

Estabilização de argamassas de terra: Uma revisão

Earth mortars stabilization: A review

Inês Carreira¹, Isabel Pombo Cardoso^{1*}, Paulina Faria²

¹ LAQV-REQUIMTE, Departamento de Conservação e Restauro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

² CERIS e Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal

*Autor correspondente: isabel.pombocardoso@gmail.com

Resumo

A terra como material de construção tem sido alvo de um renovado interesse por se enquadrar nas actuais preocupações ambientais e de eco-eficiência. De facto, é um material ecológico e economicamente eficiente, revelando também propriedades de optimização do conforto no interior de edifícios.

As argamassas de terra apresentam, no entanto, uma limitação: a sua susceptibilidade à água. De forma a viabilizar a sua utilização de forma mais abrangente, em ambientes interiores e exteriores onde possa existir contacto com água, tem vindo a ser estudada a inclusão de agentes estabilizantes. Neste artigo apresenta-se uma revisão crítica do efeito de estabilizantes mais comuns utilizados em argamassas de terra, nomeadamente: fibras vegetais; ligantes tais como sulfatos de cálcio, cais aéreas e cais com propriedades hidráulicas, cimento; e óleos. Verifica-se que alguns destes estabilizantes parecem melhorar a resistência da terra à água líquida. No entanto, na maior parte das vezes, essa melhoria ocorre em detrimento de outras propriedades importantes, que são também discutidas.

Palavras-chave

Ligantes; Minerais argilosos; Suscetibilidade à água; Estabilizantes; Rebocos

Abstract

Earth as a building material has been gaining a renewed interest due to current environmental and eco-efficiency concerns. Indeed, earth is an ecological and economically efficient material that can also contribute to increase indoor comfort.

However, earth mortars have a limitation: their susceptibility to water. In order to implement a more comprehensive use in indoor and outdoor environments, where there may be contact with water, the inclusion of stabilizing agents has been studied. This article presents a critical literature review of the effect of the most common stabilizers used in earth mortars, specifically: vegetable fibres; binders such as calcium sulfates, air limes and limes with hydraulic properties, cement; and oils. It appears that some of these stabilizers seem to improve the earth mortars resistance to liquid water. However, in most cases, this improvement occurs at the expense of other important properties, which are also discussed.

Keywords

Binders; Clay minerals; Susceptibility to water; Stabilizers; Plasters and renders

Introdução

A terra argilosa foi um dos primeiros materiais de construção a ser utilizado pelo homem, existindo inúmeras evidências do seu uso desde a Pré-História [1]. A sua utilização é de tal forma abrangente e relevante que estudos recentes revelam que 30 % da população mundial vive em construção em terra [2] e, números da UNESCO, indicam que 20 % do Património Mundial Cultural classificado é total ou parcialmente construído neste material [3]. Este Património classificado, de valor incalculável, inclui edificações históricas e arqueológicas, construídas com alvenaria de adobes, em taipa e tabique ou utilizando a terra em argamassas de assentamento ou reboco [4].

A utilização de terra para construção teve o seu declínio com o advento da Revolução Industrial, que veio tornar o tijolo (bloco cozido) mais facilmente acessível ao construtor. Mais tarde, o desenvolvimento do cimento Portland e a utilização de ferro e aço vieram permitir a construção em altura e com estruturas mais robustas, sobrepondo-se a sua utilização à da terra [5].

Nas últimas décadas, a crescente preocupação ambiental tem vindo a encorajar o estudo de materiais eco-eficientes para a construção, voltando-se recentemente ao estudo dos materiais à base de terra devido às vantagens que apresentam sobre materiais “modernos”, como o cimento, de muito maior energia incorporada. Entre essas vantagens destacam-se os factos da terra ser um material que é reciclável, não-poluente, não-tóxico, com baixa energia incorporada, abundante na natureza, capaz de contribuir para o conforto interior e a qualidade do ar quando aplicado em ambientes interiores, e ao qual se alia um baixo custo [6]. Acresce ainda a relevância da utilização deste material na construção e reabilitação não só de edificações contemporâneas, mas também na conservação e restauro de construções históricas e arqueológicas construídas em terra, pedra, cais ou materiais cerâmicos, dada a sua compatibilidade e adequabilidade com estes material.

A terra apresenta, no entanto, um desafio para a sua utilização: a sua susceptibilidade à água líquida [6-8]. Assim, em primeiro lugar, pretende-se analisar o mecanismo responsável por esta susceptibilidade.

A estabilização da terra é essencial para a viabilização da sua utilização quando em contacto por exemplo com a chuva incidente. Muitos têm sido os estudos que se debruçam sobre a adição de estabilizantes à terra e, nomeadamente, às argamassas de terra, não só com o objectivo de ultrapassar esta desvantagem, mas também com o propósito de potenciar outras características vantajosas. A dispersão destes trabalhos torna urgente uma revisão de literatura que investigue e sintetize os tipos de estabilizantes comumente utilizados na formulação de argamassas de terra, os objectivos da sua adição e os resultados obtidos com esses diferentes estabilizantes.

Com a justificação da susceptibilidade à água das argamassas de terra e com os resultados da adição dos diferentes estabilizantes pretende-se contribuir para a optimização da forma de solucionar o problema, que incluam soluções de reutilização ou reciclagem dos materiais estabilizados.

