

ARGAMASSAS DE TERRA ESTABILIZADAS COM SULFATOS DE CÁLCIO: CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

EARTHEN MORTARS STABILIZED WITH CALCIUM SULPHATE: PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION

José Lima⁽¹⁾, Afonso Lino⁽²⁾, Teresa Freire⁽³⁾, Paulina Faria⁽⁴⁾

(1) Faculdade de Arquitectura, Universidade de Lisboa, Portugal, jose.lima.ferreira@gmail.com

(2) DEC, FCT, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal, a.lino@campus.fct.unl.pt

(3) CERIS e Sival – Gessos Especiais, Lda., Portugal, inov-ge@sival.pt; mtfreire@gmail.com

(4) CERIS e DEC, FCT, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal, paulina.faria@fct.unl.pt

RESUMO

As argamassas de terra foram muito utilizadas no passado na construção de abrigos, assentamento de alvenarias, e revestimentos interiores e exteriores. Nos últimos anos têm suscitado um renovado interesse devido às suas características técnicas, nomeadamente elevada higroscopicidade e compatibilidade com suportes antigos, mas também devido a aspectos ambientais, como a reduzida energia incorporada. No entanto, para aplicações nas quais possa haver contacto, mesmo que accidental, com água, as argamassas de terra apresentam vulnerabilidade. Nesse sentido, interessa avaliar de que forma a estabilização com ligantes de baixa energia incorporada permite manter as suas características mais positivas, melhorando também a resistência à água. O gesso hemi-hidratado é produzido por calcinação da pedra de gesso a baixa temperatura e a anidrite por calcinação a temperatura mais elevada, embora ainda muito inferior à de outros ligantes correntes, como as cals. No âmbito de estudos anteriores verificou-se que a estabilização com gesso hemi-hidratado melhora o comportamento das argamassas de terra face à água e em termos mecânicos, sem reduzir significativamente a sua higroscopicidade. Neste artigo apresenta-se a caracterização física e mecânica de argamassas elaboradas com base numa argamassa de terra pré-doseada, sem estabilização por ligante, comercializada pela empresa Embarro, considerando a adição, em volume, de 5, 10 e 20% de anidrite e também a adição de 20% de gesso hemi-hidratado. Verifica-se que a adição de anidrite aumenta a retracção linear das argamassas, contrariamente ao observado com a adição de gesso hemi-hidratado. A resistência mecânica e a resistência à abrasão a seco tendem também a aumentar, embora de forma menos significativa que com a adição de gesso hemi-hidratado. Observa-se, ainda, que a capacidade higroscópica das argamassas sofre uma pequena redução com o incremento da adição de anidrite, embora pouco expressiva e inferior à redução observada com o gesso hemi-hidratado. No entanto, a melhoria da durabilidade face à água das argamassas estabilizadas com anidrite é muito inferior à atingida com o gesso hemi-hidratado.

Palavras-chave: Reboco / Argila / Adição de estabilizante / Gesso hemi-hidratado / Anidrite

1. INTRODUÇÃO

As argamassas de terra foram provavelmente o primeiro tipo de argamassa a ser utilizado pela humanidade na antiguidade, inicialmente no revestimento e preenchimento dos espaços vazios entre os elementos vegetais utilizados na construção de abrigos e, mais tarde, no revestimento de fossas para depósito de alimentos, no assentamento de alvenarias de pedra ou blocos de terra, ou ainda no reboco de alvenarias, como são o caso dos vestígios encontrados em sítios arqueológicos em território nacional (Bruno, Faria, Candeias, *et al.*, 2010). Desde então, as argamassas de terra continuaram a ser utilizadas em várias regiões do mundo, predominantemente em construções de arquitectura vernácula, mas também em edifícios monumentais, servindo para o assentamento de alvenarias de adobe ou pedra, ou para o preenchimento de estruturas de elementos de madeira, como o caso do tabique, ou ainda sendo empregues em rebocos, no revestimento de protecção ou decorativo de paredes e tectos, ou até em pavimentos (Houben e Guillaud, 1989; Minke, 2006; Schroeder, 2016).

Contudo, a utilização de argamassas de terra entrou em declínio quando a produção e comercialização de ligantes minerais se generalizou, primeiro com as cais de construção, aéreas e com propriedades hidráulicas, e depois com o cimento. O desinteresse deveu-se, em parte, ao facto destes ligantes permitirem a produção de argamassas geralmente com maior resistência mecânica e com maior durabilidade à intempérie, mas também devido às argamassas de terra serem socialmente associadas a falta de recursos económicos (Minke, 2006).

O interesse pelas argamassas de terra foi recentemente retomado, em especial a partir do início do século XXI, principalmente para a execução de rebocos, motivado por razões ecológicas, associadas à ausência de toxicidade, à reduzida energia que incorporam e à possibilidade da sua reutilização, maximizando a circularidade do recurso e minimizando o impacto ambiental (Melià, Ruggieri, Sabbadini, *et al.*, 2014; Gomes, Faria e Gonçalves, 2019). Actualmente, o interesse pelos rebocos de terra centra-se também no seu desempenho acrescido quando comparado com os rebocos de ligantes convencionais, nomeadamente ao nível estético, possibilitando acabamentos com múltiplas cores e texturas (Faria e Lima, 2018) e, ao nível técnico, devido à elevada higroscopicidade, contribuindo de forma significativa para a regulação termo-higrométrica dos ambientes interiores (Lima, Faria e Santos Silva, 2016; Liuzzi, Rubino, Stefanizzi, *et al.*, 2018; Maskell, Thomson, Walker, *et al.*, 2018;), para a qualidade do ar interior (Darling, Cros, Wargocki, *et al.*, 2012; Santos, Gomes, Coelho, *et al.*, 2019), e para a saúde e conforto dos ocupantes (Arundel, Sterling, Biggin, *et al.*, 1986; Moret-Rodrigues, Canha-da-Piedade e Braga, 2009). Os rebocos de terra podem também ser benéficos para a conservação do património edificado e arqueológico, sendo potencialmente compatíveis com os suportes antigos e contribuindo para a conservação de outros materiais construtivos através da regulação da humidade relativa (Stazi, Nacci, Tittarelli, *et al.*, 2015; Gomes, Faria e Gonçalves, 2019).

