

CORREÇÃO DE SOLOS PARA TAIPA DE PILÃO COM REJEITO DE MINERAÇÃO: ANÁLISE DA LITERATURA

SOIL CORRECTION FOR RAMMED EARTH WITH IRON ORE TAILINGS: LITERATURE ANALYSIS

Data de aceite: 17/07/2023 | Data de submissão: 07/07/2023

LAGE, Gabriela Tavares de Lanna, M.^a

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: gabrielat@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0018-2555>.

SANTOS, White José dos, Dr.

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: white@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7451-3365>.

BESSA, Sofia Araújo Lima, Dr.^a

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: sofiabessa@ufmg.br

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

RESUMO:

Minas Gerais destaca-se como uma das principais regiões de extração de minério de ferro no Brasil, país que é o segundo maior produtor mundial. Durante essa extração, grandes quantidades de rejeitos são geradas. No setor da Engenharia Civil e Arquitetura, há o desafio de apresentar soluções construtivas com menor impacto ambiental. A taipa de pilão surge como uma técnica construtiva sustentável devido à sua baixa energia incorporada em comparação com técnicas convencionais. Portanto, este artigo propõe analisar a possibilidade do uso do rejeito de minério de ferro (RMF) como estabilizante físico para solos da taipa de pilão. Não foram encontradas pesquisas sobre este uso especificamente. No entanto, constatou-se que o RMF pode ser viável para a correção granulométrica dos solos da taipa de pilão ou como substituto de materiais base, devido às suas características físicas, químicas e mineralógicas adequadas, especialmente quando requerem percentuais de areia, areia fina ou silte.

PALAVRAS-CHAVE:

Rejeito de minério de ferro. Taipa de pilão. Estabilização de solos. Sustentabilidade. Resíduos.

ABSTRACT:

Minas Gerais stands out as one of the main iron ore extraction regions in Brazil, the world's second largest producer. During this extraction, large amounts of waste are generated. In the Civil Engineering and Architecture sector, there is the challenge of presenting construction solutions with less environmental impact. Rammed earth emerges as a sustainable construction technique due to its low embodied energy compared to conventional techniques. Therefore, this paper proposes to analyze the possibility of using iron ore tailings (RMF) as a physical stabilizer for rammed earth soils. No research on this use specifically was found. However, it was found that RMF can be viable for grain size correction of rammed earth soils or as a substitute for base materials due to its suitable physical, chemical and mineralogical characteristics, especially when requiring percentages of sand, fine sand or silt.

KEYWORDS:

Iron ore tailings. Rammed earth. Soil stabilization. Sustainability. Waste reuse.

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução industrial há uma demanda cada vez maior de minerais e consequentemente de rejeitos também (SCHATZMAYR *et al.*, 2022). Durante os processos de extração e beneficiamento de minérios, grandes quantidades de resíduos são produzidas (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 seus concentrados (37%). Uma das alternativas mais utilizadas na destinação desses rejeitos é a construção de barragens de mineração, onde esses materiais ficam dispostos na forma de polpa ou de lama (IPEA, 2012). No Brasil, há pouco mais de 800 barragens de mineração e destas, apenas 50% estão inseridas na política nacional de segurança de barragens (ANM, 2020).

Além do considerável volume de resíduos produzidos no país, a forma como o RMF é estocado tem provocado ameaças ao ambiente e à população. A deposição de RMF em barragens tornou-se uma preocupação constante devido à má gestão e aos riscos inerentes. No estado de Minas Gerais ocorreram, nos últimos anos, dois dos maiores desastres ambientais do Brasil. Em 2015, o rompimento da Barragem de Fundão, em Bento Rodrigues, subdistrito do município de Mariana, que provocou o deslocamento de RMF por 663 km até o litoral (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017) e, em 2019, o rompimento da Barragem B1, na mina do Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, que provocou a morte de mais de 270 pessoas (COSTA *et al.*, 2021).

De forma paralela, há o fato de que o setor da construção civil é reconhecido como um dos principais geradores de impacto ambiental. 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 formações rochosas e causam alterações drásticas no meio ambiente, além de materiais com alto 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 acumulados no meio ambiente.