Terra e minerais argilosos

Terra

A terra utilizada para construção é terra argilosa. Esta terra é composta por minerais argilosos (partículas de pequena dimensão formadas por reacções químicas), contendo também minerais associados (nomeadamente areias e siltes formados por desintegração de rocha), e fases associadas (não-cristalinas, amorfas, nomeadamente matéria orgânica) [9-10]. Entre estes constituintes, os minerais argilosos são identificados como os compostos de uma terra que mais influenciam as suas propriedades físico-mecânicas, nomeadamente por conferirem plasticidade e capacidade de aglutinação à terra quando endurece por secagem [9], sendo esta a característica que torna a terra relevante enquanto material de construção.

Minerais argilosos e susceptibilidade à água líquida

A formação de minerais argilosos é resultado da meteorização química das rochas e subsequente sedimentação. Durante os ciclos de meteorização ocorrem reacções de oxidação, hidratação, carbonatação e lixiviação devido à presença de água e ácidos orgânicos no meio envolvente. Como consequência, os minerais de rocha degradam-se gradualmente, depositam-se, formam soluções de grãos e finalmente cristalizam sob diferentes condições de pressão e temperatura, dando origem a novos minerais que podem ter arranjos moleculares completamente díspares dos “originais” [10].

Os minerais argilosos são estruturas complexas compostas por silicatos de alumínio, magnésio e ferro hidratados. Estas estruturas em folhas, denominadas filossilicatos,

apresentam elevada área superficial específica, sendo o seu comportamento essencialmente “governado” por fenómenos ocorrentes nas suas superfícies [10].

A estrutura cristalina destes minerais baseia-se em dois tipos de unidades estruturais: unidades tetraédricas (T) – em que quatro átomos de oxigénio “encapsulam” um átomo de silício, alumínio ou ferro (p. ex. SiO_4), e unidades octaédricas (O) – em que um átomo de alumínio, ferro ou magnésio é “encapsulado” por seis de oxigénio ou grupos hidroxilo (p. ex. $\text{Al}(\text{OH})_2\text{O}_4$) [10-12].

As unidades tetraédricas estão ligadas a outras adjacentes formando uma folha T. As unidades octaédricas ligam-se, igualmente, a unidades adjacentes, formando folhas O [11]. Estas folhas distintas sobrepõem-se formando camadas.

Existem dois tipos de camadas: camada tetraédrica-octaédrica (TO), e camada tetraédrica-octaédrica-tetraédrica (TOT). Estas camadas, por sobreposição, formam agregados do tipo TO-TO ou TOT-TOT.

A ligação entre folhas pode resultar numa estrutura de carga neutra, o que se verifica essencialmente nas camadas de estrutura TO, ou negativamente carregada, frequente nas estruturas TOT [12].

As ligações entre camadas TO-TO por pontes de hidrogénio são bastante fortes, resultando num espaço entre camadas reduzido e sendo muito difícil separar os vários agregados formados. Este é o caso das caulinites, que apresentam uma estrutura TO e apresentam como característica a relativa estabilidade, resultando numa dificuldade na incorporação de água entre camadas e numa variação dimensional reduzida [10, 13].

Ocorre carga negativa quando se verifica substituição isomórfica tanto nas folhas T como nas folhas O [11]. Este é o caso das camadas TOT. Estas substituições isomórficas parciais nas folhas T e/ou O dão origem a camadas TOT com excesso de carga negativa, que torna a sua superfície bastante reactiva. A carga superficial negativa destas camadas é compensada pela adsorção, entre as camadas dos agregados TOT-TOT, de catiões presentes no meio aquoso envolvente [10, 12-14]. Estes catiões compensadores de carga, denominados catiões permutáveis, não pertencem à estrutura cristalina (podem ser substituídos por outros) e são responsáveis por diferentes propriedades superficiais que vão depender da natureza e densidade dessa carga [9, 12]. As ligações que se estabelecem entre as camadas TOT são, portanto, mais fracas em comparação com as observadas entre camadas TO [10]. Este é o caso das ilites e montmorilonites que apresentam uma estrutura TOT de maior área superficial e com diferenças de carga, que conferem maior susceptibilidade a reacções entre as camadas dos agregados TOT-TOT, nomeadamente incorporação de água resultando na expansibilidade destes minerais – maior no caso das montmorilonites [13].

Note-se que é a presença de catiões permutáveis que confere aos minerais argilosos as suas características hidrofílicas. Estes catiões, caracteristicamente hidrofílicos, são

adsorvidos entre camadas e agregados. No entanto, podem apresentar carga positiva excedente após satisfazer a superfície negativa das camadas, sendo a sua carga atenuada pela sua associação a moléculas de água. Uma vez adsorvidos nos espaços entre camadas ou entre agregados, observa-se um incremento da sua capacidade de adsorção de água e outras moléculas hidratadas [12, 15].

Este fenómeno de ocupação reversível de diferentes espécies nos espaços entre agregados e camadas de minerais argilosos é denominado como intercalação. Esta intercalação, normalmente por adsorção, pode dar origem à expansão dos minerais argilosos, observando-se macroscopicamente na terra, pelo aumento da distância entre agregados ou entre camadas [12]. Esta distância pode aumentar infinitamente, ocorrendo primeiramente delaminação, em que se observa separação dos vários agregados e camadas dos minerais, mas onde ainda existe algum grau de interacção entre as camadas e alguma orientação cristalina, e, depois, exfoliação, em que há uma inexistência de interacção entre as camadas que se tornam móveis, difundindo-se aleatoriamente na água líquida [9, 12]. Este comportamento é observável à escala macroscópica, verificando-se a desagregação da terra (e dos produtos da construção à base de terra, como é o caso das argamassas de terra) quando em contacto com água líquida. No entanto, é também esta capacidade de adsorção-dessorção que explica, ainda, o excelente desempenho higroscópico dos rebocos com argamassas de terra, que lhes permitem funcionar como um buffer passivo relativamente à regulação da humidade relativa no interior de edifícios.

