

Conteúdo

- Cal no Património com valor cultural
- Importância dos processos de preparação da cal
- Processos de preparação da cal
- Composição da cal
- Características das argamassas de cal
- Considerações finais

Cal no Património

- A cal tem uma grande importância no Património construído europeu (e não só)
- Pelas suas características físicas (**permeabilidade, deformabilidade, higroscopicidade, absorção do som**) e químicas (**redução do CO₂, poder biocida**) e imagem (**textura, reflexão da luz, etc.**) tem uma marca forte no ambiente.



Cal no Património



Cal no Património

CAL AÉREA – Ligante aéreo

A cal aérea pode ser de origem cálcica ou dolomítica.

Obtida por calcinação, a temperaturas da ordem de **800 a 1000 °C**, de rochas carbonatadas, constituídas predominantemente por carbonato de cálcio (**calcário**) ou por carbonato de cálcio e magnésio (**calcário dolomítico**)

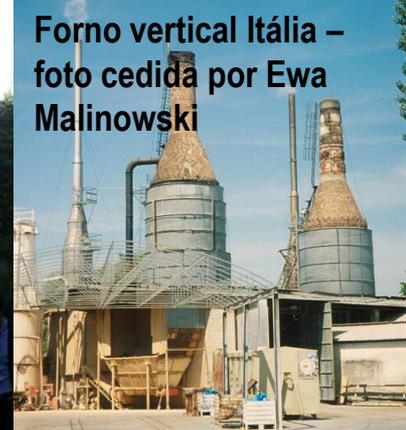
Cal viva: $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Hidratação: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{calor}$

Endurecimento: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (entre 50% HR e 85% HR)

Processos de preparação da Cal

- A produção da cal depende das tecnologias disponíveis: inicialmente simples fogueiras; **fornos intermitentes**; fornos contínuos; fornos industriais verticais; fornos industriais rotativos.
- **Temperatura e uniformidade** dependentes do combustível e das características do forno.
- Mas também **seleção da pedra**, dimensões, tempo.
- O carbonato de cálcio decompõe-se em CaO e CO₂ a cerca de 900°C por isso a eficiência da calcinação dá-se a essa temperatura (**900 – 1000 °C**).
- $\text{CaCO}_3 + \text{calor (900}^\circ\text{C)} \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Temperaturas mais elevadas podem produzir recozimento e reatividade reduzida; temperaturas baixas produzem grânulos crus, ou seja que se mantêm como carbonato de cálcio (inertes).



Processos de preparação da cal

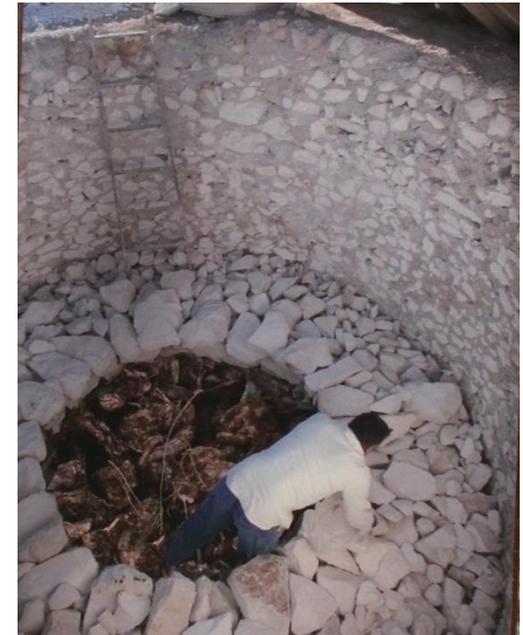
- Em 1997 ainda havia 6 ou 7 fornos tradicionais em laboração no Alentejo e Algarve. Eram fornos intermitentes (pouco rentáveis).
- Em 2007 já só se encontraram 2 (Montes Claros) que entretanto deixaram de laborar.
- Combustível: madeira e mato (verde, para ser mais lento) – ramos de **eucalipto, oliveira, sobro, azinho**.
- Pedra: resíduos da indústria de extração da pedra, no Alentejo era muito usado o **mármore** (por ex. em Trigaches).



