

## **A influência da areia e do cimento na compactação de solo laterítico e sedimento de rejeito de minério de ferro**

### ***Influence of sand and cement on the compaction of laterite soil and iron ore tailings sediment***

**Jhade Iane Cunha Vimieiro, Arquiteta e Urbanista, UFMG.**

jhadevimieiro@gmail.com

**Sofia Araújo Lima Bessa, Doutora em Engenharia Urbana, Professora UFMG.**

salbessa@gmail.com

**Lorena Andrade de Freitas Silva, UFMG.**

fandranelorena@gmail.com

**Ana Carolina Santana Arantes, UFMG.**

acsntana@gmail.com

**Talita Caroline Miranda, UFMG.**

talita@etg.ufmg.br

#### **Resumo**

Os solos lateríticos apresentam uma variação significativa em suas características, dependendo do processo de laterização sofrido. Devido a essa diversidade, pode ser necessário ensaios físico-químicos e mecânicos para avaliar a viabilidade de utilização do solo laterítico. Esta pesquisa teve como objetivo realizar o ensaio de compactação de solo laterítico com incorporação de sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), areia e cimento com o intuito de avaliar a mistura que apresentasse resultados adequados para a taipa de pilão. Concluiu-se que a areia e o cimento contribuíram positivamente para diminuir a umidade ótima de compactação e aumentar a massa específica aparente seca nas misturas em que não havia SRMF, contudo, nas misturas com SRMF, o cimento e a areia não influenciaram significativamente.

**Palavras-chave:** Ensaio de compactação; Solo laterítico; Taipa de pilão; CPII; Rejeito de minério de ferro.

#### **Abstract**

*Lateritic soils vary significantly in their characteristics, depending on the laterisation process they have undergone. Due to this diversity, physicochemical and mechanical tests may be necessary to assess the feasibility of using laterite soil. This research aimed to carry out compaction tests on laterite soil with the incorporation of iron ore tailings sediment (IOTS), sand and cement to assess the mixture that would produce suitable results for rammed earth. It was concluded that sand and cement made a positive contribution to reducing the optimum compaction moisture and increasing the dry apparent specific mass in mixtures without IOTS, but in mixtures with IOTS, cement and sand did not have a significant influence.*

**Keywords:** *Compaction test; Lateritic soil; Rammed earth; Iron ore tailings.*

## 1. Introdução

A laterização é um processo natural de degradação de rochas causado por condições atmosféricas e geológicas [01]. Os solos lateríticos são o produto desse processo de intemperismo, originados de rochas compostas essencialmente por óxidos de ferro e alumínio, além de quartzo. Esses solos são predominantemente encontrados em regiões tropicais e subtropicais [02]. Estima-se que cerca de 8% da superfície terrestre seja coberta por solos lateríticos, e o Brasil possui esses solos presentes em quase todas as regiões.

A fração argila de solos lateríticos é predominantemente composta por argilominerais do grupo caulínico [03]. Entre os três principais argilominerais, a caulinita é o que possui maior área de superfície, porém, com a menor atividade de argila [04]. Sua estrutura consiste na repetição de camadas de lâminas de sílica gibsita elementares em uma rede cristalina 1:1. A presença de argila pouco expansiva é frequente em solos lateríticos em regiões de clima tropical, como é o caso de Minas Gerais, no qual a laterização é condicionada pela lixiviação do solo [05].

O comportamento hidráulico e mecânico dos argilominerais é influenciado pelo processo de laterização sofrido [01]. Devido a essa variação, há dificuldade em prever o comportamento desses materiais quando submetido à ação do clima. Portanto, pode ser necessária a realização de diversos ensaios físico-químicos e mecânicos e, assim, avaliar a viabilidade de utilização do solo laterítico [06].

