



## POTENCIAL DE ESTABILIZAÇÃO DA TAIPA DE PILÃO COM REJEITOS DE MINERAÇÃO E CAL

Potential stabilization of rammed earth with mining wastes and lime

**Gabriela Tavares de Lanna Lage**

Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | gabrielatlanna@gmail.com

**Sofia Araújo Lima Bessa**

Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | salbessa@gmail.com

**Beatriz Faria Alves dos Santos**

Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | bialvesfca@gmail.com

**Larissa Moreira Matias**

Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | larissallm@ufmg.br

**Roberto Galéry**

Universidade Federal de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | rgallery@demin.ufmg.br

### Resumo

*A taipa de pilão é uma antiga técnica construtiva resgatada em vários países devido ao seu baixo impacto ambiental. Para melhorar a resistência e durabilidade, é comum estabilizá-la com cimento, embora isso aumente a energia incorporada e contribua para o efeito estufa. O uso de materiais alternativos ao cimento pode ajudar a preservar a sustentabilidade da taipa de pilão. No entanto, reduzir o cimento pode diminuir o pH do solo, apesar de solos adequados para taipa de pilão se beneficiarem de pH mais elevado. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a resistência mecânica da taipa de pilão com sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), com e sem cal hidratada. Foram conduzidos ensaios de caracterização dos materiais, índice de compactação e resistência à compressão. Os resultados indicaram a possibilidade de utilizar o SRMF na taipa de pilão, não houve influência da cal no aumento da resistência.*

**Palavras-chave:** Taipa de pilão; estabilização; rejeito de minério de ferro, cal; resistência mecânica.

### ABSTRACT

*Rammed earth is an old construction technique rescued in several countries because of its low environmental impact. Stabilizing the RE with cement is common, although it increases embodied energy and contributes to the greenhouse effect. In addition, may improve strength and durability. Using alternative materials to cement can help preserve the sustainability of rammed earth. However, reducing cement may decrease soil pH, although soils suitable for rammed earth benefit from higher pH. Therefore, this study aimed to analyze the mechanical strength of rammed earth with iron ore tailings sediment (IOTS), with and without hydrated lime. The tests were material characterization, compaction index, and compressive strength. The results indicated the possibility of using IOTS in rammed earth. There was no influence of lime in increasing the strength.*

**Keywords:** Rammed earth; stabilization; iron ore tailings, lime; mechanical resistance.

## 1 INTRODUÇÃO

A taipa de pilão é uma técnica construtiva realizada através de camadas de solo compactado (MINKE, 2022). Uma de suas vantagens é a necessidade de poucos materiais: solo, que é amplamente disponível e limitada quantidade de água (WEIMER, 2012; TORGAL; EIRES; JALALI, 2009). A taipa contemporânea é frequentemente estabilizada - procedimento que altera as características do solo para torná-lo mais apropriado para construções - como forma de elevar sua resistência e durabilidade (HALL; ALLINSON, 2009).

O cimento é amplamente utilizado na estabilização da taipa de pilão, porém ele eleva o impacto ambiental da técnica (ARRIGONI *et al.*, 2017; MEEK *et al.*, 2021; KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016). Existem alternativas de estabilizantes com uma menor energia incorporada (ARRIGONI *et al.*, 2017; GIUFFRIDA *et al.*, 2019). Entretanto, a redução de cimento pode significar a diminuição do pH dos solos. Conforme Ciancio, Beckett e Carraro (2013) solos para taipa de pilão se beneficiam de pH acima de 12, pois são compatíveis com reforços em aço que devem estar inseridos em matrizes alcalinas. Ademais, o trabalho de Hoffmann (2007) demonstra melhor trabalhabilidade, redução de fissuras e aumentos de resistência a compressão na adição de cal em argissolos. Portanto, este estudo objetivou analisar a resistência mecânica de corpos de prova representativos da taipa de pilão com sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF), com e sem a incorporação da cal hidratada, visando a manutenção do pH alcalino da mistura.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados os seguintes materiais: solo da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH); Sedimento de rejeito de minério de ferro (SRMF) coletado em Barra Longa e Rio Doce; Cal hidratada tipo CH-I. Os métodos empregados incluíram: i) Caracterização física das amostras de SRMF e do solo; ii) Análise de pH das misturas para a taipa; iv) Análise de compactação das misturas SRMF-solo; e v) Análise mecânica de corpos de provas cilíndricos representativos da taipa de pilão.

As amostras de SRMF foram coletadas em Barra Longa e Rio Doce, Minas Gerais, região onde a lama se espalhou após o rompimento da Barragem de Fundão (LACAZ; PORTO; PINHEIRO, 2017). As amostras de solo e SRMF passaram por análises granulométricas por sedimentação, limite de liquidez e plasticidade do solo (Tabela 1).

