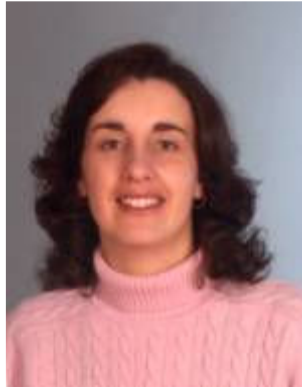


Cal Hidráulica – Um ligante para a reabilitação



Ana Cristina Sequeira
Secil Martingança, SA
Portugal
cristina@secilmartinganca.pt



Dina Frade
Secil Martingança, SA
Portugal
dinafrade@secilmartinganca.pt



Paulo Gonçalves
Secil Martingança, SA
Portugal
paulogoncalves@secilmartinganca.pt

Resumo: Apresenta-se um estudo sobre a caracterização do ligante cal hidráulica natural e suas aplicações, em particular na área da reabilitação, onde os aspectos estético e funcional deverão ter uma relação harmoniosa. Descrição das várias etapas do processo produtivo. Enquadramento da cal hidráulica na Norma Europeia EN459.

Utilização da cal hidráulica natural, como ligante principal, na formulação de um argamassa de refechamento de juntas, pelas suas características, nomeadamente a afinidade cromática com este tipo de suportes. Os agregados foram criteriosamente seleccionados e construída uma curva granulométrica otimizada tendo em vista a trabalhabilidade, aplicação e durabilidade da argamassa.

O estudo contempla ensaios químicos e físicos demonstrando a compatibilidade da argamassa com os diversos tipos de elementos pétreos constituintes dos suportes desta natureza e é ilustrado com aplicações práticas em obra.

Palavras-chave: Ligante, cal hidráulica, juntas, trabalhabilidade, durabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As heranças que nos têm ficado dos nossos antepassados, desde o que nos é possível reconstituir pelos hábitos, técnicas, e materiais utilizados ao longo de milénios, demonstram a evolução do conhecimento e domínio dos processos construtivos pelo Homem.

Hoje somos nós os actores. Protagonizamos a cena construtiva desenvolvendo novas técnicas, novos materiais, adequando-os aos nossos hábitos, fazendo crescer exponencialmente o património edificado. Quanto mais vasto ele é, maior a responsabilidade e a necessidade de mantê-lo vivo.

Estas trivialidades dão fundamento à vontade de reabilitar o que outrora foi criado e, para tal, é imperativo compatibilizar os materiais e funcionalidades de hoje com o conceito original do objecto.

Sabe-se que a cal aérea é o ligante histórico por excelência nas formulações clássicas das argamassas utilizadas ao longo do tempo, e, que a hidráulicidade necessária era obtida genericamente pela introdução de elementos de reacção *pozzulânica*.

A cal hidráulica é o ligante que combina numa única substância a presa hidráulica e a presa aérea, desenvolvendo características que conferem às argamassas modernas propriedades particulares, adequadas para a utilização na tarefa complexa de reabilitar.

2. NOÇÕES GERAIS

2.1 Definição de Cal

Cal, material abrangendo quaisquer formas físicas e químicas sob as quais pode aparecer o óxido de cálcio (CaO) e/ou o óxido de magnésio (MgO) e/ou os hidróxidos (Ca (OH)₂ e Mg (OH)₂)[1]. As cais de construção são cais utilizadas na construção de edifícios e em Engenharia Civil. Inclui todos os tipos apresentados na Tabela 1 [1].

Tabela 1 – Tipos de cais de construção ^a

Designação	Notação
Cal cálcica 90	CL 90
Cal cálcica 80	CL 80
Cal cálcica 70	CL 70
Cal dolomítica 85	DL 85
Cal dolomítica 80	DL 80
Cal hidráulica 2	HL 2
Cal hidráulica 3,5	HL 3,5
Cal hidráulica 5	HL 5
Cal hidráulica natural 2	NHL 2
Cal hidráulica natural 3,5	NHL 3,5
Cal hidráulica natural 5	NHL 5

^a Em complemento, as cais aéreas são classificadas de acordo com as suas condições de fornecimento, em cal viva (Q) ou cal hidratada (S). No caso particular de cais dolomíticas hidratadas, o grau de hidratação é identificado por S1:semi-hidratada ou por S2:totalmente hidratada

Os campos de aplicação dos vários tipos de cais podem esquematizar-se da forma que se apresenta no diagrama da Figura 1.