O ensaio de compactação é uma prática comum utilizada para estudo de solos. Em estado natural, o solo possui elevado índice de vazios que são preenchidos com ar. Durante a compactação, a aplicação de energia mecânica remove o ar, aumentando a densidade do solo e reduzindo seus espaços vazios [07]. A medida do grau de compactação do solo é feita com base na sua massa específica aparente seca.

Além de ser útil em várias áreas da construção civil, a técnica construtiva taipa de pilão também se beneficia do conhecimento que pode ser adquirido no ensaio de compactação e é inclusive um dos parâmetros exigidos pela NBR 17014 [08], reforçando sua importância para a qualidade desta técnica construtiva.

A taipa de pilão é uma técnica construtiva em que a parede é executada com terra compactada dentro de fôrmas removíveis, resultando em elemento monolítico. Desta forma, uma compactação adequada pode aumentar a resistência da parede. Contudo, alguns autores afirmam que a vulnerabilidade da taipa de pilão aumenta quando se utiliza solos lateríticos devido a estes solos alterarem suas propriedades ao interagirem com a atmosfera [09].

Pesquisas têm usado estabilizantes para melhorar as características físicas e mecânicas de solos lateríticos. Wahab *et al.* [09] estudaram a influência de 3, 6, 9 e 12% de adição de cimento em solo laterítico na compactação, durabilidade e resistência à compressão. A compactação do solo aumentou à medida que o cimento foi adicionado. Caro *et al.* [10] constataram que entre 2% e 6% de cimento pode ser suficiente para estabilizar solos lateríticos.

Outro estudo utilizou resíduos agrícolas para estabilização de solo lateríticos para produção de adobes. Os autores concluíram que adição de cinza de osso e cinza de palma contribui para um aumento de 129% na resistência à compressão das amostras. Outro estudo utilizou areia contaminada com óleo para estabilização de solo laterítico. Foi constatado que 20% da areia contaminada poderia ser adequada para estabilização [11].

Lage *et al.* [12] utilizou sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF) em substituição ao solo em cinco teores, para estabilização de solo laterítico para moldagem de taipa de pilão. A autora demonstrou que a compactação aumentou e a umidade ótima diminuiu à medida em que se adicionou SRMF. Em suma, diferentes estabilizantes foram discutidos na literatura, e a utilização de resíduos industriais surge como uma alternativa viável para mitigar o impacto ambiental.

Considerando a disponibilidade de solos lateríticos no Brasil, a crescente demanda por construção com terra e a urgência na utilização de rejeito de minério de ferro, este estudo teve como objetivo realizar o ensaio de compactação de solo laterítico com incorporação de SRMF, areia e cimento para taipa de pilão e avaliar a mistura com resultados mais adequados para taipa de pilão.

## 2. Materiais e métodos

O solo utilizado foi coletado na Região Metropolitana de Belo Horizonte. O sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF) foi dragado do leito do afluente do Rio Doce na cidade de Barra Longa após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão e da sedimentação do material.

O solo e o SRMF passaram por caracterização mineralógica através do ensaio de difração de raios X (DrX); caracterização química por meio dos ensaios de fluorescência de raios X (FrX); e caracterização física através dos ensaios de granulometria, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), e massa específica dos grãos. Na Tabela 1 são apresentados os ensaios físicos e resultados obtidos.

**Tabela 1:** Caracterização e classificação do solo e do SRMF.

| Caracterização                                  | Solo | SRMF |
|---|------|------|
| Argila (%)                                      | 35,0 | 9,0  |
| Silte (%)                                       | 19,0 | 35,0 |
| Areia (%)                                       | 45,8 | 52,0 |
| Pedregulho (%)                                  | 0,2  | 4,0  |
| Limite de Liquidez (%)                          | 41,0 | 20,0 |
| Limite de plasticidade (%)                      | 39,0 | NP   |
| Índice de plasticidade (%)                      | 2,0  | -    |
| Massa específica dos grãos (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,6  | 2,8  |
| <i>Unified soil classification</i> (USCS)       | ML   | ML   |

Fonte: Autoras (2024).