**Tabela 1:** Propriedade físicas das amostras de solo e de SRMF

Propriedades Físicas	Solo	SRMF BL	SRMF RD
Limite de plasticidade	53	20	-
Limite de Liquidez	31	-	-
Índice de Plasticidade	22	-	-
Pedregulho (d > 2,0 mm) - %	2,0	4,0	6,0
Areia (0,06 < d < 2,0 mm) - %	28,0	52,0	59,0
Silte (0,002 < d < 0,06 mm) - %	14,5	15,0	29,0
Argila (d < 0,002 mm) - %	55,5	9,0	6,0

Nota-se predominância de grãos maiores nas amostras de SRMF que apresentaram características granulométricas arenosas. Em contrapartida, a amostra de solo apresentou características argilosas. O limite de liquidez (LL) do solo e índice de plasticidade (IP) - tendo como referência CRATerre (DOAT, 1979) reiteram que o solo analisado é classificado como argiloso. O LL do SRMF-BL indica características arenosas. Ambas as amostras de sedimento não apresentaram plasticidade suficiente. Isso sugere que a adição deste material ao solo poderia reduzir os valores de LL e de LP.

Para analisar a compatibilidade entre o SRMF e o solo para taipa de pilão, realizou-se o ensaio de compactação (ABNT, 2016). Para tal, utilizou-se dez misturas nos teores de 40%, 60%, 70%, 80% e 90% com ambas as amostras, BL e RD, além de amostra com 100% solo. Para execução do ensaio utilizou-se um cilindro de Proctor pequeno (volume: 969,42 cm<sup>3</sup>; massa: 2396,50 g) para compactação, seguindo as diretrizes da norma que especifica três camadas com 26 golpes por camada para a energia normal de compactação. O cilindro de Proctor pequeno (vol. 969,42 cm<sup>3</sup>; massa: 2396,50 g) foi utilizado na compactação. O número de camadas (três) e golpes por camada (26) seguiu a indicação da norma para características para a energia normal de compactação.

Para o ensaio de resistência à compressão, utilizou-se apenas a mistura com 90% de SRMF. Para verificar o efeito da cal como estabilizante, moldaram-se seis misturas (Tabela 2). Os teores de cal utilizados nas misturas (com e sem SRMF) foram aferidos 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 estabilizados com cal. O pH das amostras foi analisado com pHmetro de bancada digital, marca SevenEasy Mettler Toledo. Cada mistura analisada foi preparada adicionando-se 30g de água destilada a 50g de material sólido. A mistura foi homogeneizada por dois minutos e o pH foi medido com eletrodo. Realizaram-se duas medições para cada amostra e duas amostras para cada proporção. O pHmetro foi calibrado utilizando soluções-padrão de pH 4, 7 e 10.

**Figura 1.** Medição do pH das misturas solo-SRMF



**Tabela 2.** Misturas e quantidade de cal utilizadas

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

As misturas foram moldadas em formas cilíndricas com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, adaptados da NBR 12024 (ABNT, 2012), em uma proporção de 1:2 (diâmetro/altura). Utilizou-se cinco camadas com 27 golpes por camada, conforme indicado na norma para a energia modificada de compactação, entretanto a utilização do soquete pequeno foi uma adaptação a norma. 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 feita devido a problemas de moldagem observados nas amostras com umidade ótima, causados pelo excesso de água (Figura 2).