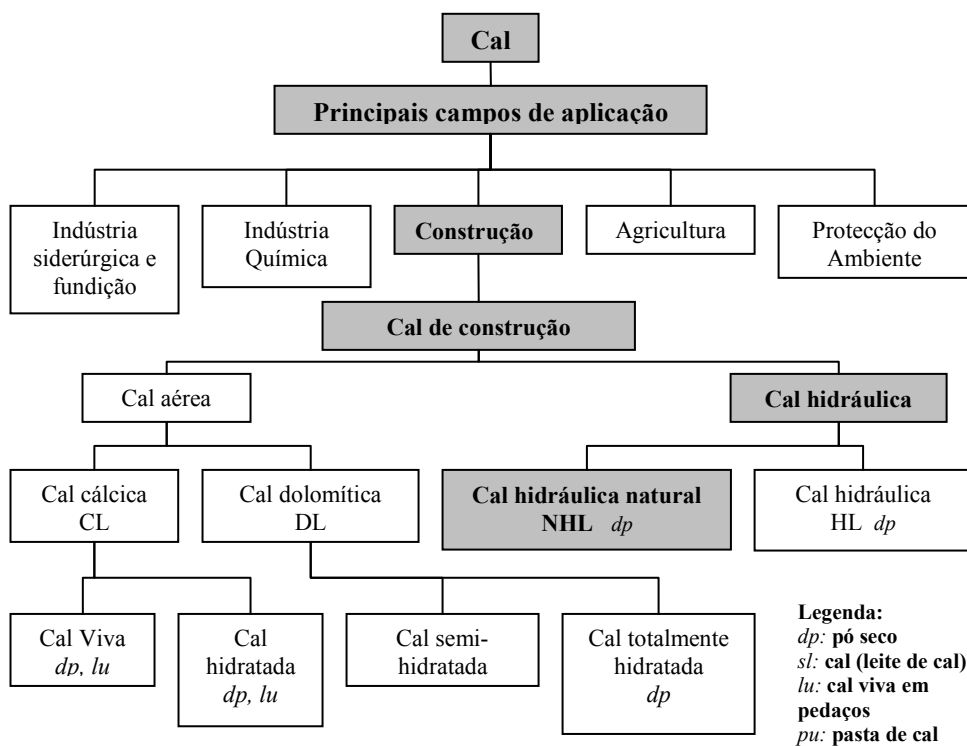


Figura 1 – Diagrama esquemático de tipos de cais e campos de aplicação

2.2 Cal Hidráulica Natural

A estrutura da cal hidráulica natural é diferente da estrutura das cais aéreas, uma vez que é obtida de rochas constituídas por uma mistura de argila e calcário (marga) e não apenas de calcário. Quando se sujeita a marga a temperaturas da ordem dos 900-1200°C, formam-se três compostos principais: a cal (CaO), a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃). Na tabela 2 apresenta-se a classificação do calcário em função do teor de CaCO₃ (% massa) [1].

Tabela 2 – Classificação de calcários

Tipo de Calcário	% CaCO ₃
Calcário Rico	96 a 100
Calcário Margoso	90 a 96
Marga Calcária	75 a 90
Marga	40 a 75
Marga Argilosa	10 a 40
Argila Margosa	4 a 10
Argila	0 a 4

Existem ainda as NHLZ, que são produtos especiais que podem conter materiais *pozzulânicos* ou hidráulicos apropriados, adicionados até 20% em massa. Os teores de carbonato de cálcio, argilas e sílica presentes na matéria-prima, são determinantes para a definição das características da cal obtida [1].

