

CARACTERIZAÇÃO DE ARGAMASSAS DE CAL HIDRÁULICA NATURAL COM METACAUPLINO E RESÍDUO CERÂMICO

Teresa Fontes*, Paulina Faria e Vítor Silva

Departamento de Eng. Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologias
Universidade Nova de Lisboa
2829-516 Caparica

e-mail: t.fontes@campus.fct.unl.pt, paulina.faria@fct.unl.pt, vmd.silva@fct.unl.pt, web:
<http://www.dec.fct.unl.pt>

Palavras-chave: Cal hidráulica natural, resíduo cerâmico, metacaulino, argamassa, caracterização laboratorial

Resumo. *As argamassas são um material de grande relevância na construção. Estas são aplicadas no assentamento de alvenarias, em rebocos e ainda para assentamento de revestimentos de acabamento aderidos. As argamassas são muito utilizadas na construção e grande parte do parque imobiliário nacional necessita de intervenções de reabilitação e manutenção que envolvem a sua aplicação. Daí a importância da sua caracterização, assim como o estudo de materiais alternativos para a sua composição. Aliando este material construtivo ao conceito da construção sustentável, é possível e vantajosa a introdução de resíduos industriais na sua produção.*

No presente artigo apresenta-se um estudo, realizado no âmbito dos projetos financiados pela FCT METACAL e LIMECONTECH, a argamassas de traço volumétrico 1:3, em que o traço de ligante é constituído por cal hidráulica natural NHL3.5 de produção nacional, ou essa cal e resíduo de granulometria fina de cerâmica de barro vermelho e/ou de metacaulino, e o traço de agregado é constituído sempre pela mesma mistura de areias siliciosas lavadas e calibradas.

Foram realizadas diversas composições de argamassas, variando as percentagens de resíduo e de metacaulino empregues em substituição de massa equivalente da cal hidráulica natural. Os ensaios foram realizados em provetes prismáticos, cujas dimensões são 160x40x40 (mm). Os provetes foram sujeitos a três condições de cura até à idade de ensaio, aos 28 dias: húmida, a 90±5% de humidade relativa (HR), de referência segundo a norma EN 1015-11: 1999, a 65±5% de HR, e nestas últimas condições mas com aspersão diária com água durante os primeiros dias de cura, sempre a 20±3°C de temperatura.

A campanha experimental apresentada inclui os seguintes ensaios aos provetes: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem e porosidade aberta.

Em relação aos resultados obtidos constata-se que as argamassas sujeitas a cura com aspersão nos primeiros dias (mais facilmente reproduzível em obra), apresentam valores de resistência mecânica adequados à aplicação na reabilitação de edifícios. As argamassas sujeitas a cura húmida e principalmente as com substituição de cal por metacaulino apresentam as resistências mecânicas mais elevadas, possíveis de adotar em suportes mais recentes. Em relação à absorção capilar e à secagem, o comportamento das argamassas foi adequado, não apresentando valores piores devido à substituição da cal pelo resíduo cerâmico.

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população a nível mundial, cresceu também a necessidade de construir cada vez mais edifícios, procurando dar resposta aos padrões de qualidade exigidos. Mas em Portugal essa necessidade estabilizou, havendo atualmente o interesse e a necessidade de conservar e reabilitar edifícios existentes, principalmente os de relevância histórica e cultural, e todos os que constituam valor patrimonial.

As argamassas são um recurso com diversas aplicações e muito utilizado, tanto em novas construções como em intervenções em edifícios existentes. Assim importa estudar e otimizar as suas características, promovendo a adoção de novos componentes e, quando possível, a adoção de resíduos de construção.

No estudo em curso, pretende-se analisar argamassas de cal hidráulica natural e a sua aplicabilidade, nomeadamente como reboco de substituição de alvenarias existentes.

Quando aplicadas, estas têm de ser compatíveis com os materiais constituintes das alvenarias, que podem ser mais recentes ou mais antigos. Assim, pretende-se que uma argamassa de reboco apresente, para além de alguma capacidade de deformação que lhe possibilite acompanhar a deformação do suporte, características a nível de resistência mecânica, absorção de água por capilaridade e capacidade de secagem adequadas aos suportes e, eventualmente, a argamassas pré-existentes.

Nesse caso pode ser necessário constituir argamassas semelhantes às aplicadas originalmente e adotar técnicas de aplicação eficientes e adequadas a esses materiais.

A utilização de cal hidráulica natural (produto com constituintes conducentes a cura mista hidráulica e aérea) genericamente conduz a argamassas com características entre as com base em cimento e as com base em cal aérea. Com a entrada em vigor da nova versão da norma NP EN 459-1: 2011 [1], as cals hidráulicas naturais de fabrico nacional anteriormente produzidas tiveram de ser substancialmente alteradas. Surgiu também no mercado uma cal hidráulica natural NHL3.5, que recentemente começou a ser caracterizada [2]. Para que argamassas produzidas com a referida cal possam ser compatíveis com suportes existentes, terão de apresentar características de resistência e de comportamento face à água líquida e ao vapor de água semelhantes às dos suportes, em determinados traços estudados.