Na análise por Difração de raio X a amostra de solo apresentou predominância dos minerais caulinita, quartzo e goethita. Já a amostra de SRMF apresentou quartzo e hematita como minerais predominantes. Essas descobertas sugerem que, mesmo após o rejeito ter sedimentado e se misturado no meio ambiente, ainda manteve características semelhantes ao rejeito de minério de ferro encontrado em barragens. No resultado da análise química por FrX, tanto na

amostra de solo quanto na amostra de SRMF, foram identificadas proporções significativas dos minerais alumina ( $Al_2O_3$ ), sílica ( $SiO_2$ ) e hematita ( $Fe_2O_3$ ). Este último também foi observado no ensaio de DrX.

A areia utilizada nesta pesquisa é do tipo média lavada comercial. O valor de dimensão máxima característica da areia foi 2,36 mm e o módulo de finura foi 2,44. A areia foi adicionada para alcançar as diretrizes granulométricas definidas pela NBR 17014 [08]. Para garantir a resistência mecânica adequada, aumentar a durabilidade e elevar o pH, foi também adicionado cimento nas misturas. O cimento escolhido foi o tipo CII-F 32 (cimento composto com filer calcário), por ser um dos cimentos mais comuns no país. Na Tabela 2 apresentam-se as séries e as misturas com os teores de cada material.

Três séries de moldagens foram realizadas, conforme Tabela 2, a saber: 1) misturas de substituição de solo por SRMF, em cinco diferentes teores; 2) misturas com adição de areia; e 3) misturas com adição de cimento. Os teores de SRMF foram escolhidos de forma a maximizar a substituição de solo por SRMF, uma vez que um dos objetivos desta pesquisa é investigar opções para uma melhor destinação do SRMF.

**Tabela 2:** Descrição das misturas e teores dos materiais

| Séries   | Misturas | Solo (%) | SRMF (%) | Areia adicionada (%) | Cimento (%) |
|----------|----------|----------|----------|----------------------|-------------|
| <b>1</b> | 0        | 100      | 0        | -                    | -           |
|          | 70       | 30       | 70       | -                    | -           |
|          | 80       | 20       | 80       | -                    | -           |
|          | 90       | 10       | 90       | -                    | -           |
|          | 100      | 0        | 100      | -                    | -           |
| <b>2</b> | 0-A      | 100      | 0        | 40                   | -           |
|          | 70-A     | 30       | 70       | 40                   | -           |
|          | 80-A     | 20       | 80       | 40                   | -           |
|          | 90-A     | 10       | 90       | 40                   | -           |
|          | 100-A    | 100      | 100      | 40                   | -           |
| <b>3</b> | 0-AC     | 100      | 0        | 40                   | 2,5         |
|          | 70-AC    | 30       | 70       | 40                   | 2,5         |
|          | 80-AC    | 20       | 80       | 40                   | 2,5         |
|          | 90-AC    | 10       | 90       | 40                   | 2,5         |
|          | 100-AC   | 100      | 100      | 40                   | 2,5         |

Fonte: Autoras (2024).