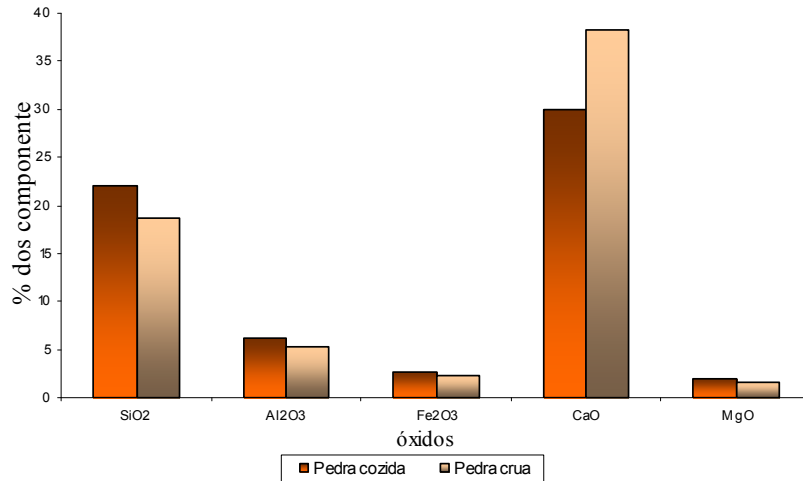
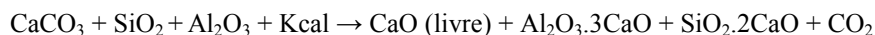


Figura 2 – Análise química da matéria-prima

A cal hidráulica natural é obtida de marga – ver tabela 2. Entre os 400°C e 600°C a argila decompõe-se. Combina-se com o óxido de cálcio, entre 850°C a 1100°C, dando origem aos silicatos bicálcicos (1) e aos aluminatos tricálcicos (2). Considera-se que a sílica e a alumina se ligam ao CaO através de forças inter moleculares formando o silicato bicálcico (SiO₂.2CaO) e o aluminato tricálcico (Al₂O₃.3CaO) através das seguintes reacções químicas:



Através da calcinação do carbonato de cálcio (calcário CaCO₃) a partir de 850°C obtém-se o dióxido de carbono (CO₂) e o óxido de cálcio (CaO). A cozedura de substâncias calcárias e argilosas, em proporções definidas, até à ustulação, (sem que haja formação de fase líquida) origina uma estrutura compacta designada pedra cozida (à saída dos fornos).



O CaO, isoladamente, não serve como material de construção, uma vez que é um composto instável que está ávido de água, com a qual reage dando-se uma grande libertação de energia acompanhada de uma grande aumento de volume.

À pedra cozida é adicionado o gesso cru (CaSO₄.2H₂O). A mistura é, consecutivamente, homogeneizada e transformada num pó fino de cor cinzento-amarelado [2].

A presa da cal hidráulica natural acontece em duas fases. Inicialmente, é predominantemente hidráulica, e, a longo prazo produz efeitos a presa aérea, ocorrendo da superfície para o interior.

- A fase hidráulica é obtida pela hidratação dos aluminatos tricálcicos e silicatos bicálcicos após a amassadura.
- A fase aérea ocorre por reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono atmosférico.

Em suma, a cal hidráulica natural é produzida pela selecção de uma marga que, quando aquecida a uma temperatura de 900 – 1200 °C, produz um ligante com porosidade equilibrada, com hidratação inicial seguida de carbonatação lenta, sendo estes os pré-requisitos para uma argamassa de reabilitação compatível. A figura 3 apresenta a microestrutura de poros abertos da cal hidráulica natural obtida por difracção de raios X numa amostra de cal hidráulica (*) [3].

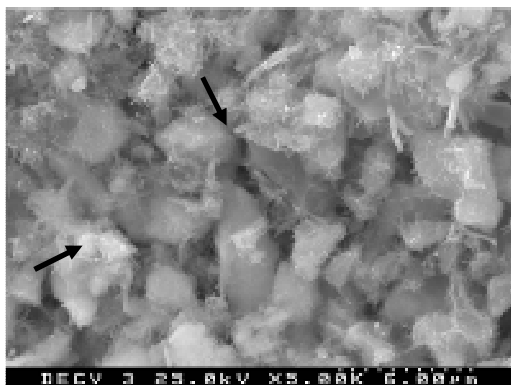


Figura 3 – Microestrutura da cal hidráulica natural

Na figura 4 apresentam-se as resistências mecânicas da cal hidráulica natural.

