

## USO DA CAL COMO ESTABILIZANTE EM ESTRUTURAS DE TAIPA DE PILÃO: REVISÃO DA LITERATURA

### USE OF LIME AS A STABILIZER IN RAMMED EARTH STRUCTURES: A LITERATURE REVIEW

Data de aceite: 21/09/2024 | Data de submissão: 19/09/2024

#### **LAGE, Gabriela Tavares de Lanna, doutoranda em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: gabrielatlanna@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0018-2555>

#### **BESSA, Sofia Araújo Lima, prof. Doutora no Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: salbessa@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1883-1251>

#### **SANTOS, Beatriz Faria Alves dos, graduanda na Escola de Arquitetura**

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, E-mail: biaalvesfca@gmail.com

#### **RESUMO**

A taipa de pilão é uma técnica de construção com terra reconhecida por sua sustentabilidade. A cal é usada como estabilizante, promovendo resistência e durabilidade às estruturas. Este artigo analisou na literatura os estudos recentes que apresentaram adição da cal na taipa de pilão, para compreender a eficácia da incorporação da cal em diferentes tipos de solos; além de mapear as proporções utilizadas, os diferentes processos de cura e idade das amostras ensaiadas. O método foi a coleta de dados documentais. Como resultado tem-se que as investigações sobre incorporação de cal na taipa de pilão buscam métodos comparáveis ao uso de cimento, entretanto as reações químicas envolvidas entre solo-cal são distintas.

**Palavras-chave:** Estabilização de solos; Valor ótimo de cal; Método de cura; Sustentabilidade.

#### **ABSTRACT**

*Rammed earth is an earth construction technique recognized for its sustainability. Lime is used as a stabilizer, providing strength and durability to the structures. This article analyzed recent studies in the literature on the addition of lime to rammed earth, in order to understand the effectiveness of incorporating lime into different types of soil; in addition to mapping the proportions used, the different curing processes and the age of the samples tested. The method was the collection of documentary data. The result is that research into the incorporation of lime into rammed earth seeks methods comparable to the use of cement, but the chemical reactions involved between soil and lime are different.*

**Keywords:** Soil stabilization; Optimal lime content; Curing method; Sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

A taipa de pilão é uma técnica construtiva milenar que continua sendo mundialmente empregada principalmente devido ao caráter sustentável e o baixo consumo energético. A técnica consiste na compactação de camadas de solo úmido em fôrmas temporárias, formando paredes espessas e monolíticas (ÁVILA, PUERTAS e GALLEGO, 2021). Tal estrutura pode ser estabilizada com aglomerantes como o cimento e a cal, visando ganho de resistência e durabilidade, além da diminuição da frequência de manutenção das paredes (ARRIGONI *et al.*, 2017).

O uso da cal como um estabilizante para a taipa de pilão (TP) pode ser datado de séculos (ARRIGONI *et al.*, 2017) e se fez presente em diversos países, como Japão (ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016), no continente europeu (FERNANDES, 2013) e no Brasil (EIJK e SOUZA, 2006); já o uso do cimento como um estabilizante só se popularizou após a Segunda Guerra Mundial (CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013). Além da melhora na resistência das paredes, a estabilização cimentícia colabora com a redução da retração e a desagregação das paredes (ARRIGONI *et al.*, 2017). Entretanto, mesmo trazendo benefícios em relação à durabilidade e ao desempenho mecânico (BUI *et al.*, 2014), os estabilizantes cimentícios utilizados aumentam a energia incorporada da técnica, uma vez que sua produção é responsável por elevados níveis de emissão de CO<sub>2</sub> (ARRIGONI *et al.*, 2017).

Nesse sentido, a utilização da cal como agente estabilizador da taipa de pilão apresenta potencial por ser mais eficaz e ecologicamente responsável em comparação com estabilizantes à base de cimento. Isso poderia resultar na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> durante a fase de fabricação e, ao mesmo tempo, contribuir para a absorção deste gás ao longo de sua vida útil, graças ao processo de carbonatação (ÁVILA, PUERTAS e GALLEGO, 2021; KANG, KWON e MOON, 2019).