Estabilização das argamassas de terra

Estabilizantes

A adição de estabilizantes, em pequena quantidade, a uma argamassa de terra tem como intuito atenuar, conferir ou alterar determinadas características identificadas como vantajosas ou desvantajosas para o seu bom desempenho na função que terá na construção. Note-se, no entanto, que é expectável que estes compostos estabilizantes alterem não apenas as características desejadas, mas influenciem outras propriedades da argamassa. Em particular menciona-se que estes materiais podem revelar como desvantagem o facto de contribuírem para o aumento da energia incorporada das argamassas de terra e, conseqüentemente, ter conseqüências na sua eco-eficiência [4]. Esta questão tem vindo a estimular a procura por estabilizantes de baixa energia incorporada, nomeadamente resultantes de resíduos, que mantenham a reciclabilidade das argamassas no final da sua vida útil e que não alterem significativamente as suas restantes propriedades [7, 16].

Diversos compostos têm vindo a ser avaliados para estabilização das argamassas de terra sendo os óleos, as cais, o gesso, os cimentos e as fibras naturais os compostos mais comumente referidos em bibliografia (Tabela 1, [17-32]). Esta revisão de literatura revelou não existir relação entre os estabilizantes adicionados e o produto da construção

ou finalidade da sua aplicação. Com efeito, alguns são usados indiscriminadamente para argamassas de terra, mas também na produção de adobe ou taipa.

Da mesma forma, esta revisão revelou que todos os estabilizantes identificados adicionados têm como objectivo comum o incremento da resistência das argamassas de terra face à água líquida (ex. [6, 19, 21]). Como excepção surge da adição de fibras naturais, que são referidas como tendo como objectivo principal contribuir para reduzir a retração por secagem e incrementar a resistência mecânica (ex. [25, 32]), embora tal não seja muitas vezes verificado [33], pois depende do tipo e preparação das fibras e do seu teor.

Na literatura são frequentemente apenas apresentadas, e sem tentativa de explicação, as alterações verificadas no desempenho físico-mecânico incluindo a resistência à água, das argamassas de terra por adição dos vários estabilizantes. Igualmente, esta apreciação raramente é acompanhada pela caracterização química e mineralógica do produto final, isto é, das argamassas estabilizadas, sendo o recurso a técnicas analíticas, como a difracção de raiosX ou a fluorescência de raiosX, comum apenas para identificação dos materiais constituintes das argamassas antes da sua mistura.

Tabela 1. Materiais utilizados na estabilização de argamassas e outros elementos da construção de terra e respetivas referências.

Estabilizante	Técnicas	Referências
	Adobe	[17-19, 25-26]
Cimentos	Rebocos/argamassas	[4, 6, 23]
	Taipa	[17-19, 30]
Cais com propriedades hidráulicas	Rebocos/argamassas	[4, 6, 21-23]
	Adobe	[17-20]
Cais aéreas	Rebocos/argamassas	[4, 6, 21-23]
	Taipa	[17-19, 24]
Sulfatos de cálcio	Adobe	[25-26]
	Rebocos/argamassas	[7, 23, 27-29]
Óleos	Adobe	[17-19]
	Rebocos/argamassas	[7, 23, 29]

	Taipa	[17-19]
	Adobe	[25-26]
Fibras vegetais	Rebocos/argamassas	[6-7, 16, 22, 31-32]

É preciso também alertar que as conclusões retiradas pelos autores – a nível de vantagens e desvantagens da adição de estabilizantes nas argamassas– nem sempre são claramente transponíveis e comparáveis entre publicações, por falta de informação detalhada ou por se tratarem de estudos com objetivos muito diferentes. Note-se ainda que, para esta revisão, se contou apenas com as publicações em que o estabilizante representa menos de 50 % do total da mistura final da argamassa estabilizada.

Resultados da estabilização com diferentes ligantes

Cimentos

Vários autores referem a utilização de “cimento” [25-26], cimento Portland [4, 19, 22] e cimento natural [4, 22]. De forma simplificada, o cimento natural é um ligante à base de clínquer: silicatos e aluminatos cálcicos obtidos por queima de matérias-primas ricas em carbonato de cálcio, sílica e outros óxidos, nomeadamente, calcário e margas. O cimento Portland é obtido por queima a temperaturas superiores às do cimento natural e por inclusão de aditivos como, por exemplo, gesso para retardar o tempo de presa [34-35].