No entanto, os rebocos de terra são susceptíveis de desagregação quando em contacto, mesmo que accidental, com água no estado líquido. Justifica-se, assim, estudar o efeito da adição de estabilizantes que, por um lado, viabilizem a utilização destas argamassas em condições de contacto com a água e, por outro lado, não prejudiquem de forma substancial a sua eco-eficiência, nomeadamente pela incorporação de significativa energia ou pela redução da sua capacidade higroscópica.

De entre os ligantes minerais usualmente utilizados da indústria da construção, o gesso é o ligante com menor energia incorporada. É produzido por tratamento térmico da rocha de gesso (sulfato de cálcio di-hidratado) a temperatura relativamente baixa – cerca de 120-180 °C – à qual a rocha liberta parte da

água que contém, ligada quimicamente, transformando-se em gesso hemi-hidratado. Este, após trituração, pode ser amassado com água, formando uma pasta que endurece rapidamente, transformando-se novamente num sulfato de cálcio di-hidratado, quimicamente semelhante à rocha inicial, embora muito mais poroso e sensível à humidade (La Spina, 2015; Freire, 2016).

Se a mesma rocha de gesso for tratada termicamente a temperatura superior, então liberta toda a água que contém quimicamente ligada, transformando-se num sulfato de cálcio anidro, designado por anidrite. Entre os 180-200 °C é obtida anidrite de tipo III (anidrite solúvel), muito instável e ávida de água que, em contacto com a humidade do ar, rapidamente se transforma em gesso hemi-hidratado. Quando a temperatura ultrapassa os 300 °C, obtém-se anidrite de tipo II (anidrite insolúvel), mais estável e de hidratação lenta. A temperatura superior a 1200 °C forma-se anidrite de tipo I, que ao arrefecer se transforma em anidrite tipo II (La Spina, 2015; Freire, 2016).

Quando amassada com água, a anidrite tipo II forma também uma pasta que endurece lentamente, transformando-se igualmente em sulfato de cálcio di-hidratado, quimicamente semelhante à rocha inicial, mas menos poroso, com maior resistência mecânica e mais estável em relação à água que o obtido pela hidratação do gesso hemi-hidratado (La Spina, 2015; Freire, 2016). Embora a produção de anidrite tipo II requeira um tratamento térmico a temperatura superior ao gesso hemi-hidratado, incorpora menos energia que os restantes ligantes minerais convencionais, nomeadamente cais aéreas, cais com propriedades hidráulicas e cimentos, produzidos com tratamentos térmicos a temperatura muito superior.

Em estudo anterior avaliou-se a estabilização de uma argamassa de terra, formulada com base numa terra íltica e areia siliciosa, através da adição de gesso hemi-hidratado, tendo-se obtido resultados promissores, nomeadamente a redução da retração linear e fissuração, o aumento significativo da resistência mecânica e da resistência à abrasão a seco e, cumulativamente, uma redução pouco significativa da capacidade higroscópica da argamassa (Lima, Correia e Faria, 2016).

O presente estudo pretende avaliar se a estabilização de uma argamassa de terra através da adição de anidrite tipo II pode melhorar os bons resultados anteriormente obtidos com a adição de gesso hemi-hidratado. Para esse fim, foram formuladas cinco argamassas com base numa argamassa de terra pré-doseada, comercializada pela empresa Embarro. A argamassa tal qual, i.e., sem adição de anidrite, foi considerada como referência, sendo designada por RM. Três argamassas foram preparadas com adição de 5, 10 e 20% de anidrite, em relação ao volume da mistura seca da argamassa de referência, e designadas respectivamente por RM_A5, RM_A10 e RM_A20. Para facilitar a comparação de resultados foi preparada uma argamassa com adição de 20% de gesso hemi-hidratado, também em relação ao volume da mistura seca da argamassa de referência, e designada por RM_G20_SR. Foi, ainda, preparada uma pasta de anidrite, sem adição de agregados, designada por A100, com o intuito de obter dados de caracterização do estabilizante.

2. MATERIAIS

A argamassa de terra pré-doseada, usada em cinco formulações no presente estudo, corresponde ao produto *Embarro Universal*, comercializado pela empresa Embarro. De acordo com o fabricante, é uma mistura composta por terra argilosa, areia siliciosa com granulometria de 0-2 mm e fibras de palha com dimensão inferior a 10 mm (Embarro, 2018). A distribuição granulométrica, apresentada na Figura 1, foi realizada por via húmida para partículas de dimensão superior a 0,075 mm, de acordo com a norma EN 1015-1 (CEN, 1998a), e por sedimentação para partículas de dimensão igual, ou inferior, a 0,075 mm, de

acordo com a especificação LNEC E196-1966 (LNEC, 1966).

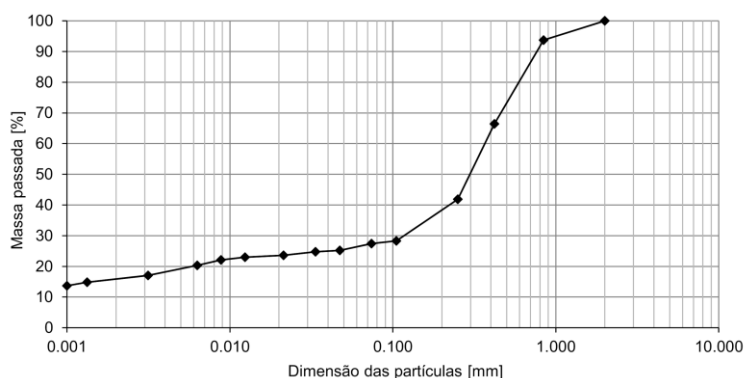


Figura 1 – Curva granulométrica da argamassa pré-doseada RM, obtida por peneiração seca para partículas de dimensão superior a 0,075 mm, e por via húmida para partículas de dimensão igual ou inferior a 0,075 mm (adaptado de Santos, Gomes, Coelho, *et al.*, 2019)