Além disso, a redução da adição de cimento, que significaria a diminuição do pH de misturas para a produção da TP pode ser evitada com a adição de cal. Conforme Ciancio, Beckett e Carraro (2014), misturas para TP 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. Portanto, é importante que solos ácidos sejam corrigidos de alguma forma com o objetivo de elevar o pH da mistura para a produção da TP.

Há um interesse crescente em melhorar as propriedades de durabilidade da TP em contato com a água, além do aumento do pH que proporciona proteção contra a corrosão, já que o ambiente ácido favorece a corrosão de reforços de aço (HELENE, 1986). Estas propriedades podem ser alcançadas com a utilização da cal em nível mínimo para elevar o pH do solo e criar um ambiente alcalino favorável (KANG, KWON e MOON, 2019).

Dessa forma, este artigo buscou estudos acerca da interação solo-cal na taipa de pilão e teve como objetivo analisar na literatura os estudos recentes que

apresentaram ensaios de resistência e durabilidade em solos com adição da cal para a taipa de pilão, de forma a compreender a eficácia da incorporação da cal em diferentes tipos de solos; além de mapear as proporções utilizadas, os diferentes processos de cura e idade das amostras ensaiadas.

## 2. MÉTODO

Esta pesquisa consistiu em uma pesquisa bibliográfica, de forma a realizar uma revisão da literatura sobre a adição de cal em corpos de prova representativos de taipa de pilão. Durante a análise, alguns dados de interesse foram levantados: i) teores de cal utilizados nas misturas com o solo; ii) o tipo de solo utilizado em cada pesquisa quanto a granulometria e composição química/ mineralógica; e iii) a influência do tempo de cura e o processo de cura empregado aos corpos de prova representativos.

Os métodos utilizados foram: 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 três bases de dados: Scopus; ScienceDirect e Sielo, que foram os bancos que apresentaram o maior número de trabalhos sobre o assunto.

Tabela 1: Critérios para levantamento de dados sobre a estabilização de taipa de pilão com cal.

Foco	Critério	Condições
Estabilização da taipa de pilão com cal	Data de publicação	Período entre 2002-2022
	Palavras-chave	“Rammed Earth”; “Lime”; “Stabilization” ou “Stabilisation”
	Tipo de documento	Artigos de periódicos ou anais de eventos
	Idioma	Inglês, português ou espanhol

Fonte: autoria própria.

As referências citadas em cada um dos artigos selecionados também foram examinadas e tornaram-se uma fonte secundária de informações, de forma a identificar fontes relacionadas que não foram abrangidas na busca inicial, mas que poderiam ser importantes para garantir uma revisão abrangente e pertinente sobre o tema.

Além dos critérios levados em consideração para a inclusão de artigos, todos os resumos dos artigos encontrados foram lidos e um segundo filtro foi aplicado. Foram selecionados apenas os artigos que detalharam o uso da cal como estabilizante para solos destinados as paredes de taipa de pilão.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da revisão bibliográfica realizada foram selecionados 11 artigos que contemplaram os critérios e condições preestabelecidas (Tabela 2).

Tabela 2: Relação dos artigos consultados.