Desta forma, é acordo que há um desafio no setor da Engenharia Civil e Arquitetura de apresentar soluções construtivas mais sustentáveis (SIEFFERT; HUYGEN; DAUDON, 2014) Dentre as técnicas construtivas com grande potencial sustentável encontra-se a taipa de pilão, devido a possibilidade de ser produzida com baixa energia incorporada (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019; MELLAIKHAFI *et al.*, 2021), advinda da viabilidade de executá-la com solo local, promovendo limitado transporte de materiais (BECKETT; CIANCIO, 2013). Além disso, há investigações acerca da capacidade das construções com terra de equilibrarem a umidade e temperatura interior do ambiente (MINKE, 2022), uma característica que pode auxiliar no melhor controle do conforto térmico das edificações (MELLAIKHAFI *et al.*, 2021).

A estabilização da taipa de pilão visa colaborar com o aumento de sua resistência e durabilidade, sendo uma prática frequente nos países desenvolvidos que utilizam a

técnica (HALL; ALLINSON, 2009a). Segundo Arrigoni *et al.*, (2017) a incorporação de cimento como estabilizante eleva a durabilidade da taipa de pilão. Entretanto, a análise de ciclo de vida realizada pelo autor revelou um aumento significativo do impacto ambiental da técnica construtiva quando o cimento, principalmente com conteúdo de clínquer, foi utilizado como estabilizante.

Desta forma, o autor recomenda 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, Beckett, et al., 2017). Sendo assim, há uma lacuna acerca da possibilidade de se utilizar alguns resíduos como estabilizantes já que os materiais alternativos tendem reduzir a energia incorporada da técnica entre 50 e 100% (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019).

Dentro do setor da construção civil o uso do RMF já vem sendo estudado e empregado com diversas finalidades: como substituto parcial do cimento (CHENG *et al.*, 2016; SHETTIMA *et al.*, 2018; MORAIS *et al.*, 2021); e como substituto da areia para concreto (PROTASIO *et al.*, 2021); na produção de tijolos cerâmicos (LI *et al.*, 2019; MENDES *et al.*, 2019); como pigmento de tintas (GALVÃO *et al.*, 2018); como agregado de argamassa de revestimento (CARRASCO *et al.*, 2017; FONTES *et al.*, 2016; MORAIS *et al.*, 2021); como adição mineral em argamassas estruturais (ALMADA, B. *et al.*, 2022; ALMADA, B. S. *et al.*, 2022; DUARTE *et al.*, 2022; LINHARES *et al.*, 2021). Destaca-se ainda o uso como estabilizante de blocos de terra comprimida (NAVARRO *et al.*, 2019) que demonstrou aumento na resistência a compressão e diminuição da absorção por capilaridade em teores incorporados com até 30% de RMF. Como estabilizante para pavimentação, foi analisado que porcentagens entre 10 e 20% de rejeito e obtiveram valores adequados de resistência do pavimento e se 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);

Estudos demonstram, entre diversas características do RMF, o comportamento inerte e o formato de partículas angulares e irregulares, superfície porosa e rugosa, além da presença relevante de minerais, como o ferro (SHETTIMA *et al.*, 2018; ZHAO; FAN; SUN, 2014). Além disso, a composição granulométrica do RMF pode variar de região para região, mas ainda assim é possível uma comparação em relação ao diâmetro de grãos de autores que realizaram a caracterização do RMF com a granulometria da areia natural (SHETTIMA *et al.*, 2018; ZHAO; FAN; SUN, 2014). Alguns estudos demonstram compatibilidade entre o rejeito e o solo, o que pode ser devido ao fato de que ambos são advindos de processos de decomposição de rochas ou pelo fato de ambos (solo e rejeito) serem ricos em sílica (SiO₂). Entretanto não há ainda referências na literatura a respeito do uso do RMF como estabilizante para a taipa de pilão.

Desta forma, é importante realizar um levantamento sobre as características do RMF e verificar a possibilidade da sua incorporação à técnica de taipa de pilão. Portanto, são objetivos deste artigo: i) realizar uma revisão da literatura sobre o RMF com foco em estabilização de solos; ii) mapear os produtos já usados como estabilizantes físicos da taipa de pilão com o RMF; e iii) avaliar a possibilidade de uso do RMF como estabilizante de solos em taipa de pilão baseado em características físicas e granulométricas.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O método empregado tem como base a pesquisa bibliográfica, de forma a realizar uma revisão da literatura sobre as propriedades do RMF como estabilizante físico, principalmente em relação à granulometria e à composição química, bem como sobre o uso de diferentes materiais utilizados como estabilizantes para a taipa de pilão.