Em estudo anterior foi caracterizado outro lote do mesmo produto, observando-se a predominância do mineral argiloso ilite (Faria, Santos e Aubert, 2016). Embora não tenha sido possível determinar a proporção exacta dos constituintes dessa mistura pré-doseada, em estudo anterior, foram formuladas, em laboratório, argamassas de terra com base em terra ílítica extraída do mesmo barreiro e areia siliciosa com distribuição granulométrica semelhante, respectivamente na proporção volumétrica de 1:3, tendo-se registado resultados próximos dos obtidos pela argamassa de referência no presente estudo (Lima, Correia e Faria, 2016; Lima, Faria e Santos Silva, 2016). Após peneiração com o peneiro nº4 (4,75 mm), para rejeição de agregados grosseiros pontuais e da palha presente na mistura pré-doseada, a baridade desta foi aferida com base na norma EN 1097-3 (CEN, 1998c), tendo sido obtido o valor de 1414,0 kg/m³. A mesma norma foi utilizada para determinação da baridade dos restantes constituintes.

A anidrite tipo II, utilizada neste estudo na preparação das argamassas de terra RM_A5, RM_A10 e RM_A20 e na execução da pasta A100, foi o produto *Anhidrita II* produzido e comercializado pela empresa Gypsum Plus, obtido por tratamento térmico da rocha de gesso a 400-700 °C, sendo fornecido em pó (resíduos nos peneiros: 400 µm ≤ 10%; 200 µm ≤ 20%; 100 µm ≤ 50%), com índice de pureza superior a 80% (Gypsum-Plus, 2017) e baridade de 970,6 kg/m³.

O gesso hemi-hidratado utilizado na preparação da argamassa RM_G20_SR, foi o produto *Gesso Estuque*, produzido e comercializado pela empresa Sival, correspondendo a sulfato de cálcio hemi-hidratado, não aditivado, fornecido na forma de pó fino (resíduos nos peneiros: 500 µm ≤ 0,10%; 300 µm ≤ 0,65%), de cor branca, destinado ao revestimento de paredes e tectos, por aplicação manual, sendo aconselhada a amassadura mecânica com água na proporção de um litro de água para 1,45 kg de gesso, e estimado um tempo de início de presa de 12 ± 3 min e um tempo de fim de presa de 28 ± 5 min (SIVAL, 2020), apresentando a baridade de 667,4 kg/m³.

Na preparação de argamassa RM_G20_SR, e uma vez que o gesso hemi-hidratado tem um tempo de presa reduzido, insuficiente para a realização dos provetes necessários, foi utilizado um retardador de presa, produzido e comercializado pela empresa SICIT2000 S.p.A., com o nome de *Plast Retard PE*, fornecido na forma de pó de cor branco-marfim, totalmente solúvel em água, sendo recomendada a adição de 0,02% a 0,08%, em relação à massa de gesso hemi-hidratado, respectivamente para que se obtenham tempos iniciais de presa superiores a 45 min e 240 min (SICIT2000, 2019).

3. MÉTODOS

Na inexistência de outras normas específicas para a caracterização de argamassas de terra, no presente estudo seguiu-se a norma alemã DIN 18947 (DIN, 2013), que define os requisitos, as classificações e os procedimentos de ensaios a aplicar na caracterização de argamassas de terra não estabilizadas quimicamente. Esta norma remete muitos ensaios para as partes aplicáveis da norma europeia EN 1015. Para os ensaios não definidos na norma DIN 18947 (DIN, 2013) os autores seguiram outras normas, ou procedimentos desenvolvidos especificamente, seguidamente descritos.

A mistura e caracterização das argamassas no estado fresco foram realizadas com base na norma DIN 18947 (DIN, 2013), que prevê uma amassadura com duração de 90 s, dividida em dois períodos, respectivamente de 60 s e 30 s, intercalados por um período de descanso da argamassa de 5 min. Na preparação da argamassa RM_G20_SR, o período de descanso da amassadura foi suprimido e foi adicionado o retardador de presa à mistura, na proporção de 0,02% em relação à massa de gesso hemi-hidratado. A pasta A100 foi preparada também com supressão do período de descanso da amassadura, mas sem adição do retardador de presa.

Todas as argamassas foram amassadas com o mínimo de água necessário para obter boa trabalhabilidade e valores de consistência por espalhamento próximos de 175 ± 5 mm, de acordo com a DIN 18947 (DIN, 2013), aferidos segundo a EN 1015-3 (CEN, 1999a). A pasta A100 foi amassada com o mínimo de água necessário para a saturação do pó de anidrite tipo II, determinada em ensaio de saturação preliminar, resultando num valor de consistência por espalhamento superior ao definido na DIN 18947 (DIN, 2013).

A Tabela 1 apresenta as formulações das argamassas em termos de proporções volumétricas e mássicas dos materiais constituintes, assim como os resultados obtidos para a consistência por espalhamento e massa volúmica no estado fresco, aferida de acordo com a EN 1015-6 (CEN 1998b).

Tabela 1 – Composição das argamassas e caracterização no estado fresco

Argamassa	Proporções volumétricas				Proporções mássicas				Massa volúmica [kg/m ³]	Consistência espalhamento [mm]
	RM [%]	A [%]	G [%]	Água ^(a) [%]	RM [%]	A [%]	G [%]	Água ^(b) [%]		
RM	100,0	0,0	0,0	26,3	100,0	0,0	0,0	18,5	2026,5 ± 5,1	172,4 ± 2,3
RM_A5	100,0	5,0	0,0	26,3	96,7	3,3	0,0	17,9	2027,8 ± 1,2	168,5 ± 3,7
RM_A10	100,0	10,0	0,0	26,7	93,6	6,4	0,0	17,6	2051,2 ± 4,8	165,9 ± 1,3
RM_A20	100,0	20,0	0,0	28,8	87,9	12,1	0,0	17,8	2048,9 ± 4,2	169,6 ± 2,1
RM_G20_SR	100,0	0,0	20,0	28,1	91,4	0,0	8,6	18,1	2022,8 ± 4,7	177,0 ± 1,2
A100	0,0	100,0	0,0	29,2	0,0	100,0	0,0	30,0	1969,1 ± 5,0	194,8 ± 2,5