Fontes	Título	Autores	Ano de publicação
1	Greening stabilized rammed earth: devising more sustainable dosages based on strength controlling equations	Cecília Gravina da Rocha, Nilo Cesar Consoli, Amanda Dalla Rosa Johann	2014
2	Experimental evaluation of the optimum lime content and strength development of lime-stabilized rammed earth	Fernando Ávila, Esther Puerta, Rafael Gallego	2021
3	Considerations on the physical and mechanical properties of lime-stabilized rammed earth walls and their evaluation by ultrasonic pulse velocity testing	Jacinto Canivell, Juan Jesús Martindel-Rio, F.J. Alejandro, Joaquín García-Heras, Alberto Jimenez-Aguilar	2018
4	New insight into the craftsmanship of sucrose-modified rammed earth-lime materials	Shiqiang Fang, Chenglei Meng, Kun Zhang, Wenjing Hu, Xiaobin Liu	2022
5	Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization	Rodrigo Beck Saldanha, Cecília Gravina da Rocha, Andrés Maurício Lotero Caicedo, Nilo Cesar Consoli	2021
6	Hydric characterisation of rammed earth samples for different lime concentrations	Lucile Soudani, Antonin Fabbri, Monika Woloszyn, Anne-Cécile Grillet, Jean-Claude Morel	2018
7	Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth	Daniela Ciancio, Christopher Beckett, J. Antonio Carraro	2014
8	Tensile strength of compacted rammed earth materials	Hiroyuki Araki, Junichi Koseki, Takeshi Sato	2016
9	Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth	Quoc-Bao Bui, Jean-Claude Morel, Stéphane Hans, Peter Walker	2014
10	Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth	Daniela Ciancio, Paul Jaquin, Peter Walker	2013
11	Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil	Jair de Jesús Arrieta Baldovino, Ronaldo Luis dos Santos Izzo, Eclesielter Batista Moreira, Juliana Lundgren Rose	2018

Fonte: autoria própria com dados de (ROCHA, CONSOLI e JOHANN 2014; ÁVILA, PUERTAS e GALLEGO, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO, BECKETT; CARRARO 2014; ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; BUI *et al.*, 2014; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; BALDOVINO *et al.*, 2018).

Foi possível estabelecer seis critérios importantes ressaltados pela maioria dos autores que realizaram a adição de cal como estabilizante para a taipa de pilão: i – Tipo de solo adotado, ii – Tipo de energia adotada; iii - Idade dos corpos de prova a serem rompidos; iv - Teor e tipo de cal utilizada; v - Critério para a adição de água; e vi - Tipo de cura realizada. Esses critérios estão descritos na Tabela 3, 4 e 5.

### 3.1. Tipo de solo adotado

A distribuição granulométrica e o empacotamento adequado das partículas são fundamentais para a produção de taipa de pilão e outras construções com terra, pois influenciam diretamente a densidade e a resistência das paredes (HALL; ALLINSON, 2008; LIN *et al.*, 2017). Embora um mínimo de argila seja necessário para conferir coesão ao material, seu excesso pode causar retração, dificultar a trabalhabilidade (HOFFMANN; MINTO; HEISE, 2011) e aumentar a demanda de água. Por outro lado, altos teores de areia são importantes para reduzir a umidade, aumentar a densidade seca da mistura e melhorar a resistência da taipa de pilão (KOUTOUS; HILALI, 2019). Nesse quesito todos os trabalhos consultados foram unânimes na utilização de solos com características mais arenosas (Tabela 3).

Tabela 3: Características dos solos adotados pelos autores durante os ensaios com adição de cal.

Fontes	Tipo de solo
1	Solo residual derivado do arenito de Botucatu intemperizado, de Porto Alegre. Caracterizado como areia siltosa de baixa plasticidade e areia argilosa. A fração de argila é predominantemente caulinita.
2	Solo natural de Padul (Granada, Espanha), classificado como areia argilosa bem graduada. Não apresenta informações sobre mineralogia do solo.
3	Solo composto de uma mistura de areia, solo calcário (biocalcarenito), subsolo da área circundante. A caracterização demonstrou traços minerais de argilas (filossilicatos), feldspatos potássicos (microclina) e plagioclásio (anortita).
4	Solo conhecido como terra amarela típica com pouca argila em Zhejiang, China. O tipo de argila predominante foi a nontronita.
5	Solo residual derivado do arenito de Botucatu intemperizado, de Porto Alegre. Caracterizado como areia siltosa de baixa plasticidade e areia argilosa. A fração de argila é predominantemente caulinita.
6	Solo coletado em Isère, França. Composto por 16% de argila. Não apresenta informações sobre mineralogia do solo.
7	Solo engenheirado (preparado). Foi combinado quantidades conhecidas de pó de argila caulinita, farinha de sílica, areia e cascalho.
8	Três tipos de solo com diferentes proporções de: areia argilosa (feita a partir do material das antigas paredes, triturado e peneirado); areia siltosa (solo comercial com o nome de areia Nashime, frequentemente utilizado para a construção de paredes de terra no Japão) e areia mal graduada (produzida a partir de cascalho comercial mal graduado, por meio de trituração). Não apresenta informações sobre mineralogia do solo.