A utilização de pozolanas e nomeadamente de metacaulino em substituição ou como adição em argamassas de cal aérea tem sido bastante estudada por vários investigadores [3] [4] e o mesmo tem recentemente começado a ser feito em argamassas de cal hidráulica natural. Também alguns estudos têm vindo a caracterizar argamassas de cal aérea com resíduos cerâmicos [5]. No entanto, só recentemente alguns estudos foram realizados com argamassas com este tipo de cal hidráulica natural nacional NHL3.5 em que tenham sido utilizadas substituições de resíduos de cerâmica em substituição parcial do agregado [6] ou de metacaulino em substituição parcial da cal [7], e não se conhecem estudos em que tenham sido utilizadas simultaneamente substituições de cal por resíduo de cerâmica e metacaulino.

O metacaulino é reconhecido como uma pozolana que pode ser bastante reativa (tanto mais quanto maior o teor em sílica e/ou alumina no estado não cristalino – que depende do tratamento térmico a que o caulino é sujeito – e maior a sua superfície específica – que depende da moagem) [8]. Por seu lado, os resíduos cerâmicos constituem normalmente pozolanas muito menos reativas, pois o teor em sílica é normalmente menor, muitas vezes o tratamento térmico que é realizado às composições argilosas que os constituem é demasiado elevado para o efeito, deixando parte da sílica e da alumina

no estado cristalino, e a moagem dos resíduos é mais difícil, resultando em partículas com uma menor superfície específica comparativamente à dos metacaulinos [9]. No entanto, por se tratar de um resíduo que interessa reintroduzir no processo produtivo, mesmo a parte não reativa pozolanicamente pode funcionar como um filler, compactando a estrutura porosa das argamassas. Neste contexto, foi feita uma campanha experimental com o objetivo de caracterizar argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com resíduo cerâmico e metacaulino.

2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES

2.1. Matérias-primas

Foram preparadas argamassas tendo como ligante cal hidráulica natural NHL3.5, produzida pela Secil e classificada segundo a norma NP EN 459-1:2011 [1]. Excepto na argamassa de referência, procedeu-se à substituição parcial de 5% ou de 10% de massa cal por resíduo de granulometria fina de cerâmica de barro vermelho ou de metacaulino. O resíduo cerâmico, designado por T, resultou de resíduo de construção e demolição (RCD) de uma obra de substituição de revestimento com ladrilhos cerâmicos da fachada de um edifício; também poderia ter resultado de ladrilhos não conformes da fábrica de produção dos mesmos produtos cerâmicos. O RCD foi moído e separado em diferentes gamas de granulometrias, na Figura 1. O metacaulino, que se designa por Mk, é uma pozolana artificial, tendo sido utilizado o Argical M-1200S da Imerys. Em relação aos agregados, foi empregue uma mistura de areias siliciosas lavadas e calibradas de diferentes granulometrias (APAS 12 – areia grossa; APAS 20 – areia intermédia; APAS 30 – areia fina). As curvas granulométricas de cada uma das areias utilizadas e da mistura de areias também são apresentadas na Figura 1. As baridades dos diversos constituintes das argamassas são apresentadas na Tabela 1.

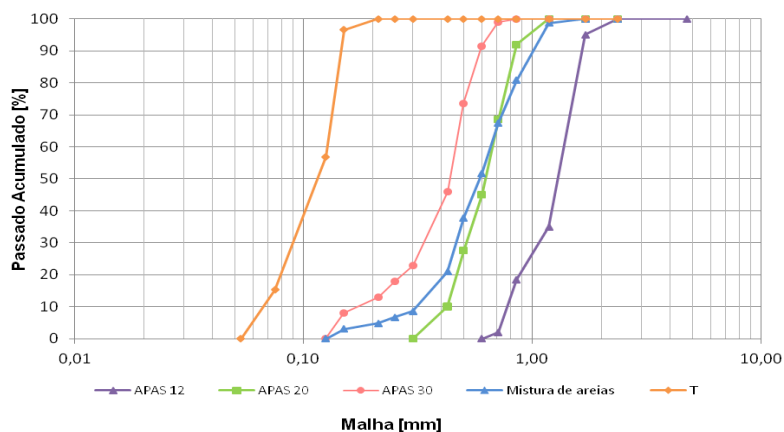


Tabela 1. Baridade dos constituintes das argamassas

Materiais	Baridade (g/cm³)
APAS12	1,412
APAS20	1,405
APAS30	1,388
T	1,058
Mk	0,294
NHL3.5	0,771

Previamente ao processo de amassadura, para cada tipo de argamassa, os constituintes secos (cal, resíduo cerâmico, metacaulino e agregados) foram homogeneizados manualmente. A amassadura foi feita em misturadora mecânica, adicionando-se água durante os primeiros segundos da mistura. Esta teve uma duração total de três minutos, nas condições laboratoriais de 24°C e 63% de humidade relativa.

A quantidade de água utilizada em cada amassadura foi determinada experimentalmente de forma a garantir a trabalhabilidade das argamassas.