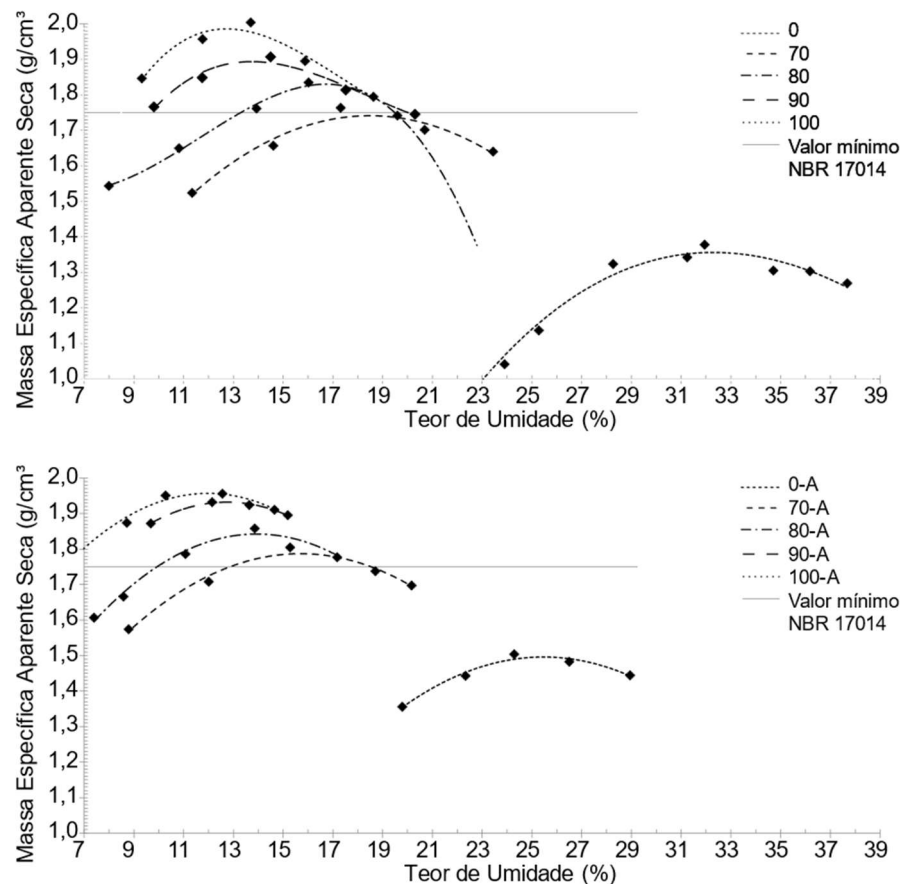
O ensaio de compactação, conforme estabelecido pela NBR 7182 [13], foi realizado para determinar o teor de umidade necessário para compactar um solo até alcançar a massa específica seca máxima, considerando a energia de compactação. Utilizou-se o cilindro de Proctor pequeno para a energia normal de compactação.

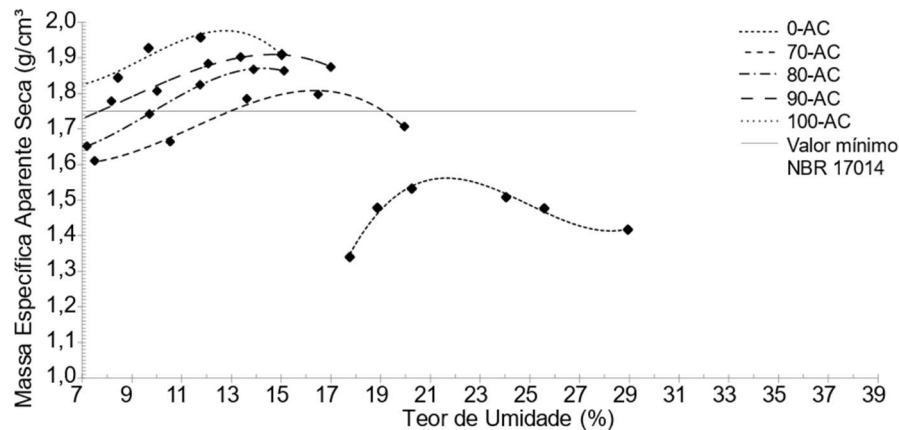
No ensaio de compactação, o solo é compactado em um volume conhecido, em camadas, com diferentes umidades. A curva de compactação é então feita correlacionando a umidade com a massa específica aparente seca. O pico da curva indica a massa e umidade máxima de compactação alcançada no ensaio. A água atua como agente amolecedor nas partículas do solo, permitindo que elas deslizem umas sobre as outras e se posicionem em uma formação compacta de alta densidade [04].

