ARGAMASSAS COMPATÍVEIS COM ALVENARIAS HISTÓRICAS COM BASE EM CAL HIDRÁULICA NATURAL

COMPATIBLE NATURAL HYDRAULIC LIME MORTARS FOR HISTORIC MASONRIES

Paulina Faria
Prof. Associada, paulina.faria@fct.unl.pt

Vitor Silva
Bolseiro da Secção de Construção e Hidráulica

João Grilo, João Carneiro, Tiago Branco, Duarte Mergulhão, Rui Antunes
Mestrandos

DEC, FCT Universidade Nova de Lisboa
Portugal

RESUMO

A nova versão da norma NP EN 459-1:2011 de cais de construção apresenta uma nova classificação das cais com propriedades hidráulicas. Esta situação impõe uma reclassificação e, por vezes, uma reformulação de muitas cais hidráulicas que, segundo a versão anterior da norma eram classificadas como cais hidráulicas naturais.
Neste artigo são apresentadas as características de argamassas realizadas com cais hidráulicas naturais portuguesas NHL3.5 e NHL5, comparativamente a argamassas realizadas com uma cal aérea hidratada em pó CL90-S. As argamassas foram sujeitas a curas distintas e algumas percentagens mássicas de cal foram substituídas por iguais percentagens de um metacaulino, uma pozolana artificial comercializada no mercado internacional.
Discute-se a influência que o tipo de cal, as condições de cura e a percentagem de substituição de cal por metacaulino têm em diferentes características mecânicas e físicas das argamassas, de modo a conhecer melhor este tipo de argamassas e poder formulá-las e aplicá-las em função das características pretendidas.

ABSTRACT

The new version of standard EN 459-1: 2010 of building limes presents a new classification of limes with hydraulic behavior, which lead to the reclassification or reformulation of many portuguese hydraulic limes that were previously (by the ancient version of the standard) classified as natural hydraulic limes.
In this paper the characteristics of mortars formulated with portuguese natural hydraulic limes NHL5 and NHL3.5 are presented and compared with mortars made with an air lime CL90-Sd. The mortars were differently cured and some percentages of each lime were substituted by the same weight of a metakaolin, an artificial pozzolan available in the international market.
The influence of the type of lime, the curing conditions and the amount of metakaolin on distinct mechanical and physical properties of the mortars are discussed, in order to a better knowledge of these types of mortars.

1. INTRODUÇÃO

A nova versão de 2011 da norma NP EN 459-1 [1] redefiniu a constituição das cais com propriedades hidráulicas e estabeleceu três diferentes tipos destas cais: as cais formuladas (FL), as cais hidráulicas (HL) e as cais hidráulicas naturais (NHL). Nas cais hidráulicas naturais não são admitidas adições e é exigido um teor mínimo de hidróxido de cálcio e máximo de sulfato. São estabelecidas três classes de cais hidráulicas naturais: NHL2, NHL3.5 e NHL5, relacionadas com a resistência à compressão registada (em MPa) aos 28 dias.
A norma encontra-se atualmente numa fase de implementação a nível nacional mas estará completamente em vigor a partir de Julho de 2012. Com a entrada em vigor da nova versão da norma, algumas cais portuguesas com

propriedades hidráulicas antigamente classificadas como NHL5, se não forem objeto de reformulação, passarão a ser classificadas como HL5 ou como FL5; os produtores que pretendam continuar a fornecer cais hidráulicas naturais poderão ter de vir a reformular as suas cais, em termos de matéria-prima e/ou de processo de fabrico. Espera-se que estas novas cais hidráulicas naturais apresentem características melhoradas comparativamente às que antes eram designadas pelo mesmo nome, em termos de características diferenciadas dos restantes ligantes minerais e homogeneidade de qualidade.

Portugal é um dos pouco mais de uma dezena de países que possui matéria-prima e produz cais hidráulicas naturais. Do que se tem conhecimento, são atualmente produzidas no país cais NHL3.5 e NHL5.

As cais hidráulicas naturais diferem das cais aéreas por endurecerem por contacto com a água e terem a capacidade de efetuar esse endurecimento mesmo em imersão em água; no caso das cais aéreas não há endurecimento se não existir contacto com o dióxido de carbono e por isso ele não ocorre em imersão em água, iniciando-se muito lentamente em ambientes muito húmidos.

A existência de "impurezas" argilosas na rocha calcária, matéria-prima das cais hidráulicas naturais, nomeadamente de sílica e de alumina, dá origem e justifica esta diferenciação. Ainda mais que na produção de cimento, a produção de cal hidráulica natural depende da natureza e da mineralogia da rocha calcária (daí não ser produzida em muitos países), das condições de cozedura e do tipo de forno utilizado. Normalmente não é possível controlar rigorosamente a temperatura num forno de cal devido a variações na localização do material, face à distância ao queimador ou à periferia do forno. A temperatura varia também com o tipo de combustível utilizado e o material a ser calcinado (com a sua composição química e mineralógica e com a dimensão das partículas) [2].

A reação entre o hidróxido de cálcio com a sílica e a alumina conduz à formação de silicatos e aluminatos de cálcio hidratados [3]. Estas fases hidratadas (sua quantidade e tipo) condicionam as propriedades da cal hidráulica [4] e, como referido, diferenciam-na dos cimentos Portland e das cais aéreas.