Notação: RM – Argamassa de terra pré-doseada; A – Anidrite; G – Gesso; (a) – Percentagem de volume de água adicionado em relação ao volume total de argamassa pré-doseada seca RM, ou volume total de ligante, no caso da argamassa A100; (b) – Percentagem de massa de água adicionada em relação à massa total dos restantes materiais constituintes

A preparação dos provetes seguiu igualmente a DIN 18947 (DIN, 2013). Para cada formulação foram preparados seis provetes prismáticos em moldes metálicos, com dimensão de 160 mm × 40 mm × 40 mm, seis provetes circulares moldados em anéis de PVC, com espessura de 20 mm e diâmetro de 90 mm, três provetes planares em moldes metálicos, com dimensão de 500 mm × 200 mm × 15 mm, e dois provetes constituídos por 20 mm de espessura de argamassa aplicada numa das faces de tijolos furados, com dimensão de 295 mm × 195 mm, simulando a aplicação de reboco em situação real. A secagem dos

provetes decorreu em ambiente condicionado, com temperatura de $20,2 \pm 0,5$ °C e humidade relativa (HR) de $60 \pm 5\%$. Após um período de 15 dias, os provetes prismáticos foram desmoldados, enquanto os restantes provetes foram mantidos nos respectivos moldes. Todos os provetes permaneceram no referido ambiente condicionado durante um período de 247 dias, até ao início dos ensaios de caracterização no estado endurecido.

A retracção linear das argamassas foi avaliada visualmente nos provetes planares e nos provetes prismáticos, de acordo com a DIN 18947 (DIN, 2013). Os provetes prismáticos foram posteriormente utilizados na aferição da massa volúmica, seguindo a EN 1015-10/A1 (CEN, 1999b), do módulo de elasticidade dinâmico, pela EN 14146 (CEN, 2004), e das resistências à tracção por flexão e à compressão, com base na EN 1015-11 (CEN, 1999c). Os provetes de argamassa sobre tijolo foram utilizados no ensaio de resistência à abrasão a seco, considerando uma escova de dureza média, de acordo com a DIN 18947 (DIN, 2013), no ensaio de coesão superficial, seguindo o procedimento definido por Drdácý, Lesák, Niedoba, *et al.* (2015) e adaptado por Parracha, Pereira, Velez da Silva, *et al.* (2019), e no ensaio de aderência ao suporte, realizado com base na EN 1015-12 (CEN, 2000). A condutibilidade térmica foi aferida nos provetes circulares com um equipamento Heat Transfer Analyzer ISOMET 2104, com uma sonda de contacto API 210412 de 60 mm de diâmetro e uma amplitude de aferição de 0.3 to 2.0 W/(mK). O ensaio de adsorção e desadsorção de vapor de água foi realizado em câmara climática com os provetes planares mantidos nos respectivos moldes metálicos, tal como definido na DIN 18947 (DIN, 2013). Posteriormente, estes provetes foram desmoldados e utilizados no ensaio de erosão por gotejamento, baseado da norma neozelandesa para blocos de terra NZS 4298/A1 (NZS, 2000), adaptada pelos autores para o ensaio de rebocos de terra, de acordo com o procedimento descrito em estudo anterior (Lima, Faria e Santos Silva, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adição de anidrite à argamassa de terra de referência, e o seu incremento, promoveu o aumento da retracção linear das argamassas aditivadas (Figura 2A). O efeito oposto foi observado na argamassa RM_G20_SR, onde a adição de 20% de gesso hemi-hidratado provocou a redução significativa da retracção linear, em linha com o comportamento habitual desta fase do gesso (Freire, 2016) e com os resultados obtidos em estudo anterior, onde se avaliou o efeito da adição de gesso hemi-hidratado a argamassas formuladas com terra íltica e areia siliciosa (Lima, Correia e Faria, 2016).

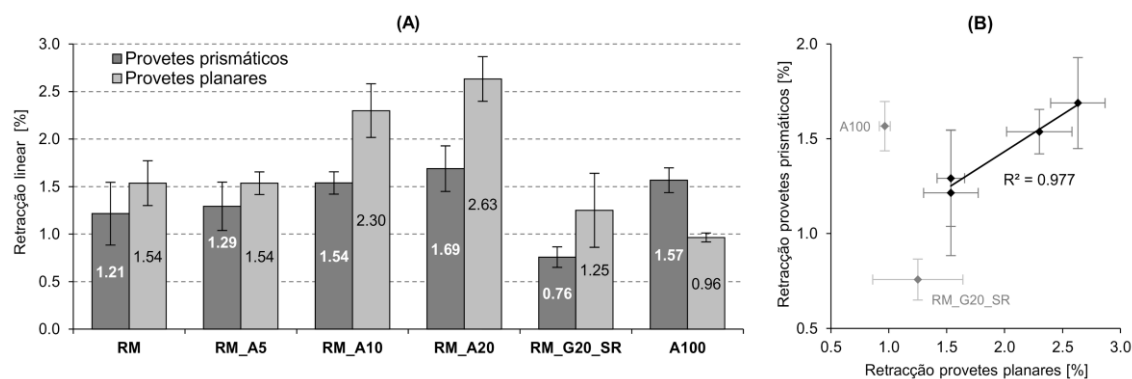


Figura 2 – (A) Retracção linear aferida em provetes prismáticos e planares; (B) Correlação entre as retracções lineares dos provetes prismáticos e dos provetes planares, para a argamassa de terra de referência e para as argamassas de terra com adição de anidrite

Os provetes prismáticos e os provetes planares da argamassa de terra de referência e das argamassas de terra com adição de anidrite apresentaram comportamento semelhante de retracção, evidenciado pela correlação significativa da Figura 2B.