Fontes	Tipo de solo
9	Cinco solos diferentes foram utilizados neste estudo, os teores de argila foram de 5 a 10%. <b>Solo A:</b> Caulinita: 35% e Montmorilonita: 65%. <b>Solo B:</b> Caulinita: 15% e Montmorilonita: 85%. <b>Solo C:</b> Illita: 65% e Montmorilonita: 35%. <b>Solo D:</b> Caulinita: 18%, Illita: 18% e Montmorilonita: 64%. <b>Solo E:</b> Caulinita: 18% e Montmorilonita: 82%.
10	10 solos artificiais compostos por diferentes teores de argila de caulim, 'farinha de rocha', areia branca limpa e cascalho (tamanho máximo de 10 mm).
11	Dois tipos de solo foram utilizados: o solo 1 é classificado como silte elástico arenoso, composto principalmente por $\text{SiO}_2$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e o solo 2 como argila arenosa de baixa plasticidade com argila predominante a caulinita.

Fonte: autoria própria com dados de (ROCHA, CONSOLI e JOHANN 2014; ÁVILA, PUERTAS e GALLEGU, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO, BECKETT; CARRARO 2014; ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; BUI *et al.*, 2014; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; BALDOVINO *et al.*, 2018).

Entretanto também é necessário entender a composição química do solo, já que pode haver reações químicas quando há a presença de argilas ativas no solo. A atividade da superfície mineral das argilas depende de suas características mineralógicas. As caulinitas são menos ativas e as montmorilonitas são mais ativas (CAPUTO, 1978). Quando se conhece o tipo de argila é possível usar essa ferramenta para eleger o estabilizante químico mais adequado. Segundo Minke (2022) solos ricos em argila reagem melhor com a adição de cal e solos ricos em areia se beneficiam mais da adição de cimento. Segundo o autor o cimento atua de maneira mais satisfatória com caulinitas e a cal com a montmorilonitas.

Apesar das recomendações da literatura quanto à combinação de estabilizante e característica do solo, a maioria das investigações que detalharam a composição química das argilas se deram com a utilização de cal em solos arenosos com predominância de argila do tipo caulinita (ROCHA, CONSOLI E JOHANN 2014; SALDANHA ET AL., 2021; CIANCIO, BECKETT; CARRARO 2014; CIANCIO, JAQUIN E WALKER, 2013; BALDOVINO ET AL., 2018).

Esse fato pode ter a ver com os montmorilonitas e illitas serem minerais argilosos expansivos, que ficam instáveis em presença de água enquanto as argilas caulinitas possuem estrutura mais rígida e por tanto são mais estáveis em presença de água (CAPUTO, 1978). De acordo com Minke (2022), ao adicionar estabilizantes químicos, estes cobrem os minerais da argila e impedem que a água alcance-os, evitando a expansão das argilas presentes no solo.

O único estudo que realizou variações de tipos de argilas nos solos adotados foi BUI *et al.*, (2018). Os autores encontraram valores de resistência a compressão inferiores em amostras com conteúdos mais elevados de montmorilonitas. Os autores, porém, afirmam que uma cura adequada poderia elevar os resultados das amostras estabilizadas com cal e que a variação em função do tipo de solo foi pequena, sendo necessário um estudo com um número maior de solos (BUI *et al.*, 2018).

### 3.2. Tipo de energia de compactação adotada

A energia modificada foi utilizada de forma unânime pelos pesquisadores que adotaram a compactação por meio do Proctor (ÁVILA, PUERTAS e GALLEGOS, 2021; ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; CIANCIO, BECKETT e CARRARO 2014; CANIVELL *et al.*, 2018), conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Idade de ensaio, tipo de energia de compactação adotada e porcentagem e tipo de cal utilizada.