**Figura 2.** Corpos de prova com desagregação e aderência de material na forma.



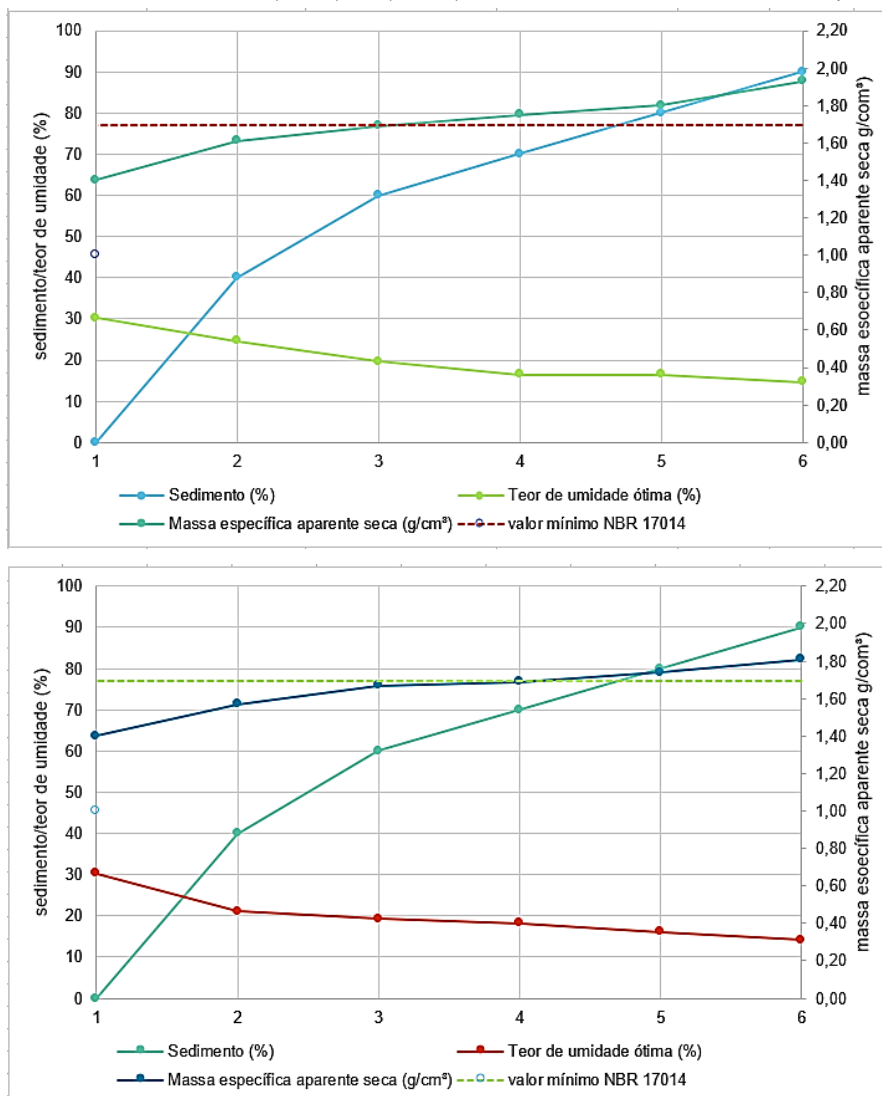
Os indícios de excesso de água incluíram a aderência excessiva da mistura nos equipamentos, desagregação do material durante o desmolde e presença excessiva de mofo nas amostras. Essa adaptação já foi adotada por outros pesquisadores (ROCHA, CONSOLI e JOHANN, 2014; MEEK, BECKETT E ELCHALAKANI, 2021).

Os corpos de prova foram desmoldados após sete dias, pesados e, em seguida, embalados em plástico filme por 14 dias. Após esse período, foram desembalados e permaneceram mais 10 dias sem o plástico, quando foram rompidos aos 31 dias de idade.

## 2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

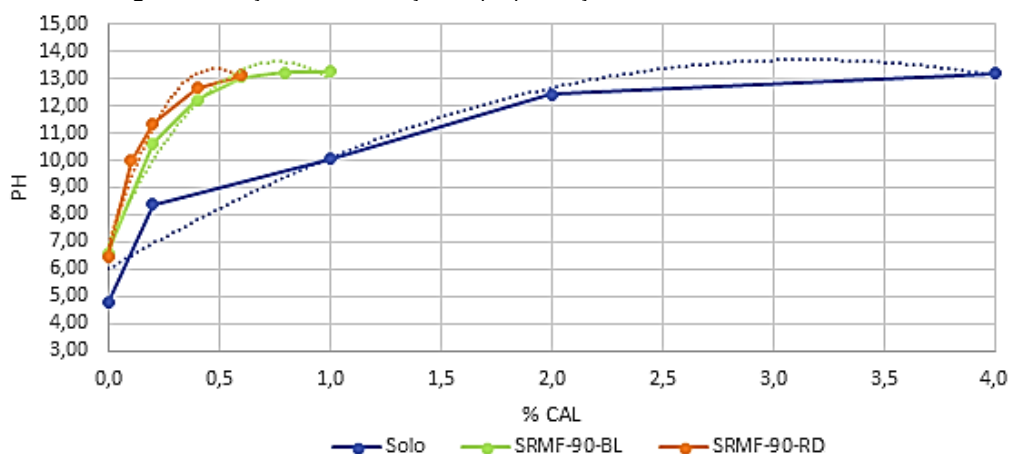
A análise da relação entre o teor de resíduo adicionado, teor de umidade e massa específica aparente seca revela que a incorporação de SRMF ao solo diminuiu a umidade necessária e aproximou o índice de compactação para os níveis ideais da técnica da taipa de pilão. Esse fato está associado a um melhor empacotamento das partículas, influenciados pela maior variedade de diâmetro de grãos, ocasionando menor volume de vazios. A massa específica aparente seca atingiu valores sugeridos pela norma (1,75g/cm<sup>3</sup>) somente em misturas com elevados valores de incorporação de SRMF: 70, 80 e 90% BL e 90% RD. À vista disso, optou-se por realizar o ensaio de resistência à compressão das misturas com 90% de SRMF (Figura 3).