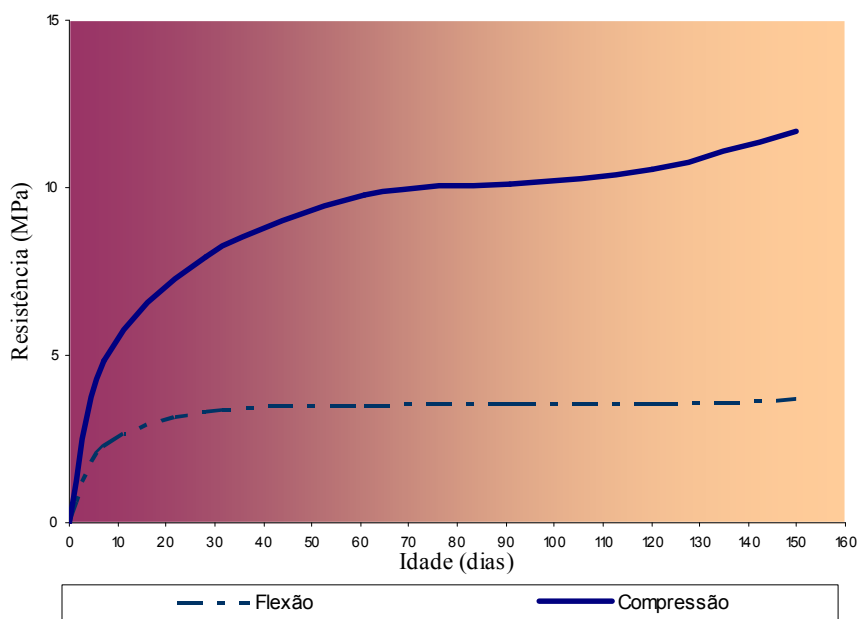


Figura 4 – Resistências mecânicas da cal hidráulica natural

(*) A cal hidráulica utilizada neste estudo foi a Cal Hidráulica *MARTINGANÇA*®, NHL5

2.3 Requisitos Normativos para NHL5 [1]

Tabela 4 – Requisitos da norma referentes às propriedades da cal hidráulica [1]

Requisitos		Valores
Requisitos químicos	Cal livre (%)	≥ 3
	Sulfatos (%)	≤ 7
Requisitos resistências mecânicas	Compressão 7 dias (MPa)	≥ 2
	Compressão 28 dias (MPa)	≥ 5
Requisitos físicos	Finura	$90\mu\text{m}$
	% Resíduo em massa	$200\mu\text{m}$
	Água livre (%)	≤ 2
	Expansibilidade (mm)	≤ 20
	Penetração (mm)	$10 < \text{Pentr.} < 50$
	Teor em ar (%)	≤ 20
	Tempo de presa (h)	Início > 1 Fim ≤ 15

3. CAL HIDRÁULICA

3.1 Processo de Fabrico

A Cal Hidráulica Natural, obtêm-se por cozedura de marga, seguida de moagem e adição de sulfato de cálcio para regularização da presa [4].