Fontes	Idade do ensaio de resistência à compressão, em dias:						Energia de compactação	Porcentagem e tipo de cal utilizada
	7	28	60	90	180	360		
1*	x	x	x	x	x	x	N.A.	3%, 5%, 7% e 9%
2		x					Proctor modificado	1ª fase: 3, 6, 9, 12, 15 e 18%. 2ª. fase: 12% de cal hidráulica
3		x					Proctor modificado	18% de cal hidráulica (referente ao volume)
4		x	x				Não fica claro	cal viva, pó de cal hidratada e sacarose
5	x						N.A.	3, 5 e 7% de cal viva e cal hidratada no mercado e cal viva e hidratada retirada da casca do ovo
6	x						N.A.	2,5% e 4% (cal hidráulica)
7		x					Proctor Modificado	2%, 3%, 4%, 5%, 6% de cal hidratada
8		x					Proctor Modificado	11,4% de cal
9		x					Não fica claro	8% cal hidratada
10		x					Proctor Modificado	1 e 2% de cal
11		x		x		x	Normal, intermediária e modificada	3, 5, 7, 9 e 11% de cal hidratada

Fonte: autoria própria com dados de (ROCHA, CONSOLI e JOHANN 2014; ÁVILA, PUERTAS e GALLEGOS, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO, BECKETT; CARRARO 2014; ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; BUI *et al.*, 2014; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; BALDOVINO *et al.*, 2018). \* os resultados de 28 e 60 dias foram descartados.

### 3.2. Idade dos corpos de prova solo-cal rompidos

A determinação de 28 dias de idade para romper os corpos de prova foi majoritária (Tabela 4). Segundo Maniatidis *et al.*, (2013) a cal atinge a sua resistência final mais lentamente que o cimento, e, portanto, o período de cura deve ser pelo menos três vezes superior ao utilizado para o cimento (que é de 28 dias). Esta condição ocorre pelo processo lento de endurecimento, resultado da reação da cal hidratada com o dióxido de carbono do ar (MINKE, 2022).

Por meio dos resultados dos diversos autores analisados, 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 (KANG, KWON e MOON, 2019).

Apesar disso, o estudo de Ávila; Puertas; Gallego (2021) indica que a maior parte da resistência e da rigidez é desenvolvida nos primeiros 20 a 30 dias de cura, relacionada à formação de agentes cimentantes na presença de água. Este fato pode estar relacionado com a baixa (ou inexistente) reação pozolânica, que pode não ocorrer devido ao tipo de solo selecionado (argilas pouco ativas, como a caulinita).

### 3.3. Teor e tipo de cal utilizada

Alguns dos artigos analisados utilizaram valores padrões para a adição de cal, ou mesmo tentaram estabelecer um valor ótimo deste aglomerante. Existe uma óbvia dificuldade de estabelecer critérios gerais para a quantidade de cal adicionada ao solo para a produção de taipa de pilão visto que o solo é um material natural e heterogêneo e, por tanto, sua estabilização também deve ser personalizada. Os valores de cal adotados pelos autores foram estabelecidos por meio de estudos de porosidade, impacto ambiental e reações pozolânicas. A maioria dos estudos realizados indicaram valores de adição de cal entre 3 e 9% e poucos realizaram testes com mais de 10% de adição de cal (Tabela 4).

Segundo Rocha, Consoli e Johann (2014) a resistência à compressão da taipa de pilão não depende apenas do teor de ligante cimentício, mas também de três outros fatores: peso unitário seco, tempo de cura e o teor de resíduo agregado.

Aumentar o teor de cal requer grandes mudanças para aumentar a resistência, enquanto uma pequena redução na porosidade pode alcançar o mesmo resultado, tornando-a mais sustentável ambientalmente. Segundo os autores, é preferível aumentar o peso unitário seco em vez do teor de ligante por razões ambientais. Pequenas alterações na porosidade têm um impacto significativo na resistência, tornando-a uma opção sustentável (ROCHA, CONSOLI e JOHANN, 2014).

Por outro lado, de acordo com Minke (2022), a resistência à compressão de um solo pode decrescer com o uso de cimento e cal em porcentagens menores que 5%, já que estes materiais podem interferir na coesão dos minerais da argila.