Na Tabela 2 são apresentadas as designações das argamassas (em que NHL refere-se à cal NHL3.5 utilizada, a que se seguem as percentagens de substituição de massa dessa cal por resíduo de cerâmica (T) e por metacaulino (Mk)), os traços volumétricos e ponderais (considerando como ligante o conjunto de cal, resíduo cerâmico e metacaulino), a relação água/ligante e a consistência por espalhamento obtida com a argamassa fresca no ensaio da mesa de espalhamento, com base na norma EN 1015-3:1999 [10].

Foram realizados provetes prismáticos de dimensões 40x40x160 (mm) em moldes metálicos. Para a execução dos provetes prismáticos, a argamassa foi colocada nos moldes em duas camadas e compactada mecanicamente com 20 pancadas em cada camada.

Tabela 2. Designação das argamassas, traços volumétrico e ponderal, relação água/ligante e consistência por espalhamento

Argamassa	Traço volumétrico [Ligante:Areia]	Traço Ponderal [Ligante:Areia]	Relação A/Ligante	Consistência (mm)
NHL	1:3	1:5	1,05	166
NHL_5T	1:3	1:5	1,05	158
NHL_10T	1:3	1:5	1,11	181
NHL_5T+5Mk	1:3	1:5	1,05	154
NHL_5T+10Mk	1:3	1:5	1,05	142
NHL_10T+10Mk	1:3	1:5	1,05	148

2.3. Condições de cura

Os provetes prismáticos de cada tipo de argamassa foram sujeitos a três condições de cura diferentes: a cura segundo a norma EN 1015-11:1999 [11], (designada por St – standard), a cura húmida (H) e a cura com aspersão de água do 2º ao 5º dia das argamassas nas mesmas condições

da cura St (SP) – esta última considerada próxima de condições reprodutíveis em obra. Todas as curas tiveram lugar em laboratório, em condições de temperatura similares ($20\pm 3^\circ\text{C}$).

Após a preparação e moldagem dos provetes, os das curas H e St foram envoltos em polietileno, de acordo com a norma [11], de forma a manter a humidade relativa elevada e evitar uma desidratação rápida das argamassas. Os moldes com os provetes da cura SP foram colocados, após moldagem, num laboratório condicionado (temperatura $20\pm 3^\circ\text{C}$ e $65\pm 5\%$ de HR) e aspergidos diariamente com água desde o segundo até ao quinto dia após a amassadura.

A desmoldagem de todos os provetes prismáticos foi feita quando as argamassas atingiram dois dias de idade, tendo os provetes de cura H e St permanecido envoltos no polietileno até ao 5º dia. A essa idade os provetes da cura H foram colocados em laboratório às condições de $90\pm 5\%$ de HR., tendo os provetes da cura St sido colocados nas mesmas condições que os da cura SP (a $65\pm 5\%$ de HR). À designação das argamassas (Tabela 2) acresce a sigla que identifica a cura respetiva a que foram sujeitas.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

No presente artigo são apresentados os resultados obtidos aos 28 dias de idade das argamassas relativos às resistências mecânicas (módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão, resistência à compressão), absorção de água por capilaridade, secagem e porosidade aberta.

O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) dos provetes foi determinado com base na norma NP EN 14146:2006 [12] utilizando um equipamento Zeus Ressonance Meter. A determinação da resistência à tração por flexão (R_t) e à compressão (R_c) foi realizada segundo o preconizado na norma EN 1015-11:1999 [11], utilizando uma máquina de tração universal e células de carga respetivamente de 2 kN e de 50 kN.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com uma das metades de cada provete, resultante do ensaio de resistência à flexão. No dia anterior ao início destes ensaios, os provetes H foram colocados nas mesmas condições que os restantes (65% HR).

Os valores de E_d dos provetes da argamassa com 10% de cal substituída por Mk e 5% ou 10% por resíduo cerâmico sujeitas a cura húmida (NHL_5T+10Mk_H e NHL_10T+10MK_H) foram muito dispersos. Tal poderá ser explicado possivelmente por os provetes ainda se encontrarem muito húmidos aquando a realização do ensaio (quando se partiram os provetes no ensaio de flexão verificou-se que o seu núcleo central apresentava uma mancha mais escura devido a maior teor de humidade que na periferia e que na seção dos provetes de constituição idêntica mas que tinham permanecido nas curas St e SP).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base nas normas EN 15801:2009 [13] e EN 1015-18:2002 [14]. Este foi executado em metades de provetes (de volume médio semelhante) previamente secos em estufa a 60°C e com as faces laterais impermeabilizadas com película aderente. Os provetes foram colocados dentro de um tabuleiro com uma lâmina de água de 5mm na base, sobre uma rede plástica que possibilitava o acesso da água à base dos provetes. O tabuleiro encontrava-se no interior de uma caixa plástica fechada com uma massa de água, no fundo, de forma a tornar o ambiente na caixa perto da saturação em termos de humidade relativa.

A absorção de água pela base dos provetes foi determinada através da medição da massa dos provetes antes de colocados no tabuleiro e posteriormente após 5, 10, 15 e 30 minutos, 1 hora (desde a colocação no tabuleiro) e depois de hora a hora até os provetes estarem praticamente saturados, medindo-se depois a massa de 24h em 24h até a variação de massa dos provetes ser

inferior a 1%. Foi determinado o coeficiente de capilaridade CC (declive do troço inicial da curva de absorção capilar) e o valor assintótico VA da curva de absorção capilar de cada argamassa.