### 3. Resultados e discussão

O ensaio de compactação foi realizado com as misturas sem adição, com adição de areia e com adição de cimento. No Gráfico 1, é possível observar o resultado do ensaio de compactação das misturas. Na mistura realizada apenas com solo, mesmo com as adições de areia e de cimento, não atingiu o valor de massa específica aparente seca mínima definida pela NBR 17014 [08] e apresentou elevada umidade ótima de compactação, acima das demais misturas.

**Gráfico 1:** Curva de compactação das misturas sem areia e cimento, com adição de areia (A) e com adição de areia e cimento (AC)





Fonte: Autoras (2024).

A elevada umidade de compactação do solo pode ser atribuída, em parte, ao elevado teor de alumina ( $Al_2O_3$ ) presente no solo. A alumina atua como um adsorvente natural com propriedade de reter líquidos em sua superfície [14].

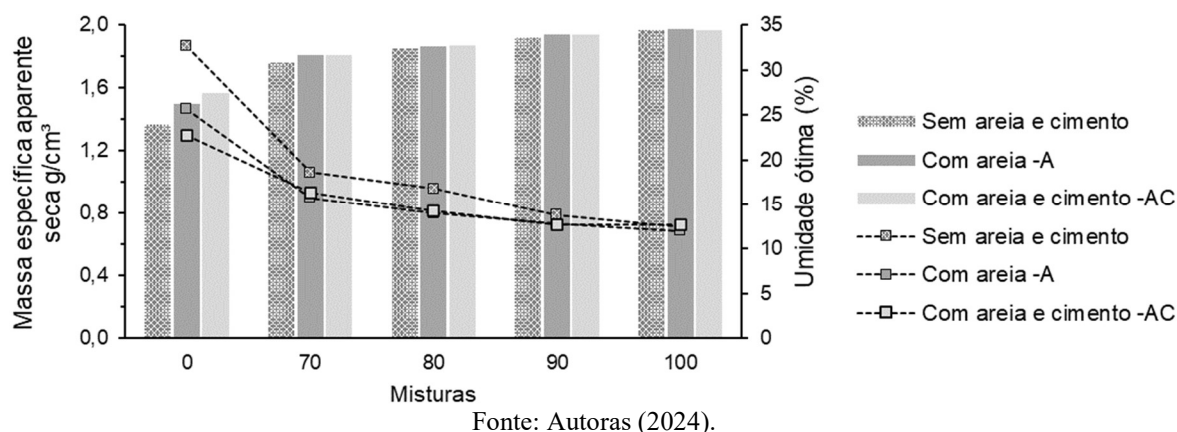
Se as misturas representativas para a taipa de pilão necessitam de uma elevada umidade ótima de compactação, pode-se observar quatro desvantagens principais: i) contemporaneamente, devido ao recurso de água limitado [15]; ii) o elevado teor de água pode gerar retração e deformação na taipa de pilão durante o processo de secagem e evaporação da água [16]; iii) a umidade excessiva do solo pode resultar na aderência deste às formas e a outros equipamentos de trabalho durante a moldagem da taipa de pilão [17]; e iv) a resistência mecânica tende a aumentar com a redução da umidade ótima de compactação [18].

A mistura 70 (sem adições) não apresentou valor de massa específica aparente seca mínima exigida pela norma. Nas misturas 70, 80, 90 e 100, com e sem adições, houve um aumento gradativo da massa específica à medida que aumentou a proporção de SRMF na mistura. Ávila, Puertas e Gallego [19] demonstraram que a massa específica aparente seca é importante para determinar o comportamento mecânico da taipa de pilão, o que indica que a mistura 70 pode não obter resultados satisfatórios no ensaio de resistência à compressão.

Para comparação e melhor entendimento da influência da adição de areia e cimento nas misturas, foi elaborado o Gráfico 2. Nota-se que as misturas com adição de areia e cimento apresentaram valores de massa específica aparente seca ligeiramente superior em comparação com as misturas sem adição.