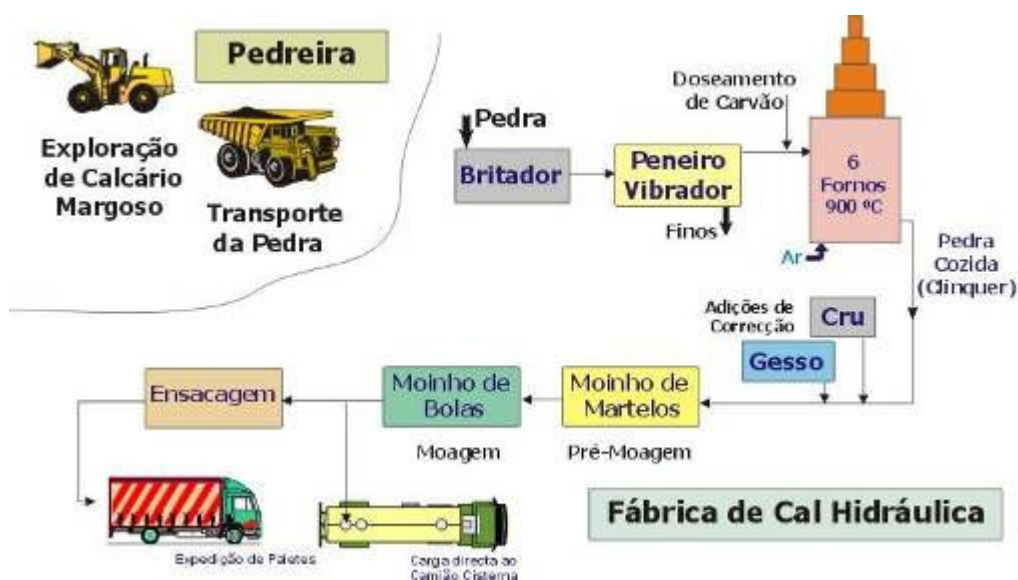


Figura 5 – Diagrama de produção industrial da cal hidráulica natural



Figura 6 – Pedreira

Figura 7 - Forno

Figura 8 – Moinho

Figura 9 - NHL

3.2 Características da Cal Hidráulica

A cal hidráulica comercial utilizada no presente estudo é, segundo a norma EN 459-1, uma NHL5 – Natural Hydraulic Lime, e apresenta a seguinte caracterização:

Tabela 5 – Características da cal hidráulica

Requisitos		Valores
Requisitos químicos	Cal livre (%)	3,7
	Sulfatos (%)	2,7
Requisitos resistências mecânicas	Compressão 7 dias (MPa)	5,2
	Compressão 28 dias (MPa)	8,1
Requisitos físicos	Finura	90µm
	% Resíduo em massa	200µm
	Água livre (%)	0,7
	Expansibilidade (mm)	0,8
	Penetração (mm)	28
	Teor em ar (%)	3,3
	Tempo de presa (h)	Início Fim

Nas figuras 10 e 11 podem verificar-se os diferenciais de resistência mecânica à compressão e à flexão respectivamente, para a cal hidráulica natural, um ligante puramente hidráulico e um ligante puramente aéreo [5].

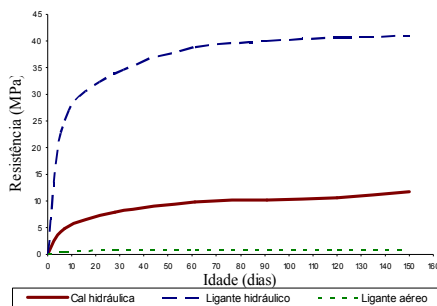


Figura 10 – Compressão

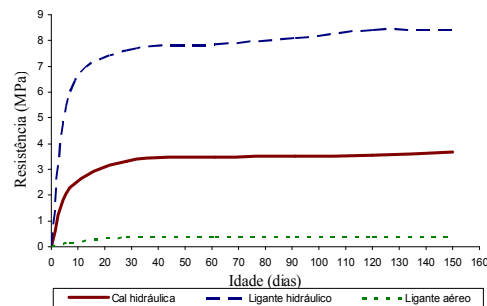


Figura 11 – Flexão

As resistências à flexão e à compressão da cal hidráulica natural apresentam então, valores intermédios entre um ligante puramente hidráulico e um aéreo. O mesmo acontece na ductilidade.

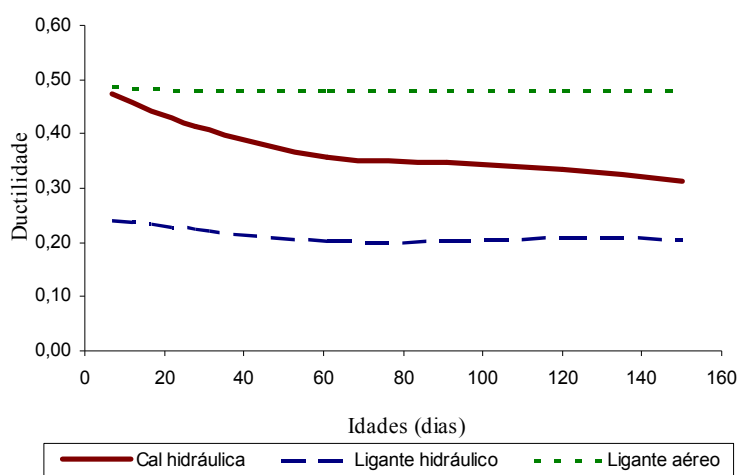


Figura 12 – Ductilidade

Apesar do ligante aéreo ter uma ductilidade mais elevada (o que é mais favorável), a cal hidráulica apresenta um bom compromisso entre ductilidade e resistência, prevendo-se melhor resistência ao uso, para argamassas de cal hidráulica natural, do que argamassas que contenham exclusivamente ligante aéreo ou hidráulico. Sendo este factor mais importante no caso da reabilitação.