A Figura 3A apresenta os resultados dos ensaios de massa volúmica aparente e condutibilidade térmica, observando-se que o incremento da adição de anidrite promoveu o ligeiro aumento da massa volúmica aparente das argamassas de terra aditivadas. Pelo contrário, a argamassa de terra RM_G20_SR, com adição de 20% de gesso, apresentou uma ligeira redução da massa volúmica aparente, o que está de acordo com o obtido em estudo anterior (Lima, Correia e Faria, 2016). A condutibilidade térmica aumentou com a adição de 5% de anidrite, decrescendo com o seu incremento, enquanto a adição de 20% de gesso hemi-hidratado aumentou ligeiramente a condutibilidade térmica. Em estudo anterior, observou-se que a adição de gesso promoveu um padrão de influência na condutibilidade térmica semelhante ao observado no presente estudo com a adição de anidrite. No entanto, nesse estudo a adição de 20% de gesso resultou na redução da condutibilidade térmica (Lima, Correia e Faria, 2016, contrariamente ao aqui obtido. Para a argamassa de terra de referência e argamassas de terra com adição de anidrite foi observada uma correlação significativa entre a massa volúmica aparente e a retracção linear, também já reportada em estudos anteriores que avaliaram argamassas de terra (Lima, Faria e Santos Silva, 2016, 2020). No entanto, não foi observada qualquer correlação entre a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica, contrariamente ao observado em argamassas de terra em estudos anteriores (Lima, Faria e Santos Silva, 2016, 2020) e reportado por outros autores para materiais com base em terra (Minke, 2006; Schroeder, 2016).

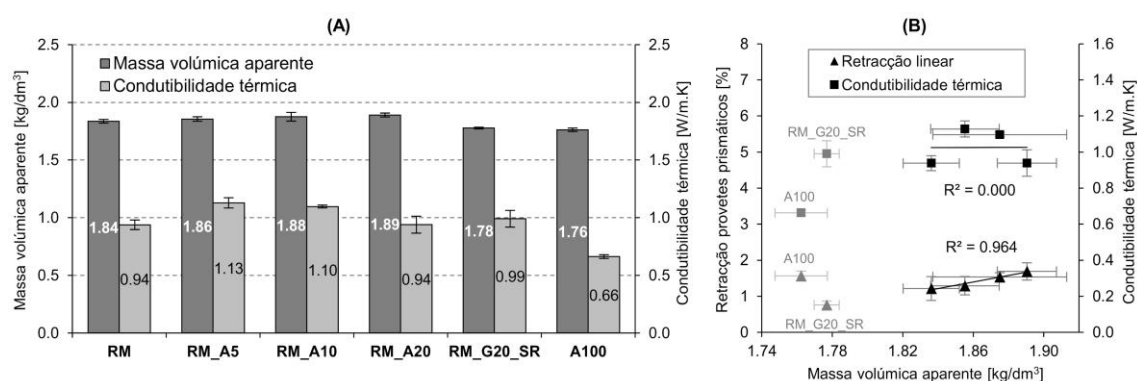


Figura 3 – (A) Massa volúmica aparente e condutibilidade térmica; (B) Correlações entre a massa volúmica aparente e a retracção linear e condutibilidade térmica, para a argamassa de terra de referência e as argamassas de terra com adição de anidrite

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão, resistência à tracção por flexão, e aderência ao suporte, apresentados na Figura 4A, mostram que o incremento da adição de anidrite promoveu o ligeiro aumento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas de terras aditivadas. Contudo, não foi observado o aumento da resistência à compressão, da resistência à tracção por flexão, ou da aderência ao suporte. Pelo contrário, na argamassa RM_G20_SR, a adição de 20% de gesso hemi-hidratado aumentou de forma significativa a resistência à compressão, a resistência à tracção por flexão e a aderência ao suporte, resultados que estão de acordo com os obtidos em estudo

anterior (Lima, Correia e Faria, 2016). Não foi possível avaliar a aderência ao suporte para a pasta A100, devido ao destacamento dos provetes realizados sobre tijolo, motivado pela elevada retração linear e fissuração. No entanto, os resultados muito superiores de módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tracção por flexão, fariam esperar maior contributo da adição de anidrite para a resistência mecânica das argamassas de terra analisadas. Ainda assim é de salientar que a argamassa de terra de referência e as argamassas de terra aditivadas com anidrite atingiram a classe de resistência mínima S-I, definida na DIN 18947 (DIN 2013), quer em relação à resistência à compressão ($\geq 1,0$ MPa) quer em relação à resistência à tracção por flexão ($\geq 0,3$ MPa). Porém nenhuma dessas argamassas atingiu o valor mínimo de aderência ao suporte definido para essa mesma classe ($\geq 0,05$ MPa). Também em concordância com o anteriormente exposto, não foram observadas correlações significativas entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão, resistência à tracção por flexão e aderência ao suporte (Figura 4B).

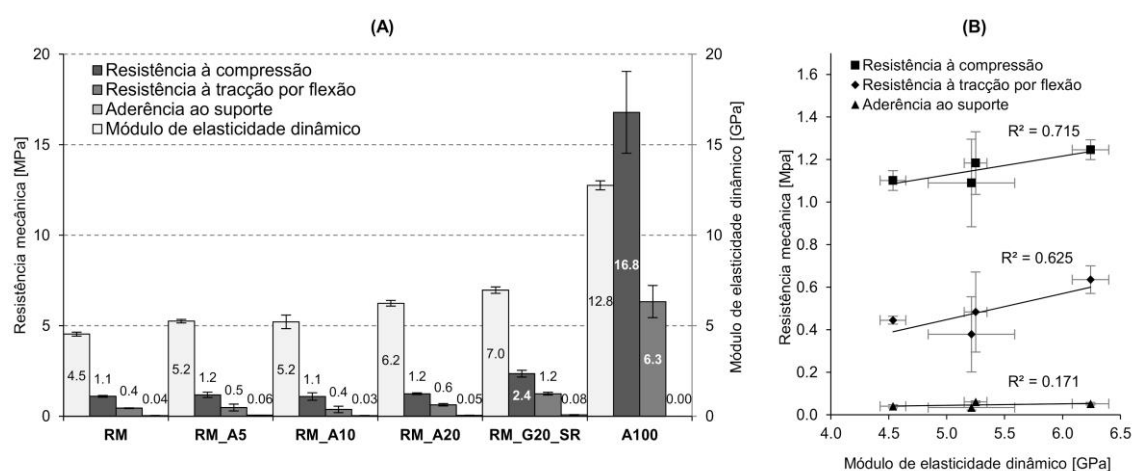


Figura 4 – (A) Resistência à compressão, resistência à tracção por flexão, aderência ao suporte e módulo de elasticidade dinâmico; (B) Correlações entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão, resistência à tracção por flexão e aderência ao suporte

