com volume de 969,42 cm³ e massa de 2396,50 g. O soquete utilizado foi o soquete pequeno de 2500g, o número de camadas (três) e golpes por camada (26) seguiu a indicação da norma para características para a energia normal de compactação (Figura 12).

Figura 12 - Execução do ensaio de compactação



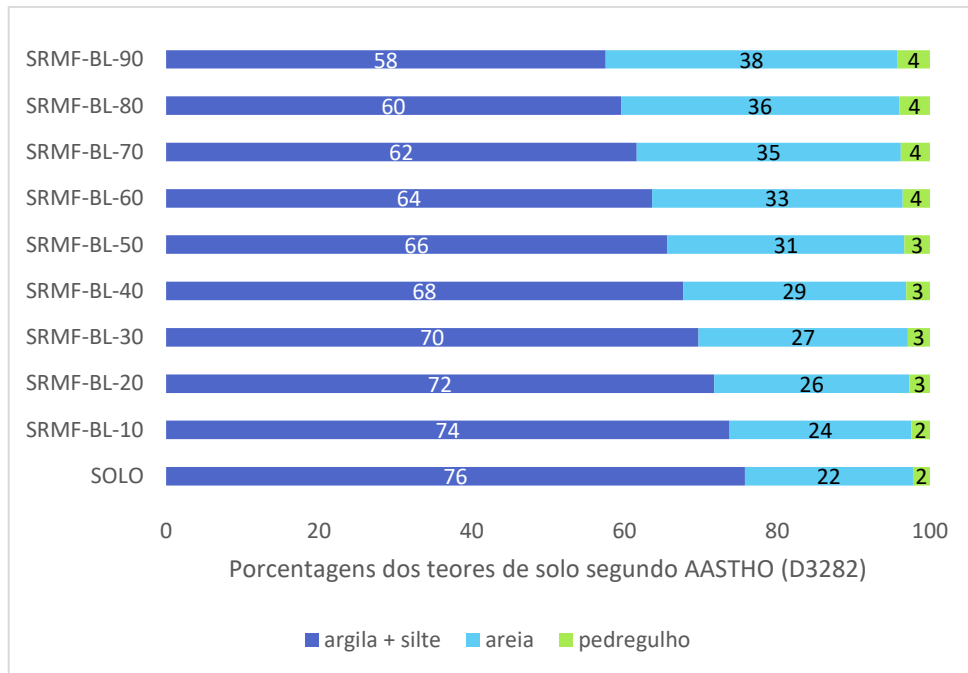
Fonte: Acervo da autora, 2022.

As proporções de adição de solo-SRMF (P) foram pré-determinadas levando-se em consideração os teores adequados de argila, silte e areia sugeridos por diferentes autores (ABNT, 2022; DOAT *et al.*, 1979; SADCSTAN, 2014; WALKER; AUSTRALIA, 2002) (Tabela 1) e utilizando valores encontrados pelo ensaio de granulometria, em vista a equação baseada em Hoffmann, Minto e Heise (2011), na qual T_{co} , T_t e T_i correspondem ao teor de areia, silte ou argila de cada tipo de solo.

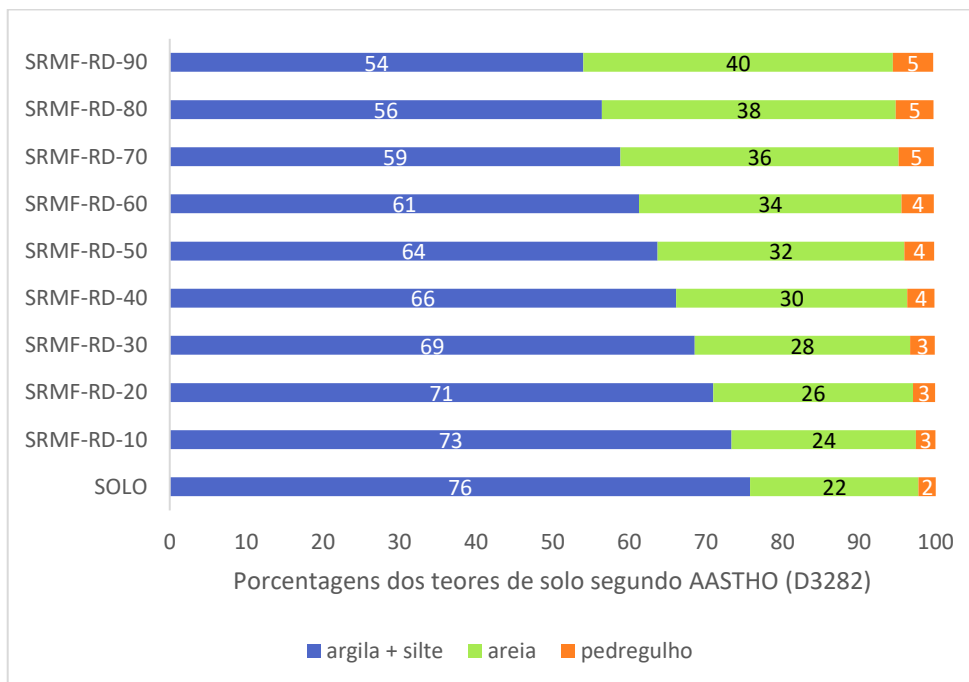
$$P = \frac{T_{co} - T_i}{T_i - T_t}$$

Dessa forma, foi possível observar que independente das proporções de substituição de solo por SRMF, os teores não conseguiriam atender a NBR 17014 (ABNT, 2022), levando em consideração que a norma, apesar de não fazer menção, utiliza as mesmas peneiras da classificação de solos AASHTO, definida pela D3282 (ASTM, 2015) (Gráficos 1 e 2).

Dessa forma, por meio da classificação AASHTO, foram consideradas 11 amostras, que apesar de não se enquadrarem na norma, foram consideradas representativas para esta pesquisa: a mistura referência com 100% solo e os teores de 40%, 60%, 70%, 80% e 90% de SRMF-BL e SRMF-RD em substituição ao solo, em massa.

Gráfico 1 - Distribuições dos teores de solo em diferentes porcentagens de substituição de SRMF-BL

Fonte: Da autora, 2023.

Gráfico 2 - Distribuições dos teores de solo em diferentes porcentagens de substituição de SRMF-RD

Fonte: Da autora, 2023.

Com este ensaio, foi possível também calcular a massa específica aparente seca, em acordo com a NBR 17014, de todas as misturas analisadas (ABNT, 2022).

3.5 Determinação do teor ótimo de cal

Além da adição de SRMF, considerou-se analisar o comportamento das amostras de solo e SRMF com a adição de pequenas quantidades de estabilizante químico. Apesar das características argilosas do solo indicarem uma compatibilidade maior com a adição de cimento do que com a cal (MINKE, 2022), o trabalho de Hoffmann (2007) demonstra melhora na trabalhabilidade e redução de fissuras na adição de cal em solos para estruturas com terra, além de aumentos dos valores de resistência à compressão simples em argissolos com a adição de cal.

Ademais esta investigação optou por realizar testes com adição de cal visto que já foi realizada uma análise com cimento Portland anteriormente (LAGE *et al.*, 2021). Além disso, a incorporação de cal hidratada ao solo, visando a estabilização, pode representar um menor impacto ambiental se comparada a incorporação do cimento, devido ao fato de que o consumo de energia para a fabricação da cal é menor, já que sua produção acontece em temperaturas mais baixas do que as do cimento Portland (KANG; KWON; MOON, 2019). Por fim, a adição de cal representa uma técnica de estabilização frequente nas construções com taipa das cidades históricas de Minas Gerais (REZENDE, 2012).

Os teores de cal utilizados nas misturas produzidas com e sem SRMF foram determinados por meio do ensaio de pH. Ciancio, Beckett e Carraro (2013) correlacionaram o teor ótimo de cal (saturação de cal na água do poro - valor de pH em 12,45) com uma máxima resistência à compressão para misturas de solo estabilizadas com cal.

O pH das amostras foi analisado com pHmetro de bancada digital, marca SevenEasy Mettler Toledo (Figura 13). Cada mistura analisada foi preparada adicionando-se 30g de água destilada a 50g de material sólido (misturas solo-SRMF).

Figura 13 - Medição do pH das misturas solo-SRMF



Fonte: Acervo da autora, 2023.

A mistura foi homogeneizada por dois minutos e o pH foi medido com eletrodo. Foram realizadas duas medições para cada amostra e preparadas duas amostras para cada mistura. O pHmetro foi calibrado utilizando soluções-padrão de pH 4, 7 e 10.

3.6 Moldagem e produção de corpos de prova

Após a determinação do teor de umidade ótimo e da determinação do teor de ótimo de cal foram moldados os corpos de prova para o ensaio de resistência a compressão. As misturas foram moldadas em formas cilíndricas com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, adaptados da NBR 12024 (ABNT, 2012), na proporção de 1:2 (diâmetro/altura). Esta adaptação foi feita porque o corpo de prova cilíndrico é mais simples de ser removido do molde do que o Proctor, que requer um extrator. Como o ensaio é qualitativo e comparativo, foi possível analisar a incorporação do SRMF entre as misturas mesmo com um corpo de prova adaptado.

O número de camadas (cinco) e golpes por camada (27) seguiu os valores da energia modificada de compactação (ABNT, 2016c). No entanto, foi feita uma adaptação no processo, utilizando o soquete pequeno (Figuras 14 e 15). Antes da moldagem, aplicou-se desmoldante nas formas e nos colarinhos. Após cada camada, a superfície foi escarificada antes de compactar a camada seguinte.

O teor de água foi ajustado de acordo com os valores estabelecidos no ensaio de compactação, com uma redução de 15% de água em relação aos valores obtidos.

Essa adaptação foi realizada devido a problemas de moldagem encontrados nas amostras com umidade ótima, causados pelo excesso de água e aderência nas formas utilizadas. Este problema pode ter ocorrido devido a mudanças da energia de compactação durante o ensaio de compactação (energia normal) e durante o ensaio de resistência a compressão (energia modificada), já que ao elevar a força de compactação há uma necessidade menor de adição de água.

Figura 14 - Processo de moldagem de corpos de prova cilíndricos representativos da taipa de pilão



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Figura 15 - Execução de golpes para compactação das camadas da amostra



Fonte: Acervo da autora, 2021.

Os sinais do excesso de água incluíram a aderência excessiva da mistura nos equipamentos e moldes, fissuras, desagregação do material durante o desmolde e presença excessiva de mofo nas amostras (Figura 16). Alguns autores já trabalharam

com a energia de compactação modificada em misturas para a taipa de pilão (MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2021; ROCHA; CONSOLI; JOHANN, 2014).

Algumas pesquisas mostram que utilizar uma quantidade de água um pouco abaixo do valor encontrado no ensaio de umidade ótima pode resultar em misturas de solo compactado com valores mais elevados de resistência à compressão (CARRARO, 1997), no caso de solos com características arenosas (FELT, 1955; FOPPA, 2005).

Figura 16 - Corpos de prova com trincas, desagregação e aderência de material na fôrma



Fonte: Acervo da autora, 2022.

Foram moldadas seis misturas para a realização do ensaio de resistência à compressão simples não confinada: uma mistura contendo apenas solo (SRMF-0); uma mistura com solo e 90% de SRMF de Barra Longa (SRMF-BL-90) e outro com solo e 90% de SRMF de Rio Doce (SRMF-RD-90). Estas três misturas foram repetidas, desta vez adicionando-se o teor de cal determinado na etapa anterior (Tabela 4).

Tabela 4 - Misturas e quantidade de cal utilizadas, em massa

Mistura	Solo (%)	SRMF (%)	Cal (%)	Água (%)
SRMF-0	100,00	0,00	0,00	25,69
SRMF-BL-90	10,00	90,00	0,00	12,39
SRMF-RD-90	10,00	90,00	0,00	12,06
SRMF-0-C	100,00	0,00	2,00	25,69
SRMF-BL-90-C	10,00	90,00	0,50	12,39
SRMF-RD-90-C	10,00	90,00	0,50	12,06

Fonte: Da autora, 2023.

As misturas foram produzidas em argamassadeira industrial de 60 L. Adicionou-se primeiro os materiais secos, que foram homogeneizados até atingir uma coloração uniforme. A água foi então adicionada, aos poucos, até que a mistura atingisse a quantidade de água pré-determinada. O processo de incorporação da água manteve um tempo padrão para todas as amostras, já que o tempo de mistura das amostras pode influenciar em sua coesão e resistência (MINKE, 2022). Vinte minutos foram suficientes para que as misturas atingissem um aspecto homogêneo.