**Gráfico 2:** Compactação e umidade ótima das misturas sem e com adições





Nota-se que na mistura 0 (sem substituição de solo por SRMF), a adição de areia e de cimento impactam mais positivamente e acarretam o aumento da massa específica aparente seca e diminuem a umidade ótima de compactação. Wahab *et al.* [09], em pesquisa com solo laterítico, encontraram que a umidade ótima de compactação aumentou (o que difere desta pesquisa) e a massa específica aparente seca aumentou à medida que se acrescentou mais cimento (o que está de acordo com esta pesquisa). O discreto aumento da massa específica aparente seca na mistura 0 com adições pode ser explicado pela contribuição da areia para uma distribuição granulométrica uniforme, resultando em um empacotamento mais adequado dos grãos e, conseqüentemente, em uma maior massa específica [17].

Assim, nas amostras 100 (total substituição de solo por SRMF), a areia e o cimento praticamente não afetam nem a umidade ótima nem a massa específica aparente seca. Há, ainda, uma tendência de que a massa específica aparente seca das misturas aumente à medida que aumenta o teor de SRMF.

#### 4. Considerações Finais

As seguintes conclusões podem ser retiradas desta pesquisa:

- i) A adição de areia e de cimento contribuiu positivamente para diminuir a umidade ótima de compactação e aumentar a massa específica aparente seca nas misturas em que não foi utilizado o SRMF;
- ii) Nas misturas com SRMF, a areia e o cimento não influenciaram significativamente nem a umidade nem a massa específica;
- iii) O uso do SRMF nas misturas contribuiu positivamente para reduzir a umidade de compactação e elevar a massa específica aparente seca, sem o qual, o solo não estaria de acordo com o mínimo exigido em norma.

#### Referências

[01] KUMAR, G. S.; SAINI, P. K., DEOLI, R.; MISHRA, A. K.; NEGI, S. K. Characterization of laterite soil and its use in construction applications: a review. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, v.16, 1 dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200120>. Acesso em: 22 mar. 2024.

- [02] CASTRO, M. D.; OLIVEIRA, V. N.; MASCARENHA, M. M.A.; GITIRANA J., Gilson de F.N.; LUZ, M. P. Análise das curvas características solo-água de amostras remoldada e indeformada de um solo laterítico não saturado. *In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 2020. *Anais [...]*. Campinas, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/362144568\\_Analise\\_das\\_curvas\\_caracteristicas\\_sol\\_o-agua\\_de\\_amostras\\_remoldada\\_e\\_indeformada\\_de\\_um\\_solo\\_lateritico\\_nao\\_saturado](https://www.researchgate.net/publication/362144568_Analise_das_curvas_caracteristicas_sol_o-agua_de_amostras_remoldada_e_indeformada_de_um_solo_lateritico_nao_saturado). Acesso em: 22 mar. 2024.
- [03] LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. da.; BATISTELA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.6, p.1733-1744, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- [04] DAS, B. M. *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. 6. ed. São Paulo: Thompson, 2007.
- [05] VALE, J. L. R. *Seleção de solos tropicais para a produção de adobe: a utilização do ensaio azul de metileno*. Tese (Doutorado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura UFMG, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: [https://sites.arq.ufmg.br/pos/ambienteconstruido/wp-content/uploads/2021/06/SELECAO-DE-SOLOS-TROPICAIS-PARA-PRODUCAO-DE-ADOBE\\_-a-utilizacao-do-ensaio-de-azul-de-metileno.pdf](https://sites.arq.ufmg.br/pos/ambienteconstruido/wp-content/uploads/2021/06/SELECAO-DE-SOLOS-TROPICAIS-PARA-PRODUCAO-DE-ADOBE_-a-utilizacao-do-ensaio-de-azul-de-metileno.pdf). Acesso em: 22 mar. 2024.
- [06] ARAÚJO E FARIAS, M. L.; ARAÚJO, H. A. O.; RODRIGUES, J. K. G. Análise da aplicabilidade de Sistema de Classificação Universal para solos lateríticos utilizados em camadas de pavimentos. *TRANSPORTES*, v. 31, n. 1, p. 2750, 27 fev. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i1.2750>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- [07] BARROS, D. dos S. P.; PEREIRA, P. H. dos S.; MOTTER, H.; AMARANTE, M. dos S. Compactação de solo: índices físicos necessários para determinação dos fatores de compactação. *Pesquisa e ação*, v. 7, 2021. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/929>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- [08] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014: taipa de pilão: Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.ABNT.
- [09] WAHAB, N. A.; ROSHAN, M. J.; RASHID, A. S. A.; HEZMI, M. A.; JUSOH, S. N.; NORSYAHARIATI, N. D.; TAMASSOKI, S. Strength and durability of cement-treated lateritic soil. *Sustainability*, v. 13, n. 11, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13116430>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- [10] CARO, S.; AGUDELO, J. P.; CAICEDO, B.; OROZCO, L. F.; PATIÑO, F.; RODALO, N. Advanced characterisation of cement-stabilised lateritic soils to be used as road materials. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 20, p. 1425–1434. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200120>. Acesso em 22 mar. 2024.
- [11] ABDELHALIM, R. A.; RAMLI, H.; SELAMAT, M. R. Cone penetration measurements in oil-contaminated sand stabilized by lateritic soil and potential usage in concrete mix. *Case Studies in Construction Materials*, v. 15, 1 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00580>. Acesso em: 22 mar. 2024.