Segundo Ávila, Puertas e Gallego (2021), aumentar o teor de cal geralmente melhora as propriedades mecânicas, mas o pico de resistência à compressão de seu estudo ocorre com 9% de cal, um aumento de 11% em relação ao valor inicial. Teores mais elevados de cal, por outro lado, não melhoram significativamente a resistência, devido a um possível aumento da fragilidade e pelo desenvolvimento



de fissuras. O módulo de elasticidade, no entanto, mostra uma melhoria significativa (mais de 40% em relação ao valor inicial) com teores de cal superiores a 12%.

Ciancio, Beckett e Carraro (2014) buscaram estabelecer um valor ótimo de cal para um solo padrão apropriado para taipa de pilão. Para estabelecer este valor os autores utilizaram três métodos: a relação porosidade/cal; limite plástico e valor de Ph. Ciancio, Beckett e Carraro (2014) correlacionaram o teor ótimo de cal (saturação de cal na água do poro – valor de Ph em 12,4) com uma máxima resistência à compressão para misturas de solo estabilizadas com cal. Os três métodos indicaram valores entre 3 e 4% de adição de cal para elevar a qualidade da taipa de pilão. O fato de os autores não terem obtido valores mais elevados de resistência à compressão em adições acima de 4% de cal pode estar relacionado com a não saturação da cal, já que não houve ajustes na adição de água, que permaneceu no Teor Ótimo de Água (TOA) para todas as misturas testadas.

Outra questão relevante tem a ver com o tipo de cal utilizada. Segundo Saldanha *et al.*, (2021) a resposta mecânica varia com o tipo de cal. Os autores compararam a adição de cal, cal viva e cal hidratada no mercado e cal viva e hidratada retirada da casca do ovo e eles observaram que a resistência e a rigidez foram superiores ao usar cal de casca de ovo. Essas diferenças podem ser atribuídas, em parte, aos teores de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaO}$  presentes nas cascas do ovo, que contém quantidades significativas de óxido e hidróxido de cálcio, que promovem reações benéficas na formação de ligantes quando combinadas com materiais pozolânicos.

Por meio de um estudo a respeito da influência da cal na absorção de água, Soudani *et al.*, (2018) concluíram que diferentes porcentagens de cal não interferem no transporte da água das paredes de taipa de pilão, entretanto os testes foram realizados antes de qualquer reação química acontecer, já que foram rompidos imediatamente após a desmoldagem dos corpos de prova.

### 3.4. Critério para a adição de água

Dentre os artigos analisados, a maior parte apresenta como critério de adição de água o valor ótimo de água - encontrado por meio do ensaio de compactação do Proctor (Tabela 5). Entretanto, alguns autores utilizam valores pré-estabelecidos através de outros métodos não detalhados (ROCHA, CONSOLI e JOHANN, 2014), ou utilizam valores recorrentes na literatura ou mesmo não esclarecem qual a quantidade de água utilizada. Sabe-se, porém, que existe uma quantidade de umidade mínima para haver intercâmbio de íons no solo com cal para que se evite a penetração da água (MINKE, 2022).

Tabela 5: Método de secagem adotado por autores que moldaram corpos de prova representativos de taipa de pilão com adição de cal.

Fontes	Critério de adição de água	Tipo de secagem
[11]	14% para todas as amostras	envoltas em plástico e cura em sala úmida + submersão em água por 24 horas, 1 dia antes do rompimento
[1]	TOA	constante condições de CA. 25 °C e 40% de umidade relativa
[12]	TOA	mesmas condições ambientais (20 C±2 C e 65 ± 5% relativo umidade
[13]	N.A.	em condições de laboratório (T = (22 ± 3)°C, RH = (80 ± 5) %)
[14]	TOA	sacos plásticos e armazenados em uma sala com temperatura controlada (23 C) por 7 dias. Em sequência as amostras foram submersas em um recipiente com água por 24 horas antes do teste de UCS
[15]	não fica claro	nenhum período de cura foi considerado
[9]	TOA	condições constantes de 94 ± 2% de umidade relativa (RH) e 21 ± 1 C de temperatura. Parte das amostras, após 28 dias foi seco em estufa a 105 C por mais 24 horas antes do teste UCS.
[3]	TOA	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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) para manter a umidade relativa a 98%RH sob uma temperatura constante de 16 C.
[7]	Foram testados diferentes valores de adição de água (de 2 a 11%)	condições atmosféricas normais
[6]	TOA	Retiradas da fôrma após 1 dia e embaladas durante 21 dias
[16]	TOA	temperatura ambiente 23 + - 2 °c