Foram moldados entre quatro e cinco corpos de prova para cada mistura. Os corpos de prova foram desmoldados das fôrmas após sete dias, a massa foi aferida e, logo após, foram embalados em plástico filme por 14 dias (Figuras 17 e 18). Após esse período, foram desembalados e ficaram mais 10 dias sem o plástico, quando foram rompidos aos 31 dias de idade em prensa hidráulica semiautomática com velocidade de carregamento uniforme (Figura 19).

Figura 17 - Processos de descanso dos corpos de prova



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Figura 18 - Armazenamento das amostras



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Figura 19 - Ensaio de resistência a compressão simples não confinada



Fonte: Acervo da autora, 2023.

A energia de compactação, o método de secagem e a idade de rompimento foi determinada após levantamento de dados com autores que fizeram ensaios de resistência à compressão em corpos de prova representativos da taipa de pilão e com incorporação de cal (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5 - Idade de ensaio e tipo de energia de compactação adotada - corpos de prova representativos de taipa de pilão com adição de cal

Pesquisa	Idade do ensaio de resistência à compressão, em dias							Energia de compactação
	7	20	28	60	90	180	360	
(ROCHA; CONSOLI; JOHANN, 2014)*			x	x	x	x	x	Não apresenta
(ÁVILA; PUERTAS; GALLEGO, 2021)			x					Proctor modificado
(CANIVELL et al., 2018)			x					Não fica claro
(FANG et al., 2022)			x	x				Não fica claro
(SALDANHA et al., 2021)	x							Não apresenta
(SOUDANI et al., 2018)	x							Não apresenta
(CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014)			x					Proctor Modificado
(ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016)			x					Proctor Modificado
(BUI et al., 2011)			x					Não fica claro
(ARRIGONI et al., 2017a)			x	x				Proctor Modificado
(CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013)			x					Proctor Modificado
(CIANCIO; GIBBINGS, 2012)			x					Proctor Modificado

Fonte: Elaborado pela autora baseado em ROCHA; CONSOLI; JOHANN, 2014; ÁVILA; PUERTAS; GALLEGO, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014; ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016; BUI *et al.*, 2011; ARRIGONI *et al.*, 2017^a; CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013; CIANCIO; GIBBINGS, 2012.

Nota: * os resultados de 28 e 60 dias foram descartados.

A energia modificada foi utilizada de forma unânime pelos pesquisadores que adotaram a compactação por meio do Proctor (ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016; ARRIGONI *et al.*, 2017^a; ÁVILA; PUERTAS; GALLEGO, 2021; CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014; CIANCIO; GIBBINGS, 2012; CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013).

Além disso, a determinação dos 28 dias de idade para romper os corpos de prova foi majoritária (Tabela 5). Ficou claro que tempos de cura mais prolongados podem potencializar uma possível reação pozolânica e elevar a resistência à compressão, entretanto ainda se tem como padrão em algumas normas técnicas a adoção de período de cura para misturas com cal a partir de 28 dias (CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014).

Além disso, alguns autores mencionam uma técnica alternativa de envolver o corpo

de prova em folhas plásticas como uma possível substituição para a câmara úmida (ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016; CIANCIO; GIBBINGS, 2012; CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013; SALDANHA *et al.*, 2021).

O tempo de espera de sete dias antes de retirar os corpos de prova da forma se mostrou necessário para evitar a aderência dos corpos de prova nas fôrmas. No entanto, o plástico filme foi removido após 14 dias devido ao surgimento de mofo nos corpos de prova. O traço SRMF-90-RD foi particularmente afetado por esse problema (Figura 20). Devido ao acúmulo de mofo das amostras, não foi considerada uma estratégia interessante o envelopamento da taipa com rejeito e cal durante a cura.

Tabela 6 - Método de secagem adotado por autores que moldaram corpos de prova representativos de taipa de pilão com adição de cal

Fonte	Tipo de secagem
(ROCHA; CONSOLI; JOHANN, 2014)	cura em sala úmida
(ÁVILA; PUERTAS; GALLEGO, 2021)	constante condições de CA. 25 °C e 40% de umidade relativa
(CANIVELL et al., 2018)	mesmas condições ambientais (20 C±2 C e 65 ± 5% relativo umidade
(FANG et al., 2022)	em condições de laboratório (T = (22 ± 3)°C, RH = (80 ± 5) %)
(SALDANHA et al., 2021)	sacos plásticos e armazenados em uma sala com temperatura controlada (23 C) por 7 dias.
(SOUDANI et al., 2018)	nenhum período de cura foi considerado
(CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014)	condições constantes de 94 ± 2% de umidade relativa (RH) e 21 ± 1 C de temperatura
(ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016)	O autor variou o método de secagem entre três, a seguir: I - condições de temperatura ambiente e umidade relativa em espaço sem vedação - 7 a 245 dias II- temperatura ambiente e condições de umidade relativa no ambiente no molde durante 14 dias. A umidade relativa do ar na faixa de 60 a 70%. Após a desmoldagem, envoltos por filme plástico e curados sob a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar por 14 dias. III - as amostras nos moldes foram curadas dentro dos dessecadores com uma solução saturada de sulfato de potássio (K ₂ SO ₄) para manter a umidade relativa a 98%RH sob uma temperatura constante de 16 C
(BUI et al., 2011)	condições atmosféricas normais
(ARRIGONI et al., 2017a)	sala de cura a 21±1 graus
(CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013)	Retiradas da fôrma após 1 dia e embaladas durante 21 dias
(CIANCIO; GIBBINGS, 2012)	as amostras foram extraídas dos moldes após alguns dias. Foram embrulhadas em folhas plásticas por alguns dias e depois deixadas para curar dentro do laboratório em condições ambientais

Fonte: Elaborado pela autora baseado em ROCHA; CONSOLI; JOHANN, 2014; ÁVILA; PUERTAS; GALLEGO, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO; BECKETT; CARRARO, 2014; ARAKI; KOSEKI; SATO, 2016; BUI *et al.*, 2011; ARRIGONI *et al.*, 2017^a; CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013; CIANCIO; GIBBINGS, 2012.

Figura 20 - Traço SRMF-90-RD embalado no plástico (acima) e após a retirada do plástico (abaixo)



Fonte: Acervo da autora, 2023.

Para a análise dos resultados de resistência à compressão, utilizou-se a NBR 7215 (ABNT, 2019) como parâmetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

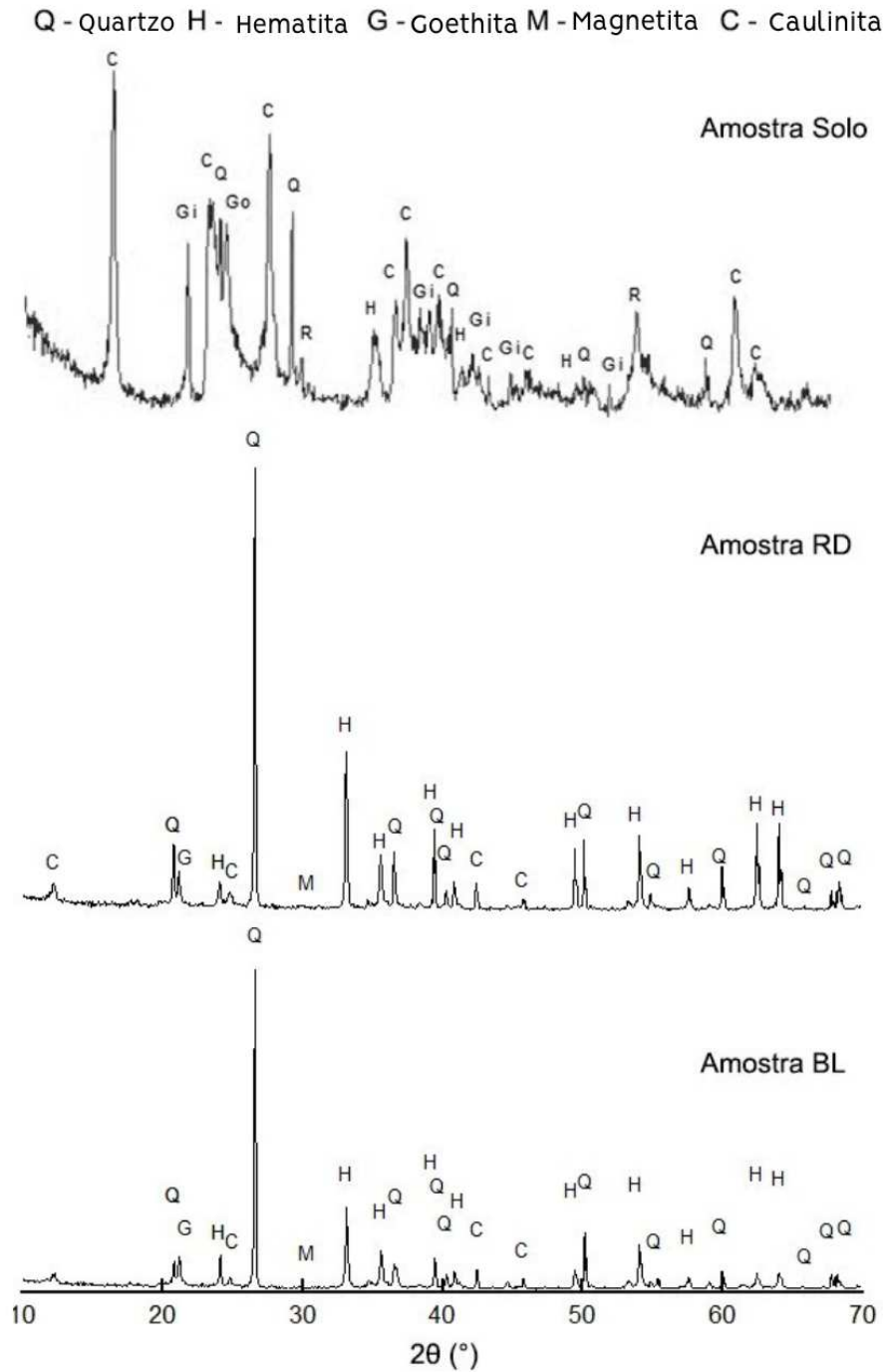
Neste item, são apresentados os resultados que compreendem os ensaios de caracterização das amostras de solo e de SRMF, a análise das misturas e o ensaio de resistência a compressão das misturas para a taipa de pilão.

4.1 Caracterização do solo e do SRMF

Pela Figura 21, é possível observar os difratogramas das amostras de SRMF e de solo. Nas amostras de SRMF nota-se a predominância de quartzo (SiO_2 - ICDD - 46-1045) e hematita (α - Fe_2O_3 - ICDD - 33-664). Os elementos encontrados no SRMF coletado em Barra Longa e Rio Doce são semelhantes entre si e são consistentes com os achados na literatura referentes às amostras de RMF coletados diretamente de barragem (ANDRADE, 2014; BASTOS *et al.*, 2016; DAUCE *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2016). Tal fato confirma que as amostras analisadas possuem traços de minério de ferro, porém teores mais baixos em relação aos rejeitos retirados diretamente das barragens de mineração.

Na amostra de solo analisada, não foram encontrados minerais argilosos expansivos (montmorilonita, vermiculita etc.), sendo a caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) considerada uma argila não expansível (GOMES; GONÇALVES; FARIA, 2013) e de baixa reatividade. Esse fato corrobora com uma melhor estabilidade dimensional de componentes de terra produzidos com este material. Além disso a relevante presença caulinita (Imagem 21) condiz com os tipos de argila presentes em solos característicos do Cerrado, em conjunto com as elevadas concentrações de alumínio (ROSOLEN *et al.*, 2012) (Tabela 7).

Figura 21 - Difratoograma das amostras de sedimento e solo



Fonte: Laboratório de pesquisa NPMS.

Pela análise química realizada por meio de FRX, foi possível reiterar a composição química predominante das amostras de SRMF e de solo, com uma maior presença de óxido de silício (SiO_2) e óxido de ferro (Fe_2O_3) nas amostras de SRMF, e de óxido de silício e óxido de alumínio no solo. Além disso, verificou-se que as amostras de SRMF possuem teores ligeiramente mais elevados de óxido de ferro em comparação

com a amostra de solo (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise química das amostras por Fluorescência de raios X, em %

Amostra	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	MnO	CaO
Solo	41,94	6,14	26,89	1,65	0,15	0,01	0,09
SRMF BL	67,05	9,57	6,39	0,67	0,62	0,07	0,21
SRMF RD	76,85	8,46	2,49	0,27	0,34	0,06	0,24

Fonte: Laboratório de pesquisa NPMS, 2022.