Os métodos a serem utilizados são: i) a coleta de dados documentais (identificação, localização, compilação e fichamento) (Tabela 1); e ii) a análise e a interpretação dos dados, representados através de tabelas. A coleta de dados teve como fonte documental cinco bases de dados: i) Scopus; ii) ScienceDirect; iii) Sielo; iv) Horizon Research; v) MDPI.

Tabela 1: 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: autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A estabilização do tipo cimentícia na taipa de pilão vem sendo amplamente utilizada nos últimos anos como forma de melhorar sua durabilidade. O uso de cimento ou cal como estabilizantes colaboram com aumento da resistência à compressão da taipa de pilão, além de reduzir a retração e a desagregação das paredes (ARRIGONI; BECKETT; *et al.*, 2017). O uso do cimento também demonstra ter maior eficácia em paredes de taipa reforçadas com aço (MEEK; BECKETT; ELCHALAKANI, 2021), evitando a corrosão do reforço estrutural. De acordo com (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 ainda torna a energia incorporada da técnica menor que a energia incorporada 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 é considerada uma opção de construção sustentável (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016).

Entretanto, segundo Arrigoni *et al.*, (2017) a incorporação de cimento, principalmente com a adição de clínquer, como estabilizante da taipa de pilão, diante da análise de ciclo de vida, eleva o impacto ambiental da técnica construtiva se comparada a taipa de pilão não estabilizada. Desta forma, o autor recomenda o uso de materiais alternativos ao cimento para atuar como estabilizantes da taipa de pilão, de forma a diminuir os valores de energia incorporada à taipa de pilão estabilizada (ARRIGONI; BECKETT; *et al.*, 2017).

Em relação ao uso dos resíduos, 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 (ARRIGONI *et al.*, 2017a). Arrigoni *et al.*, (2017) 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 manter a técnica considerada de baixo impacto. 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 (SIDDIQUA; BARRETO 2018; KOSARIMOVAHHED; TOUFIGH 2020; LIU *et al.*, 2018;). Além de guar e fibra de vidro (TOUFIGH; KIANFAR 2019) e cinza da casca do arroz (MILANI, LABAKI 2012).

Siddiqua e Barreto (2018) utilizaram os subprodutos carbonato de cálcio e cinzas volantes, que atuaram como estabilizantes químicos, e alcançaram valores acima de 3 MPa de resistência à compressão. O uso de cinzas volantes em solos também foi analisado por da 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 MPa. Kosarimovahhed e Toufigh, (2020) analisaram o uso de cinzas volantes e cimento para alcançar resultados suficientes de resistência à compressão, em uma mistura de 0,7% de cimento e 6,5% de cinzas volantes

Liu *et al.*, (2018) testaram 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, 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. (MILANI; LABAKI, 2012) apresentaram o uso de resíduo de cinza da casca do arroz em porcentagens de 7,5%, junto de 10 a 13% de cimento para melhorar as propriedades de solos arenosos para a taipa de pilão.

A maioria dos resíduos encontrados como estabilizantes para a taipa de pilão na literatura representam estabilização por tratamento químico: “agrega ao solo diversas substâncias capazes de formar compostos estáveis com os elementos da argila” (NEVES *et al.*, 2010, p. 13) ou cimentícia: adição de material que atua através 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).

Ressalta-se que alguns autores (LIN *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2013) entendem como estabilização apenas a adição de produtos cimentantes e tratamentos químicos, porém tal proposição não é consenso. Este artigo apresenta uma abordagem mais ampla, na qual a estabilização de solos pode ser entendida também como uma ação mecânica/física, como por exemplo, a correção granulométrica do solo (GIUFFRIDA; CAPONETTO; CUOMO, 2019; HALL; ALLINSON, 2009b; NEVES *et al.*, 2010).

A correção granulométrica do solo corresponde à mescla de diferentes materiais para se obter proporções mais adequadas entre as dimensões dos grãos (NEVES *et al.*, 2010). Uma das formas mais comuns e recomendadas de estabilização de solos para a taipa de pilão é por meio da correção granulométrica com adição de areia - em casos de solo argiloso (ABNT, 2022; HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011; KOUTOUS; HILALI, 2019b; MELLAIKHAFI *et al.*, 2021; NEVES *et al.*, 2010). Para a realização da taipa de pilão ou qualquer construção com terra, uma das características mais importantes a se atentar em relação ao material é a sua distribuição granulométrica em relação ao bom empacotamento das partículas (HALL; ALLINSON, 2009a) pois este influencia diretamente na densidade e resistência das paredes (LIN *et al.*, 2017).