A Figura 5A mostra os resultados obtidos nos ensaios de resistência à abrasão a seco e coesão superficial, em termos de massa perdida pelos provetes. Pode observar-se que a adição de anidrite, e o seu incremento, melhoraram de forma substancial a resistência à abrasão a seco e a coesão superficial das argamassas aditivadas. Na argamassa RM_G20_SR, com adição de 20% de gesso, essa melhoria foi ainda mais significativa, o que também já tinha sido verificado anteriormente (Lima, Correia e Faria, 2016).

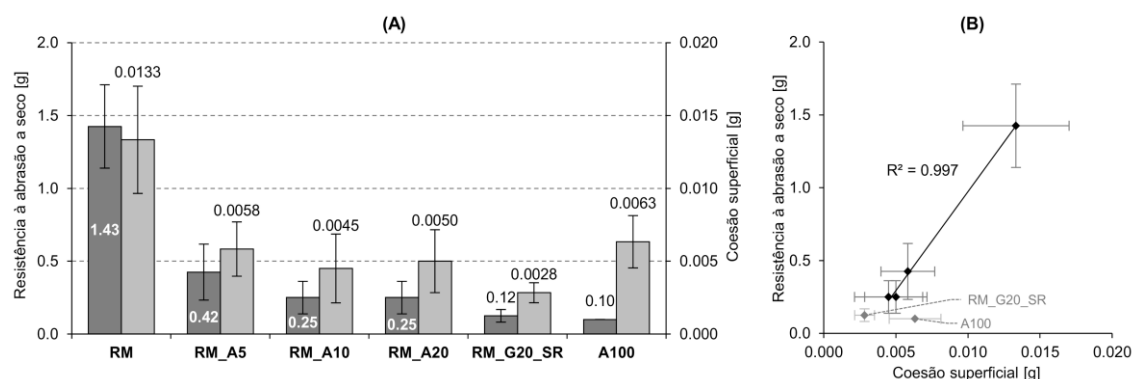


Figura 5 – Resistência à abrasão a seco e coesão superficial (A) e correlação entre ambas (B)

Para a argamassa de referência e para as argamassas de terra com adição de anidrite foi possível observar uma boa correlação entre os resultados de abrasão a seco e de coesão superficial (Figura 5B), o que em certa medida pode ser considerado coerente, uma vez que ambas as propriedades dependem das características da superfície dos provetes. No entanto, não foram observadas correlações entre estes resultados e os resultados de resistência à compressão, resistência à tracção por flexão e aderência ao suporte, o que é contrário ao esperado e reportado em estudo anterior (Lima, Faria e Santos Silva, 2020).

Os resultados do ensaio de adsorção e desadsorção de vapor (Figura 6) evidenciam a elevada capacidade higroscópica da argamassa de terra de referência, em acordo com o observado anteriormente em argamassas de terra com composições semelhantes (Lima, Faria e Santos Silva, 2016). Os resultados mostram, ainda, que a estabilização da argamassa de terra de referência através da adição de quantidades crescentes de anidrite, não prejudicou de forma significativa a higroscopicidade das argamassas. Os resultados evidenciam também que a adição de 20% de gesso hemi-hidratado promove maior redução da capacidade higroscópica da argamassa, quando comparada com a adição de igual quantidade de anidrite. Salienta-se que todas as argamassas estabilizadas, mesmo a argamassa com adição de 20% de gesso, obtiveram resultados superiores à classe de adsorção máxima WS-III, definida na DIN 18947 (DIN 2013). Faz-se, ainda, notar que a pasta A100, constituída exclusivamente por anidrite, apesar de ter a menor capacidade higroscópica, apresentou valores que podem ser considerados relativamente elevados, atendendo à ausência de minerais argilosos na sua formulação, e também por comparação com os resultados obtidos por outros investigadores para argamassas pré-doseadas com base em cimento (Santos, Gomes, Coelho, *et al.*, 2019).

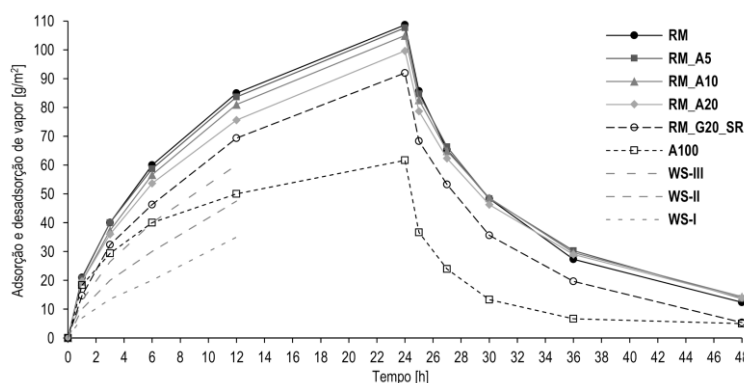


Figura 6 – Adsorção e desadsorção de vapor das argamassas e pasta analisadas e classes de adsorção de vapor WS-I, WS-II e WS-III, definidas na DIN 18947 (DIN, 2013).

A Figura 7A apresenta os resultados obtidos no ensaio de erosão por gotejamento, expressos em termos de massa erodida e quantidade de água absorvida pelos provetes no decorrer do ensaio. Constata-se que a adição incremental de anidrite aumentou de forma progressiva e significativa a resistência à erosão por gotejamento das argamassas de terra aditivadas, assim como reduziu a quantidade de água absorvida, embora de forma menos expressiva. Para estas argamassas, e para a argamassa de terra de referência, foi observada uma correlação positiva entre a massa erodida e a quantidade de água absorvida (Figura 7B). No entanto, esta tendência não abrangeu a argamassa RM_G20_SR, com adição de 20% de gesso hemi-hidratado, nem a pasta A100, nas quais se observou erosão nula; contudo, esta foi acompanhada do aumento da quantidade de água absorvida, particularmente significativo no caso da pasta A100. Em estudo anterior, que caracterizou argamassas executadas com terras com distintos minerais argilosos, também não foi encontrada correlação entre a massa erodida e a quantidade de água absorvida (Lima,

Faria e Santos Silva, 2020).