A cal hidráulica natural é produzida atualmente em Portugal a temperaturas inferiores a 900°C - temperaturas semelhantes às utilizadas para a produção de cal aérea. Para a produção de cimento, a rocha calcária possui (no caso das margas) ou são-lhe adicionadas argilas e a calcinação ocorre a temperaturas de quase o dobro, formando-se clinquer no processo de sinterização. Para além da calcinação, também a moagem do clinquer do cimento é muito mais consumidora de energia que a da cal hidráulica.

A cal hidráulica natural constitui assim um ligante hidráulico mais sustentável comparativamente ao cimento mas é também potencialmente mais compatível com as características dos suportes antigos onde venha a ser aplicado.

As pozolanas, materiais com elevada superfície específica, ricos em sílica e/ou alumina no estado amorfo, são objeto de normalização em Portugal [5], com vista à sua aplicação em argamassas, caldas e betões. A sua utilização foi muito importante no passado mas caiu em desuso durante muito tempo; em períodos mais recentes tem vindo a ser reconhecida como promovendo melhorias técnicas, económicas e ambientais. Nomeadamente em argamassas de cal aérea, a adição de pozolanas pode conferir características hidráulicas a essas argamassas [6], possibilitando a sua utilização em situações em que se pretendam endurecimentos rápidos em ambientes com elevada humidade relativa ou com fraco contacto com o dióxido de carbono, indispensável para a carbonatação da cal aérea.

Simultaneamente, a imposição da utilização de argamassas de ligante mineral e pozolanas começa a ressurgir em Cadernos de Encargos de obras. A substituição parcial do ligante de argamassas por pozolanas artificiais pode resultar, assim, também em argamassas mais sustentáveis. Devido à sua procura, surgem no mercado pozolanas artificiais de diversos tipos.

Vários trabalhos têm vindo a ser desenvolvidos relativamente à caracterização de argamassas de cal aérea ou de cimento com pozolanas mas são poucos os que existem relativos à utilização de pozolanas em argamassas de cal hidráulica natural e, que se tenha conhecimento, são ainda poucos aqueles utilizando cais hidráulicas naturais portuguesas classificadas de acordo com a nova versão da norma [7, 8, 9].

No Caderno de Encargos da obra de reabilitação de uma ponte de alvenaria encontrou-se prescrito o uso de argamassa "à base de cal hidráulica e pozolana, isenta de produtos cimentícios" para preenchimento de juntas. Era ainda prescrito que o "produto deverá ser fornecido em sacos, pré-doseado". Como requisitos eram apresentadas as gamas de valores recomendadas por Veiga [10] para algumas propriedades de argamassas de juntas em estruturas de alvenaria aos 90 dias, embora no Caderno de Encargos não fosse especificada a idade dos ensaios.

Na tentativa de poder fornecer dados concretos que pudessem vir a apoiar a sociedade – nomeadamente os produtores, os prescritores e as empresas de construção que possam vir a executar as obras de reabilitação,

ampliar os conhecimentos a transmitir na formação de futuros engenheiros -, iniciou-se uma linha de investigação na área das argamassas de cal hidráulica com eventual utilização de pozolanas.
Não se tinha à data conhecimento das características de argamassas de cal hidráulica natural de fabrico recente (classificada de acordo com a nova norma), da influência das condições de cura neste tipo de cal e dos eventuais benefícios (e desvantagens) que a adição de pozolanas pudesse ter neste tipo de argamassas. Iniciou-se assim um estudo preliminar pela produção e caracterização - em termos de módulo de elasticidade, resistências à flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem e resistência à ação de sulfatos - de uma argamassa de cal hidráulica natural EN 459-1 NHL5 de fabrico nacional ao traço volumétrico 1:4 e de argamassas semelhantes mas em que determinadas percentagens da massa da cal foram substituídas por iguais massas de três diferentes pozolanas existentes no mercado nacional, com preços que variavam entre 60 euros e 625 euros por 1000 kg. Uma destas pozolanas (no caso, de preço intermédio) era um metacaulino de produção nacional. Estas argamassas foram sujeitas a condições de cura distintas (que variaram entre 65% de humidade relativa (HR) e 90% de HR, à temperatura de 23°C) para avaliar a influência deste aspeto nas características das argamassas. Para a maior parte das características analisadas, as condições de cura revelaram-se como tendo mais influência que a utilização (ou não) das pozolanas e do tipo e dosagem da pozolana. No entanto, a substituição parcial de percentagens de cal por determinadas pozolanas, tais como o metacaulino, demonstrou ser benéfica a nível ambiental e também potenciar algumas das características das argamassas, e muito particularmente a resistência à ação agressiva de sulfatos [7]. Comparativamente a outros estudos que utilizaram procedimentos de ensaio semelhantes [11] mas uma cal hidráulica NHL5 produzida pelo mesmo fabricante mas classificada de acordo com a norma antiga, a cal hidráulica natural NHL5 utilizada no estudo preliminar referido, e classificada de acordo com a nova norma, pareceu indiciar um comportamento claramente melhorado relativamente à que antes era comercializada com a mesma designação.
Esta linha de investigação tem vindo a prosseguir com a análise comparativa de argamassas de cais hidráulicas naturais NHL3.5 e NHL5, face a argamassas de cais aéreas. Também a influência das condições de cura das argamassas e da percentagem de substituição de cal por um metacaulino comercial foram avaliadas. É esta nova etapa do estudo (que continua em curso) que se pretende aqui apresentar e discutir.