Como vantagem da adição de cimento às argamassas de terra, e apesar da diminuição da massa volúmica, é referido o aumento da resistência à compressão e flexão [26]. No entanto, Zak et al. [25] observam, contrariamente, a perda de resistência à compressão das suas argamassas, sendo esta discordância talvez justificada pelo teor e tipo do cimento utilizado na formulação das argamassas, que não é especificado. Observam, também, menor retracção com a adição de cimento, mas indicam a perda de trabalhabilidade da argamassa. A perda desta capacidade plástica poderá ter consequências por dificultar a sua aplicação. Por outro lado, como os cimentos têm geralmente elevado teor de sais, a sua introdução como estabilizante de argamassas de terra pode torná-las incompatíveis quimicamente com edifícios antigos. Efectivamente, a estabilização de argamassas de terra com cimento pode contaminar os suportes antigos com sais e acelerar a deterioração dos materiais originais presentes, que supostamente teriam a função de proteger. É ainda referido o incremento da condutibilidade térmica das argamassas aditivadas com cimento. Embora as argamassas de reboco sejam aplicadas em espessuras relativamente reduzidas (cerca de 2 cm) e o decréscimo de resistência térmica conferido por uma argamassa com elevada condutibilidade térmica seja reduzido por ser proporcional à espessura de aplicação, tal não contribui para o conforto de interiores [25].

Como vantagem da adição de cimento Portland comparativamente à utilização de outros ligantes, Gomes et al. [4] observam a diminuição da retracção das argamassas. Eires et al. [19] notam o aumento da resistência à compressão das suas argamassas de terra aditivadas com cimento Portland. Por outro lado, é referido o aumento da absorção de água por capilaridade com adição deste cimento, menor permeabilidade ao vapor e redução da capacidade de secagem das argamassas [4]. Com a adição de cimento natural Gomes et al. [6] referem, como vantagem, a diminuição da condutibilidade térmica.

A estabilização com cimento natural parece aumentar também a resistência à compressão e flexão das argamassas [6]. Como desvantagens, são notados o aumento da retracção, o aumento da absorção de água por capilaridade e a redução da capacidade de secagem [4].

Na globalidade, a utilização de cimento como agente estabilizador de argamassas de terra não parece ser adequada. De facto, para além das desvantagens mencionadas, nomeadamente a perda de trabalhabilidade ou deformabilidade, é necessário referir a grande energia incorporada deste material e a sua consequência na análise do ciclo de vida argamassa, que deixa de ser perfeitamente reciclável em fim-de-vida.

Cais com propriedades hidráulicas

As cais com propriedades hidráulicas incluem cais hidráulicas naturais (NHL), resultantes da calcinação de rocha calcária (CaCO_3) + argilas (SiO_2 e Al_2O_3), sem aditivos. Incluem também cais hidráulicas, (HL) que na sua produção já podem conter aditivos, para além de cais formuladas [36]. Como a classificação diferenciando as cais com propriedades hidráulicas em NHL e HL é relativamente recente (tem uma década), e antes ambas as cais eram designadas como cais hidráulicas, muitas publicações não permitem distinguir que tipo de cal com propriedades hidráulicas foi utilizada, o que dificulta esta análise.

É referido o aumento da resistência mecânica das argamassas aditivadas com cais com propriedades hidráulicas, sendo notado que estas apresentam melhores resultados que quando estabilizadas com cal aérea [21]. É também referida a melhoria da resistência à água líquida, sendo a argamassa de terra estabilizada com uma cal HL [4] ou com uma cal NHL [21] indicada como mais impermeável e apresentando menor abrasão por acção de jacto de água que quando estabilizada com uma cal aérea.

Como desvantagem é referido o ligeiro aumento da retracção das argamassas aditivadas com cal HL [4] ou com cal NHL [21]. Santos et al. [21] referem também o clareamento da cor de reboco de argamassa de terra castanha escura quando estabilizada com NHL.

Tal como para o cimento, o acréscimo de energia incorporada pela adição deste estabilizante deve ser tida em conta no desenvolvimento de argamassas eco-eficientes.

Cais aéreas

A cal aérea é utilizada, na bibliografia consultada, em diferentes estados: cal aérea hidratada (extinta, hidratada, apagada) – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [4, 13, 16, 19, 21] e cal viva – CaO [19]. São aplicadas mais frequentemente cais cálcicas do que dolomíticas [36].

Como vantagem deste tipo de estabilização com cal aérea é referida a melhoria da resistência à água líquida, nomeadamente o incremento da coesão superficial [4, 21], e a redução da susceptibilidade ao desenvolvimento biológico [16]. Esta última deve-se à alteração do pH das argamassas de terra com a estabilização com cal aérea

No entanto, alguns investigadores verificaram a redução da resistência mecânica das argamassas de terra com baixas adições de cal aérea [4, 16, 19, 21]. É ainda referido que a adição de cal aérea a um reboco de terra reduz drasticamente a sua higroscopicidade e, assim, a capacidade de regulação da humidade relativa no interior dos edifícios [32].

A cal viva é indicada por Eires et al. [19] como conduzindo a uma maior resistência mecânica, menor taxa de erosão e menor permeabilidade em comparação com argamassas de terra não estabilizadas com cal. Com a cal hidratada (apagada) observa-se menor resistência à compressão, maior permeabilidade e baixa taxa de erosão [19].

A redução da resistência das argamassas de terra quando estabilizadas com baixos teores de cal aérea deve-se à rede de carbonato de cálcio interromper as ligações entre os agregados de argila, sem ser suficientemente forte para as substituir [6, 16]. Da mesma forma, a intercalação da rede de carbonato de cálcio entre os agregados da argila será responsável pela redução da higroscopicidade.

Embora a estabilização das argamassas de terra com cais aéreas apresente várias vantagens, a energia incorporada deste aditivo (obtido a cozedura sensivelmente a metade da temperatura que a utilizada para produção de cimentos) deve ser tida em atenção. Para além disso, a estabilização de uma argamassas de terra de cor forte mesmo que com baixo teor de cal pode implicar uma drástica alteração da sua cor [21], à semelhança do referido com adição de NHL. A argamassa fica muito mais clara principalmente em rebocos, devido à concentração de finos do ligante à superfície pelo acabamento superficial.