3.3 Aplicações da cal hidráulica

A cal hidráulica natural possui uma vasta gama de aplicações, nomeadamente nas argamassas tradicionais para rebocos como ligante hidráulico, argamassas para elevação de alvenarias, enchimentos e acabamentos. É também matéria-prima na fabricação de argamassas secas pré-doseadas industriais.

As vantagens que a cal hidráulica apresenta como ligante de argamassas são:

- maior untuosidade e plasticidade
- redução da fissuração (devido à sua adesividade, e baixa retracção)
- maior tempo de trabalho para o operador (maior intervalo de tempo entre o início e o fim de presa).



Figura 13 – Alvenaria, betonilha e reboco

Na indústria da pré-fabricação de artefactos de cimento como ligante complementar, pode ser utilizada na formulação de amassaduras para obter blocos para alvenaria, lancis, patelas, e outros artefactos.

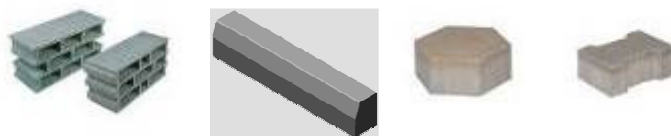


Figura 14 – Artefactos pré-fabricados

A cal hidráulica é também usada como *filler* nos pavimentos betuminosos, melhorando a resistência à penetração das águas, a consistência e a resistência à fissuração.



Figura 15 – Betuminosos

Mais recentemente como estabilizador de solos. A cal hidráulica natural permite a estabilização em certos solos argilosos e húmidos, através da diminuição da humidade. Diminui o índice de plasticidade e melhora a compactação, permitindo um aumento do índice CBR (*California Bearing Ratio – índice compacidade de suporte*).



Figura 16 – Tratamento de solos

Em argamassas para operações de reabilitação a cal hidráulica natural é o ligante que, possuindo presa hidráulica possibilita a obtenção de propriedades mecânicas mais adequadas. A presa aérea confere as características físico-químicas que compatibilizam estas argamassas com os suportes antigos.



Figura 17 – Reabilitação

4. ARGAMASSA DE JUNTAS DE ALVENARIAS ANTIGAS

Conhecido o ligante de eleição no presente estudo, seleccionou-se a cal hidráulica como ligante principal na formulação de uma argamassa para uma aplicação específica de reabilitação – refechamento de juntas de alvenarias antigas, uma operação não estrutural. Foram estudadas duas formulações – argamassa A e argamassa B – com diferentes níveis de adição de ligante sintético (redispersível) com o objectivo de melhorar a ductilidade e resistência aos sais. A fórmula B possui uma percentagem superior de ligante sintético.

4.1 Caracterização

Tendo em vista a utilização prevista da argamassa construiu-se uma curva granulométrica de agregados adequada e otimizada.

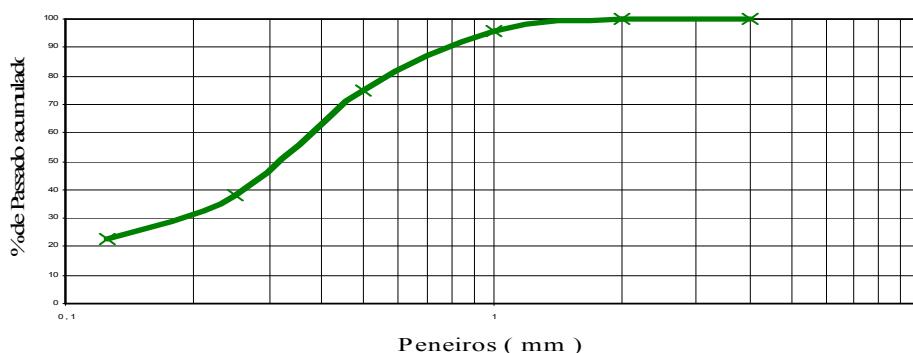


Figura 18 – Curva granulométrica – EN 1015-1

Tabela 6 – Características do produto em pasta

Ensaio	Norma de Ensaio	A	B
H ₂ O Amassadura (%)	-	16,0	17,0
Espalhamento (mm)	EN 1015-3	151	158
Massa Volúmica (kg/m ³)	EN 1015-6	1850	1800
Ar contido (%)	EN 1015-7	17,0	17,5