Com os provetes saturados após o ensaio de capilaridade, deu-se início ao ensaio de secagem, de acordo com o definido por RILEM [15]; Após os provetes serem retirados do tabuleiro, estes permaneceram num ambiente de $65\pm 5\%$ de HR apenas com o topo livre, e a sua massa foi medida de hora a hora no primeiro dia de ensaio e depois diariamente (de 24h em 24h) até a sua variação de massa ser mínima, o que aconteceu às 480h de duração do ensaio. Foi determinado o coeficiente de secagem CS (declive do troço inicial da curva de secagem, em kg/m^2) e o índice de secagem IS [16] de cada argamassa.

O ensaio de porosidade aberta (P_{ab}) foi executado com base na norma EN NP 1936:2008 [17] definida para pedra. Este foi feito com uma pequena parte dos provetes, integra, separada durante o ensaio de resistência à compressão e seca em estufa a 60°C . Durante a preparação dos provetes para o ensaio da porosidade aberta, foi necessário limpar a superfície dos provetes para libertar os grãos soltos. Verificou-se nessa etapa que os provetes com metacaulino aparentavam ser menos freáveis do que os só com resíduo cerâmico.

Primeiramente foi medida a massa dos provetes secos, de seguida estes foram colocados no exsiccador onde estiveram 24h em vácuo, mais 24h imersos e em vácuo e outras 24h imersos mas sujeitos à pressão atmosférica. No fim deste ciclo foi feita uma pesagem hidrostática dos provetes e uma pesagem destes saturados. Em todos estes ensaios utilizaram-se três provetes de cada argamassa.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os valores obtidos no ensaio de resistência à tração por flexão, aos 28 dias de idade das argamassas, estão representados na Figura 2. Um maior R_t pode indiciar maior resistência à fendilhação, mas dentro de limites que sejam compatíveis com a resistência do suporte onde as argamassas sejam aplicadas. Analisando a referida figura pode-se observar que no caso da cura H, quanto maior o teor de T em substituição de NHL3.5, menor é R_t . Quando se substitui 5% de cal por Mk obtém-se o maior valor de R_t ; no entanto, quando se aumenta a substituição de Mk para 10% R_t volta a diminuir. No caso da cura SP, R_t também diminui com o aumento do teor de T. Quando se substitui 5% de Mk para além de 5% de T, R_t aumenta bastante. Com o acréscimo dos teores de Mk e de T, em substituição de massa de NHL3.5, R_t mantém-se praticamente constante. No que respeita à cura St, verifica-se que existe um pico quando se substitui 5% da cal por T. Neste caso, a substituição de Mk só conduz a um aumento de R_t num teor de 10% com 5% de T. Nas argamassas sem Mk, a cura H é onde se obtêm valores superiores de R_t . Nas argamassas com substituições de cal mistas (por Mk e T), a influência da aspensão inicial (cura SP) parece ser crescente.

Na Figura 3 estão representados os valores de resistência à compressão. Os valores de R_c têm de ser da mesma ordem de grandeza dos do suporte onde a argamassa seja aplicada, de modo a não conduzirem ao desenvolvimento de tensões. Uma maior razão R_t/R_c será vantajosa (Figura 4), sendo que neste caso NHL_5T_St será a mais favorável.

Pode-se observar que entre as argamassas só de cal, a cura H conduz a valores de R_c muito superiores que as restantes. Com o aumento da percentagem de T, sem a utilização de Mk, R_c diminui, em todas as curas, embora seja mais notório no caso da cura H. No entanto, os valores de R_c para as curas St e SP são bastante semelhantes entre si entre as várias dosagens. A utilização de Mk aumenta significativamente os valores de R_c . No caso da cura H, R_c aumenta à medida que

aumentam os teores de Mk e T. Neste caso verifica-se uma inversão da tendência de diminuição de R_c que ocorre nas argamassas que apenas têm T. Nas curas SP e St tem-se um pico nas argamassas com 5% de T e 10% de Mk.

Um baixo módulo de elasticidade indicia uma tendência para uma maior deformabilidade das argamassas. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, representados na Figura 5, apresentam exatamente o mesmo andamento que os da Figura 3 (à exceção do caso da argamassa NHL_5T+5Mk_St, que apresenta um valor mais baixo de E_d que o correspondente de R_c).