Processos de preparação da Cal

Antigamente:

- A maioria dos fornos que se encontram em Portugal, em particular no Alentejo e Algarve, eram **foros intermitentes** alimentados com o combustível lenha: ramos e mato. A madeira escolhida assegurava (pela experiência) temperaturas adequadas de cozedura.
- O **tempo era doseado pelos caleiros**, que sabiam ver quando a pedra estava cozida pela experiência: **cor do fumo** que saía pela abertura superior; **cor da pedra**.
- **Sabiam também partir a pedra e colocá-la** de acordo com o tempo de cozedura e temperatura de que cada tipo e tamanho de pedra necessitava.



Processos de preparação da Cal

Antigamente:

- Tudo dependia dos **artesãos caleiros**:
- do seu **conhecimento** empírico
- da sua **experiência**
- da sua **arte** e do seu **engenho**
- do seu **saber**
- do seu **empenho**
- **O fator humana era muito importante.**



Processos de preparação da cal

- O processo de fabrico da cal teve grandes avanços no final do século XIX e início do século XX mas os **fornos industriais eficientes**, com estruturas metálicas, zonas distintas de **pré-aquecimento**, **calcinação** e **arrefecimento**, começaram a surgir na década de 50 do século passado (Boynton).
- Os fornos tradicionais começaram a ser abandonados em Portugal a partir daí (1960?) mas só no **início do século XXI** foram extintas as últimas produções artesanais (de que se tem conhecimento).



Processos de preparação da cal

Hoje:

- Pedra selecionada e controlada por **análises químicas**
- **Moída a dimensões pré-definidas** para uniformizar as necessidades de calor/temperatura/tempo de cozedura
- **Temperatura controlada** durante todo o processo
- Tempo de exposição **uniforme**
- Controlo do produto final de novo por **análises químicas e físicas.**

Processos de preparação da cal

Hoje:

- Tudo depende:
- do equipamento
- do processo estabelecido
- do rigor dos controlos
- **o fator humano fica a montante (definição de todo o sistema).**
- **Os fatores económicos são predominantes.**

Processos de preparação da cal

E a embalagem, armazenagem e transporte?

Antes:

- **Sob a forma de pedra: cal viva**
- Devia ser preparada e aplicada pouco tempo depois porque ia hidratando à superfície; mas fragmentos relativamente grandes tinham uma % pequena de hidratação e mantinham a reatividade
- **Sob a forma de pasta: cal em pasta**
- Mantinha-se durante muito tempo sem carbonatar, ou carbonatava só à superfície
-

Agora:

- Predominantemente vendida **hidratada e em pó, muito fina** (da ordem de 1-10 microm.)
- Facilmente carbonata. Com isso deixa de ser reativa.
- CL 90: CaO > 90% originalmente, mas se 20% carbonatar passamos a ter valores da ordem de 70%.

Processos de preparação da cal

- Cal em pedra
- Cal viva micronizada
- Cal viva apagada com areia (**hot mix**)
- Cal hidratada em pó
- Cal (hidratada) **em pasta**



Processos de preparação da cal

Produção de cal hidratada:

- A partir de **cal viva**, sob a forma de pedra ou em pó (micronizada)
- **Cal hidratada em pó** (apagada com a quantidade de água necessária)
- **Cal em pasta** (apagada com água em quantidade superior à necessária)
- **Cal viva extinta com areia** (hot lime mix) (misturada com areia húmida em obra e deixada durante algum tempo)



Processos de preparação da cal

Cal extinta com areia húmida (hot lime mix)



Temperaturas elevadas favorecem a reação com os agregados e um aumento da resistência. Mas é um processo com muitos riscos. Talvez adequado para alvenarias.