- [12] LAGE, G. T. de L.; VIMIEIRO, J. I. C.; MATIAS, L. M.; COSTA, J. M.; BATISTA, G. E. F.; BESSA, S. A. L. Caracterização do sedimento de rejeito de minério de ferro para uso como estabilizante da taipa de pilão. *In: 4º Congresso luso-brasileiro de materiais de construção sustentáveis, 2022, Salvador. Anais eletrônicos...Salvador, 2022.* Disponível em: <https://clbmcs2020.uefs.br/anais-do-evento>. Acesso em: 22 marc. 2024.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2018.
- [14] PHAM, T. D.; TRAN, T. T.; LE, V. A.; PHAM, T. T.; DAO, T. H.; LE T. S.L. Adsorption characteristics of molecular oxytetracycline onto alumina particles: The role of surface modification with an anionic surfactant. *Journal of Molecular Liquids*, v. 287, 1 ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.110900>. Acesso em: 22 marc. 2024.
- [15] ZAMI, M. S.; EWEBAJO, A. O.; AL-AMOUDI, O. S.B.; AL-OSTA, M. A.; MUSTAFA, Y. M.H. Compressive strength and wetting–drying cycles of Al-Hofuf "Hamrah" soil stabilized with cement and lime. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 47, p. 13249- 13264, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06576-0>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- [16] KOUTOUS, A.; HILALI, E. M. A Proposed Experimental Method for the Preparation of Rammed Earth Material. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV8IS070140>. Acesso em: 22 mar. 2024.
- [17] HOFFMANN, M.; MINTO, F.; HEISE, A. Taipa de pilão. *In: NEVES, C.; FARIA, O. B. (org.). Técnicas de construção com terra. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. p. 1–79. E-book.* Disponível em: [www.redproterra.org](http://www.redproterra.org). Acesso em: 22 nov. 2023.
- [18] CHAUHAN, P.; HAJJAR, A. E.; PRIME, N.; PLÉ, O. Unsaturated behavior of rammed earth: experimentation towards numerical modelling. *Construction and Building Materials*, v. 227, p. 1-12, 10 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.027>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- [19] ÁVILA, F.; PUERTAS, E.; GALLEGRO, R. Characterization of the mechanical and physical properties of unstabilized rammed earth: a review. *Construction and Building Materials*, v. 270, p. 121435-121446, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121435>. Acesso em: 22 mar. 2024.