**Figura 3.** Relação entre o teor de SRMF BL (acima) RD (abaixo), o teor de umidade ótima e a massa específica aparente seca.



Na Figura 4 estão apresentados os resultados do ensaio de pH. A adição de 2% de cal à mistura com 100% solo e a adição de 0,50% de cal às misturas com 90% de SRMF resultou em 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. Assim, estes foram os valores estabelecidos para a adição de cal nas amostras preparadas para o ensaio de resistência à compressão.

Os valores de pH nas misturas sem adição de cal indicam caráter ácido (pH abaixo de 7,0), principalmente o solo, que registrou um pH de 4,77. O valor encontrado para o solo condiz com os solos tropicais lateríticos do Cerrado (pH entre 4,0 e 5,5) (ROSOLEN *et al.*, 2012). Ambientes ácidos favorecem a corrosão de reforços de aço (HELENE, 1986). Por tanto, a adição mínima de cal é interessante para elevar o pH do solo e criar um ambiente alcalino favorável para aumento da resistência e prevenir a corrosão. Além disso, substituir o cimento pela cal pode reduzir significativamente o consumo de energia (KANG; KWON; MOON, 2019).

**Figura 4.** Relação entre a variação do pH por adição de cal nas misturas analisadas

Fonte: Autoria própria

Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 31 dias estão apresentados na Tabela 3. Os valores de resistência à compressão não confinada sugerem que as amostras BL e RD podem ser eficazes como estabilizantes para solos argilosos na técnica da taipa de pilão. Valores de resistência à compressão entre 1 e 2 MPa são considerados adequados para essa técnica (WALKER; AUSTRÁLIA, 2002; ABNT, 2022; SADCSTAN, 2014; ARRIGONI *et al.*, 2017). Entretanto, todas as amostras obtiveram os valores mínimos de resistência à compressão presente na norma brasileira de taipa de pilão, 1,3 MPa (ABNT, 2022).

**Tabela 3:** Valores de resistência à compressão aos 31 dias

Amostra	Resistência à compressão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
SRMF-0	1,45	9,33
SRMF-BL-90	1,66	10,34
SRMF-RD-90	1,30	6,07
SRMF-0-C	1,22	6,87
SRMF-BL-90-C	1,30	4,60
SRMF-RD-90-C	0,69	12,23

Apesar de os teores de cal terem sido obtidos das misturas com pH 12,45, não foi possível obter uma correlação entre o 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%). Esse fator pode estar relacionado ao tipo de cura adotado, ou à redução da densidade seca causada pelos estabilizantes químicos (SIDDIQUA E BARRETO, 2018). A redução da adição de água baseada no teor ótimo 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 que haver troca catiônica (CIANCIO, BECKETT, CARRARO, 2014).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após análise, foi possível aferir que o SRMF pode ser utilizado em misturas com solos argilosos para a taipa de pilão. O SRMF possui características arenosas e ao ser incorporado ao solo forneceu uma maior variedade granulométrica que preencheu os vazios e elevou os valores de massa específica aparente seca das misturas. Os valores de resistência à compressão encontrados atendem a norma brasileira. Estudos mais aprofundados são necessários para compreender a relação entre o SRMF e a cal, como a realização de cura úmida ou cura térmica.

## 5 AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016
- 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 17014**: taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- 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.
- CIANCIO, D.; BECKETT, C. T. S.; CARRARO, J. A. H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 59–65, 2014.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- KANG, Sung Hoon; KWON, Yang Hee; MOON, Juhuk. Quantitative Analysis of CO<sub>2</sub> 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.
- 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.
- MEEK, Aezandra H. *et al.* Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, Edimburgo, v. 267, 2021.
- 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.
- 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
- CHA, 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.
- ROSOLEN, Vania *et al.* Impactos da substituição da vegetação original do Cerrado brasileiro em sistemas agrícolas: alteração do carbono orgânico do solo e  $\delta^{13}C$ . **Investigaciones Geográficas**, v. 1, n. 79, p. 39–47, 2012.
- SADCSTAN. **SADC ZD HS 983**: Rammed earth structures: code of practice. Zimbabwe: SADCSTAN, 2014.
- TORGAL, Pacheco; EIRES, Rute; JALALI, Said. **Construção em Terra**. Braga: TECMINHO, 2009. v. 1.
- WALKER, Peter; AUSTRALIA, Standards. **HB 195**: The Australian earth building handbook. Sydney: Standards Australia International, 2002
- WEIMER, G. *Arquitetura popular brasileira*. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2012.