Processos de preparação da cal

Cal em pasta



5 anos

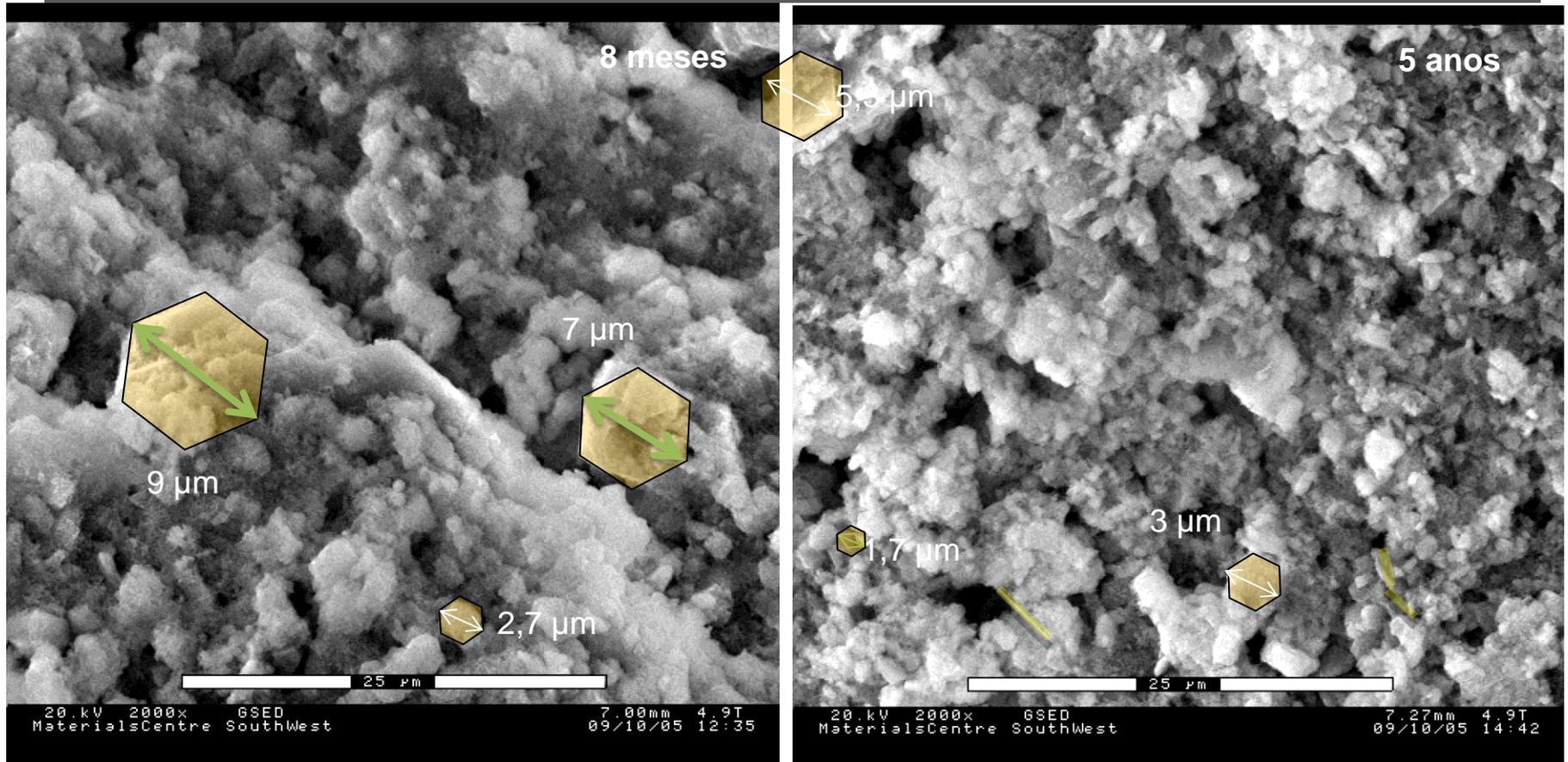
1 mês



	<i>Tempo de apagamento</i>				
	<i>48 horas</i>	<i>1 mês</i>	<i>1 ano</i>	<i>3 anos</i>	<i>5 anos</i>
Água livre (% massa)	64	64	58	48	51

De Margalha et al,
12 DBMC, Abril 2011

Processos de preparação da cal



ESEM

Cal em pasta

Tem a vantagem de não carbonatar e ganhar qualidade com o tempo

Figura extraída de Margalha et al, 12 DBMC, Abril 2011



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Processos de preparação da cal

Cal hidratada em pó



Fabrico industrial, com controlo de qualidade, fácil de utilizar e de dosear

Composição da cal

- As cals produzidas industrialmente são diferentes das produzidas nos fornos tradicionais?