2. MATERIAIS

Na produção dos provetes de argamassa utilizaram-se como ligantes uma cal aérea hidratada em pó CL90-S LUSICAL H100 (que se passa a designar por CL) e duas cais hidráulicas naturais SECIL – EN 459-1 NHL3.5 e NHL5 (que se passam a designar por NHL3.5 e NHL5), de acordo com o fabricante classificadas já segundo a nova versão da norma NP EN 459-1:2011. Utilizou-se como pozolana artificial um metacaulino comercial Argical M 1200 S da IMERYS (que se passa a designar por Mk). Como agregado utilizou-se uma mistura bem graduada de três areias siliciosas lavadas. Apresenta-se na Tabela 1 a caracterização dos materiais, em que a baridade foi determinada com base na NP EN 1097-3:2002 [12], a constituição do metacaulino foi obtida de trabalhos inseridos no projeto METACAL e os restantes valores obtidos da norma das cais de construção; na Figura 1 apresenta-se a curva granulométrica da mistura de areias utilizadas, determinada de acordo com a NP EN 933-1:2000 [13].

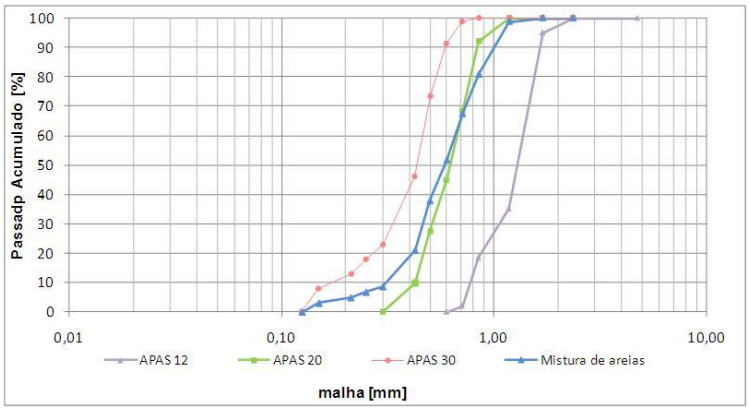

Figura 1 – Curva granulométrica da areia

Tabela 1 – Caracterização dos constituintes das argamassas

Materiais	Baridade [g/cm^3]	SO_3 [%]	$Ca(OH)_2$ [%]	SiO_3 [%]	Al_2O_3 [%]
CL	0,36	≤ 2	≥ 80		
NHL3.5	0,85	≤ 2	≥ 25		
NHL5	0,82	≤ 2	≥ 15		
Mk	0,29			54	39
Areia	1,46				

3. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS E CURAS

Relativamente a cada tipo de cal apresentam-se neste artigo argamassas sem e com duas percentagens de substituição de cal por metacaulino. Estabeleceram-se essas percentagens em função do teor em hidróxido de cálcio que cada tipo de cal possuía. Assim, para as argamassas de cal aérea utilizaram substituições de 30% e de 50% da massa da cal; para as de NHL3.5, de 10% e 20%, e para as de NHL5, de 5% e 10%.

Para a execução das argamassas, os constituintes secos foram homogeneizados manualmente e a quantidade de água foi adicionada durante os primeiros segundos de amassadura em misturadora mecânica. Esta quantidade de água foi determinada experimentalmente, de modo a obterem-se argamassas que se considerassem trabalháveis. O período de tempo de amassadura mecânica foi definido e mais alargado que o preconizado na EN 1015-2:1998/A1:2006 [14], totalizando três minutos. Procedeu-se à realização de provetes prismáticos em moldes metálicos de 40 x 40 x 160 (mm), sendo a compactação das argamassas nos moldes sempre mecânica, realizada através de 20 pancadas em cada uma das duas camadas com que os moldes foram preenchidos.

Após moldagem, todos os provetes permaneceram dois dias dentro dos respetivos moldes, dentro de saco de polietileno fechado, ao fim dos quais foram desmoldados, permanecendo outros 5 dias ainda dentro do saco de polietileno, após o que foram colocados nas curas respetivas. Após uma semana de idade, os provetes de cada argamassa foram colocados em três condições de cura distintas: em laboratório à temperatura de 20 ± 3^{0}C em duas condições de cura distintas em termos de humidade relativa (HR), denominadas como curas segundo a norma S (standard - 65 ± 5 % de HR) [15] e húmida H (90 ± 5% de HR), e ainda em condições de cura em exposição natural na Estação de Exposição do LNEC situada no Cabo Raso, Cascais (onde recebiam aspersão natural de água do mar). Permaneceram nessas condições de cura até à véspera da data de ensaio, aos 28 dias de idade; na véspera da data de ensaio todos os provetes foram colocados a 65% de HR. Apenas as argamassas puras de cal aérea não puderam ser desmoldadas diretamente depois de terem estado dentro de saco de polietileno, tendo ficado mais dois dias fora do saco a 65% HR para serem desmoldadas.

As argamassas produzidas encontram-se especificadas na Tabela 2, com a respetiva designação - onde é mencionado o tipo de cal e a percentagem de substituição mássica de cal por metacaulino -, os traços volumétrico e ponderal, a relação água/ligante (considerando o conjunto de cal e metacaulino) e a consistência por espalhamento média das diversas amassaduras das argamassas frescas produzidas.