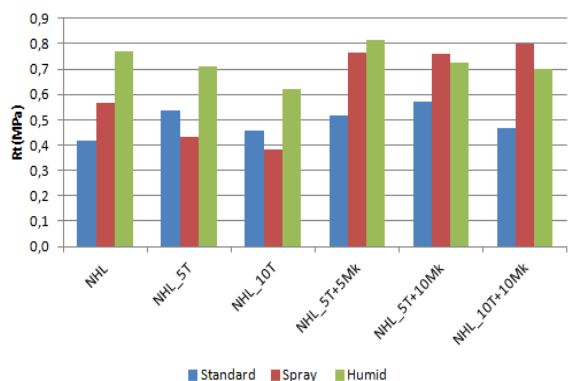


Figura 2. Resistência à tração por flexão

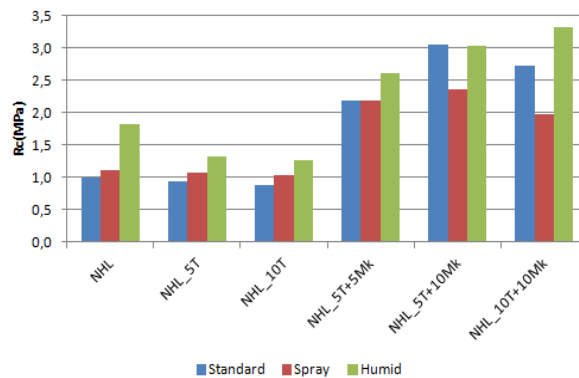


Figura 3. Resistência à compressão

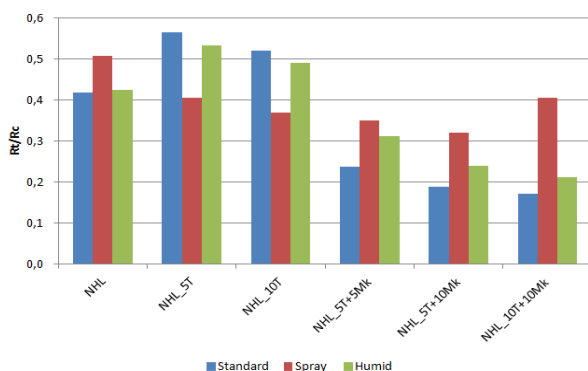


Figura 4. Razão R_t/R_c

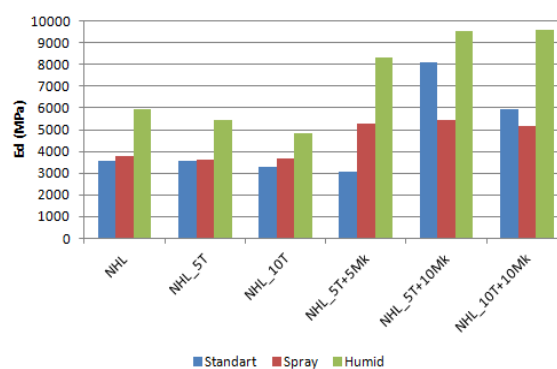


Figura 5. Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores do coeficiente de capilaridade CC e do valor assintótico da absorção capilar VA são apresentados nas Figuras 6 e 7, respetivamente. São mais eficientes argamassas que apresentem baixos CC e VA. Na análise dos valores de CC, todas as argamassas na cura H apresentam valores inferiores aos das restantes curas, o que significa que absorção de água é mais lenta. Ainda em relação ao CC, a cura St apresenta valores superiores em todos os casos, exceto na NHL_5T+10Mk, em a que cura SP toma um valor um pouco maior. É possível observar também que as argamassas que apenas têm substituição de NHL por T têm valores superiores de CC, pelo que são as mais rápidas a ficar saturadas. No caso da cura H, a argamassa de referência (só de cal) e as com Mk tem valores muito próximos. Na cura SP, a argamassa de referência e a NHL_5T+5Mk também têm valores muito semelhantes; com o aumento das percentagens de Mk e de T, CC diminui. Na cura St,

o valor de CC da argamassa de referência é muito próximo da argamassa com 5% de T (sendo ligeiramente superior). A argamassa NHL_5T+10Mk apresenta o menor valor de CC, entre as argamassas da cura St.

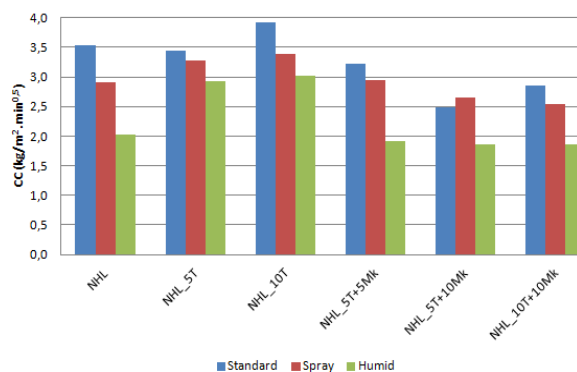


Figura 6. Coeficiente de capilaridade

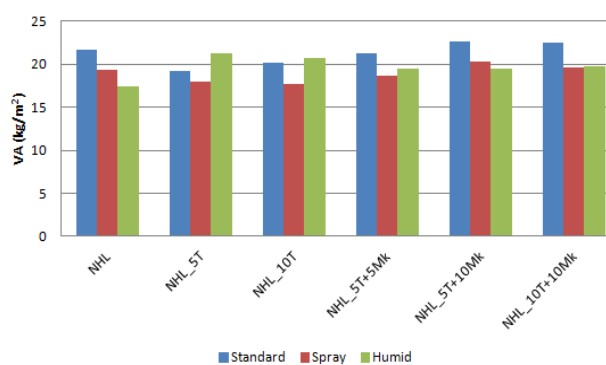


Figura 7. Valor assintótico

Da análise à Figura 7 é possível observar que os valores de todas as argamassas são muito semelhantes, o que significa que o teor em água absorvida não variou muito entre os tipos de composições analisados. Pode-se ainda notar que os VA na cura H são tão ou mais elevados que os das restantes curas, ao contrário do caso dos valores de CC, que são sempre mais baixos. Tal significa que apesar das argamassas, nas referidas condições de cura, absorverem água mais lentamente, estas absorvem tanta água quanto as argamassas das restantes curas.