Composição química da Cal (Cal hidratada em pó) ⁽¹⁾

Análise química	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	PR
Cal Industrial de Alcanede (I)	71,9	-	0,2	0,03	0,1	0,2	27,6
Cal preta Montes Claros (MCp)	45,9	25,5	1,2	1,6	0,01	0,01	25,9
Cal branca Montes Claros (MCb)	71,4	-	0,3	0,05	0,1	0,2	27,9

⁽¹⁾ Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha 2009 (ver bibliografia no final)

Composição da cal

- As cals produzidas industrialmente são diferentes das produzidas nos fornos tradicionais?

Composição mineralógica da Cal (Cal hidratada em pó) ⁽¹⁾

Composição mineralógica		Ca(OH) ₂	Mg(OH) ₂	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂	Outros
Cal Industrial de Alcanede (I)	Extinta pelo fornecedor	74,0	-	23,0	-	3,0
Cal preta Montes Claros (MCp)	Extinta pelo fornecedor	42,8	17,6	22,8	vest	17,0
	Extinta em obra (preta)	51,0	17,6	9,0	-	1,00 (quartzo)
Cal branca Montes Claros (MCb)	Extinta em obra (branca)	70,0	-	25,0	-	4,0

(1) Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha 2009, ver bibliografia no final

Argamassas de cal

- Características das argamassas de cal **hidratada em pó 1:3** (1)

Cal	M Volum	Flexão 90 d	Flexão 360 d	Comp 90 d	Comp 360 d	Mód Elast 90 d	Mód Elast 360 d	Coef Cap 90 d	Coef Cap 360 d
MCp_G	1824	0,39	0,46	0,85	1,02	4070	-	0,77	
MCb_G	1803	0,33	0,39	0,63	1,11	3319	-	1,49	
I_G	1895	0,43	0,47	0,90	0,83	4403	-	1,08	
I_SM	2207	0,52	1,17	1,33	2,31	3886	3903	0,77	0,79
MCp_SM		0,43	0,48	1,16	1,19	-	-	2,51	2,14
MCb_SM		0,28	0,25	0,69	1,00	-	-	1,00	1,81
I_S		0,37	0,40	1,30	0,97	3176	3209	1,20	1,00

MCp – Montes Claros preta; MCb – Montes Claros branca; I – Industrial
G – Areia do Guadiana; SM – Areia de Santa Margarida; S – Areia de Sesimbra

(1) Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha 2009, ver bibliografia no final

Argamassas de cal

- Características das argamassas de cal **viva, pasta e pó** ⁽¹⁾

Composição	Traço Volumétrico	Características Mecânicas (aos 90 dias)			Comp. à água (aos 90 dias)
		Rt (MPa)	Rc (MPa)	E (MPa)	C (kg/m ² .min ^{1/2})
<u>Cal hidratada em pó</u>	1:3	0,52	1,33	-	0,77
<u>Cal em pasta extinção recente (1 mês)</u>	1:3	0,37	1,06	4091	1,47
<u>Cal em pasta extinção longa (5 anos)</u>	1:3	0,63	1,42	4748	1,29
<u>Cal viva em pedra com areia: 1 dia</u>	1:3	0,47	0,96	3816	1,64
<u>Cal viva em pedra com areia: 7 dias</u>	1.3	0,50	1,08	3658	1,48

Rt – Resistência à tração por flexão; **Rc** – Resistência à compressão; **E** – Módulo de elasticidade; **C** - Coeficiente de capilaridade; Areia: mistura de areias siliciosas de santa Margarida

(1) Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha 2009, ver bibliografia no final