Segundo Couto *et al.*, (2021) e Orlando *et al.*, (2020) o quartzo e a hematita são justamente os principais componentes minerais dos rejeitos em barragens. Foram também encontrados traços de óxido de manganês, óxido de titânio e óxido de potássio.

Na Tabela 8, é possível observar os valores da massa específica, da massa unitária, do volume de vazios e da absorção de água das amostras. A partir dos resultados obtidos de massa unitária (p_{ap}) e massa específica de cada amostra (d_1), calculou-se o volume de vazios (E_v) pela Equação 1.

$$E_v = \frac{100 \times [(d_1 \times p_w) - p_{ap}]}{d_1 \times p_w}$$

sendo

d_1 = massa específica do material (kg/m³)

p_w = massa específica da água (kg/m³)

p_{ap} = massa unitária média do material (kg/m³)

Tabela 8 - Resumo - caracterização física

Amostras	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)	Volume de vazios (%)	Absorção de água (%)
SOLO	2340	1012	57,50	21,28
SRMF-BL	2790	1368	64,20	7,52
SRMF-RD	2820	1499	64,50	3,33

Fonte: Da autora, 2022.

Comparando-se os valores de massa específica encontrados com os resultados encontrados por FONTES *et al.*, (2016) e Silva *et al.*, (2015), pode-se inferir que são compatíveis com rejeitos ricos em sílica com menores concentrações de ferro, devido a densidade mais próxima à da areia, que é de 2650 kg/m³. Esses resultados são

consistentes aos encontrados na análise mineralógica, que mostrou o SiO₂ como o mineral mais presente nas amostras, interferindo diretamente nos resultados de massa específica.

Os resultados obtidos para o índice de vazios foram similares. Considerando a granulometria característica do rejeito de minério de ferro, que apresenta uma elevada concentração de partículas de um mesmo tamanho, representando uma curva granulométrica uniforme, era de se esperar um índice de volume de vazios relativamente elevado (acima de 50%). Além disso, há similaridade entre o volume de vazios das amostras de SRMF analisados.

Por meio dos valores obtidos no ensaio de absorção de água, foi possível observar que a amostra SRMF-RD apresentou um baixo índice de absorção de água, sendo o esperado para rejeitos compostos majoritariamente por sílica. O SRMF-BL apresentou uma taxa de absorção de água mais elevada em comparação com SRMF-RD, o que pode estar relacionado com a presença de minerais argilosos na amostra. (Tabela 8) Segundo Taiz e Zeiger (2003) devido a poros menores entre partículas, solos argilosos retêm um maior teor de água do que os solos arenosos.

Tabela 9 - Resultados - Área superficial específica e porosimetria

Amostras	Área Superficial (m²/g)	Volume de Poros (cm³/g)	Diâmetro de Poros (nm)
SRMF RD	3,260	0,013	3,8732
SRMF BL	7,277	0,020	3,2998

Fonte: Laboratório de pesquisa NPMS, 2022.

As amostras analisadas apresentam área superficial específica compatível para minério de ferro (Tabela 9). Mangabeira (2009) encontrou, para esse parâmetro, valores de 3,0, 2,0, 9,6, e 0,6 m²/g para distintas minas de ferro da empresa Samarco, após moagem para adequação à flotação. Segundo Minke (2022), valores mais elevados de superfície específica estão associados a forças internas de adesão mais elevadas, o que pode proporcionar uma maior capacidade aglutinante e de resistência a compressão. Uma menor dimensão dos poros pode ser um indicativo da maior presença de argila no material.

Os ensaios realizados para determinar os limites de Atterberg (Tabela 10) - limite de

liquidez (LL) e índice de plasticidade (IP) - tendo como referência CRATerre (1979), reiteram que o solo analisado pode ser classificado como argiloso. Já os valores de LL do SRMF-BL reiteram característica arenosa para o material. Essas amostras não possuíram características plásticas suficientes para a realização dos ensaios de limite e índice de plasticidade (Figura 18). Este fato já é um indicativo importante que a adição deste material ao solo poderia promover a diminuição do LL e LP.

Tabela 10 - Valores de Limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade das amostras

Amostras	LL	LP	IP
Solo	53	31	22
SRMF-BL	20	-	-
SRMF-RD	-	-	-

Da autora, 2022.

Figura 22 - Realização do ensaio de plasticidade



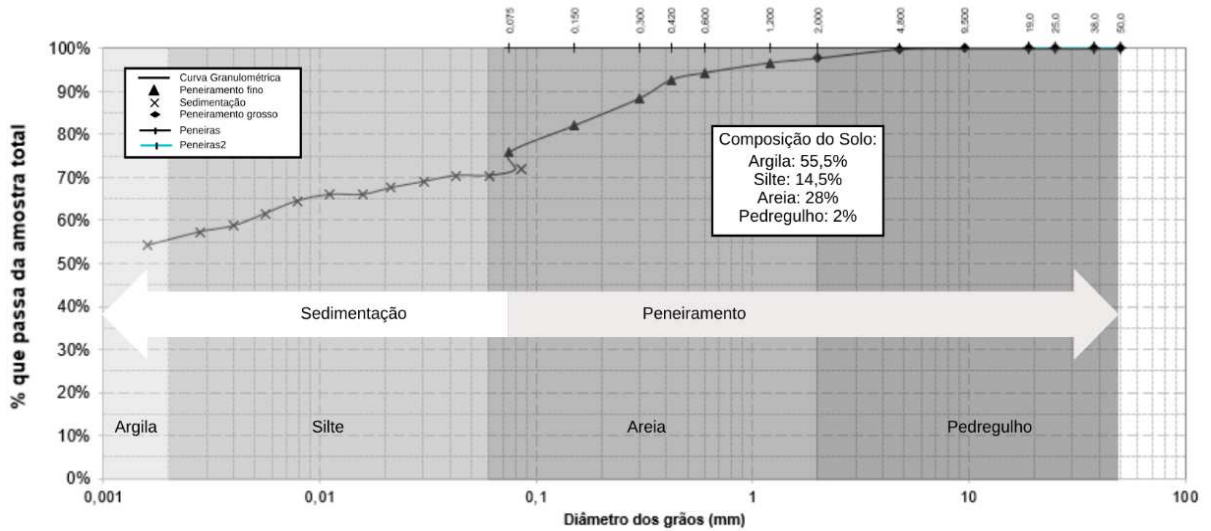
Fonte: Acervo da autora, 2022.

A amostra de solo alcançou o tamanho necessário no momento da fissura. O mesmo não aconteceu com as amostras de SRMF, que apresentaram fissuras antes da espessura ideal para o ensaio (Figura 22). Não há consenso, na literatura internacional, sobre os valores recomendados de LL e de IP para o solo empregado na taipa de pilão, no entanto, valores de LL entre 35 e 45% (raramente excedendo 45%) e valores de IP entre 7 e 30% são os mais aceitos (GOMES; GONÇALVES; FARIA, 2013). Dessa forma, pode-se afirmar que a incorporação de SRMF pode melhorar as características do solo para seu melhor emprego na produção da taipa de pilão (Tabela 10).

O ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento identificou um solo com dimensões equivalentes à 55,5% de argila, 14,5% de silte e 28% de areia. A amostra de SRMF-BL apresentou distribuição granulométrica representativa de 9% de argila,

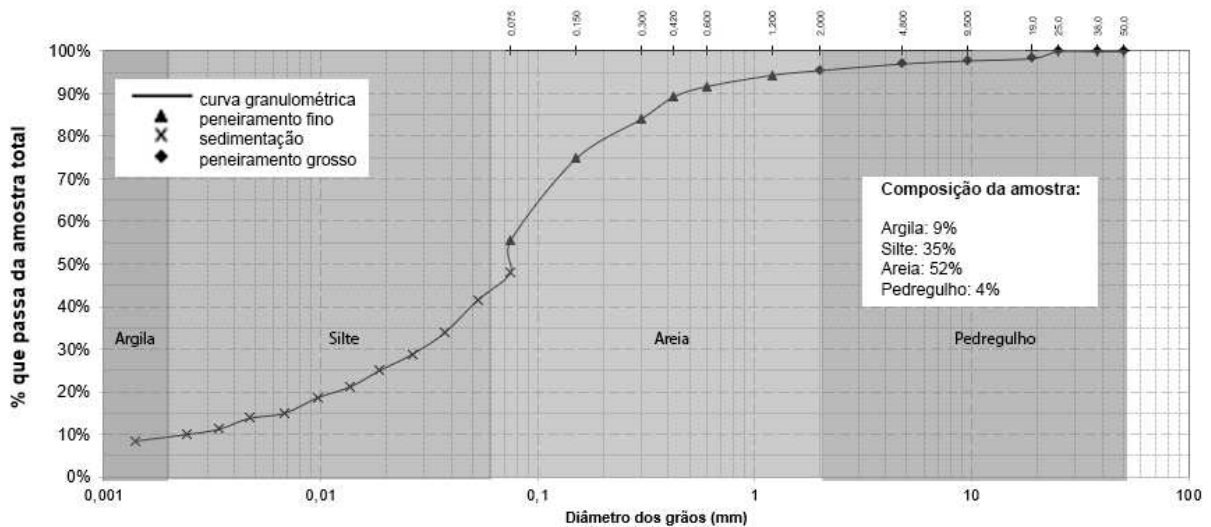
35% de silte e 52% de areia. A amostra de SRMF-RD apresentou diâmetros equivalentes a 6% de argila, 29% de silte e 59% de areia. A partir do ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento foi possível gerar as curvas granulométricas dos materiais (Gráficos 3, 4 e 5).

Gráfico 3 - Curva de distribuição granulométrica do solo da RMBH



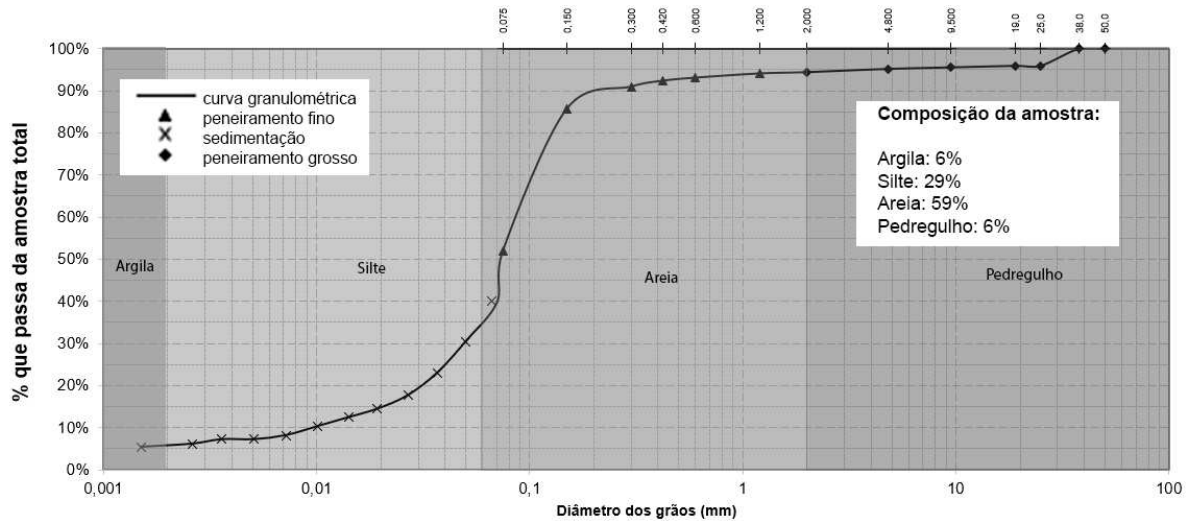
Fonte: Da autora, 2022.

Gráfico 4 - Curva de distribuição granulométrica do SRMF-BL



Fonte: Da autora, 2022.

Gráfico 5 - Curva de distribuição granulométrica do SRMF-RD



Fonte: Da autora, 2022.