Sulfatos de cálcio

Na bibliografia, o termo gesso nem sempre é suficientemente esclarecido: Mattone e Bignamini [10], Lima et al. [7] e Lima et al. [28] referem a utilização de gesso hemi-hidratado, enquanto Ashour et al. [26] e Zak et al. [25] não especificam o estado de hidratação do sulfato de cálcio utilizado nas suas argamassas.

Segundo Lima et al. [7] e Lima et al. [28], a utilização de até 20 % de sulfato de cálcio hemi-hidratado na estabilização de argamassas de terra ilítica contribui para o aumento

da resistência à flexão e compressão, da resistência à erosão por abrasão e da aderência ao suporte, observando-se maior coesão superficial que em argamassas não estabilizada. Zak et al. [25] parecem contradizer este ponto, referindo que a adição de gesso levou à diminuição da resistência à compressão das suas argamassas. É preciso notar, no entanto, que este artigo não clarifica qual o tipo de gesso e em que percentagem foi adicionado à argamassa, e talvez estas questões possam justificar as diferenças.

Lima et al. [7] and Lima et al. [28] referem que a adição de sulfato de cálcio hemi-hidratado diminui a retração, de argamassa de terra ílítica, reduzindo a probabilidade de fissuração de reboco durante a secagem. É referido o ligeiro aumento da permeabilidade à água líquida (absorção de água sob baixa pressão e por capilaridade), mas associado a uma menor degradação da superfície da argamassa, associada a um aumento da sua resistência à água. Com efeito, ao contrário do que sucede com a argamassa de terra não estabilizada, a degradação da superfície é quase inexistente [7]. No entanto, não são apresentadas justificações para o ocorrido.

Como desvantagem desta estabilização é referida uma ligeira diminuição da adsorção e desadsorção de vapor de água, mantendo, no entanto, uma elevada capacidade de regulação da humidade relativa no interior comparativamente a argamassa só de gesso [32].

Resultados da estabilização com óleos

Outros produtos referidos na bibliografia comumente usados para estabilização de argamassas de terra devido à sua baixa afinidade com a água são os óleos, nomeadamente óleo de linhaça [7, 23, 29], óleo de linhaça associado a cera de abelha [10] e óleo de soja usado [9]. Como vantagem é observada a diminuição da permeabilidade à água líquida e da absorção por capilaridade e a redução da perda de massa por abrasão superficial por acção da água [7, 19, 23, 29]. É ainda referido o aumento da resistência à flexão e abrasão, e ligeiro aumento da resistência à compressão [19, 29].

É notada, como desvantagem, uma drástica diminuição da capacidade de adsorção-desadsorção de vapor de água pelas argamassas de terra [7, 29]. É ainda referido o aumento da vulnerabilidade biológica nestas argamassas, observando-se, em particular, o desenvolvimento de fungos [19]. É ainda necessário notar que o desenvolvimento de fungos poderá ter consequências não apenas ao nível do decaimento da argamassa em si, mas também ao nível da qualidade do ar interior quando utilizada em rebocos à vista. A utilização de óleo, apesar de se revelar ser bastante interessante no aumento da resistência à água líquida, apresenta drásticas consequências a nível da capacidade de regulação da humidade relativa no interior através de rebocos com estas argamassas, pela redução da higroscopicidade.

Alguns óleos, por serem reutilizados, não deverão apresentar aumento da energia incorporada das argamassas de terra. Ao contrário dos ligantes anteriormente mencionados e das fibras vegetais, que só podem ser aplicados na formulação das argamassas, os óleos podem, em alternativa, ser aplicados apenas como tratamento superficial. Assim, a sua utilização dependerá dos requisitos fundamentais pretendidos.

Resultados da estabilização com diferentes fibras vegetais

A recolha de bibliografia revelou a utilização de um vasto conjunto de fibras vegetais para a optimização de argamassas de terra, nomeadamente: fibras de palha de aveia [7, 16, 35], fibras de sementes de tabúia [7, 35], fibras de trigo [26], fibras de cevada [26], fibras de linho [25], fibras de cânhamo [6, 22, 25]. Obviamente o tipo, teor de fibras adicionado e a sua preparação (por exemplo dimensões) terá influência significativa nas propriedades finais das argamassas. Tal como referido anteriormente, a adição de fibras constitui apenas uma estabilização física, uma vez que não ocorre qualquer reação química. Tal como referido anteriormente, uma terra para argamassa de reboco é desterroada e peneirada para se removerem partículas de dimensão superior à da areia. Assim fica constituída por areia, silte e argila. Quando uma terra é muito argilosa, para que não fendilhe muito por retração ao ser usada para um reboco, tem de se adicionar à terra, na amassadura com água, mais areia ou, em alternativa mais ecológica, fibras naturais de pequena dimensão (como as fibras de tabua) ou cortadas em pequenas dimensão (não muito superiores a 1 cm) que sejam subprodutos agrícolas. As fibras vão ocupar espaço por entre a matriz argilosa.