Entretanto já é consenso na literatura sobre o tema de que o tamanho do grão não é o único fator físico que interfere na qualidade das paredes de taipa de pilão, tendo-se que considerar também a característica plástica e a rugosidade, o ângulo/forma e a aspereza dos grãos (KOUTOUS; HILALI, 2019b)

Como apresentado acima, a maioria dos resíduos empregados como estabilizantes para a taipa de pilão na literatura são estabilizantes químicos ou cimentícios. O uso

de conceitos de empacotamento de partículas permitirá a mescla de diferentes materiais para se obter proporções mais adequadas entre as dimensões dos grãos (NEVES *et al.*, 2010).

Essa circunstância se dá pelo fato de que, para a boa execução da técnica faz-se necessário solos mais arenosos, mas com coesão adequadas à compactação. Autores sugerem frações de solos para a taipa de pilão, assim como é possível encontrar sugestão de teores em algumas normas técnicas (Tabela 2). Há uma enorme variação em relação aos teores, o que deve ser por conta de as características dos solos serem muito diversas, visto ser um material natural (DELGADO; GUERRERO, 2007).

Tabela 2: Recomendações relativas aos teores das frações do solo.

Tipo de fonte	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	-	-	<35	-
	SADAC 983	5 a 15	15 a 30	50 a 70	
	IETcc	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		20 a 35	50 a 80	-
	CraTerre	15 a 25	20 a 35	40 a 50	0 a 15

Fonte: Autores.

Um mínimo teor de argila é necessário, pois adiciona coesão à terra, entretanto o excesso está relacionado ao aumento da retração à dificuldade de trabalhabilidade (HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011) e ao aumento da 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 à compressão da taipa de pilão (KOUTOUS; HILALI, 2019a).

Ao se discutir o grau de compactação por adequada 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 alguns autores que apresentaram análises do uso de resíduos com esta finalidade (Tabela 3), 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 3: Tipos de materiais encontrados que fazem o papel de 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: Autores. * f_c corresponde a resistência à compressão aos 28 dias de secagem para todas as amostras

As proporções da utilização de resíduos nas misturas encontradas são consideráveis (a partir de 44%), o que é um indicativo de que o emprego de resíduo via substituição granulométrica promove a destinação de notável volume destes materiais, considerando as particularidades dos solos usados em cada estudo. Além disso a maioria dos traços apresentados atingem resultados de resistência a compressão satisfatórios de acordo com a literatura, que ficam entre 1 e 2 MPa (ABNT, 2022; ARRIGONI; BECKETT; *et al.*, 2017; SADCSTAN, 2014; WALKER; AUSTRALIA, 2002).

A investigação dos autores reitera a importância da distribuição granulométrica em construções com terra, visto que a curva granulométrica das amostras foi o único dado de caracterização em comum apresentado em todos os trabalhos analisados. Através da média diâmetro dos grãos dos resíduos em destaque (Tabela 4) fica claro que a maioria dos materiais foi incorporado atuando como material arenoso, já que levando em consideração a Tabela 2, a maior demanda em termos granulométricos da taipa de pilão é justamente a areia.

Levando-se em consideração as características do solo necessários para atingir qualidade necessária para a taipa de pilão e as características dos materiais utilizados para estabilizar fisicamente o solo quando este não apresenta uma faixa granulométrica adequada, identifica-se como possibilidade a incorporação do RMF como estabilização física para a técnica. Ainda que não tenha sido encontrada pesquisas que relacionem o resíduo de mineração de ferro com a taipa de pilão, entende-se que o RMF apresenta características adequadas para essa associação.

Tabela 4: Índice de diâmetro de grãos dos resíduos investigados

MATERIAL	AUTORES	D ₁₀ (MM)	D ₃₀ (MM)	D ₆₀ (MM)
Solo vulcânico residual	(LIN <i>et al.</i> , 2017)	0.012	0.12	0.40
Granito completamente decomposto	(LIN <i>et al.</i> , 2017)	0.002	0.30	1.1
Agregado de concreto reciclado	(ARRIGONI <i>et al.</i> , 2018)	0.250	1.00	7.50

Agregado de concreto reciclado	(JAYASINGHE <i>et al.</i> , 2016)	0.150	0.45	1.25
Tijolo e concreto reciclado	(MEEK <i>et al.</i> , 2021)	0.350	0.65	2.00
Tijolo vermelho triturado	(SHAABAN, 2021)	0.500	2.15	9.10

Fonte: Autores.