Fonte: autoria própria com dados de (ROCHA, CONSOLI e JOHANN 2014; ÁVILA, PUERTAS e GALLEGU, 2021; CANIVELL *et al.*, 2018; FANG *et al.*, 2022; SALDANHA *et al.*, 2021; SOUDANI *et al.*, 2018; CIANCIO, BECKETT; CARRARO 2014; ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; BUI *et al.*, 2014; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; BALDOVINO *et al.*, 2018).

### 3.5. Tipo de cura realizada

O tipo de cura/secagem dos corpos de prova moldados foi o item que mais divergiu ao longo da análise. Os métodos variaram entre curas em ambientes controlados, curas úmidas, curas a temperaturas elevadas e curas em que houve o uso de plástico para embalar os corpos de prova, como uma possível substituição para a câmara úmida (ARAKI, KOSEKI e SATO, 2016; CIANCIO, JAQUIN e WALKER, 2013; SALDANHA *et al.*, 2021) (Tabela 5).

A cura úmida tem por objetivo tornar mais lento o processo de perda de água das amostras, visto que a reação pozolânica que surge pela interação solo-cal acontece de maneira progressiva ao longo do tempo e nesse processo a hidratação da cal é essencial (CIANCIO, BECKETT e CARRARO 2014). Outra questão importante é evitar a carbonatação da cal nas primeiras idades, o que pode precipitar a formação de carbonato de cálcio e diminuir os valores esperados para a resistência à compressão.

Curas a temperaturas mais elevadas aumentam a velocidade das reações, o que faz com que a resistência das amostras se eleve mais rapidamente. Entretanto, Ciancio, Beckett e Carraro (2014), não recomendaram esse tipo de cura pois este se difere muito dos processos reais de secagem das paredes de taipa de pilão e por isso geram resultados que não podem ser usados como comparativos.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso da cal como estabilizante para a taipa de pilão pode ser uma alternativa ao uso do cimento principalmente pela menor energia incorporada que acrescenta ao sistema. Com base na análise dos diversos artigos, o tipo de solo, a adição de água, o tipo de cura, porcentagem teor e o tipo de cal utilizados desempenham papéis significativos na resistência e na rigidez da taipa de pilão estabilizada.

Entender a composição química do solo trabalhado é essencial para determinar o tipo e a quantidade de estabilizante químico a ser adicionado a fins de estabilizar a terra. O período de cura, embora muitas vezes fixado em 28 dias, pode influenciar positivamente a resistência se ampliado para tempos de cura mais longos.

A adição de água requer atenção, visto que pouca água pode não hidratar a cal e não promover as reações necessárias para a estabilização química; e a incorporação elevada de água pode aumentar o volume de poros e dificultar o processo de moldagem. É por isso que a maioria dos artigos analisados adotaram o TOA.

Em relação aos teores ideais de adição de cal, não há um consenso. Alguns autores sugerem adições menores de cal em solos mais argilosos. Entretanto, a adição de cal não parece funcionar bem em solos arenosos. O tipo de argila também influencia na eficácia da interação solo-cal. Valores acima de 8% de adição de cal são considerados pouco sustentáveis. Dessa forma, a redução da porosidade é uma estratégia para elevar a resistência sem a necessidade de um

elevado aumento do teor de cal. Além disso, divergências ocorrem no método de cura, com a cura úmida prolongando a formação de ligantes, mas curas a altas temperaturas gerando resultados questionáveis.