Assim, e de acordo com a bibliografia, a adição de fibras às argamassas de terra resulta sempre numa diminuição da sua massa volúmica e da sua condutibilidade térmica [6, 22, 26]. Esta última característica terá interesse para a eco-eficiência da construção, uma vez que indica um maior contributo para o isolamento térmico do interior de um edifício. No entanto esse contributo depende do tipo de aplicação da argamassa: se for aplicada num reboco com cerca de 2 cm de espessura, a variação de contributo não é muito relevante.

É também reportado o aumento da deformabilidade, o que pode facilitar, por exemplo, a aderência de rebocos, para além da menor tendência para fendilhação. Mas, em oposição, verifica-se uma redução da resistência à compressão, o que poderá ser problemático para construções que necessitem suportar grandes cargas (quando a argamassa é aplicada em juntas de assentamento de alvenaria) ou choques (quando em rebocos) [25].

Associada à redução da massa volúmica e ao aumento da porosidade, ocorre o aumento da permeabilidade ao vapor de água e, dentro de certos limites, o aumento da aderência ao suporte. Obviamente se a adição de fibras for elevado demais, a aderência reduzirá por falta de matriz argilosa.

Por outro lado, a estas vantagens associam-se desvantagens por aumento da permeabilidade à água líquida, com o aumento da absorção por capilaridade, e o aumento do tempo de secagem [7]. Por fim, é ainda referido como desvantagem o aumento da receptividade biológica das argamassas [16, 19].

A utilização de fibras na composição das argamassas de terra, mesmo que não tenha consequências significativas em termos ecológicos, mas tem valoração estética. Com efeito, por entrevistas realizadas a produtores de argamassas de terra, foi recolhida a informação que a adição de fibras naturais é muitas vezes uma opção principalmente estética.

Tabela 2. Efeitos principais de estabilização de argamassas de terra com baixos teores.

Estabilizante	Massa volúmica e condutibilidade	Comportamento mecânico	Higroscopicidade	Resistência à água	Alteração de cor	Energia incorporada
Cimentos	Ligeiro aumento	Ligeiro aumento	Espectável decréscimo	Aumento	-	Aumento muito significativo
Cais com propriedades hidráulicas	Ligeiro aumento	Pouco significativo	Espectável decréscimo	Aumento	Forte clareamento com terras escuras	Aumento significativo
Cais aéreas	Ligeiro aumento	Decréscimo	Decréscimo	Aumento	Forte clareamento com terras escuras	Aumento significativo
Sulfatos de cálcio	Pouco significativo	Aumento	Ligeiro decréscimo	Aumento ligeiro	Ligeiro clareamento	Aumento ligeiro
Óleos naturais	Pouco significativo	Pouco significativo	Decréscimo	Aumento	Ligeiro escurecimento	Aumento ligeiro
Fibras vegetais	Decréscimo positivo	Ligeiro decréscimo	Pouco significativo	Pouco significativo	Pouco significativo	Sem significativo

Análise final

Diferentes estabilizantes têm distintos efeitos em argamassas de terra. Na tabela 2 apresenta-se uma síntese dos efeitos de baixos teores de estabilizantes nas características de argamassa de terra. No entanto, pela inexistência de dados concretos relativos à utilização de alguns tipos de estabilizantes em argamassas de terra, por vezes não se apresentam dados ou apresentam-se apenas os efeitos espectáveis.

Quanto à redução da massa volúmica e da condutibilidade térmica, são de salientar as fibras naturais [33]. No entanto, para aplicação das argamassas de terra em rebocos, nenhum dos estabilizantes têm um efeito muito negativo.

Relativamente ao comportamento mecânico, salienta-se a melhoria pela adição de sulfato de cálcio hemi-hidratado [28, 32]. No caso de alguns ligantes, tal como a cal aérea [6, 16, 21, 32], ocorre um decréscimo em vez de um aumento das características mecânicas. Essa redução é devida à intercalação da rede criada pelo respectivo ligante, que é relativamente fraca pelo baixo teor de ligante, por entre os agregados de argila, dificultando essas ligações.

Todos os ligantes e óleos têm um efeito negativo na higroscopicidade, reduzindo a capacidade de adsorção e desadsorção cíclica de vapor de água [23, 32]. É também a intercalação da rede criada pelo ligante, por entre os agregados da argila, que provoca a redução da higroscopicidade. No entanto, o gesso hemi-hidratado surge como a única adição que associa um aumento das características mecânicas apenas a um ligeiro decréscimo da higroscopicidade, características particularmente importantes em rebocos interiores, com efeitos no conforto, qualidade do ar interior e, logo, na saúde dos ocupantes e, até, na redução das necessidades energéticas para climatização [28, 32]. A influência das fibras naturais na higroscopicidade de rebocos de terra é muito baixa pois, embora as fibras sejam geralmente bastante higroscópicas, a matriz de argila onde se vão inserir também o é [33].

Todos os ligantes e óleos têm um efeito positivo na resistência à água, mostrando ser claramente essa a razão principal pela sua aplicação [7]. Já a melhoria garantida pela utilização de fibras naturais, criando rugosidade em rebocos após lavagem dos finos superficiais e, dessa forma, contribuindo para menos água escorrer pela superfície, só será significativa em construção mais vernácula e já não suficiente para os requisitos actuais da construção. No entanto, os requisitos que se colocam a um reboco face à água variam muito com o seu local de aplicação: em rebocos interiores ou exteriores e, em rebocos interiores, em zonas secas ou húmidas; na conservação de construções arqueológicas, ao funcionarem como rebocos de sacrifício, as argamassas de terra tem de garantir compatibilidade para efectivamente protegerem as construções, mesmo que colocando em causa a sua durabilidade. Assim, por exemplo para rebocos interiores em zonas secas ou para rebocos de sacrifício em sítios arqueológicos, a resistência à água poderá ser apenas moderada.