Tabela 2 – Designação, tipo de pozolana, traços, relação água/ligante e consistência por espalhamento das argamassas

Argamassa	Traço volumét. [L+Mk:Areia]	Traço ponderal [L+Mk:Areia]	Rel. A/(L+Mk) [-]	Consist. [mm]
CL	1:3	1:12	2,5	158
CL_30Mk	1:3	1:12	2,5	154
CL_50Mk	1:3	1:12	2,6	154
NHL3.5	1:3	1:5	1,1	153
NHL3.5_10Mk	1:3	1:5	1,1	149
NHL3.5_20Mk	1:3	1:5	1,1	143
NHL5	1:3	1:5	1,1	161
NHL5_5Mk	1:3	1:5	1,1	156
NHL5_10Mk	1:3	1:5	1,1	149

Como se verifica na tabela, considerando como ligante o conjunto da cal com o metacaulino, os traços ponderais (correspondentes ao traço volumétrico de 1:3 para as argamassas de todas as cais) são da ordem de 1:12 nas argamassas de cal aérea e de 1:5 nas argamassas de cais hidráulicas naturais.
Considerando como ligante o conjunto da cal e da pozolana, verifica-se que, para consistências por espalhamento numa gama considerada comparável, a relação água/ligante foi mantida sem grande variação dentro de cada tipo de cal (aérea ou hidráulicas naturais) mas que é substancialmente maior nas argamassas com cal aérea comparativamente às argamassas com cais hidráulicas naturais.

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Todas as argamassas foram produzidas com pequena variação de constituintes, incluindo de água, alterando apenas o tipo de cal e a percentagem mássica de metacaulino por substituição de igual massa da cal. Em todos os casos obtiveram-se argamassas com trabalhabilidade considerada adequada para aplicação em obra.
A influência da água na argamassa fresca foi aferida através do ensaio de consistência por espalhamento. A consistência por espalhamento das argamassas frescas, realizada de acordo com a EN 1015-3: 1999/A1:2004/A2:2006 [16], pode ser observada na Tabela 2. Obteve-se um valor médio de 153 ± 8 mm.
Neste artigo apresentam-se as resistências à tração por flexão e à compressão, a porosidade aberta, a absorção por capilaridade e a secagem.
A resistência à tração por flexão (Rt) foi determinada de acordo com a EN 1015-11:1999 [15]; a determinação da resistência à compressão (Rc) seguiu a mesma norma e foi realizada sobre uma metade de cada provete ensaiado à tração.
A porosidade aberta (Pa) foi realizada com uma parte íntegra de cada provete ensaiado mecanicamente, através do método da pesagem hidrostática após imersão em vácuo, com base na norma NP EN 1936:2008 [17]. Os provetes foram envoltos num pedaço de uma meia de nylon, para evitar a perda de material dos provetes no manuseamento ao longo do ensaio, e a massa seca e húmida dessa peça de nylon foi tida em consideração nas pesagens.
A absorção de água por capilaridade foi determinada em meios provetes que se encontravam com massa constante (variação de massa inferior a 0,1% num intervalo de 24 horas), após secagem em estufa a 60°C. O ensaio efetuou-se com base nas normas EN 15801:2009 [18] e EN 1015-18:2002 [19], tendo as faces laterais dos provetes sido impermeabilizadas e a base protegida com uma gaze para evitar perda de massa no manuseamento dos provetes. O ensaio realizou-se numa caixa plástica fechada onde tinha sido previamente estabelecido ambiente saturado em humidade relativa, por evaporação a partir de uma massa de água existente por baixo do tabuleiro onde se colocavam os provetes. Realizaram-se pesagens com intervalos de poucos minutos no início da imersão da base dos provetes em 5 mm de altura de água, e a cada 24 horas, até se atingir a saturação dos provetes (variação de massa inferior a 1% em 24 horas). Considerando-se que, em termos médios, o volume dos meios provetes era muito semelhante, o valor máximo de água absorvida por capilaridade por unidade de área é traduzido pelo valor assintótico (VA); o declive do troço inicial do gráfico define o coeficiente de capilaridade (CC), que traduz a velocidade com que ocorre a absorção capilar.
A secagem dos provetes foi iniciada imediatamente após o ensaio de capilaridade, com os provetes saturados e sem a gaze inferior, com base em especificação de ensaio da RILEM [20]. Decorreu em ambiente de 65 ± 5% de HR e temperatura de 23 ± 3°C. Os provetes foram pesados periodicamente até à estabilização da sua massa e determinaram-se as curvas de evaporação, que traduzem a variação no tempo do teor em água.
O índice de secagem determinou-se a partir das curvas de evaporação, utilizando, como método simplificado de integração numérica, a regra do trapézio [21].
Para a caracterização das argamassas endurecidas tomou-se sempre o valor médio de um mínimo de três provetes. Apresentam-se os resultados obtidos na caracterização de todas as argamassas às resistências mecânicas e em termos de valor assintótico de absorção capilar mas não se apresentam os resultados de todas as argamassas quanto à porosidade aberta, ao coeficiente de capilaridade e ao índice de secagem devido a nesses ensaios terem-se utilizado procedimentos distintos com algumas argamassas ou por os ensaios se encontrarem ainda em curso aquando da redação deste artigo. Os resultados são apresentados na Tabela 3. À designação das argamassas apresentada na tabela 2 acresce agora a letra que identifica o tipo de cura (H – húmida, M – em exposição natural junto ao mar, S – de acordo com a norma).