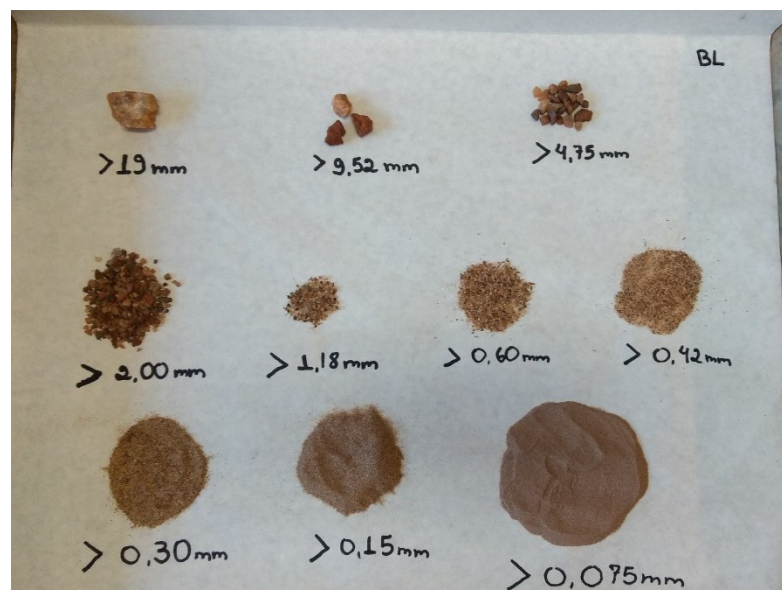
Por meio das curvas obtidas, foi possível perceber a presença de diâmetros de grãos maiores nas amostras de sedimento de minério de ferro coletadas. As características granulométricas tanto da amostra de Barra Longa quanto de Rio Doce podem ser consideradas arenosas, já que possuem acima de 50% de areia segundo NBR 6502 (1995). O contrário pode ser constatado na amostra de solo, que possui característica argilosa, pois em sua composição há mais de 50% de argila (Figuras 23, 24 e 25).

Figura 23 - Representação granulométrica do solo de Pedro Leopoldo



Fonte: Acervo da autora, 2022.

Figura 24 - Representação granulométrica do SRMF de Barra Longa



Fonte: Acervo da autora, 2022.

Figura 25 - representação granulométrica do SRMF de Rio Doce



Fonte: Acervo da autora, 2022.

Tabela 11 - Classificação do solo quanto a fração granulométrica segundo NBR e AASHTO

Material	Fração granulométrica	NBR 6502 (%)	AASHTO D3282
Solo	argila	55,50	70,00
	silte	14,50	
	areia	28,00	21,99
	pedregulho	2,00	2,22
	argila	9,00	45,00
	silte	36,00	
	areia	52,00	40,01
	pedregulho	4,00	4,47
SRMF RD	argila	6,00	35,00
	silte	29,00	
	areia	59,00	42,47
	pedregulho	6,00	5,58

Fonte: Elaborado pela autora com base em ABNT, 1995 e ASTM, 2015.

A partir de análise da literatura foi possível estabelecer como média, os valores recomendados entre 8 e 22% de argila, 14 e 32% de silte e 41 a 72% de areia/cascalho para a mistura adequada para a técnica da taipa de pilão. Diversos autores apontam solos de características arenosas como mais indicados para a adequada execução da técnica (ABNT, 2022; DOAT *et al.*, 1979; HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011; WALKER *et al.*, 2005). A partir dos parâmetros apresentados na tabela 11 pode-se observar que a correção granulométrica do solo utilizado poderia ser mais adequada à execução da taipa de pilão, que necessita de material arenoso.

A partir da análise granulométrica, foram utilizados seis teores de incorporação de SRMF para a realização do ensaio de compactação (Tabela 12 e 13).

Tabela 12 - Adição de SRMF e a granulometria das misturas, segundo NBR 6502

Traço	SRMF (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Solo	0	56	15	28	2
SRMF Barra Longa	40	37	23	38	3
	60	28	27	42	3
	70	23	29	45	3
	80	18	31	47	4
	90	14	33	50	4
SRMF Rio Doce	40	36	20	40	4
	60	26	23	47	4
	70	21	25	50	5
	80	16	26	53	5
	90	11	28	56	6

Fonte: Da autora, 2023.

Tabela 13 - Adição de SRMF e a granulometria das misturas, segundo D3282

Traço	Sedimento (%)	Argila + silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Solo	0	76	22	2
SRMF Barra Longa	40	68	29	3
	60	64	33	4
	70	62	35	4
	80	60	36	4
	90	58	38	4
SRMF Rio Doce	40	66	30	4
	60	61	34	4
	70	59	36	5
	80	56	38	5
	90	54	40	5

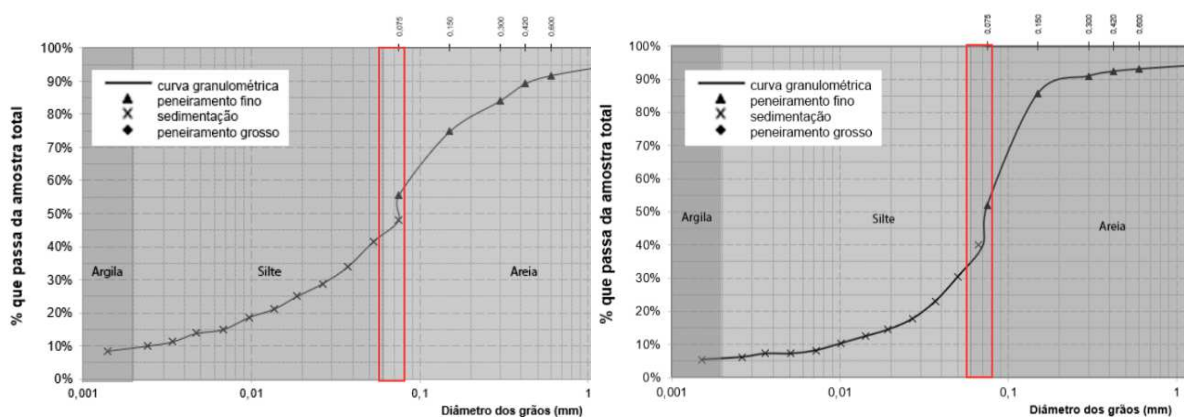
Fonte: Da autora, 2023.

Foi necessário classificar as misturas quanto a AASTHO, D3282 (ASTM, 2015), além dos parâmetros da NBR 6502, visto que a NBR 17014 (ABNT, 2022) não se refere à NBR 6502 como parâmetro para estabelecer os requisitos de faixa granulométrica necessária para a execução da técnica.

A norma padrão para classificação de solos com o propósito de construção de

estradas, D3282 (ASTM, 2015), classifica como argila e silte os materiais passantes na peneira com abertura de malha de 0,075 mm. Já a NBR 6502 (ABNT, 1995) classifica como argila e silte os materiais passantes na peneira 0,06 mm. No caso das amostras de SRMF analisadas, nesta faixa de intervalo entre 0,06 mm e 0,075 mm há uma quantidade considerável de material. Isso fica claro ao observar a inclinação da curva granulométrica neste intervalo (Figura 26).

Figura 26 - Detalhe da curva granulométrica na faixa ente silte e areia. SRMF BL (esq.) SRMF RD (dir.)



Fonte: Da autora, 2023.

Dessa forma, dependendo do método de classificação do solo, há discordâncias entre as características do material. De acordo com a ABNT as amostras de SRMF parecem ter característica arenosa, visto que segundo essa classificação há material com dimensão semelhante a areia acima de 50%. Entretanto, segundo o método AASTHO (ASTM, 2015) ambas as amostras foram classificadas como solo A4, o que representa um material com características de solo siltoso. O solo da RMBH foi classificado como argila de alta plasticidade com areia, de acordo com o método AASTHO (ASTM, 2015).

Por meio do método de classificação de solos com propósitos de práticas da engenharia, SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) (ASTM, 2017), o solo pode ser classificado como argila inorgânica com alta plasticidade. As amostras de SRMF são classificadas como siltes inorgânicos ou areia fina de baixa compressibilidade. Os três métodos de classificação alcançam valores que condizem com o encontrado na literatura a respeito da faixa granulométrica do rejeito de minério de ferro.

Apesar disso, essa diferenciação pode afetar a escolha do material para ser utilizado na taipa de pilão. Como este trabalho visa entender a viabilidade do uso do SRMF e do solo da Região Metropolitana de Minas Gerais, optou-se por não corrigir a granulometria da mistura com nenhum outro tipo de material, como a areia. Além disso, esta investigação foi iniciada em 2021, período que antecede a norma brasileira de taipa de pilão. Esses argumentos justificam o fato de que todas as misturas analisadas estão fora da faixa granulométrica recomendada pela NBR 17014 (ABNT, 2022), mas que ainda assim, de acordo com a tabela 14, as misturas com maiores teores de sedimento poderiam estar enquadradas em algumas normas técnicas, como IS 2110 (acima de 70% de SRMF-RD e SRMF-BL) e os parâmetros do CRATerre (apenas o SRMF-BL-90) (Tabela 14).

Tabela 14 - Granulometria das amostras Versus Bibliografia analisada

Mistura	Granulometria (NBR 6502) (areia/(silte/argila) %)	SADAC 983	IETcc	HB 195	NBR 17014	CRATerre
100% Solo	28/15/56	-	-	-	-	-
40%BL	38/23/37	-	-	-	-	-
60%BL	42/27/28	-	-	-	-	-
70% BL	45/29/23	-	sim	-	-	-
80% BL	47/31/18	-	sim	-	-	-
90% BL	50/33/14	-	sim	-	-	sim
40% RD	40/20/36	-	-	-	-	-
60% RD	47/23/26	-	-	-	-	-
70% RD	50/25/21	-	sim	-	-	-
80% RD	53/26/16	-	sim	-	-	-
90% RD	56/28/11	-	sim	-	-	-

Fonte: Da autora, 2023.

Na tabela 14, observa-se o arranjo granulométrico básico dos traços analisados e um quadro comparativo que responde se esse arranjo se enquadra ou não dentro do apresentado por diversas normas. Os resultados indicam que somente as características granulométricas do material não podem definir a qualidade para uso na técnica construtiva em questão

Por outro lado, é necessário reconhecer que a adição de areia na mistura de SRMF e solo analisado pode ser positiva de forma a alcançar maiores valores de resistência à compressão, além de melhorar a trabalhabilidade e a moldagem.

Pelo fato de que as amostras com baixos teores de SRMF apresentaram elevados teores de umidade e baixa trabalhabilidade, devido à aderência significativa de material nos equipamentos e a presença de fissuras inadequadas nos corpos de prova, a mistura contendo 90% de SRMF-BL apresentou curva de compactação e teores de umidade mais adequados. Adicionalmente, é importante seguir com teores elevados de SRMF pois uma maior incorporação desse material na taipa possui um relevante impacto ambiental.

4.2 Curva de compactação

Na tabela 15, são apresentados os teores de umidade e a massa específica aparente seca das misturas SRMF-solo utilizadas para o ensaio de curva de compactação.

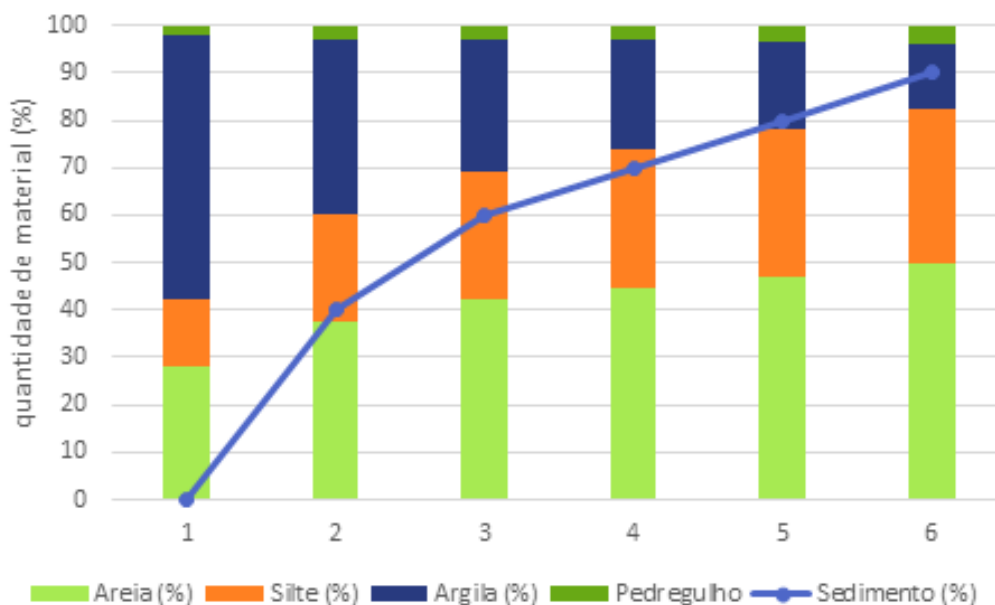
Tabela 15 - Relação entre composição das misturas, o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca