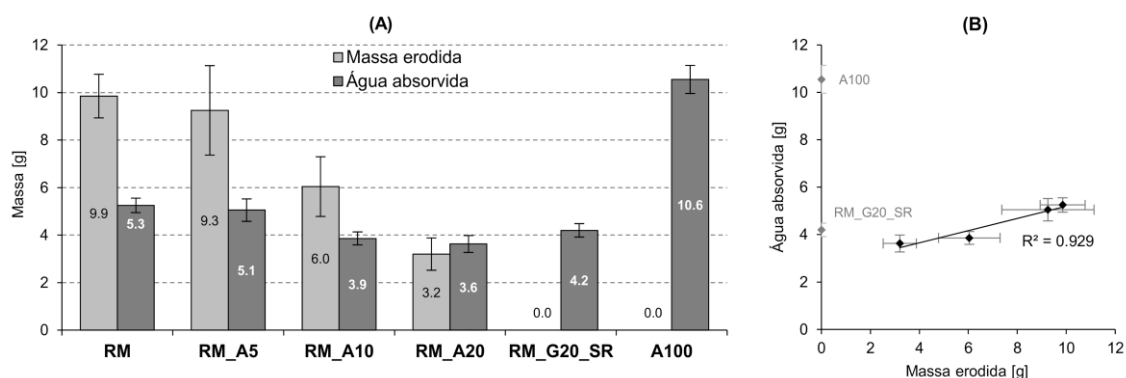


Figura 7 – Erosão por gotejamento: (A) Massa erodida e água absorvida; (B) Correlação entre a massa erodida e a água absorvida

5. CONCLUSÕES

Tendo em consideração os resultados do presente estudo e de um estudo anterior, também conduzido pelos autores e referente à avaliação da adição de gesso hemi-hidratado em argamassas de terra com composição semelhante, pode concluir-se que a estabilização de argamassas de terra ílítica, através da adição de gesso hemi-hidratado, se afigura mais vantajosa que a estabilização através da adição de anidrite tipo II. De facto, a menor quantidade de energia incorporada na argamassa com a adição de gesso hemi-hidratado, que requer um tratamento térmico a temperatura inferior ao tratamento térmico requerido para a produção de anidrite tipo II, e os melhores resultados obtidos, nomeadamente a redução da retracção linear, o aumento da resistência à compressão, o aumento da resistência à tracção por flexão, o aumento da aderência ao suporte, e ainda, o aumento da resistência à abrasão a seco e a redução da erosão por gotejamento, ilustram claramente essa vantagem. Estas propriedades são muito importantes para a eficiência das argamassas de reboco com base em terra e, no entender dos autores, compensam a ligeira desvantagem observada na redução da capacidade higroscópica das argamassas de terra aditivadas com gesso hemi-hidratado.

Para uma compreensão mais ampla das propriedades das argamassas de terra estabilizadas com sulfatos de cálcio sugere-se que, em estudos futuros, sejam contemplados ensaios de absorção de água a baixa pressão, absorção de água por capilaridade e secagem. A análise mineralógica e microestrutural das argamassas endurecidas poderá também fornecer informação relevante para o entendimento do mecanismo associado ao desempenho diferenciado dos dois estabilizantes analisados, nomeadamente a eventual formação de novos compostos químicos, ou o nível de hidratação atingido por cada estabilizante.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), Portugal, pelo financiamento da bolsa de doutoramento de José Lima (SFRH/BD/119703/2016), e o projecto de investigação PTDC/EPH-PAT/4684/2014: DB-Heritage – Database of building materials with historical and heritage interest. Agradecem, ainda, à empresa “Embarro – Tradição e Inovação”, pelo fornecimento da argamassa de terra pré-doseada “Embarro Universal” utilizada no presente estudo e ao Eng.º Vítor Silva pelo apoio na campanha experimental realizada nos Laboratórios de Construção do Departamento de

Engenharia Civil, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa.