Tabela 3 – Resistências à tração por flexão (Rt) e à compressão (Rc), porosidade aberta (Pab), coeficiente de capilaridade (CC), valor assintótico da absorção capilar (VA) e índice de secagem (IS) das argamassas em cada cura

Argamassa e cura	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Pab [%]	CC [kg/m2.min0,5]	VA [kg/m2]	IS [-]
CL_H	0,08	0,13	29		15,9	0,36*
CL_30Mk_H	0,59	1,16	33		23,3	0,29*
CL_50Mk_H	1,09	2,82	33		24,9	0,29*
CL_M	0,28	0,41	18	3,08	18,1	0,26
CL_30Mk_M	0,06	0,40	27	5,35	25,9	0,40
CL_50Mk_M	0,19	0,89	26	3,90	27,0	0,35
CL_S	0,36	0,59	16	2,79	17,0	0,31
CL_30Mk_S	0,05	0,40	23	4,49	25,4	0,39
CL_50Mk_S	0,12	0,75	26	4,22	26,1	0,37
NHL3.5_H	0,87	1,51	29	3,01	23,0	0,25
NHL3.5_10Mk_H	0,75	3,75	28	2,08	23,4	0,36
NHL3.5_20Mk_H	1,39	7,10	28	1,80	24,0	0,47
NHL3.5_M	0,50	1,19	28	3,61	22,8	0,24
NHL3.5_10Mk_M	0,88	3,16	28	2,30	24,8	0,31
NHL3.5_20Mk_M	1,14	6,54	28	1,90	23,5	0,41
NHL3.5_S	0,52	1,01	28	3,69	22,4	0,22
NHL3.5_10Mk_S	0,84	4,07	28	2,62	22,6	0,28
NHL3.5_20Mk_S	1,11	6,93	27	2,04	23,6	0,38
NHL5_H	0,52	0,92	28		20,6	0,38*
NHL5_5Mk_H	0,53	1,91	28		21,2	0,40*
NHL5_10Mk_H	0,79	2,92	29		21,6	0,41*
NHL5_M	0,36	0,73		5,84	22,1	
NHL5_5Mk_M	0,28	1,31		4,48	22,0	
NHL5_10Mk_M	0,42	1,61		3,15	23,1	
NHL5_S	0,20	0,42		6,58	23,9	
NHL5_5Mk_S	0,20	0,71		5,68	22,7	
NHL5_10Mk_S	0,36	1,79		3,66	23,3	

*Determinado por procedimento de ensaio distinto

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

El-Turki et al. [22] analisaram a evolução das reações de pastas de cal hidráulica e verificaram ser distintas em condições de cura de 65% e de 97% de HR. Consideraram que as diferentes características são devidas à reação de hidratação ser rápida comparativamente à carbonatação e ser maioritariamente condicionada pela temperatura e pela humidade relativa. No estudo apresentado, para além das argamassas terem sido sujeitas a duas condições de laboratório distintas em termos de HR, foram ainda sujeitas a cura numa situação em exposição natural em ambiente muito perto do mar, durante o Inverno. Dai serem expetáveis diferenças de comportamento das mesmas argamassas mas sujeitas a condições de cura distintas.

Em termos de resistências mecânicas, interessa que estas sejam suficientemente elevadas para aplicação no refechamento de juntas ou em rebocos mas não demasiado para não provocarem o desenvolvimento de tensões que ponham em causa todo o conjunto das alvenarias antigas. Veiga et al. [10] definem uma gama de valores, obtidos aos 90 dias, para argamassas para reboco de edifícios antigos: resistência à tração e à compressão respetivamente entre 0,2 e 0,7 MPa e 0,4 e 2,5 MPa para argamassas para reboco e entre 0,4 e 0,8 MPa e 0,6 e 3,0 MPa para argamassas para refechamento de juntas. A norma que especifica as argamassas para rebocos [23] define que, aos 28 dias, as argamassas para reabilitação de rebocos (não especificando serem para alvenarias antigas), pertencentes à classe de resistência CSII, devem apresentar valores de resistência à compressão entre 1,5 e 5,0 MPa.