Argamassas de cal

- Características das argamassas de cal **viva, pasta e pó** ⁽¹⁾

Composição	Traço Volumétrico	Características Mecânicas (aos 90 dias)			Comportamento à água (aos 90 dias)
		Rt (MPa)	Rc (MPa)	E (MPa)	C (kg/m ² .min ^{1/2})
<u>Cal hidratada em pó</u>	1:3	0,52	1,33	-	0,77
<u>Cal em pasta extinção recente (1 mês)</u>	1:3	0,37	1,06	4091	1,47
<u>Cal em pasta extinção longa (5 anos)</u>	1:3	0,63	1,42	4748	1,29
<u>Cal viva em pedra com areia: 1 dia</u>	1:3	0,47	0,96	3816	1,64
<u>Cal viva em pedra com areia: 7 dias</u>	1.3	0,50	1,08	3658	1,48

Os ensaios laboratoriais das argamassas de cal em pasta e de cal em pó mostraram diferenças ligeiras de comportamento; a cal em pasta tem a vantagem de não perder qualidades com o armazenamento. A cal viva apagada com areia não mostrou vantagens.

Argamassas de cal

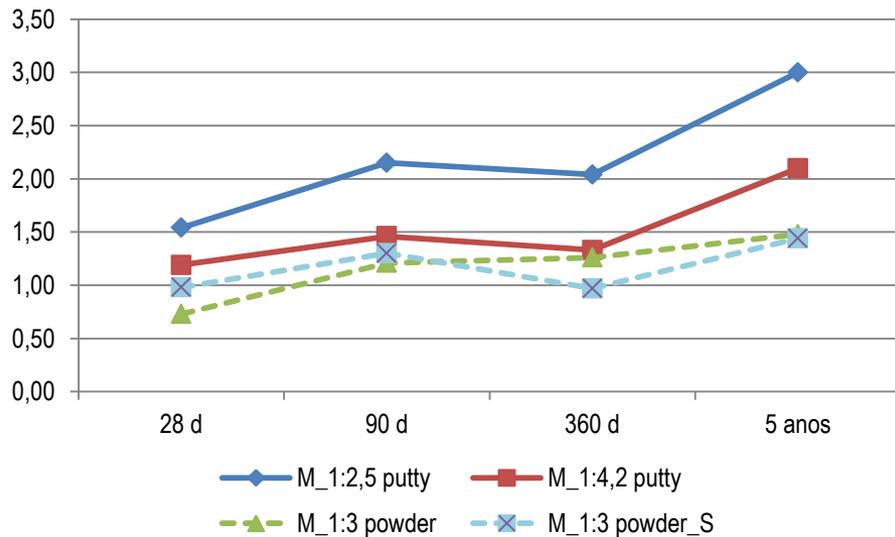
- Características das argamassas de cal **viva, pasta e pó** ⁽¹⁾

Composição	Traço Volumétrico	Características Mecânicas (aos 90 dias)		Comportamento à água (aos 90 dias)
		Rt (MPa)	Rc (MPa)	C (kg/m ² .min ^{1/2})
<u>Cal em pasta de extinção recente</u> : areia de areeiro de granulometria controlada	1:3	0,75	1,48	2,04
<u>Cal em pasta de extinção prolongada</u> : areia de areeiro de granulometria controlada	1:3	0,77	1,70	1,69
<u>Cal hidratada em pó</u> : areia de areeiro de granulometria controlada	1:3	0,78	1,65	1,66