Traços	Sedimento (%)	Teor de umidade ótima (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
Solo	0	30,23	1,40
SRMF Barra Longa	40	24,56	1,61
	60	19,68	1,69
	70	16,50	1,75
	80	16,50	1,80
	90	14,58	1,93
SRMF Rio Doce	40	21,11	1,57
	60	19,19	1,67
	70	18,15	1,69
	80	16,10	1,74
	90	14,19	1,81

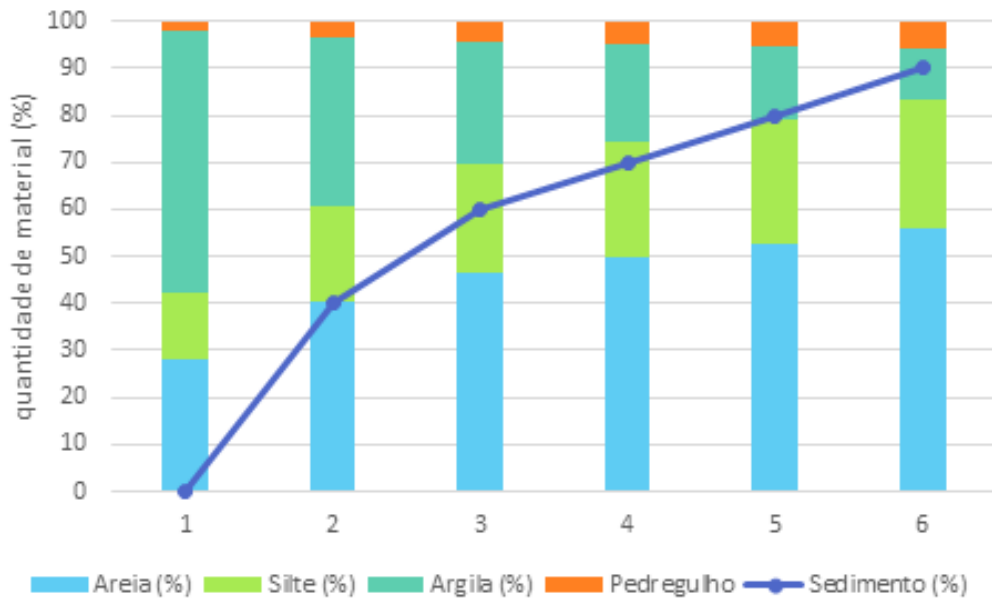
Fonte: Da autora, 2023.

Nos Gráficos 6 e 7, pode-se analisar a alteração granulométrica conforme a incorporação de SRMF.

Gráfico 6 - Relação entre quantidade de sedimento e a composição granulométrica (SRMF-BL)

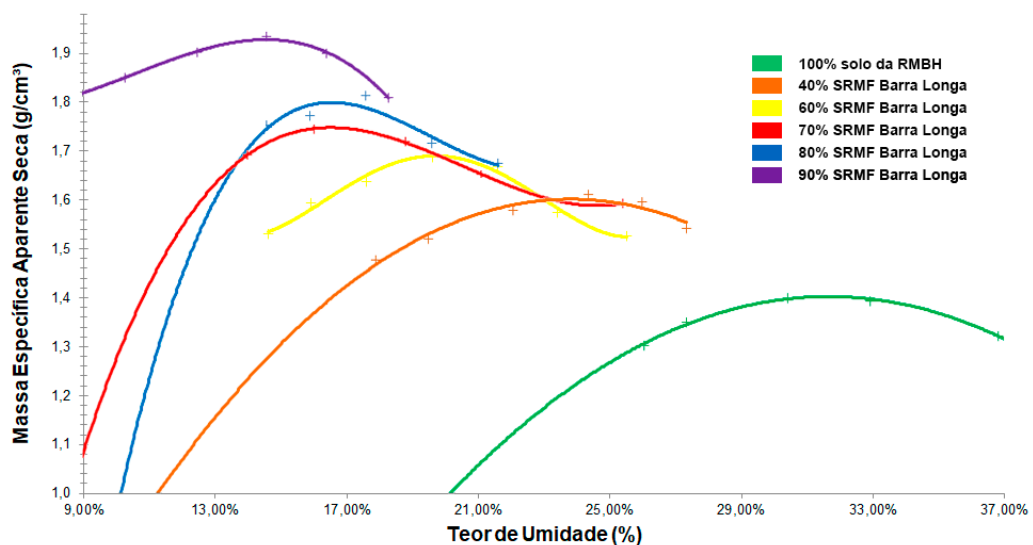


Fonte: Da autora, 2023.

Gráfico 7 - Relação entre quantidade de sedimento e a composição granulométrica (SRMF-RD)

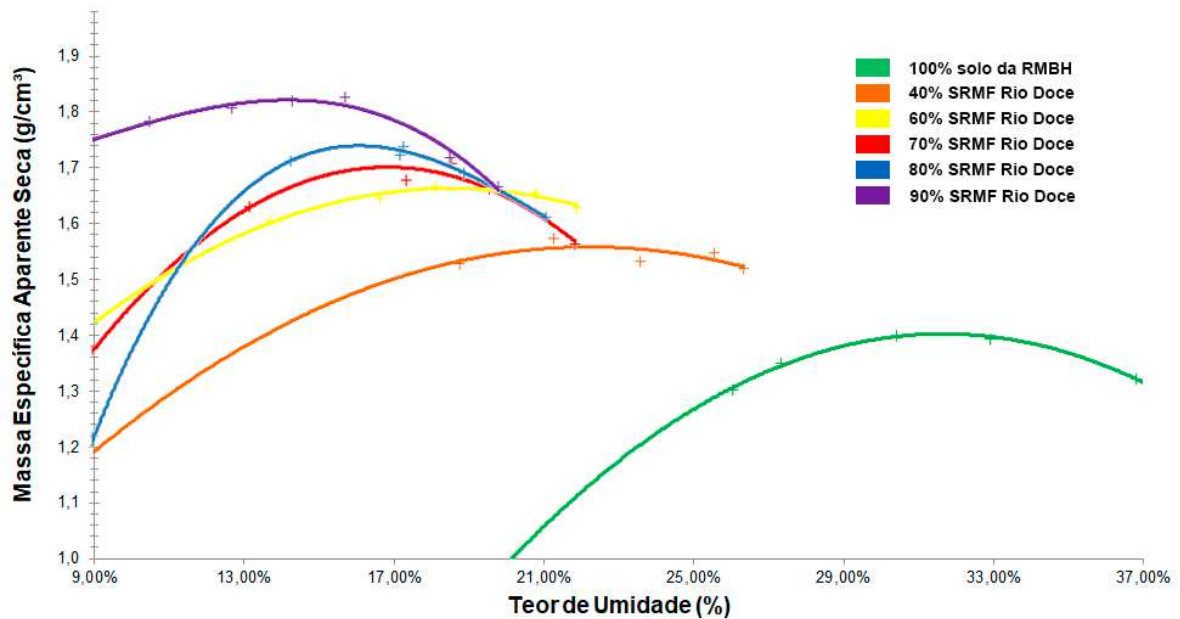
Fonte: Da autora, 2023.

A partir dos resultados do ensaio foram produzidas, também, as curvas de massa específica aparente seca versus o teor de umidade. A nível de comparação, foi adicionada a curva de compactação do solo sem a adição de SRMF em ambos os gráficos 8 e 9. Os resultados obtidos demonstram como a adição de SRMF à mistura aproximou a curva de compactação dos níveis adequados para técnica da taipa de pilão, já que a massa específica aparente seca aumentou proporcionalmente à adição de SRMF, tanto de Barra Longa quanto de Rio Doce.

Gráfico 8 – Curva de compactação das misturas com proporções diferentes entre solo e SRMF-BL

Fonte: Da autora, 2022.

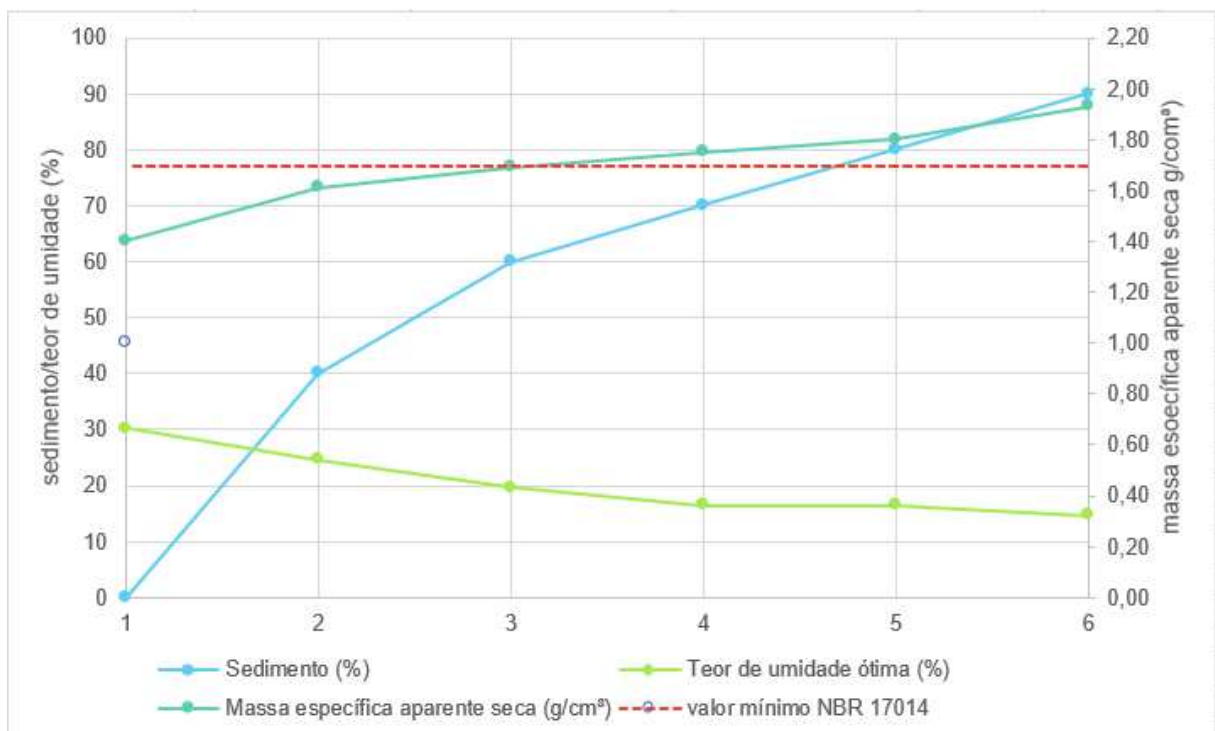
Gráfico 9 - Curva de compactação das misturas com proporções diferentes entre solo e SRMF-RD



Fonte: Da autora, 2022.

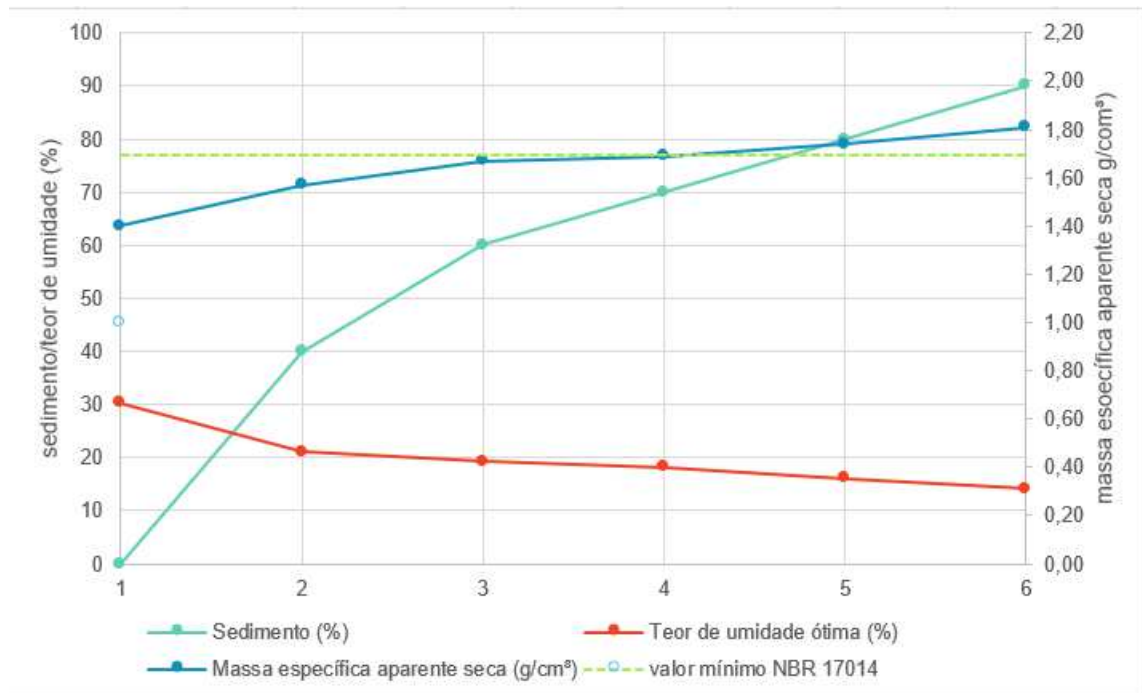
Ou seja, há uma tendência de aumento da massa específica aparente seca quando adicionado maiores teores de SRMF, tanto com as amostras de Barra Longa quanto de Rio Doce. Pode-se observar também a redução da umidade ótima conforme o aumento de quantidades de sedimento (Gráfico 10 e 11).