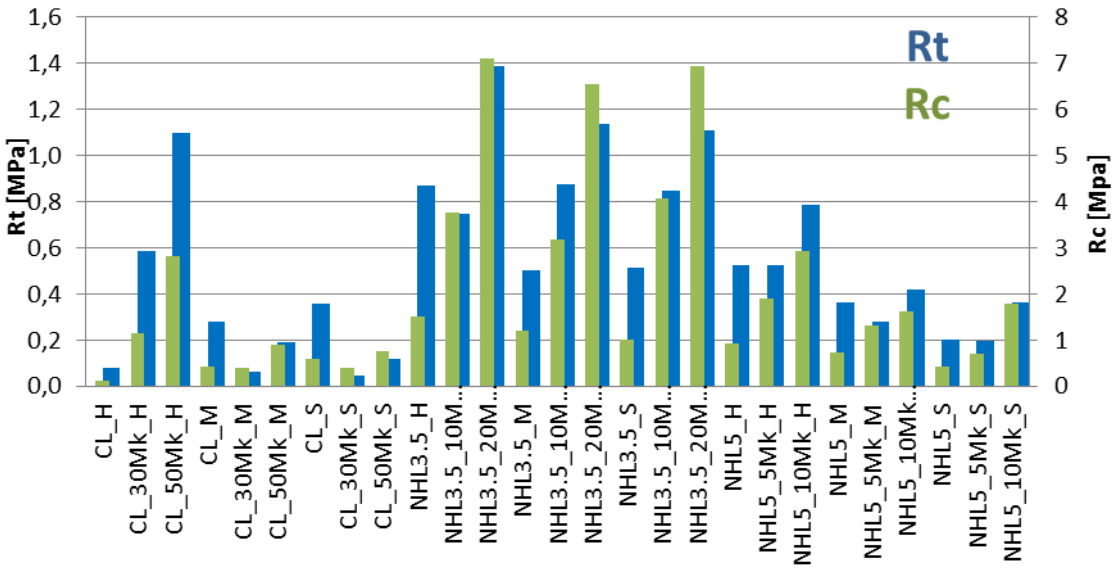

Figura 2 – Resistências à tração por flexão e à compressão das argamassas

Quanto à resistência à tração por flexão das argamassas, verifica-se que os valores mais elevados são obtidos pelas argamassas de NHL3.5 em todas as curas. Entre as argamassas só com esta cal, os valores mais elevados são obtidos com a cura H, sendo valores mais baixos (mas semelhantes entre si) obtidos com as curas S e M; com substituições de cal por metacaulino, obtiveram-se nestas argamassas valores de resistência à tração superiores em todas as curas e geralmente crescentes com a percentagem de substituição. Entre as argamassas só de NHL5 obtiveram-se valores mais elevados com a cura H e mais baixos com a cura S; as substituições de cal por metacaulino conduziram ao aumento da resistência à tração em todas as curas. Entre as argamassas só de cal aérea verifica-se que os valores da resistência á tração são melhores para a cura S e piores para a cura H; nas argamassas com esta cal, as substituições por metacaulino só demonstraram ser vantajosas com a cura H, uma vez que, aos 28 dias, nas outras curas, a resistência à compressão diminuiu com essas substituições.

Também quanto à resistência à compressão se constata serem as argamassas com NHL3.5 as que conduzem a valores mais elevados em todas as curas e entre todas as cais. Estes valores podem até ser demasiado elevados em todas as curas quando se substitui cal por 20% de metacaulino e nomeadamente se para aplicação em edifícios antigos. As argamassas só de cal NHL3.5 apresentam valores melhores quando com cura H mas não muito distinto entre curas; com substituições por metacaulino as resistências à compressão aumentam em todas as curas e de forma crescente com a percentagem de substituição. As argamassas de NHL5 registam valores de resistência à compressão mais elevados que as de cal aérea mas menores que as de NHL3.5; as argamassas só de NHL5 apresentam valores mais elevados quando com cura H e mais baixos com cura S; com substituições por metacaulino regista-se um aumento da resistência à compressão em todas as curas e crescente com a percentagem. As argamassas só de cal aérea registam os menores valores de resistência à compressão, tal como seria de esperar e particularmente aos 28 dias de idade, com melhores valores com cura S e piores com cura H; a substituição da cal por percentagem elevada de metacaulino (50%) revela-se bastante vantajosa com cura H e pouco melhor nas outras curas.

Os valores de porosidade aberta obtidos até à data revelam um aparente aumento da porosidade com a introdução de metacaulino em argamassas de cal aérea e uma constância de valores entre todas as argamassas de cais hidráulicas ensaiadas. Considerou-se necessário efetuar um estudo mais aprofundado relativo à microestrutura interna das diferentes argamassas, através de porosimetria de mercúrio, o qual está em curso.