Tabela 7 – Características do produto endurecido

Ensaio	Norma de Ensaio	A	B
Res. Flexão 7 dias (MPa)	EN 1015-11	0,6	0,4
Res. Comp. 7 dias (MPa)	EN1015-11	0,5	0,5
Ductilidade 7 dias	-	1,1	0,8
Res. Flexão 28 dias (MPa)	EN 1015-11	0,7	1,2
Res. Comp. 28 dias (MPa)	EN 1015-11	1,2	1,9
Ductilidade 28 dias	-	0,6	0,6

Ensaio	Norma de Ensaio	A	B
Capilaridade (kg/(m ² .min. ^{0.5}))	EN 1015-18	0,27	0,18
Massa Volúmica (kg/m ³)	EN 1015-10	1635	1620

Os provetes de argamassas A e B foram depositados sobre recipientes contendo soluções salinas de cloreto de sódio (12 g/l), sulfato de sódio (24 g/l) e nitrato de cálcio (60 g/l). As concentrações utilizadas foram as recomendadas pela WTA, para resistências aos sais de argamassas de reabilitação [6].

Vinte e oito dias após a confecção dos provetes, curados segundo a norma EN 1015-11, foram colocados na estufa a 100° C durante 24 h, obtendo-se a secagem completa, sendo então determinada a sua massa inicial. Seguidamente os provetes foram imersos nas várias soluções salinas, pela base menor, até à altura de 10 mm, durante 24 h. Os ciclos de imersão e secagem foram repetidos 10 vezes. Entre os ciclos foram determinadas as perdas em massa após secagem e, após os ciclos foram determinadas as resistências mecânicas [7].

A seguir apresentam-se tabelas de resultados e gráficos comparativos de resistências mecânicas.

Tabela 8 – Resistências à compressão após ciclos

Compressão Argamassa A (MPa)				
Dias	A (inicial)	A (nitratos)	A (sulfatos)	A (cloretos)
7	0,5	0,5	0,5	0,5
28	1,2	1,2	1,2	1,2
60	1,1	0,6	0,7	0,7
Compressão Argamassa B (MPa)				
Dias	B (inicial)	B (nitratos)	B (sulfatos)	B (cloretos)
7	0,5	0,5	0,5	0,5
28	1,9	1,9	1,9	1,9
60	2	1,4	1,3	1,4

Tabela 9 – Resistências à flexão após ciclos

Flexão Argamassa A (MPa)				
Dias	A (inicial)	A (nitratos)	A (sulfatos)	A (cloretos)
7	0,6	0,6	0,6	0,6
28	0,7	0,7	0,7	0,7
60	0,6	0,5	0,5	0,4
Flexão Argamassa B (MPa)				
Dias	B (inicial)	B (nitratos)	B (sulfatos)	B (cloretos)
7	0,4	0,4	0,4	0,4
28	1,2	1,2	1,2	1,2
60	1,3	0,8	0,9	0,9