REFERÊNCIAS

- ARUNDEL, A. V.; STERLING, E. M.; BIGGIN, J. H.; STERLING, T. D. – **Indirect health effects of relative humidity in indoor environments**. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 65 (1986), p. 351–361.
- BRUNO, Patrícia; FARIA, Paulina; CANDEIAS, António; MIRÃO, José, 2010 – **Earth mortars from pre-historic habitat settlements in south Portugal: Case studies**. *Journal of Iberian Archaeology*, 13, 51–67.
- CEN, 1998a EN 1015-1:1998 – **Methods of Test for Mortar for Masonry; Part 1: Determination of Particle Size Distribution (by Sieve Analysis)**. Brussels, Belgium: CEN.
- CEN, 1998b – **Methods of Test for Mortar for Masonry. Part 6: Determination of Bulk Density of Fresh Mortar**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1015-6:1998.
- CEN, 1998c – **Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates – Part 3: Determination of Loose Bulk Density and Voids**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1097-3:1998.
- CEN, 1999a – **Methods of Test for Mortar for Masonry; Part 3: Determination of Consistence of Fresh Mortar (by Flow Table)**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1015-3:1999.
- CEN, 1999b – **Methods of Test for Masonry; Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1015-10:1999.
- CEN, 1999c – **Methods of Test for Masonry; Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1015-11:1999.
- CEN, 2000 – **Methods of Test for Mortar for Masonry; Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates**. Brussels, Belgium: CEN. EN 1015-12:2000.
- CEN, 2004 – **Natural Stone Test Methods. Determination of the Dynamic Modulus of Elasticity (By Measuring the Fundamental Resonance Frequency)**. Brussels, Belgium: CEN. EN 14146:2004.
- DARLING, Erin K.; CROS, Clement J.; WARGOCKI, Pawel; KOLARIK, Jakub; MORRISON, Glenn C.; CORSI, Richard L. – **Impacts of a clay plaster on indoor air quality assessed using chemical and sensory measurements**. *Building and Environment*. Vol. 57 (2012), p. 370–376. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.06.004.
- DRDÁČKÝ, Miloš; LESÁK, Jaroslav; NIEDOBA, Krzysztof; VALACH, Jaroslav – **Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces**. *Materials and Structures*. Vol. 48, N° 6 (2015), p. 1947–1963. doi: 10.1617/s11527-014-0285-8.
- DIN, 2013 – **Earth plasters – Terms and definitions, requirements, test methods** (in German). Berlin: DIN 18947:2013-08.
- EMBARRO, 2018 – **Ficha técnica de produto: Embarro Universal**. [Em linha]. São Brás de Alportel, Portugal : Embarro – Tradição + Inovação [Consultado em 2020/01/02]. Disponível em: <https://www.embarro.com/wp-content/uploads/ARGAMASSA-EMBARRO-UNIVERSAL.pdf>.
- FARIA, Paulina; SANTOS, Tânia; AUBERT, Jean-Emmanuel – **Experimental Characterization of an Earth Eco-Efficient Plastering Mortar**. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 28, N° 1 (2016), p. 04015085. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001363.
- FARIA, Paulina; LIMA, José – **Rebocos de Terra**. Coleção Cadernos de Construção com Terra. Lisboa: Argumentum, 2018.
- FREIRE, Teresa – **Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products**. Lisboa: ULisboa, 2016. Tese de doutoramento.
- GOMES, M. Idália; FARIA, Paulina; GONÇALVES, T. Diaz – **Rammed earth walls repair by earth-based mortars: The adequacy to assess effectiveness**. *Construction and Building Materials*. Vol. 205 (2019), p. 213–231. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.222.

- GYPSUM-PLUS, 2017 – **Ficha datos tecnicos: Anidrita II**. [Em linha]. Navarra, Espana: Gypsum Plus, 2017 [Consultado em: 2019/10/22]. Disponível em: <http://www.gypsumplus.es/>.
- LA SPINA, Vincenzina – **Vestigios de Yeso. Los Revestimientos Continuos Históricos en las Fachadas de la Valencia Intramuros: Estudio Histórico, Caracterización y Propuestas de Conservación**. València: Universitat Politècnica de València, 2015. Doctoral Thesis.
- LIMA, José; CORREIA, Débora; FARIA, Paulina – **Rebocos de terra: Influência da adição de gesso e da granulometria da areia**. Em Livro de Actas – Argamassas 2016 – II Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Coimbra: ITeCons, UCoimbra, APFAC, 16 Jul. 2016.
- LIMA, José; FARIA, Paulina; SANTOS SILVA, António – **Earthen Plasters Based on Illitic Soils from Barrocal Region of Algarve: Contributions for Building Performance and Sustainability**. Key Engineering Materials. Vol. 678 (2016), p. 64–77. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.678.64.
- LIMA, José; FARIA, Paulina; SANTOS SILVA, António – **Earth plasters: the influence of clay mineralogy in the plasters' properties**. International Journal of Architectural Heritage. (2020). doi: 10.1080/15583058.2020.1727064.
- LNEC, 1966 – **Solos: Análise granulométrica (via húmida)**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Especificação E 196-1966.
- LIUZZI, Stefania; RUBINO, Chiara; STEFANIZZI, Pietro; PETRELLA, Andrea; BOGHETICH, Adriano; CASAVOLA, Caterina; PAPPALETTERA, Giovanni – **Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers**. Construction and Building Materials. Vol. 158 (2018), p. 24–32. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013.
- MASKELL, Daniel; THOMSON, Andrew; WALKER, Pete; LEMKE, Manfred – **Determination of optimal plaster thickness for moisture buffering of indoor air**. Building and Environment. Vol. 130 (2018), p. 143–150. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.11.045.
- MELIÀ, Paco; RUGGIERI, Gianluca; SABBADINI, Sergio; DOTELLI, Giovanni – **Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters**. Journal of Cleaner Production. Vol. 80 (2014), p. 179–186. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.073.
- MINKE, Gernot – **Building with earth: design and technology of a sustainable architecture**. 6th^a ed. Basel, Boston: Birkhauser-Publishers for Architecture, 2006.
- MORET-RODRIGUES, António; CANHA-DA-PIEDADE, António; BRAGA, Ana – **Térmica de edifícios**. Alfragide: Edições Orion, 2009.
- NZS, 2000 – **Materials and workmanship for earth buildings**. New Zealand Standard. Wellington, New Zealand: NZS 4298:1998/A1:2000
- SANTOS, Tânia; GOMES, Idália; COELHO, Flávia; FARIA, Paulina, 2019 – **Earth-based and current plasters: assessment of efficiency and contribution to indoor air quality**. In RILEM Proceedings PRO130: 5th Historic Mortars Conference. Pamplona, Espanha: RILEM Publications SARL.
- SCHROEDER, Horst – **Sustainable Building with Earth**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016. Doi: 10.1007/978-3-319-19491-2
- SICIT2000, 2019 – **Ficha técnica de produto: Plast Retard PE**. [Em linha]. Chiampo, Italy : SICIT2000 S.p.A. [Consultado em 2020/01/02]. Disponível em: https://www.sicitgroup.com/wp-content/uploads/2019/09/PlastRetard-PE_POR-V2.pdf.
- SIVAL, 2020 – **Ficha técnica de produto: Gesso estuque**. [Em linha]. Leiria, Portugal : SIVAL – Sociedade Industrial da Várzea, Lda. [Consultado em: 2020/01/02]. Disponível em: https://sival.pt/img/cms/pdfs/fichas_tecnicas_pt/gesso%20estuque.pdf.
- STAZI, Francesca; NACCI, Andrea; TITTARELLI, Francesca; PASQUALINI, Erio; MUNAFÒ, Placido – **An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments**. Journal of Cultural Heritage. (2015). doi: 10.1016/j.culher.2015.07.009.