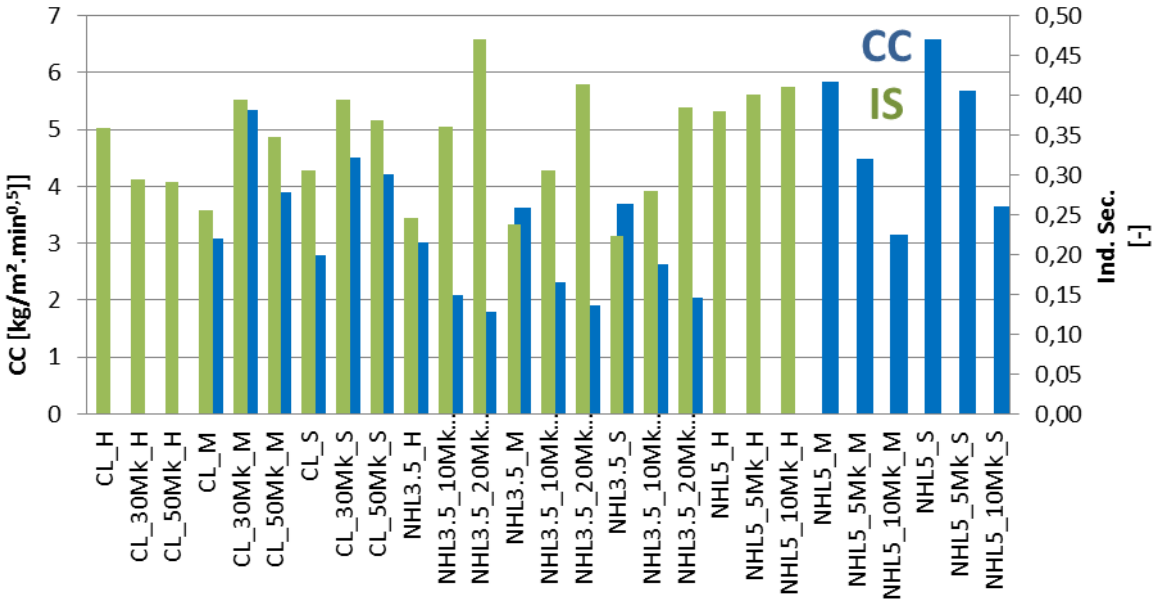

Figura 3 – Coeficiente de capilaridade e índice de secagem das argamassa

Relativamente à absorção de água por capilaridade verifica-se que, em termos de valor assintótico, ou seja, da quantidade de água absorvida, as argamassas só de cal aérea apresentam uma tendência para absorverem menos quantidade total de água, independentemente da cura; naquelas em que parte da cal aérea foi substituída por metacaulino, atingem-se valores de absorção de água mais elevados, da orem dos obtidos por argamassas de NHL3.5 e NHL5. Todas estas argamassas de cais hidráulicas naturais absorvem por capilaridade valores muito semelhantes entre si. Quanto ao coeficiente de capilaridade, que traduz a velocidade com que a água é absorvida, os valores mais baixos são apresentados pelas argamassas com NHL3.5 e os mais elevados pelas com NHL5, registando as de cal aérea valores intermédios. Tanto nas argamassas com NHL3.5 como nas com NHL5 o coeficiente de capilaridade melhora com a percentagem crescente de metacaulino em todas as curas, sendo ligeiramente melhor na cura H. Entre as argamassas de NHL5, em que se regista o pior comportamento em termos de coeficiente de capilaridade, também se denota uma melhoria com a substituição crescente de metacaulino nas curas M e S (a H foi analisada aos 28 dias através de procedimento ligeiramente distinto pelo que os valores não são comparáveis, embora a tendência se mantenha). Entre as argamassas com cal aérea a substituição por metacaulino piora o coeficiente de capilaridade mas os valores com 50% de substituição aparentam sistematicamente, nas curas M e S (a cura H foi analisada através de procedimento de ensaio ligeiramente distinto aos 28 dias e por isso não diretamente comparável), ser melhores que os registados com substituição de 30%.

No que se refere à facilidade de secagem, traduzida através dos menores valores do índice de secagem, verifica-se que com as argamassas de cal aérea com cura M e S (na cura H utilizou-se procedimento de ensaio distinto) obtêm-se valores da mesma ordem de grandeza mas a secagem tem tendência a ser mais dificultada com a introdução de 30% de metacaulino. Entre as argamassas de NHL3.5, constata-se que a substituição crescente por metacaulino dificulta a secagem em todas as curas, e que entre estas há pouca diferenciação, embora com ligeira vantagem para a cura S. As argamassas com NHL5 encontram-se atualmente em fase de ensaio; entre estas, as de cura H parecem indiciar mais dificuldade na secagem que as das restantes cais (mas foram ensaiadas de acordo com procedimento de ensaio ligeiramente diferente e talvez por isso pouco comparável).

6. CONCLUSÕES

Nas argamassas com base em cal e especialmente nas de cal aérea é ingrato efetuar a avaliação das propriedades aos 28 dias pois é expectável que estas venham a alterar-se com a idade da cura, o que será avaliado noutras publicações.

Do exposto verifica-se que, aos 28 dias de idade das argamassas:

- os três tipos de cais conduzem a argamassas com características distintas e que, como era expectável, as argamassas com cais hidráulicas naturais atingem valores de resistências mecânicas mais elevados;
- entre todas as argamassas, as com NHL3.5 atingem valores mais baixos (e melhores) do coeficiente de capilaridade e semelhantes em termos de valor assintótico;
- entre as cais hidráulicas naturais analisadas, e contrariamente ao que era expectável, as argamassas com NHL3.5 atingem resistências mecânicas mais elevadas;
- as condições de cura de argamassas de cal hidráulica natural NHL5 e de cal aérea condicionam mais os resultados obtidos comparativamente aos registados por argamassas com NHL3.5 e que essa diferenciação é mais sensível nas resistências mecânicas que nas físicas;
- a substituição parcial de massa de cal por metacaulino aumenta as resistências mecânicas das argamassas de todas as cais e em todas as curas, exceto das de cal aérea em cura S, o que demonstra que a humidade é essencial para que a reação pozolânica ocorra neste tipo de argamassas; essa substituição pode até conduzir a valores demasiado elevados de resistências mecânicas (para argamassas a serem aplicadas na reabilitação de rebocos) nas argamassas de NHL3.5;
- a substituição de cal por metacaulino em argamassas de cal aérea permite que estas endureçam mais depressa e mesmo em ambientes com elevado nível de HR e fraco contacto com o dióxido de carbono do ambiente, o que alarga o seu campo de aplicação;
- a substituição de cal por metacaulino melhora o coeficiente de capilaridade das argamassas de cais hidráulicas naturais e piora o das argamassas de cal aérea, independentemente da cura e, exceto no caso das argamassas de cal aérea, não altera o valor assintótico;
- os resultados obtidos até à data permitem avaliar que as argamassas com NHL3.5 registam valores comparáveis com os das argamassas de cal aérea e perfeitamente aceitáveis em termos de condições para facilitarem a secagem, embora a substituição por metacaulino piore ligeiramente as condições de secagem destas argamassas em todas as curas.