Gráfico 10 - Relação entre SRMF-BL, teor de umidade ótima e massa específica aparente seca



Fonte: Da autora, 2023.

Gráfico 11 - Relação entre SRMF-RD, teor de umidade ótima e massa específica aparente seca



Fonte: Da autora, 2023.

Os teores de umidade diminuíram proporcionalmente à adição de SRMF, o que consequentemente reduziu os valores de umidade ótima das misturas com maiores quantidades de incorporação do sedimento.

O aumento da massa específica aparente seca pode estar associado a um melhor empacotamento das partículas influenciados pela maior variedade de diâmetro de grãos, ocasionando menor volume de vazios. Segundo a NBR 17014 (ABNT, 2022), a mistura para execução da taipa de pilão deve apresentar valores de massa específica aparente seca maiores que 1750 kg/m^3 . Em ambos os Gráficos analisados (10 e 11) este valor está representado por meio e uma linha tracejada. O valor mínimo de 1750 kg/m^3 só foi alcançado em misturas com elevados teores de incorporação de SRMF: 70, 80 e 90% SRMF-BL e 90% SRMF-RD.

O aumento na curva de compactação das amostras pode ser percebido nos valores de massa específica seca, aos 21 dias, uma vez que os valores aumentaram com a substituição de solo por sedimento. Esse incremento pode ser devido à massa específica mais elevada do SRMF como também pode ser por conta do melhor empacotamento das partículas de solo e de SRMF.

Uma maior adição de SRMF também está relacionada com a diminuição do teor da

umidade ótima. A redução da necessidade de umidade por meio de adição de sedimento pode ser explicada pela diminuição da argila e aumento da areia na mistura, que exige menos adição de água para sua compactação (TAIZ; ZEIGER, 2003). Esse fato é interessante para a taipa de pilão, já que o solo argiloso em estado úmido provoca aderência considerável nas formas e nos outros equipamentos de trabalho durante a execução da técnica (HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011).

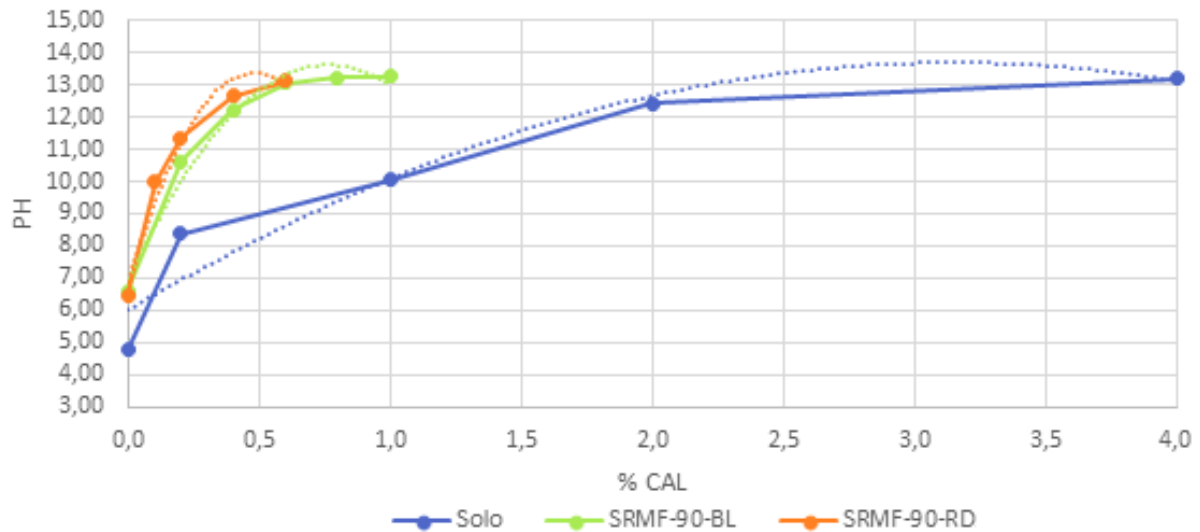
4.3 Análise do teor ótimo de cal

Na tabela 16 e gráfico 12 pode-se observar os resultados obtidos no ensaio de teor ótimo de cal. A adição de 2% de cal na mistura com 100% solo e a adição de 0,50% de cal nas misturas com 90% de SRMF obtiveram valores de pH próximos de 12,45 (CIANCIO, BECKETT e CARRARO, 2013). Foi necessário quatro vezes menos cal para saturar a água do poro nas misturas com o SRMF. Desta forma, estes foram os valores estabelecidos para a adição de cal dos traços das amostras preparadas para o ensaio de resistência à compressão.

Tabela 16 - Relação entre o teor de cal e o pH das misturas

Material	Cal (%)	pH
<i>Solo</i>	4,0	13,19
	2,0	12,43
	1,0	10,06
	0,2	8,39
	0,0	4,77
<i>SRMF-90-BL</i>	1,0	13,27
	0,8	13,21
	0,6	13,06
	0,4	12,21
	0,2	10,61
	0,0	6,61
<i>SRMF-90-RD</i>	0,6	13,14
	0,4	12,66
	0,2	11,34
	0,1	9,97
	0,0	6,46

Fonte: Da autora, 2023.

Gráfico 12 - Relação entre a variação do pH por adição de cal nas misturas analisadas

Fonte: Da autora, 2023.

Os valores de pH das misturas sem adição de cal sinalizam para um material ácido (pH abaixo de 7,0). Principalmente o solo, que apresentou um valor de pH de 4,77. O valor do pH encontrado para o solo condiz com os solos tropicais lateríticos do Cerrado (pH entre 4,0 e 5,5) (ROSOLEN *et al.*, 2012). O ambiente ácido favorece a corrosão de reforços de aço (HELENE, 1986). Por tanto, a utilização da cal em nível mínimo é interessante para elevar o pH do solo e criar um ambiente alcalino favorável para aumento da resistência e evitar a corrosão, além de que a possibilidade de estabilizar o solo com cal em detrimento do cimento, pode evitar um gasto de energia considerável (KANG; KWON; MOON, 2019).

4.4 Ensaio de resistência à compressão simples nos corpos de prova cilíndricos

Durante a incorporação de SRMF ao solo argiloso encontrado na RMBH, a questão da umidade das amostras apresentou alguns problemas. Durante as moldagens dos corpos de provas cilíndricos representativos da taipa de pilão, respeitando os valores de adição de água seguindo a umidade ótima determinada no ensaio de compactação, ficou claro que as misturas com menos conteúdo de areia (mais argilosas) apresentavam maior dificuldade de moldagem, formações de torrões e aderência nas ferramentas, mostrando-se inadequadas, talvez, para a execução da técnica.

Na figura 27, é possível perceber os problemas associados aos maiores níveis de

umidade e baixa proporção de areia nas amostras como presença de fissuras e desagregação do material no processo de desmolde.

Apesar das questões, foi importante validar a informação de que a adição de água, segundo a umidade ótima, apesar de extremamente relevante deve estar aliada a um bom arranjo granulométrico, com elevados teores de material arenoso, visto que uma mistura siltosa não funciona bem para a execução da taipa de pilão, mesmo com valor ótimo de umidade.

Figura 27 - Fissuras nas amostras com 60% de SRMF-RD



Fonte: Acervo da autora, 2023.

A aderência nas formas e as fissuras durante a desmoldagem aconteceram frequentemente com a maioria dos traços, mas principalmente aos corpos de prova que tiveram adição de menos de 90% de SRMF e que tem em comum o fato de possuírem valores consideráveis de silte e pouca areia em sua composição.

Como já mencionado anteriormente esse foi o motivo pelo qual optou-se por ensaiar apenas os corpos de prova com maior valor de SRMF incorporado e o motivo pela qual diminuiu-se os valores de adição de água proporcionalmente. Os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova podem ser observados na tabela 17:

Tabela 17 - Valores de resistência à compressão aos 31 dias

Amostra	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de variação (%)	Massa específica aos 7 dias (kg)
SRMF-0	1,45	9,33	1,69
SRMF-BL-90	1,66	10,34	2,16
SRMF-RD-90	1,34	6,07	2,10
SRMF-0-C	1,26	6,87	1,70
SRMF-BL-90-C	1,30	4,60	2,09
SRMF-RD-90-C	0,69	12,23	2,00

Fonte: Da autora, 2023.

Os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à compressão simples não confinada dos corpos de prova sugerem que as amostras BL e RD podem ser utilizadas como estabilizantes do solo argiloso para a técnica da taipa de pilão. Valores de resistência à compressão entre 1,0 e 2,0 MPa são considerados adequados para essa técnica (WALKER; AUSTRÁLIA, 2002; ABNT, 2022; SADCSTAN, 2014; ARRIGONI *et al.*, 2017).

Entretanto, todos os valores apresentados pelas misturas com solo e SRMF obtiveram os valores mínimos de resistência à compressão presente na norma brasileira de taipa de pilão, 1,3 MPa (ABNT, 2022). Apesar de os teores de cal terem sido obtidos das misturas com pH 12,45, não foi possível obter uma correlação entre a máxima resistência à compressão e solução saturada com a cal. Todas as misturas com cal tiveram seus valores diminuídos em relação à mistura sem cal, com o maior decréscimo observado para a amostra com cal e 90% de SRMF-RD (-47%). Pode-se pontuar que o ensaio foi realizado à temperatura ambiente e os mesmos autores apontaram ganhos de resistência à compressão em curas realizadas em estufas (40°C) ou até mesmo em maiores idades (entre 7 e 60 semanas).

A diminuição da resistência à compressão nas misturas com cal pode estar relacionada à redução da densidade seca causada pelos estabilizantes químicos (SIDDIQUA E BARRETO, 2018). A composição das amostras tinha, em sua maioria,

material inerte ou argila não-reativa (caulinita). Esse fato poderia justificar falta de reações químicas pretendidas com a adição de cal. Não havendo reações químicas de estabilização, a adição de cal pode ter colaborado apenas fisicamente, na redução da densidade das amostras, o que poderia justificar a diminuição dos valores resistência à compressão simples.

Outra possibilidade seria o fato de que os 31 dias de cura podem não ter sido suficientes para uma interação adequada entre a cal e o solo. Além disso, a redução da adição de água baseada no teor ótimo também pode ter influenciado os corpos de prova na qual houve a adição de cal, visto que a cal exige uma quantidade mínima de água para haver troca catiônica (CIANCIO, BECKETT E CARRARO, 2014). Por fim, foi identificado maior presença de mofo nas amostras solo-SRMF-cal, o que também pode ter interferido na resistência das amostras. Estudos mais aprofundados são necessários para compreender a relação entre o SRMF e a cal, incluindo curas mais prolongadas.

Os resultados apresentados neste trabalho visam responder a possível viabilidade do uso do SRMF de Barra Longa e Rio Doce como estabilizantes da taipa de pilão. Apesar de haver outros ensaios a serem realizados de maneira a obter uma resposta mais adequada, como por exemplo, ensaios de durabilidade, pode-se correlacionar uma relação satisfatória entre as amostras utilizadas e o solo da RMBH para a execução da taipa de pilão.

Tabela 18 - Dados gerais - características das amostras analisadas

Mistura	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica aparente seca (kg/m ³)	Teor de areia*	Teor de silte + argila*
100% solo	1,45	1400	28	70
90% BL	1,66	1930	50	47
90% RD	1,30	1810	56	38

Fonte: Da autora, 2023.