O RMF é heterogêneo e apresenta diversidades físicas, químicas, mineralógicas, granulométricas e de dureza. Assim sendo, as jazidas e o tipo de beneficiamento do RMF podem influenciar na sua heterogeneidade. O RMF possui características inertes e pode atuar como filer (SHETTIMA *et al.*, 2018; ZHAO; FAN; SUN, 2014). Contudo eles apresentam granulometria diversa (Tabela 5) a depender do processo de beneficiamento e características da jazida. Observa-se que as dimensões dos grãos variam desde areia até siltes e argilas, logo a correção granulométrica a ser feita deverá atender um arranjo ideal para um bom empacotamento das partículas, através da combinação entre diferentes tipos de solo e tipos de RMF com grãos com dimensões distintas.

Tabela 5. Diversidade da granulometria do RMF presentes na literatura

AUTORES	ORIGEM	FAIXA GRANULOMÉTRICA
(PROTASIO <i>et al.</i> , 2021)	Brasil	0,01mm e 0,3 mm
(CARRASCO <i>et al.</i> , 2017)	Brasil	0,01mm e 0,1mm
(MAGALHÃES <i>et al.</i> , 2018)	Brasil	< 0,036mm
(FONTES <i>et al.</i> , 2016)	Brasil	<2,4mm
(DAUCE <i>et al.</i> , 2019)	Brasil	0,037mm e 6,3mm
(SHETTIMA <i>et al.</i> , 2018)	Malásia	,15mm e 1,5 mm
(ZHAO; <i>et al.</i> , 2014)	China	0,003mm e 0,5 mm
(LI <i>et al.</i> , 2019)	China	<0,046mm

Fonte: valores aproximados adaptados de: (CARRASCO *et al.*, 2017; DAUCE *et al.*, 2019; FONTES *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2019; MAGALHÃES *et al.*, 2018; PROTASIO *et al.*, 2021; SHETTIMA *et al.*, 2018; ZHAO *et al.*, 2014)

Partindo das características iniciais do RMF discutidas, observa-se a forte possibilidade de uso como estabilizante para a taipa de pilão. Entretanto, apesar destes valores granulométricos serem um indicativo inicial de que as características do RMF podem ser compatíveis com estabilização de solos para a taipa de pilão, considera-se essencial que outras análises, como os limites de *Atterbeg*, sejam realizados, visto que são meios de caracterizar o solo já muito disseminados na literatura (CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013; KOUTOUS; HILALI, 2019a).

Ainda assim, ressalta-se que estudos sobre o comportamento dos materiais aplicados a técnica da taipa de pilão ainda são muito escassos e frequentemente distintos dos ensaios realizados durante a caracterização de um material para aplicação no setor da construção civil, já que a maioria dos ensaios de tecnologias com terra são baseados em estudos da geotecnia e estes testes laboratoriais nem sempre são os mais adequados para entender as características da tecnologia (CIANCIO *et al.*, 2015) e insuficientes para obter dados concretos sobre estabilização com resíduos. Ensaios de caracterização da morfologia das partículas, volume de vazios, análise de pH, reatividade das argilas e atividade pozolânica, por

exemplo, poderiam ser sugeridos na norma de taipa de pilão para obter maiores informações sobre o material utilizado para a técnica.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É de extrema relevância, por conta do cenário de aquecimento global, que sejam analisadas possibilidades de estabilização do tipo física dentro da técnica de taipa de pilão. Desta forma, tende-se a preservar a baixa energia incorporada da técnica e evitar, se possível, o uso de materiais cimentícios. O uso de resíduos para este propósito agrega muitas vantagens ambientais desde que seu uso esteja associado a uma escala regional, sem que seja gasta energia para o seu transporte. O uso da técnica de empacotamento de partículas tende a maximizar, também, as propriedades mecânicas e de durabilidade se usado junto à estabilização do tipo química.

Desta maneira este artigo analisou a viabilidade do uso do RMF como estabilizante da taipa de pilão nas regiões onde a extração do minério é frequente e o seu excedente ainda é estocado em barragens. Devido as características físicas, químicas e mineralógicas do rejeito, há expectativas de que tenha um comportamento adequado (inerte) para colaborar com uma curva granulométrica bem distribuída em tipos de solos que demandem principalmente material com características de areia, areia fina ou silte.