Para além da especificação do tipo e dosagem de argamassa deverá ser especificada para obra a necessidade de proteger as argamassas frescas com, por exemplo, feltros geotêxtis, mantidos húmidos para garantir condições de elevada HR. Outra alternativa poderá ser a aspersão regular e periódica com água [24]. Recomendam-se estes cuidados durante um mínimo de duas semanas. A ausência de manutenção de HR elevada pode conduzir à não obtenção do desempenho pretendido, principalmente em termos de resistências mecânicas.

Considera-se que esta pequena parte do estudo contribui para um maior conhecimento das argamassas com base em cal e nomeadamente das argamassas formuladas com as novas NHL3.5 e NHL5. Os resultados apresentados ressaltam as mais elevadas resistências mecânicas das argamassas com NHL3.5 e o seu melhor comportamento face à ação da água, na forma líquida e de vapor, e a otimização que, com qualquer das cais analisadas, pode ser conseguida pela utilização de metacaulino.

Em função dos resultados obtidos, está atualmente a aprofundar-se o estudo, com vista a analisar a evolução das características ao longo da idade das argamassas e a procurar justificação para as diferenças obtidas, através de análise mais detalhada da microestrutura interna e da identificação dos produtos formados. Esta última parte está a ser desenvolvida no LNEC, coordenada pelo Doutor Santos Silva. Está também a alargar-se a caracterização à determinação da resistência à ação de sais, com vista à avaliação da durabilidade das argamassas, à avaliação da influência do suporte e à otimização das percentagens de substituição de cada cal por metacaulino.

7. AGRADECIMENTOS

Agradece-se a disponibilização de materiais para a execução das argamassas por parte da Lusical, da Secil e da Imerys e o financiamento à investigação e possibilidade de discussão e complementaridade de resultados com outros Colegas, proporcionado pelos projetos FCT/MEC METACAL (PTDC/ECM/100431/2008) e LIMECONTECH (PTDC/ECM/100234/2008).

8. REFERÊNCIAS

[1] IPQ, Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. NP EN 459-1: 2011.

[2] Ball R., El-Turki A., Allen G., Influence of carbonation on the load dependent deformation of hydraulic lime mortars. Materials Science and Engineering A 528 (2011) 3193-3199.

[3] Lanas J., Pérez-Bernal J., Bello, M., Alvarez-Galindo J., Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. Cement and Concrete Research 34 (2004), 2191-2201.
[4] Mertens G., Madau P., Durinck D., Blonpain B., Elsen J., Quantitative mineralogical analysis of hydraulic limes by X-ray diffraction. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1524-1530.
[5] IPQ, Pozolanas para betão, argamassas e Caldas. Definições, requisitos e verificação da conformidade. NP 4220: 2010.
[6] Charola E., Faria-Rodrigues P., McGhie, A., Henriques F., Pozzolanic components in lime mortars: correlating behaviour, composition and microstructure. Int. J. Restoration of Buildings and Monuments.11 (2) (2005) 111-118.
[7] Faria P., Silva V., Flores-Colen I., Argamassas de cal hidráulica natural e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial. In 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Universidade de Coimbra, Portugal, 29-30 Março 2012 (CD-rom).
[8] Faria P., Branco T., Carneiro J., Veiga R., Santos Silva A., Argamassas com base em cal para a reabilitação de rebocos. In PATORREB 2012 – 4º Congreso de Patologia y Reahabilitación de Edifícios. Collegio Oficial de Arquitectos de Galicia, Santiago de Compostela Portugal, 12-14 Abril 2012 (CD-rom).
[9] Sequeira C., Santos A., Frade D., Gonçalves P., Análise de diferentes ligantes na formulação de argamassas industriais de reabilitação. In 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Universidade de Coimbra, Portugal, 29-30 Março 2012 (CD-rom).
[10] Veiga R., Fragata A., Velosa A., Magalhães A., Margalha G., Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. Int. J. Architectural Heritage 4 (2) (2010) 177-195.
[11] Faria-Rodrigues P., Henriques, F., Rato V., Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado. In 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC. Lisboa, LNEC, 22-23 Novembro 2007 (CD-rom).
[12] IPQ, Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Determinação da baridade e volume de vazios. NP EN 1097-3:2002.
[13] IPQ, Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. NP EN 933-1:2000.
[14] CEN, Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. EN 1015-2: 1998/A1: 2006.
[15] CEN, Methods of test for mortars for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. EN 1015-11: 1999/A1: 2006.
[16] CEN, Methods of test for mortars for masonry. Part 3: Determination of consistency of fresh mortars. EN 1015-3: 1999/A1:2004/A2:2006.
[17] IPQ, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. NP EN 1936: 2008.
[18] CEN, Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity. EN 15801: 2009.
[19] CEN, Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. EN 1015-18: 2002.
[20] RILEM TC 25-PEM, Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the efectiveness of treatment methods. Test nº II.5 – Evaporation curve. Materials & Structures 13 (1980), 204-207.
[21] Brito V., Gonçalves T., Faria P., Coatings applied on damp substrates: performance and influence on moisture transport. J. Coating Technology and Research, Vol.8, Issue 4 (2011), 513-525.
[22] El-Turki A., Ball R., Allen G., The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime. Cement and Concrete Research 37 (2007) 1233-1240.
[23] CEN. Specification for mortar for masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar. EN 998-1: 2010.
[24] El-Turki A., Ball R., Holmes S., Allen W., Allen G., Environmental cycling and laboratorial testing to evaluate the significance of moisture control for lime mortars. Construction and Building Materials 24 (2010) 1392-1397.