A Figura 8 apresenta o coeficiente de secagem (CS). O CS representa a quantidade de água que a argamassa perde em função do tempo decorrido no início do ensaio de secagem. Assim, quanto maior for o CS, maior a velocidade de secagem da argamassa nos primeiros dias do processo. A argamassa que apresenta maior valor de CS é a NHL_5T+5Mk_St, sendo portanto esta que perde mais rapidamente água no início da secagem. Entre as argamassas de substituição de cal por T, verifica-se, nas curas St e H, um pico na NHL_5T, quando comparado com a argamassa de referência e a com 10% de T para o mesmo tipo de cura. Nestes casos, os valores de CS das NHL_5T são superiores aos das respetivas argamassas de referência mas, para uma maior percentagem de T (10%), os valores de CS diminuem. No caso da SP a tendência é contrária, apresentando NHL_5T um valor de CS inferior à argamassa de referência e à NHL_10T. Nas argamassas com Mk, à medida que estas têm maiores percentagens de Mk e T, CS toma valores semelhantes às argamassas de referência.

Na Figura 9 é apresentado o índice de secagem (IS). O IS representa o tempo que a argamassa demora a perder água até um teor mínimo. Um maior IS significa que a argamassa demora mais tempo a secar quase completamente. Da análise à figura é possível verificar que as argamassas com 10% de Mk e as de referência (nesta com exceção da cura H) apresentam valores superiores às restantes argamassas, sendo, por isso, menos eficientes. A argamassa de referência e as com apenas substituição de cal por T, na cura SP apresentam valores superiores às mesmas argamassas nas restantes curas; na cura H, pelo contrário, nos mesmos casos apresentam valores inferiores. A tendência das referidas argamassas, em todas as curas, é a diminuição de IS à medida que as argamassas têm maior percentagem de T. A NHL_5T+5Mk apresenta menor IS nas curas SP e St em

relação às restantes argamassas, pelo que é a argamassa mais rápida a perder todo o teor de água. Na cura H, os menores valores de IS verificam-se no caso das argamassas com apenas substituição de cal por T, apresentando valores muito semelhantes nos casos de 5% de T e 10% de T.