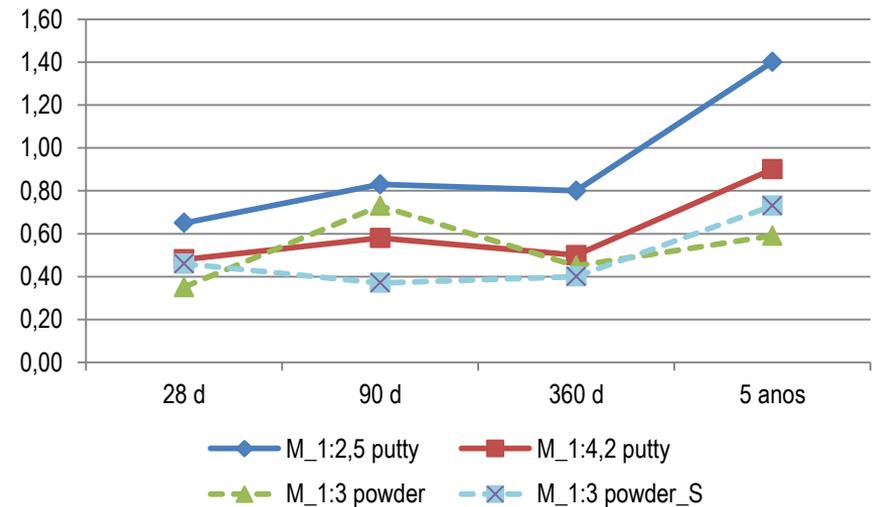
Rt – Resistência à tração por flexão; **Rc** – Resistência à compressão; **C** - Coeficiente de capilaridade
Os ensaios laboratoriais das argamassas de cal em pasta e de cal em pó mostraram diferenças ligeiras de comportamento; a cal em pasta tem a vantagem de não perder qualidades com o armazenamento. A cal viva apagada com areia não mostrou vantagens.

Argamassas de cal

- Evolução das características das argamassas de cal com o tempo (1)



Resistência à compressão (MPa)

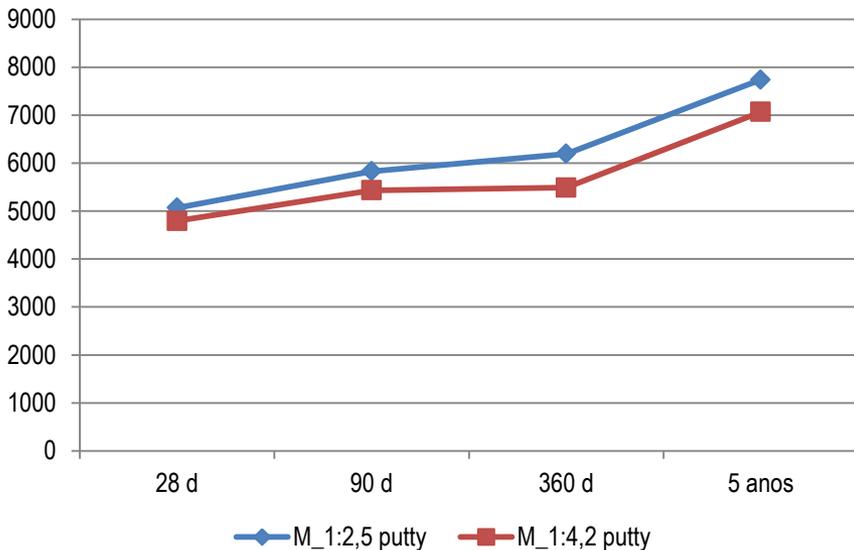


Resistência à flexão (MPa)

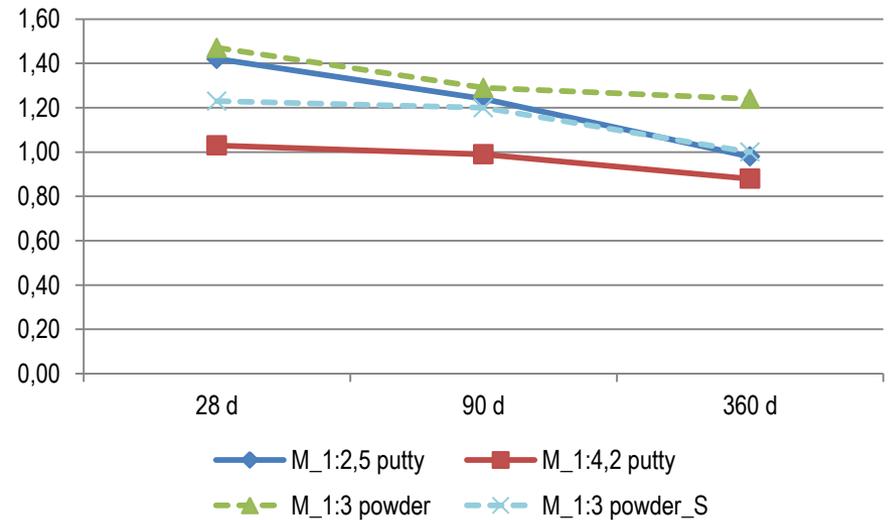
(1) Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha et al. 2013, ver bibliografia no final