Quanto à alteração de cores, as cais implicam o clareamento de rebocos realizados com terras escuras, nomeadamente castanhas [21] e cor de barro [16], enquanto a adição de algumas fibras naturais tem a vantagem de as deixarem visíveis, o que é geralmente considerado positivo pela associação a produtos ecológicos da construção.

Comparativamente a todas as adições, as fibras naturais têm vantagens em termos de energia incorporada, por se tratar da adição de um resíduo. Situação semelhante pode ocorrer com a reutilização de óleos usados. Face à temperatura de produção, o gesso hemi-hidratado, produzido a temperatura de 120-180 °C, apresenta vantagens face aos restantes ligantes, que são produzidos a temperaturas de 900 °C (cal aérea calcítica) ou superiores.

Conclusões

Este artigo pretende ser uma contribuição para o estudo da estabilização de argamassas de terra. Considera-se que a revisão de literatura permitiu organizar os diferentes produtos que têm vindo a ser estudados e os resultados que têm vindo a ser obtidos, considerados como vantagens ou desvantagens, dependendo do propósito de aplicação da argamassa.

Os estabilizantes utilizados parecem ser utilizados com o intuito de melhorar a susceptibilidade das argamassas de terra à água líquida, principalmente os ligantes e óleos. No entanto, têm consequências sobre outras características das argamassas de terra, que se pretendem manter ou até melhorar, nomeadamente a resistência físico-mecânica e a capacidade de absorção-desadsorção de vapor de água.

Considera-se como um passo importante a investigação realizada no sentido de esclarecer os mecanismos responsáveis pela susceptibilidade à água líquida das argamassas de terra. O conhecimento do problema permite pensar na optimização dos métodos de estabilização existentes e em novas soluções capazes de garantir a alteração de características consideradas desvantajosas, sem perder as qualidades intrínsecas das argamassas de terra.

É ainda importante mencionar que, na maioria dos estudos analisados, não são feitas análises de caracterização química e mineralógica às argamassas estabilizadas, mas apenas caracterização dos materiais individuais utilizados na formulação das argamassas. O recurso a técnicas analíticas complementares poderá revelar resultados interessantes, como a formação de novos compostos ou alterações na microestrutura, permitindo explicar como ocorre a estabilização e, conseqüentemente, elucidar sobre a maior ou menor eficiência destas e de novas soluções de estabilização de argamassas de terra.

ORCID

Isabel Pombo Cardoso: 0000-0003-3328-6749

Paulina Faria: 0000-0003-0372-949X

Referências

1. Çamurcuoğlu, D., ‘The Wall Paintings of Çatalhöyük (Turkey): Materials, Technologies and Artists’, tese de Doutorado, University College London, London, (2015).
2. Rao, K., ‘Foreword’ in *World Heritage Papers 36: Earthen Architecture in today’s world*, UNESCO, (2013) 7-8.
3. Gandreau, M. D.; Joffroy, M. T., ‘Inventaire 2012 des biens en terre du patrimoine mondial’ in *World Heritage Papers 36: Earthen Architecture in today’s world*, UNESCO, (2013) 228-231.
4. Gomes, M. I.; Diaz Gonçalves, T.; Faria, P., ‘Hydric behaviour of earth materials and the effects of their stabilization with cement or lime: Study on repair mortars for historical rammed earth structures’, *Journal of Materials in Civil Engineering* **28** (7) (2016).
5. Jaquin, P., ‘History of earth building techniques’ in *Modern Earth Buildings: Materials, engineering, construction and applications*, Woodhead Publishing, Cambridge (2012) 307-323, <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.307>.
6. Gomes, M. I.; Faria, P.; Diaz Gonçalves, T., ‘Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers’, *Journal of Cleaner Production* **172** (2018) 2401-2414, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>.
7. Lima, J.; Ferreira, M.; Faria, P., ‘Rebocos de terra: caracterização higroscópica e face à presença de água líquida’, *Congresso da Reabilitação do Património*: 21-29. Aveiro, 26 de Junho (2017) 21-29.
8. Sousa, V.; Meireles, I.; Almeida, N.; Brito, J., ‘Construções em terra: Principais anomalias e mecanismos de degradação’ *3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios*, Porto: Junho (2008).
9. Bergaya, F.; Lagaly, G., ‘General Introduction: Clays, Clay Minerals and Clay Science’, *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science*. 2ª ed, Elsevier, Amsterdam (2013) 1-19, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00001-8>.