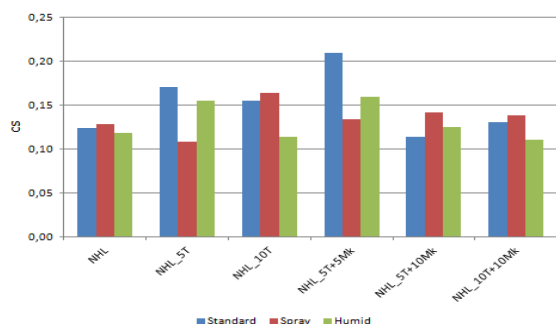


Figura 8. Coeficiente de secagem

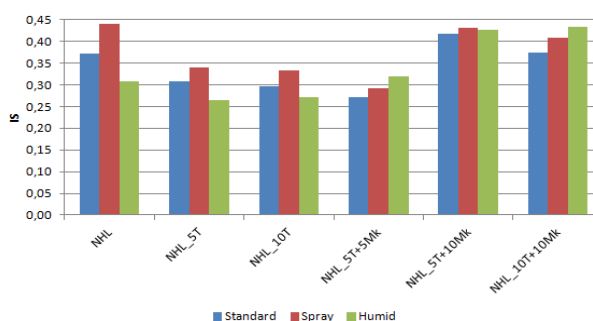


Figura 9. Índice de secagem

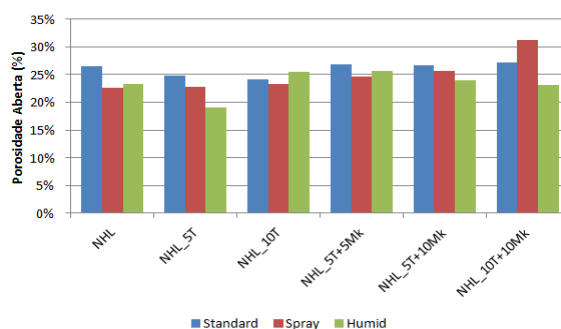


Figura 10. Porosidade aberta

A porosidade aberta, P_{ab} , representada na Figura 10, representa a percentagem de poros que são acessíveis ao exterior, indiciando uma maior compacidade. Nesta figura pode-se observar que existe uma tendência para um aumento de P_{ab} com a introdução do Mk. Nas argamassas com apenas T, na cura H, P_{ab} aumenta com o aumento do teor de T. No caso da cura SP, à medida que as percentagens de T e Mk aumentam, e mesmo em relação à argamassa de referência, há um aumento da percentagem de P_{ab} . A argamassa NHL_10T+10Mk_SP apresenta a maior percentagem de P_{ab} . Na cura H, nas argamassas com Mk, verifica-se um decréscimo do valor de P_{ab} com o aumento das percentagens de T e Mk. Já na cura St, os valores de P_{ab} , para as mesmas argamassas, não variam muito.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Dos ensaios apresentados na presente publicação e tendo em conta a avaliação da adequação das argamassas estudadas para aplicação na reabilitação de rebocos e no tratamento de juntas de edifícios existentes, valorizam-se, dentro de certos limites [18] valores de E_d baixos (garantindo a deformabilidade da argamassa); valores não demasiadamente elevados de R_t e R_c (para que a argamassa tenha menor propensão para fendilhar e tenha uma resistência comparável com a do

suporte); valores de VA e de CC menores (de forma a que a argamassa absorva menor quantidade de água e mais lentamente); CS maior e IS menor (para garantir que a secagem da argamassa seja mais rápida no início e na globalidade do processo). A P_{ab} dará uma ideia da compacidade das argamassas. Avaliando o que se pretende das características estudadas e cruzando os resultados obtidos pode-se concluir que:

- A NHL_5T_St e a NHL_5T+5Mk_St são as argamassas que apresentam melhores características quando comparadas com a respetiva argamassa de referência. Estas exibem uma evolução positiva dos valores pretendidos na globalidade dos parâmetros analisados.
- A argamassa NHL_10T+10Mk_H não cumpre os valores pretendidos na maioria dos parâmetros, podendo ser considerada incompatível para aplicação em muitos suportes.
- Na análise de E_d a cura H apresenta os piores valores (mais elevados) em todas as composições; já a cura St apresenta os valores mais baixos (exceto no caso da NHL_5T+10Mk e NHL_10T+10Mk em que os valores são mais baixos na SP).
- Ainda em relação a E_d , as argamassas com substituição de cal por T apenas, apresentam em todas as curas valores mais baixos ou muito semelhantes às respetivas argamassas de referência; já as argamassas com Mk, à exceção da NHL_5T+5Mk_St, têm valores superiores aos das argamassas de referência, isto é, são menos deformáveis.
- No caso da R_t , verifica-se que na cura H se obtêm os maiores valores, à exceção da NHL_5T+10Mk e da NHL_10T+10Mk que tem melhores valores na cura SP. A cura St na argamassa de referência e nas argamassas com Mk apresenta valores mais baixos de R_t .
- No entanto, na St, todas as composições de argamassas com substituições apresentam valores de R_t superiores à argamassa de referência. Já na cura H (e à exceção de NHL_5T+5Mk), os valores de R_t são inferiores à argamassa de referência.
- Na R_c , a cura H apresenta os valores mais elevados (à exceção da NHL_5T+10Mk), pelo que é pior para adoção em edifícios antigos. A argamassa de referência e as com substituição de cal por T, na cura St, exibem os valores mais baixos de R_c ; já no caso das argamassas com Mk os valores mais baixos são obtidos da cura SP.
- À semelhança de E_d , também na análise de R_c se verifica que em todas as argamassas com T apenas, R_c é inferior às argamassas de referência e que nas com T e Mk, R_c é superior às mesmas. Conclui-se assim que a presença de Mk dá origem a argamassas com maior R_c e que terão menor compatibilidade com suportes mais antigos.
- Em relação ao CC, na cura húmida verificam-se os melhores valores; já na cura St, e à exceção da NHL_5T+10Mk, registam-se os piores valores.
- Verifica-se ainda que as argamassas com apenas substituição de cal por T (exceto a NHL_5T_St), em todas as curas, apresentam valores de CC piores aos das respetivas argamassas de referência. Na mesma linha de análise, o contrário acontece nas argamassas com Mk (exceto na NHL_5T+5Mk_SP).
- No caso do VA, verifica-se que a argamassa de referência e as com Mk da cura SP apresentam os piores valores, isto é, são as argamassas que absorvem mais água; já em relação às argamassas com T, é na cura H que apresentam os piores valores de VA. A cura SP apresenta os melhores valores (à exceção da argamassa de referência e da NHL_5T+5Mk).
- No caso da cura H os valores de VA são piores que os da argamassa de referência em todas as composições. Nas restantes curas verifica-se que as argamassas com T apenas e as com 5% de T e 5% de Mk apresentam valores melhores que as argamassas de referência, ao contrário do que acontece nas argamassas com 10% de Mk;