O uso da cal na taipa de pilão, embora tradicional, não é estudada de forma exaustiva como o cimento. Esse tipo de estabilização se diferencia do cimento e por isso deve ser tratada de forma distinta. Sua utilização pode significar um aumento da qualidade das paredes de taipa de pilão com uma menor energia incorporada. Por tanto, é fundamental ressaltar a otimização dos parâmetros para a produção de taipa de pilão estabilizada com cal.

## REFERÊNCIAS

ARAKI, H., KOSEKI, J., & SATO, T. Tensile strength of compacted rammed earth materials. **Soils and Foundations**, 56(2), 189–204, 2016.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.02.003>

ARRIGONI, A., BECKETT, C., CIANCIO, D., & DOTELLI, G. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, 142, 128–136, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>

ÁVILA, F., PUERTAS, E., GALLEGRO, R. Experimental evaluation of the optimum lime content and strength development of lime-stabilized rammed earth.

**International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements**, 9(3), 239–248, 2021. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V9-N3-239-248>

BALDOVINO, J. DE J. A., IZZO, R. L. DOS S., MOREIRA, E. B., & ROSE, J. L. Optimizing the evolution of strength for lime-stabilized rammed soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 11(4), 882–891, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.10.008>

BUI, Q. B., MOREL, J. C., HANS, S., & WALKER, P. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. **Construction and Building Materials**, 54, 163–169, 2014.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.067>

CANIVELL, J., MARTIN-DEL-RIO, J. J., ALEJANDRE, F. J., GARCÍA-HERAS, J., & JIMENEZ-AGUILAR, A. 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**, 191, 826–836, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.207>

CAPUTO, HOMERO PINTO. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 5ª edição, 1978.

CIANCIO, D., BECKETT, C. T. S., & CARRARO, J. A. H. Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth. **Construction and Building Materials**, 53, 59–65, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.077>

CIANCIO, D., JAQUIN, P., & WALKER, P. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. **Construction and Building Materials**, 42, 40–47, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.12.049>

EIJK, D. VAN, & SOUZA, V. C. M. DE. Surgimento, desenvolvimento e desaparecimento da técnica taipa de pilão no Brasil. **Conservar Patrimônio**, 3(4), 17–24, 2006.

FANG, S., MENG, C., ZHANG, K., HU, W., & LIU, X. New insight into the craftsmanship of sucrose-modified rammed earth-lime materials. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, 21(3), 1019–1028, 2022. <https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1928505>

FERNANDES, M. A taipa no mundo. **digitAR - Revista Digital de Arqueologia, Arquitetura e Artes**, 1, 2013. [https://doi.org/10.14195/2182-844X\\_1\\_2](https://doi.org/10.14195/2182-844X_1_2)

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.

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

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](http://www.redproterra.org). Acesso em: 7 jun. 2021.

KANG, S. H., KWON, Y. H., & MOON, J. Quantitative Analysis of CO<sub>2</sub> Uptake and Mechanical Properties of Air Lime-Based Materials. **Energies** 2019, Vol. 12, Page 2903, 12(15), 2903, 2019. <https://doi.org/10.3390/EN12152903>

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.

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

MANIATIDIS, V., & WALKER, P. A review of rammed earth construction. **Innovation Project “Developing Rammed Earth for UK Housing”**, Natural Building Technology Group, Department of Architecture & Civil Engineering, University of Bath, 12, 2003.

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.



ROCHA, C. G. DA, CONSOLI, N. C., & JOHANN, A. Greening stabilized rammed earth: Devising more sustainable dosages based on strength controlling equations.

**Journal of Cleaner Production**, 66, 19–26, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.041>

SALDANHA, R. B., DA ROCHA, C. G., CAICEDO, A. M. L., & CONSOLI, N. C. Technical and environmental performance of eggshell lime for soil stabilization.

**Construction and Building Materials**, 298, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.1236484>

SOUDANI, L., FABBRI, A., WOLOSZYN, M., GRILLET, A. C., & MOREL, J. C.

Hydric characterisation of rammed earth samples for different lime concentrations.

**IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 143(1), 2018.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/143/1/012010>

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG [processo APQ-00172-23].