Por fim, reitera-se a importância da investigação de estudos padronizados e adotando-se os conceitos de ciências dos materiais para a caracterização de solos e do RMF a serem incorporados na arquitetura de terra, explorando para além dos ensaios geotécnicos, a fim de alcançar maior eficácia na estabilização da taipa de pilão.

REFERÊNCIAS

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

ALMADA *et al.* Evaluation of mechanical properties and durability indicators of mortars with addition of iron ore tailings. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais**. Porto Alegre: ANTAC, 2022.

ALMADA *et al.* Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1947–1962, 1 maio 2022.

ARRIGONI, *et al.* Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 128–136, 1 jul. 2017.

ARRIGONI *et al.* Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, p. 11–20, 1 out. 2018.

ARRIGONI *et al.* Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilisation: an experimental investigation. **Building and Environment**, v. 115, p. 358–367, 1 abr. 2017.

BECKETT, C.; CIANCIO, D. **Rammed earth**: An overview of a sustainable construction material. A report prepared for the Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 2013.

CABRAL *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**, v. 1, n. 2, p. 171–192, jun. 2008.

CARRASCO *et al.* Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and non-destructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31–38, 2017.

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

CHENG, *et al.* Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 164–170, 2016.

CIANCIO *et al.* **First International Conference on Rammed Earth Construction**. A report prepared for the First International Conference on Rammed Earth Construction, 2015.

CIANCIO *et al.* Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 40–47, 2013.

COSTA *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.

AUCE *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.

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

DUARTE *et al.* Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. **Journal of Building Engineering**, v. 59, 2022.

FONTES *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.

GALVÃO *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 *et al.* An overview on contemporary rammed earth buildings: Technological advances in production, construction and material characterization.

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais**. Institute of Physics Publishing, 2019

HALL, M.; ALLINSON, D. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 4, p. 740–747, 2009a.

_____. Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1935–1942, 2009b.

HOFFMANN, *et al.* Taipa de pilão. *Em*: NEVES, C.; FARIA, O. B. (Eds.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 1–79.

JAYASINGHE *et al.* Load bearing properties of composite masonry constructed with recycled building demolition waste and cement stabilized rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 471–477, 2016.

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

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. *Em*: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**: projeto entulho bom. 1. ed. Salvador: EDITORA DA UFBA, 2001. p. 26–44.

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

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

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

_____. Grain shape effects on the mechanical behavior of compacted earth. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, 2019b.

LACAZ, *et al.* Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 42, n. 0, 2017.

LI, *et al.* Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 43–50, 2019.

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

LINHARES *et al.* Influence of Addition Contents of Iron Ore Tailings on Structural Mortar. **Journal of Management and Sustainability**, v. 11, n. 1, p. p74, 2021.

MAGALHÃES *et al.* Iron Ore Tailing as Addition to Partial Replacement of Portland Cement. **Materials Science Forum**, v. 930, p. 225–230, 2018.

MEEK *et al.* Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Durability with and without water repellent. **Construction and Building Materials**, v. 265, 2020.

____. Reinforcement corrosion in cement- and alternatively-stabilised rammed earth materials. **Construction and Building Materials**, v. 274, 2021.

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

MILANI, A. P. DA S.; LABAKI, L. C. 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.

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

MORAIS *et al.* Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**, v. 268, 2021.

NAVARRO *et al.* Estabilização de blocos de terra comprimida com cal e rejeitos de mineração. 6o. Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção - ENARC. **Anais...**Belém: ENARC, 2019.

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

PROTASIO *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.

REDDY, B. V. V.; JAGADISH, K. S. Embodied energy of common and alternative building materials and technologies. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 2, p. 129–137, 2003.

ROCHA *et al.* Greening stabilized rammed earth: Devising more sustainable dosages based on strength controlling equations. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 19–26, 2014.

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

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

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

SHETTIMA *et al.* Strength and Microstructure of Concrete with Iron Ore Tailings as Replacement for River Sand. Web of Conferences. **Anais...**Penang: EDP Sciences, 2018.



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

SIEFFERT *et al.* Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering-architecture collaboration. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 125–138, 2014.

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

TOUFIGH, V.; KIANFAR, E. The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 616–629, 2019.

WALKER, P.; AUSTRALIA, S. **HB 195: The Australian earth building handbook**, 2002.

ZAMI *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 *et al.* Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 540–548, 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPMIG pelo financiamento desta pesquisa (Projeto APQ05495-18).