- Verifica-se que os valores de CC e VA são independentes, isto é, um menor CC não implica um menor VA. Esse caso é bastante visível no caso da cura H. Apesar das argamassas na referida condição de cura apresentarem melhores valores de CC, estas apresentam VA semelhantes a piores que as mesmas argamassas nas restantes curas;
- No que respeita aos valores de CS, as argamassas da cura SP apresentam os melhores valores, à exceção da NHL_5T e da NHL 5T+5Mk as quais exibem os valores piores. Essas argamassas exibem os melhores valores na cura St. No caso do IS, os melhores valores de IS são verificados na cura H, em relação à argamassa de referência e às com T apenas, e na cura St em relação às argamassas com Mk. Assim, as referidas argamassas são as que são mais rápidas a secar durante todo o processo. As composições da cura SP são, à exceção da NHL_5T+5Mk e da NHL_10T+10Mk, as que apresentam valores de IS piores.
- Na cura SP todas as argamassas apresentam valores de IS melhores que a argamassa de referência. Nas restantes curas, as argamassas com T apenas apresentam IS melhores aos das respetivas argamassas de referência; já as com Mk (exceto a NHL_5T+5Mk_St) apresentam valores piores às argamassas de referência;
- Na análise de P_{ab} , as argamassas da cura St exibem os maiores valores à exceção da NHL_10T e NHL_10T+10Mk. Em termos genéricos, a P_{ab} parece justificar as resistências mecânicas apresentadas, e ainda os valores de VA e de IS.

Dos resultados obtidos constata-se que as argamassas sujeitas a cura com aspersão nos primeiros dias, que pode facilmente ser implementada em obra, apresentam valores de resistência mecânica que são considerados compatíveis com os de vários suportes onde venham a ser aplicadas em intervenções de reabilitação, inclusive em edifícios antigos. Em suportes onde se pretendam resistências mecânicas mais elevadas, recomenda-se a implementação de uma cura húmida mais prolongada e a substituição de cal não apenas por resíduo cerâmico mas também por metacaulino. O comportamento face à ação da água líquida ou na forma de vapor foi avaliado como adequado e não foi muito prejudicado pela substituição da cal pelo resíduo cerâmico. Em face dos resultados obtidos considera-se que a formulação de argamassas de NHL3.5 com substituição parcial de cal por resíduo de cerâmica e metacaulino é vantajosa em termos técnicos e de sustentabilidade, e que a percentagem de substituição deve variar em função das características pretendidas.

Verifica-se que com a substituição de massa de cal por resíduo cerâmico as características mecânicas e em relação ao comportamento face à água ficam semelhantes ou em alguns casos melhores quando comparado com as argamassas de referência. Assim, considera-se a adoção do referido resíduo bastante favorável. O estudo apresentado continua em curso, com uma campanha experimental de ensaios mais abrangente, que será divulgada em breve.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia) pelo financiamento dos projetos METACAL e LIMECONTECH, nos quais se insere a investigação apresentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IPQ, *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. NP EN 459-1*, Instituto Português da Qualidade, Lisboa (2011).
- [2] P. Faria; V. Silva; J. Grilo; J. Carneiro; T. Branco; D. Mergulhão e R. Antunes, “Argamassas

- compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural,*” in CIREA, Lisboa (2012).
- [3] E. Vejmelková; M. Keppert; Z. Keršner; P. Rovnaníková e R. Černý, “*Mechanical, fracture-mechanical, hydric, thermal and durability properties of lime-metakaolin plasters for renovation of historical buildings,*” *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 22-28, (2012).
- [4] A. Arizzi e G. Cultrone, “*Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study,*” *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 135-143, (2012).
- [5] G. Matias; I. Torres e P. Faria, “*Argamassas de substituição com resíduos de tijolo cerâmico,*” Patorreb, (2012).
- [6] A. F. Cruz, “*Argamassas de cal hidráulica natural com incorporação de resíduos cerâmicos,*” Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra (2012).
- [7] J. Grilo, “*Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional,*” Dissertação de mestrado (em fase de discussão), Universidade Nova de Lisboa (2012).
- [8] P. Faria-Rodrigues, “*Resistance to salts of lime and pozzolan mortars,*” RILEM, (2009).
- [9] L. Binda; G. Baronio; C. Tiraboschi e C. Tedeschi, “*Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto,*” *Construction and building materials*, vol. 17, pp. 629-639, (2003).
- [10] CEN, *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). EN 1015-3*, Brussels: European Committee for Standardization (1999).
- [11] CEN, *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardener mortar. EN 1015-11*, Brussels: European Committee for Standardization (1999).
- [12] IPQ, *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). NP EN 14146*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade (2006).
- [13] CEN, *Conservation of cultural property - Test methods - Determination of absorption by capillarity. EN 15801*, Brussels: European Committee for Standardization (2009).
- [14] CEN, *Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardener mortar. EN 1015-18*, Brussels: European Committee for Standardization (2002).
- [15] RILEM TC 25-PEM, Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. *Materials & Structures* 13, pp. 204-207 (1980).
- [16] V. Brito, T. Gonçalves, P. Faria, “*Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport.*” *J. Coating Technology and Research*, vol.8, pp. 513-525 (2011).
- [17] IPQ, *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. NP EN 1936*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade (2008).
- [18] R. Veiga, A. Fragata, A. Velosa, A. Magalhães, G. Margalha, “*Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings.*” *Int. J. Architectural Heritage* 4 (2), pp. 177-195 (2010).
- [19] IPQ, *Especificações de argamassas para alvenarias - Parte 1: Argamassas para rebocos interiores e exteriores. NP EN 998-1*, Lisboa: Instituto Português da Qualidade (2010)