Nota: *segundo NBR 6502 (ABNT, 1995)

Na tabela 18, pode-se observar que todas as amostras alcançaram resultados acima do mínimo para a resistência à compressão. Por outro lado, os valores ideais de massa específica aparente seca, que são acima e/ou igual a 1750 kg/m³ de acordo com a NBR 17014 (ABNT, 2022), foram alcançados pelas misturas com adição de

90% de SRMF. Essa característica demonstra o grau de compactação da mistura.

É importante ressaltar, ainda, a relação entre valores mais elevados de massa específica aparente seca e os maiores teores de areia e menores valores de massa específica aparente seca associados aos menores teores de argila.

Desta forma, mesmo as curvas granulométricas estando fora do padrão apresentado pela NBR17014 (ABNT, 2022), foi possível alcançar valores adequados de resistência a compressão simples em amostras com 90% de SRMF incorporado. Esse resultado reitera a compatibilidade entre solos argilosos e rejeitos sedimentados para produção de taipa de pilão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Minas Gerais é um estado com uma vasta presença de patrimônio construído com terra, advindo ainda do período colonial brasileiro. A taipa de pilão está presente em grande parte dessas edificações. Este vasto patrimônio tem sido ameaçado não só pela falta de valorização por parte do poder público e pelo esquecimento das construções com terra, desde a Revolução Industrial até o final do século XX, no Brasil, mas também pela ocupação desenfreada da mineração e suas consequências, principalmente no Estado de Minas Gerais.

Devido a composição física do SRMF ser semelhante ao solo, ambos advindos de processos de decomposição de rochas, pode-se analisar que há uma compatibilidade mineralógica entre os dois materiais quando se trata do tamanho das partículas e composição química.

Durante esta investigação fez-se notar a importância de uma caracterização cuidadosa, principalmente quanto a curva granulométrica, curva de compactação, limites de Atterberg e tipos de argila presentes no material, visto que a atenção a essas características nas misturas de taipa de pilão são garantias de não apenas de um comportamento físico e mecânico adequado, mas também de uma boa trabalhabilidade do material.

Foi possível inferir que o teor de 90% de SRMF em substituição ao solo da RMBH seja o mais adequados, não só por promover uma distribuição granulométrica mais variada, com maior teor de areia, mas também por diminuir os valores de umidade ótima e elevar a massa específica aparente seca das amostras, de forma a melhorar a trabalhabilidade do material no estado fresco e o comportamento mecânico no estado endurecido. Mesmo não estando na faixa granulométrica indicada pela norma, as misturas com adição de 90% de SRMF apresentaram valores de resistência a compressão adequados. .

Neste sentido considera-se um problema a falta de padronização quanto a classificação dos solos e sua proporção granulométrica e principalmente a falta de padronização das normas e documentos técnicos quanto as proporções de teores granulométricos indicados para a taipa de pilão.

A diminuição da resistência à compressão nas misturas com cal pode estar relacionada à redução da densidade seca causada pelos estabilizantes químicos. Além disso, a falta de argilominerais no sedimento e no solo podem ter impedido o endurecimento esperado da relação solo-cal. Por outro lado, os 31 dias de cura e o tipo de cura podem não ter sido suficientes para uma interação adequada entre a cal e o solo. Estudos mais aprofundados são necessários para compreender a relação entre o SRMF e a cal, incluindo curas mais prolongadas.

Foi possível observar que solos de características argilosas podem se beneficiar da adição de resíduos com maiores teores de areia para se adequarem a técnica da taipa de pilão. Estes solos argilosos são muito presentes em Minas Gerais, estado da federação que no qual a extração de minério de ferro é a principal atividade econômica e que gera grandes volumes de rejeito.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. Tese de doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/6664>. Acesso em: 20 jan. 2023.
- ANM. **Classificação de Barragens de Mineração**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/plano-de-seguranca-de-barragens>. Acesso em: 19 dez. 2022.
- ARAKI, Hiroyuki; KOSEKI, Junichi; SATO, Takeshi. Tensile strength of compacted rammed earth materials. **Soils and Foundations**, Tóquio, v. 56, n. 2, p. 189–204, 2016.
- ARRIGONI, Alessandro *et al.* Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 142, p. 128–136, 2017a.
- ARRIGONI, Alessandro *et al.* Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdã, v. 137, p. 11–20, 2018.
- ARRIGONI, Alessandro *et al.* Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. **Building and Environment**, v. 115, p. 358–367, 2017b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal Hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12024**: Solo-cimento - moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17014**: taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 30**: Agregado fino - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2000b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). Pensilvânia: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3282**: Standard Practice for Classification of Soils and Soil -Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Pensilvânia: ASTM, 2015.

ÁVILA, Fernando; PUERTAS, Esther; GALLEGO, Rafael. Experimental evaluation of the optimum lime content and strength development of lime-stabilized rammed earth. **International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements**, v. 9, n. 3, p. 239–248, 2021.

BASTOS, Lucas Augusto de Castro *et al.* Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 10, p. 04016102, 2016. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001613>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BECKETT, Christopher; CIANCIO, Daniela. Rammed earth: An overview of a sustainable construction material. In: **Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/243972161>. Acesso em: 24 jan. 2021.

BUI, Quoc Bao *et al.* Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 54, p. 163–169, 2014.

BUI, Q. B. *et al.* First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings. **Engineering Structures**, v. 33, n. 12, p. 3690–3695, 2011.

CABRAL, A. E. B. *et al.* Determinação da influência do tipo de agregado reciclado de resíduo de construção e demolição sobre o módulo de deformação de concretos produzidos com agregados reciclados. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 171–192, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/riem/a/xWmKGRr7WZQzkCxmWj7gNrw/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 nov. 2022.

CALDAS, Lucas Rosse; MARTINS, Adriana Paiva de Souza; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Construção com terra no Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 12, 2021.

CALDEIRA, Altino Barbosa; LARA, Fernando Luiz. **Mapeamento do acervo arquitetônico e histórico da cidade de Mariana**. Belo Horizonte: FAPEMIG, PUCMG, 2006.

CANIVELL, Jacinto *et al.* Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 191, p. 826–836, 2018.

CARRARO, João Antônio Harb. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. 1997. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/159291>. Acesso em: 8 jul. 2023.

CARRASCO, E. V.M. *et al.* Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 131, p. 31–38, 2017.

CHEN, Zhi *et al.* Effect of incorporation of rice husk ash and iron ore tailings on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 338, 2022.

CIANCIO, Daniela *et al.* **First International Conference on Rammed Earth Construction: report**. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1680/coma.15.00038>. Acesso em: 05 jun. 2022.

CIANCIO, D.; BECKETT, C. T.S.; CARRARO, J. A.H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 53, p. 59–65, 2014.

CIANCIO, Daniela; GIBBINGS, Joshua. Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 28, n. 1, p. 294–304, 2012.

CIANCIO, Daniela; JAQUIN, Paul; WALKER, Peter. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 42, p. 40–47, 2013. Disponível em: Acesso em: 17 dez. 2022.

CORREIA, Mariana. Universalidade e diversidade da arquitetura de terra. Em: **Anais 10ª mesa redonda de primavera**. Terra: forma de construir: Arquitectura, Antropologia, Arqueologia. Portugal, 2006. p. 12–19. Disponível em: <http://www.restapia.es/files/14814>. Acesso em: 18 ago. 2020.

COSTA, Giulia Balbi Rodrigues da *et al.* Rompimento da barragem em Brumadinho: um relato de experiência sobre os debates no processo de desastres. **Saúde em Debate**, v. 44, n. spe2, p. 377–387, 2021. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/sdeb/a/MkPkWFhSZMBN5HR6SyV6C8f/?lang=pt>. Acesso em: 10 dez. 2022.

COUTO, Fernanda Resende *et al.* Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundão Dam disaster in Brazil. **Applied Soil Ecology**, v. 158, 2021.

CT-GRSA. **Nota Técnica CT-GRSA nº 13/2018**: Análise do documento “Volume 4 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 9, 2018.

DAUCE, Pedro Domingo *et al.* Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1052–1059, 2019.

DELGADO, M. Carmen Jimenez; GUERRERO, Ignacio Cañas. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 21, n. 2, p. 237–251, 2007.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. **Minas Gerais agrega valor com diversificação das exportações**, 2021. Disponível em: <https://diariodocomercio.com.br/negocios/perfil-exportador-de-minas-gerais-se-mantem-por-decadas/>. Acesso em: 5 fev. 2023.

GERMAN FOUNDATION FOR THE ENVIROMENT. **DIN 18951-1**. Berlim, 1971.

DOAT, Patrice *et al.* **Construire En Terre**. Paris: Editions Alternatives et parallèles, 1979. Disponível em: <https://archive.org/details/ConstruireEnTerre/page/n9/mode/2up>. Acesso em: 17 dez. 2022.

EIJK, Dries van; SOUZA, Vicente Custódio Moreira de. Surgimento, desenvolvimento e desaparecimento da técnica taipa de pilão no Brasil. **Conservar Patrimônio**, Lisboa, Portugal, v. 3, n. 4, p. 17–24, 2006.

EMBRAPA SOLOS. **Níveis levantamentos de solos do Brasil**, 2016. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/maps/616#more>>. Acesso em: 17 jan. 2022.

FANG, Shiqiang *et al.* New insight into the craftsmanship of sucrose-modified rammed earth-lime materials. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 21, n. 3, p. 1019–1028, 2022.

FELT, Earl J. Factors Influencing Physical Properties of soil-cement mixtures. **Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association**, n. Bulletin D5, 1955.

FERNANDES, Maria. A taipa no mundo. **digital: Revista Digital de Arqueologia, Arquitectura e Artes**, n. 1, 2013. Disponível em: https://impactum-journals.uc.pt/digital/article/view/_1_2. Acesso em: 17 jul. 2022.

FONTES, Wanna Carvalho *et al.* Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 988–995, 2016.

FOPPA, Diego. **Análise de variáveis-chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados**. 2005. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7845>. Acesso em: 8 jul. 2023.

GALVÃO, José Lucas Barros *et al.* Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, v. 200, p. 412–422, 2018.

GIUFFRIDA, G.; CAPONETTO, R.; CUOMO, M. An overview on contemporary rammed earth buildings: Technological advances in production, construction and material characterization. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Institute of Physics Publishing, 2019.

GOMES, Maria Helena Scalabrin *et al.* Política Nacional de Resíduos Sólidos: Perspectivas de Cumprimento da Lei 12.305/2010 pelos municípios brasileiros, paulistas e da região do ABC. **Revista de Administração da UFSM**, Santa Maria, v. 7, p. 93–110, 2014.

GOMES, Maria Idália; GONÇALVES, Teresa Diaz; FARIA, Paulina. Unstabilized Rammed Earth: Characterization of Material Collected from Old Constructions in South Portugal and Comparison to Normative Requirements. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 8, n. 2, p. 185–212, 2013.

DOI:10.1080/15583058.2012.683133. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583058.2012.683133>. Acesso em: 20 jan. 2023.

HALL, Matthew; ALLINSON, David. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1935–1942, 2009.

HALL, Matthew; ALLINSON, David. Assessing the moisture-content-dependent parameters of stabilised earth materials using the cyclic-response admittance

method. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 11, p. 2044–2051, 2008.

HELENE, Paulo R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1986.

HOFFMANN, Márcio Vieira. Efeito dos argilo-minerais do solo na matéria prima dos sistemas construtivos com solo cal. **Cadernos PPG-AU/UFBA**, [S. l.], v. 3, n. 1, 2007. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/ppgau/article/view/1416>. Acesso em: 15 jan. 2023.

HOFFMANN, Márcio; MINTO, Fernando; HEISE, André. Taipa de pilão. *Em*: 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.redproterra.org. Acesso em: 7 jun. 2021.

ICOMOS. **Dossiê de Tombamento de Bento Rodrigues**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://issuu.com/patrimonioculturalmpmg/docs/bentorodriguesdossietombamento>. Acesso em: 22 jan. 2023.

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não-Energéticas**. 2012. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf. Acesso em: 19 dez. 2022.

IPHAN. **Inventário nacional de bens imóveis e sítios urbanos tombados**. Brasília: IPHAN, 2007. v. 82 *E-book*. Disponível em: <https://livraria.senado.leg.br/inventario-nacional-de-bens-imoveis-e-sitios-urbanos-tombados-vol-82>. Acesso em: 22 jan. 2023.

IPT. **Rejeitos de mineração**. 2016. Disponível em: http://www.ipt.br/noticias_interna.php?id_noticia=1043%E. Acesso em: 10 jun. 2021.

JAYASINGHE, C.; FONSEKA, W. M.C.D.J.; ABEYGUNAWARDHENE, Y. M. Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 102, p. 471–477, 2016. Disponível em: Acesso em: 5 dez. 2022.