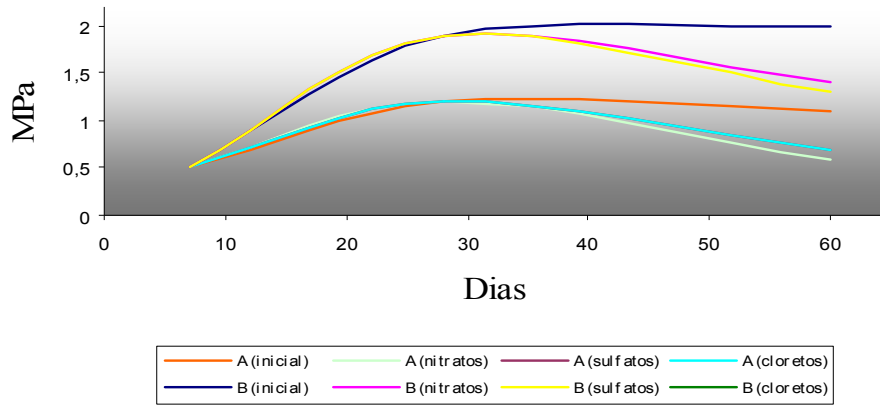


Figura 19 – Resistência à compressão após ciclos

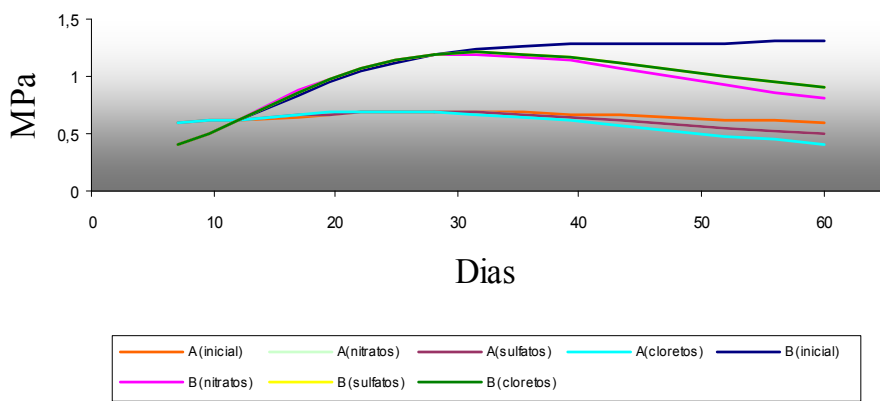


Figura 20 – Resistência à flexão após ciclo

De notar que em ambos os gráficos há curvas sobrepostas, como se constata pelos valores apresentados nas tabelas 8 e 9.



Figura 21 – Aspecto dos provetes

4.3 Aplicações

A argamassa de juntas de alvenarias antigas encontra-se já aplicada com sucesso, em várias obras. Tratando-se de uma argamassa seca pré-doseada de produção industrial, o método de preparação é simples, havendo apenas que adicionar a quantidade necessária de água para a amassadura. Utiliza-se um equipamento próprio com doseamento automático de água possibilitando a obtenção de amassaduras de consistência constante.



Figura 22 – Preparação da argamassa

Após a necessária preparação do suporte, no sentido de remover matérias desagregadas que compõe as juntas existentes, sem afectar o equilíbrio e interacção mecânica com os elementos da alvenaria, procede-se ao seu preenchimento com recurso a ferramentas próprias. A figura 23 ilustram o aspecto final da aplicação.



Figura 23 – Aspecto da argamassa aplicada

5. CONCLUSÕES

Verifica-se que as argamassas A e B apresentam ductilidade superior a qualquer das argamassas anteriormente mencionadas (argamassas de areia normalizada, segundo EN 196-1 e ligantes puramente aéreo, puramente hidráulico e de cal hidráulica natural).

Por outro lado, tanto na argamassa A como na B, a diminuição das resistências mecânicas após ataque dos sais mostram-se aceitáveis, acrescendo o facto de as perdas de massa terem sido pouco significativas, na ordem de 0,13% em média, com valor máximo de 0,25%.

Desta forma verifica-se a adequabilidade das argamassas à operação prevista.

Remete-se para posteriores estudos a quantificação da necessária incorporação de ligante sintético naquelas formulações.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Norma Europeia EN 459-1
- [2] Alvarez, J. A.; *Cal Hidráulica: seu passado e futuro*, in Workshop in Lime Mortars: Past and Future. Aveiro.
- [3] Ribeiro, T. *Caracterização da Cal Hidráulica Estudo de Argamassas*. Aveiro.
- [4] Manual da Qualidade, Secil Martingança. Maceira – Lis.
- [5] Rodrigues, P. F. *Estudo Comparativo de Diferentes Argamassas Tradicionais de Cal Aérea e Areia*. Lisboa.
- [6] <http://www.wta.de/en.20-07-2007>
- [7] Nappi, S. C. B.; Matos, K. *A Ação dos Sais em Argamassas*. Florianópolis.