Argamassas de cal

- Evolução das características das argamassas de cal com o tempo (1)



Módulo de elasticidade (MPa)



Coeficiente de capilaridade
(kg/m².min^{1/2})

(1) Resultados de ensaios realizados no LNEC – Margalha et al. 2013, ver bibliografia no final

Considerações finais

- Existem variações na cal e nas argamassas de cal conforme o método de produção – temperatura, tempo, uniformidade da cozedura – e de preparação da cal
- Essas diferenças **não são na composição mineralógica** mas sim na **microestrutura** e em consequência na **reatividade**
- Mas as maiores diferenças estarão no **fator humano: saber, esforço, engenho**
- Os processos de **preparação da cal e das argamassas de cal** geram também produtos finais distintos
- É sabido que a **aplicação** é um dos fatores mais condicionantes da qualidade e durabilidade das argamassas de cal e dos trabalhos realizados com elas
- Quando bem produzidas, armazenadas e aplicadas as argamassas de cal têm ótimo **desempenho e durabilidade** além de contribuírem para a **salubridade e sustentabilidade** da construção
- **Conhecer o passado para entender o presente e desenhar/controlar o futuro.**

Trabalhos publicados

- MARGALHA, M. G. - **Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor *tempo* na sua qualidade.** Tese de Doutoramento pelo IST, Univ de Lisboa, Out 2009.
- MARGALHA, M. Goreti; VEIGA, M. Rosário; BRITO, Jorge. – **The maturation time factor in lime putty quality.** In 7th International Brick Masonry Conference (7 IBMAC). London, October 30 to November 1, 2006.
- MARGALHA G., APPLETON J., CARVALHO F., VEIGA M. R., SANTOS SILVA A., BRITO J. – **Traditional lime kilns - Industry or archaeology?** In HMC08 – 1st Historical Mortars Conference 2008: Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Lisboa, LNEC, 24-26 de Setembro de 2008. ISBN 978-972-49-2156-3.
- MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; BRITO, J. – **Processos tradicionais de execução de uma argamassa. Cal viva extinta com a areia.** In 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de edifícios, PATORREB 2009. Porto: 18 a 20 de Março de 2009.

Trabalhos publicados

- MARGALHA, G.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, M. R.; BRITO, J. – **The influence of slaking time on lime putty**. In XII DBMC – 12 th International Conference on Durability of Building Materials and Components, 12-15 April 2011, U. Porto, Vasco Peixoto Freitas, Helena Corvacho, Michael Lacasse (edts.), ISBN 978-972-752-132-6, vol II, pp. 697-704.
- MARGALHA, G., VEIGA, R., SANTOS SILVA, A., BRITO, J. – **Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method**, Cement & Concrete Composites, 33 (concomp8) sept 2011, 796–804 pp. DOI: 10.106/j.cemconcomp.2011.05.008.
- MARGALHA, G.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; BRITO, J. DE; BALL, R.; ALLEN, G. – **Microstructural Changes of Lime Putty During Aging** , Journal of Materials in Civil Engineering, Elsevier, UK. Elsevier, UK. Volume: 25 Issue: 10 Pages: 1524-1532 DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000687 Published: OCT 1 2013.
- MARGALHA, M. G.; VEIGA, M. R.; SANTOS SILVA, A.; BRITO, J. – **A influência do teor de cal em pasta em argamassas**. Seminário Limecontech - conservação e durabilidade de revestimentos históricos - técnicas e materiais compatíveis, Lisboa, LNEC, maio de 2013.

Fim

Projeto PRESERVE – Preservação de revestimentos do Património construído com valor cultural: identificação de riscos, contributo do saber tradicional e novos materiais para conservação e proteção.

OBRIGADA PELA VOSSA ATENÇÃO