JOAQUIM, Bianca dos Santos. **Terra e trabalho: o lugar do trabalhador nos canteiros de produção da Arquitetura e construção com terra**. 2016. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-10102016-135225/>. Acesso em: 11 jun. 2022.

JOHN, Vanderley M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: Projeto entulho bom**. 1. ed. Salvador: EDITORA DA UFBA, 2001. p.

26–44.

KANG, Sung Hoon; KWON, Yang Hee; MOON, Juhyuk. Quantitative Analysis of CO₂ Uptake and Mechanical Properties of Air Lime-Based Materials. **Energies** **2019**, Vol. **12**, Page **2903**, v. 12, n. 15, p. 2903, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/15/2903/htm>. Acesso em: 16 jul. 2023.

KARIYAWASAM, K. K.G.K.D.; JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 105, p. 519–527, 2016.

KOSARIMOVAAHED, Mohammadhossein; TOUFIGH, Vahab. Sustainable usage of waste materials as stabilizer in rammed earth structures. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, 2020.

KOUTOUS, Ahmed; HILALI, El Mokhtar. A Proposed Experimental Method for the Preparation of Rammed Earth Material. **International Journal of Engineering Research & Technology**, v. 8, n. 7, 2019.

LACAZ, Francisco Antonio de Castro; PORTO, Marcelo Firpo de Sousa; PINHEIRO, Tarcísio Márcio Magalhães. Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, São Paulo, v. 42, n. 0, 2017.

LAGE, Gabriela Tavares de Lanna *et al.* Análise da viabilidade de estabilização da taipa de pilão com cimentos e rejeitos de mineração. In: **Anais [...] Seminário Arquitetura em terra: Terra como material regenerativo**. Ana Perdigão Antunes & Ana Velosa, (org.) Santiago do Cacém: CentroDaTerra, 2021. p. 21–31.

LAGE, Gabriela Tavares de Lanna *et al.* Arquitetura de terra em regiões afetadas pelo rompimento da Barragem de Fundão. In: **Anais [...] VIII Congresso de arquitetura e construção com terra no Brasil**. Terra Brasil 2022: Habitar a terra. Florianópolis: Rede Terra Brasil e UFSC, 2022. p. 232–244.

LELIS, Natália. Arquitetura na contemporaneidade: introdução. *Em*: NEVES, Célia *et al.* (org.). **Arquitetura e Construção com Terra no Brasil**. Tupã, SP: PPGARQ, 2022. v. especial, p. 118–120.

LEMOS, Carlos Alberto Cerqueira. **Alvenaria burguesa**: breve história da arquitetura residencial de tijolos em São Paulo a partir do ciclo econômico liderado pelo café. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1989.

LIN, Hongjie *et al.* Characterization of coarse soils derived from igneous rocks for rammed earth. **Engineering Geology**, v. 228, p. 137–145, 2017.

LIU, Xiangwei *et al.* A novel rammed earthen material stabilized with steel slags. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 189, p. 1134–1139, 2018.

MANGABEIRA, Alessandra Prata de Almeida. **Avaliação do efeito da porosidade nas etapas de beneficiamento de minério de ferro da Samarco**. 2009.

Dissertação de mestrado – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MEEK, Alexandra H.; BECKETT, Christopher T.S.; ELCHALAKANI, Mohamed. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 265, 2020.

MEEK, Alexandra H.; BECKETT, Christopher T.S.; ELCHALAKANI, Mohamed. Reinforcement corrosion in cement- and alternatively-stabilised rammed earth materials. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 274, 2021.

MELLAIKHAFI, Abdellah *et al.* Characterization of different earthen construction materials in oasis of south-eastern Morocco (Errachidia Province). **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, 2021.

MENDES, Beatryz C. *et al.* Technical and environmental assessment of the incorporation of iron ore tailings in construction clay bricks. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 227, 2019.

MENDES, Ludmila Cardoso Fagundes; BESSA, Sofia Araújo Lima. Análise da evolução tecnológica da taipa de pilão contemporânea. **MIX Sustentável**, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 66–77, 2021. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4650>. Acesso em: 04 dez. 2022.

MILANI, Ana Paula da Silva; LABAKI, Lucila Chebel. Physical, Mechanical, and Thermal Performance of Cement-Stabilized Rammed Earth–Rice Husk Ash Walls. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 6, p. 775–782, 2012.

MINAS GERAIS. **A mineração de ouro em Minas Gerais no século XVIII**. Promotoria Estadual de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico. Nota Técnica nº 57. Barra Longa, 2016a.

MINAS GERAIS. **Relatório**: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Belo Horizonte, 2016b.

MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO. **NORMA E.080**: Diseño y construcción con tierra reforzada. LIMA: El Peruano, 2017. Disponível em: <https://investigacion.pucp.edu.pe/grupos/ctierra/noticia-evento/publicacion-la-norma-e-080-diseno-construccion-tierra-reforzada-rne-peru/>. Acesso em: 31 jan. 2023.

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

NAVARRO, A. C. *et al.* Estabilização de blocos de terra comprimida com cal e

rejeitos de mineração. Em: **Anais [...]** 6o. Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção - ENARC. Belém: ENARC, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341945721_Estabilizacao_de_blocos_de_terra_comprimida_com_cal_e_rejeitos_de_mineracao. Acesso em: 3 fev. 2023.

NEVES, Célia *et al.* **Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra: práticas de campo**. [S. l.]: Rede Ibero-americana PROTERRA, 2010.

STANDARDS NEW ZEALAND. **NZS 4299**. Wellington: SNZ, 2020.

ORLANDO, Marcos Tadeu D'Azeredo *et al.* Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. **Chemosphere**, v. 257, p. 127184, 2020.

PAULA, João Antônio de. A mineração de ouro em Minas Gerais no século XVIII. Em: **As Minas Setecentistas**. 2. ed. Belo Horizonte: Companhia do Tempo: Autêntica, 2007. v. 1, p. 279–283.

PEIXOTO, Maria Virgínia Simão; SOUZA, Luiz Antônio Cruz; REZENDE, Marco Antônio Penido. O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais. Em: **Anais [...]** 1º Simpósio Científico ICOMOS Brasil. Belo Horizonte, MG: Instituto Metodista Izabela Hendrix, 2017. Disponível em: www.even3.com.br/Anais/eventosicomos/60252-O-ACERVO-EM-TAIPA-DE-PILAO-EM-MINAS-GERAIS. Acesso em: 11 jun. 2022.

PISANI, Maria Augusta Justi. Taipas: a arquitetura de terra. **Sinergia**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 9–15, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271829655>. Acesso em 12 dez. 2021.

PROTASIO, Fernando Nóbrega Mendes *et al.* The use of iron ore tailings obtained from the Germano dam in the production of a sustainable concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, 2021.

REATTO, Adriana *et al.* Solos do bioma Cerrado: aspectos pedológicos. Em: SANO, Sueli Matiko; ALMEIDA, Semíramis Pedrosa de; RIBEIRO, José Felipe (org.). **Cerrado: Ecologia e Flora**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2008. v. 1, p. 107–134.

REZENDE, Marco Antonio Penido de. Taipa de pilão histórica: Roteiro para reconstituição. **Arquiteturarevista**, São Leopoldo, v. 8, n. 2, p. 101–107, 2012.

RÍOS, Luis Silvio *et al.* Paredes monolíticas. Em: **Arquitecturas de tierra en Iberoamérica**. 1. ed. Buenos Aires: Fundacion Proyecto Paria; Fundacion Thomas Merle, 1994. v. 1, p. 7–10.

ROCHA, Cecília Gravina da; CONSOLI, Nilo Cesar; JOHANN, Amanda. Greening stabilized rammed earth: Devising more sustainable dosages based on strength controlling equations. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 19–26, 2014.

ROCHA NETO, João Mendes da. Os “Sem Rio”: populações desterritorializadas pelo

desastre ambiental de Mariana. **Revista Cerrados**, Montes Claros, v. 18, n. 02, p. 152–182, 2020.

ROSOLEN, Vania *et al.* Impactos da substituição da vegetação original do Cerrado brasileiro em sistemas agrícolas: alteração do carbono orgânico do solo e $\delta^{13}\text{C}$. **Investigaciones Geográficas**, v. 1, n. 79, p. 39–47, 2012.

SADCSTAN. **SADC ZD HS 983**: Rammed earth structures: code of practice. Zimbabwe: SADCSTAN, 2014.

SALDANHA, Rodrigo Beck *et al.* Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 298, 2021.

SCHATZMAYR, Thomas Welp Sá *et al.* Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 342, 2022.

SHAABAN, Mostafa. Sustainability of Excavation Soil and Red Brick Waste in Rammed Earth. **Civil Engineering and Architecture**, v. 9, n. 3, p. 789–798, 2021.

SHETTIMA, Umara Ali *et al.* Strength and Microstructure of Concrete with Iron Ore Tailings as Replacement for River Sand. In: N. Mohamed Noor & A. W. Azhari, (Org.). **E3S Web of Conferences**. Penang: EDP Sciences, 2018. p. 1–9. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/323852706_Strength_and_Microstructure_of_Concrete_with_Iron_Ore_Tailings_as_Replacement_for_River_Sand. Acesso em: 16 jul. 2021.

SIDDIQUA, Sumi; BARRETO, Priscila N.M. Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and fly ash. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 169, p. 364–371, 2018.

SILVA, Vanessa Regina Freitas. Estariam Ouro Preto e Mariana preservadas? Remanescências das formas de construir e viver. In: **Anais [...] XI Encontro nacional de pós-graduação e pesquisa em planejamento urbano e regional – ANPUR**. Salvador, Bahia: ANPUR, 2005.

SILVA, Rui A. *et al.* Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 75, p. 349–358, 2015.

SILVA, Rui A. *et al.* Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 47, p. 181–191, 2013.

SOUDANI, Lucile *et al.* Hydric characterisation of rammed earth samples for different lime concentrations. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**.

Institute of Physics Publishing, 2018.

SOUZA, C. C. I.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **Revista Matéria**: Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 194–202, 2008. DOI: 10.1590/S1517-70762008000100024 Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rmat/a/wNKCyfs53J95DWJR4pL3c8g/?lang=pt>. Acesso em: 3 fev. 2023.

SUNER, Marcia Maria Arcuri; LAIA, Paulo Otávio de; SUÑER, Rodrigo Almeida. Territórios e patrimônios na lama das negociações: desafios para a museologia comunitária na Barragem de Fundão. In: **Arquivos do museu de história natural e jardim botânico**. 2015. v. 24, p. 209–244. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/11319>. Acesso em: 23 jan. 2023.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Plant Physiology**. 3. ed. Sinauer Associates, 2003.

TOFANI, Frederico de Paula; BRUSADIN, Leandro Benedini. A arquitetura vernácula enquanto patrimônio cultural: Contribuições para sua preservação e uso sustentável. Em: **Anais[...]** 2º Seminário de Arquitetura Vernácula: Patrimônio & Sustentabilidade. Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da UFMG, 2020. p. 1–23. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/2arqvernacula/235631-A-ARQUITETURA-VERNACULA-ENQUANTO-PATRIMONIO-CULTURAL---CONTRIBUICOES-PARA-SUA-PRESERVACAO-E-USO-SUSTENTAVEL>. Acesso em: 7 jul. 2022.

TORGAL, Pacheco; EIRES, Rute; JALALI, Said. **Construção em Terra**. Braga: TECMINHO, 2009. v. 1.

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**, Edimburgo, v. 200, p. 616–629, 2019.

VAN LENGEN, Johan. **Manual do arquiteto descalço**. 2. ed. Porto Alegre: bookman, 2021. v. 1

VASCONCELLOS, Sylvio de. **Arquitetura no Brasil: Sistemas Construtivos**. 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 1979.

VENKATARAMA REDDY, B. v.; LEUZINGER, Georg; SREERAM, V. S. Low embodied energy cement stabilised rammed earth building - A case study. **Energy and Buildings**. v. 68, p. 541–546, 2014

WALKER, Peter *et al.* **Rammed earth**: design and construction guidelines. Bath: IHS BREPress, 2005.

WALKER, Peter; AUSTRALIA, Standards. **HB 195**: The Australian earth building handbook. Sydney: Standards Australia International, 2002.

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

ZAMI, Mohammad Sharif *et al.* Geotechnical properties and strength of Al-Hassa White Soil suitable for stabilized earth construction. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 8, 2022.

ZHAO, Sujing; FAN, Junjiang; SUN, Wei. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 50, p. 540–548, 2014.