10. Reddi, L. N.; Jain, A.; KYun, H-B., ‘Soil materials for earth construction; properties, classification and suitability testing’, *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (2012) 155-171, <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.155>.
11. Brigatti, M. F.; Galán, E.; Theng, B. K. G., ‘Structure and Mineralogy of Clay Minerals’, *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science*. 2ª ed., Elsevier, Amsterdam (2013) 21-81, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00002-X>.
12. Schoonheydt, R. A.; Johnston, C. T.; Bergaya, F., ‘Clay minerals and their surfaces’ *Surface and Interface Chemistry of Clay Minerals. Developments in Clay Science*, Elsevier, Amsterdam (2018) 1-21, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102432-4.00001-9>.
13. Dominguez, O. M., “Preservation and repair of rammed earth constructions.” tese de Mestrado, Universidade do Minho (2015).
14. Schoonheydt, R. A.; Johnston, C. T., ‘The surface properties of clay minerals’ *Layered mineral structures and their Application in Advanced Technologies. EMU Notes in Mineralogy*, The Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, Twickenham (2011) 337-373, <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.11.10>.
15. Schoonheydt, R. A.; Johnston, C. T., ‘Surface and interface chemistry of clay minerals’ *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science*. 2ª ed., Elsevier, Amsterdam (2013) 139-172, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098258-8.00005-5>.
16. Santos, T.; Nunes, L.; Faria, P., ‘Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility’, *Journal of Cleaner Production* **167** (2017) 55-67 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.131>.
17. Camões, A.; Eires, R.; Jalali, S., ‘Old materials and techniques to improve the durability of earth buildings’ *Terra 2012*. International Committee on Vernacular Architecture – International Council on Monuments and Sites (CIAV-ICOMOS), 1–14 (2012).
18. Eires, R.; Camões, A.; Jalali, S., ‘Ancient materials and techniques to improve the earthen building durability’, *Key Engineering Materials* **634** (2015) 357-366, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.357>.
19. Eires, R.; Camões, A.; Jalali, S., ‘Enhancing water resistance of earthen buildings with quicklime and oil’ *Journal of Cleaner Production* **142** (2017) 3281-3292 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.141>.

20. Zhang, L.; Yang, L.; Petter Jelle, B.; Wang, Y.; Gustavsen, A., 'Hygrothermal properties of compressed earthen bricks' *Construction and Building Materials* **162** (2018) 576-586, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.163>.
21. Santos, T.; Faria, P.; Santos Silva, A., 'Avaliação *in situ* do comportamento de rebocos exteriores de argamassas de terra com baixas adições de cais' *Conservar Património* **26** (2017) 11-21, <https://doi.org/10.14568/cp2016022>
22. Gomes, M. I.; Gonçalves, T. D.; Faria, P., 'Characterization of earth-based mortars for rammed earth repair' in *Earth Construction and Tradition*, IVA-Institute for Comparative Research in Architecture, Vienna (2016) 259-275.
23. Lima, J.; Silva, S.; Faria, P., 'Rebocos de terra: influência da adição de óleo de linhaça e comparação com rebocos convencionais' Atas do 1º Congresso de Ensaios e Experimentação em Engenharia Civil – *TESTE2016 – Ensaiar para Reabilitar*, Lisboa, 4 de Julho (2016).
24. Di Sante, M.; Fratolocchi, E.; Mazzieri, F.; Pasqualini, E., 'Time of reactions in a lime treated clayey soil and influence of curing conditions on its microstructure and behaviour', *Applied Clay Science* **99** (2014) 100-109, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.06.018>.
25. Zak, P.; Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W., 'The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth brick materials', *Construction and Building Materials* **106** (2016) 179-188, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031>.
26. Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W., 'Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum', *Energy and Buildings* **104** (2015) 139-146, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.016>.
27. Mattone, M.; Rescic, S.; Fratini, F.; Manganelli Del Fà, R., 'Experimentation of earth-gypsum plasters for the conservation of earthen constructions' *International Journal of Architectural Heritage* **11**(6) (2017) 763-772 <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1290850>.
28. Lima, J.; Correia, D.; Faria, P., 'Rebocos de terra: influência da adição de gesso e da granulometria da areia' *III Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento*, Coimbra, 16-17 de Junho (2016).
29. Mattone, M.; Bignamini, E., 'Conservation of earthen construction: Earth-gypsum plasters' *Rammed Earth Conservation*, ed. Mileto, Vegas e Cristini, Taylor and Francis Group, London (2012).
30. Ma, C.; Chen, B.; Chen, L., 'Effect of organic matter on strength development of self-compacting earth-based construction stabilized with cement-based

- composites’, *Construction and Building Materials* **123** (2016) 414-423, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.018>.
31. Lima, J.; Faria, P., ‘Earthen Plasters: The potential of the clayey soils of Barrocal region in Algarve’ *Conference: 40th IAHS World Congress on Housing – Sustainable Housing Construction*, Funchal (2014).
32. Faria, P.; Lima J., *Rebocos de Terra*, Argumentum, Lisboa (2018).
33. Lima, J.; Faria P., ‘Eco-efficient earthen plasters: The influence of the addition of natural fibers’ *Natural Fibers: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*, ed. R. Figueiro; S. Rana, Vol. 12 de RILEM Book Series, Springer (2016).
34. Varas, M. J.; Alvarez de Buergo, M.; Fort, R., ‘Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification’ *Cement and Concrete Research* **35** (2005) 2055-2065, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045>.
35. van Oss, H. G.; Padovani, A. C., ‘Cement manufacture and the environment – Part 1: Chemistry and technology’ *Journal of Industrial Ecology* **6**(1) (2002) 89-105 <https://doi.org/10.1162/108819802320971650>.
36. EN 459-1. 2015. Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. CEN, Brussels.

RECEBIDO: 2019.11.21

REVISTO: 2020.8.23

ACEITE: 2020.9.24

ONLINE: 2020.11.5



Licenciado sob uma Licença Creative Commons

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0

Internacional. Para ver uma cópia desta licença, visite

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt>.

Esta é a primeira versão publicada do manuscrito revisto. O processo de edição, paginação e revisão de provas poderão levar a diferenças entre esta versão e a versão final publicada.