

CAL DOLOMÍTICA EM PORTUGAL

O passado e o presente

António Santos Silva

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Departamento de Materiais

ssilva@lnec.pt

V Jornadas FICAL

Fórum Ibérico da Cal

Portugal | Lisboa | LNEC | 23 - 25 | maio | 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

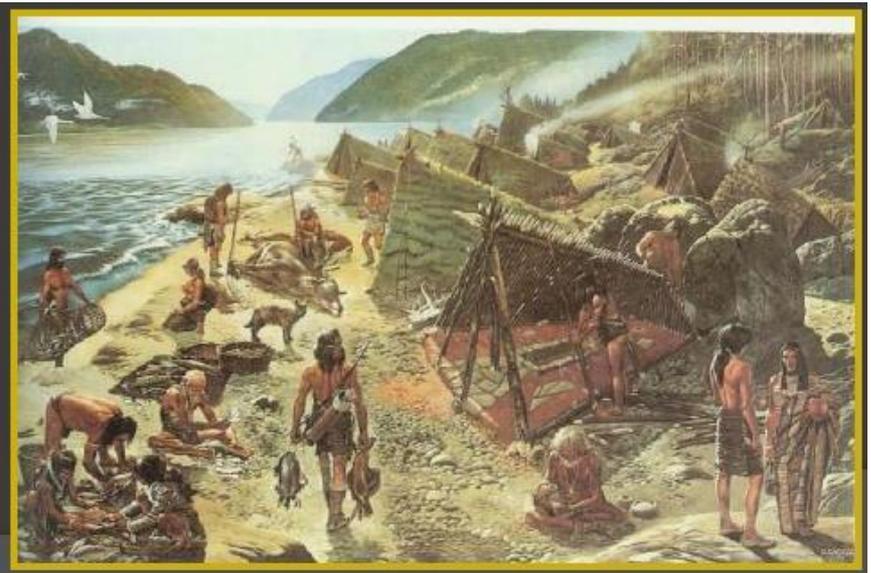
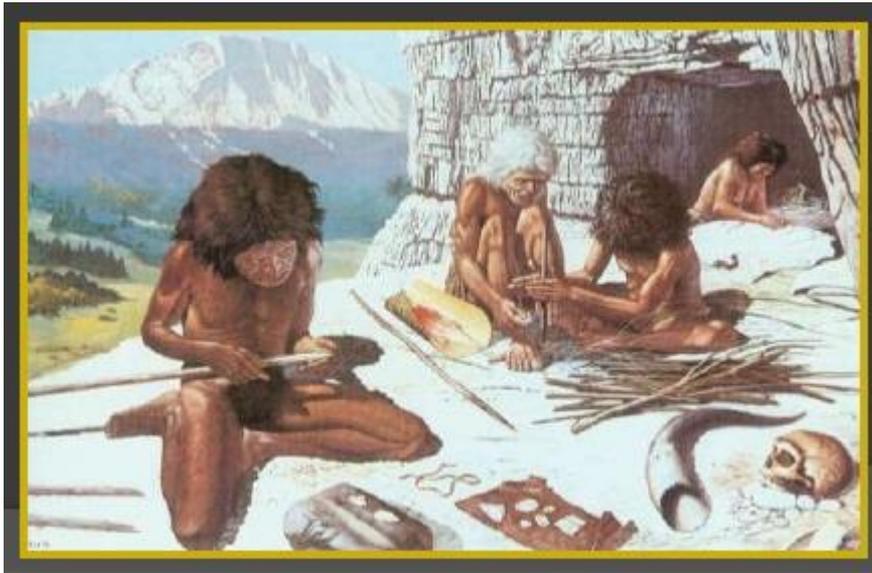


FICAL
Forum Ibérico de la Cal

❑ Cal – contexto histórico

Com a descoberta do fogo os efeitos do calor nas propriedades das argilas e dos calcários permitiriam a descoberta das características aglutinantes destes materiais em contacto com a água.

Durante séculos, as argamassas foram confeccionadas usando a cal como principal ligante e que era, em geral, produzida localmente.



❑ Cal – contexto histórico

- ❖ A caracterização de diversos materiais, através de modernas técnicas de análise, coloca a “invenção” da cal calcinada no período Epipaleolítico (12000 a.C.).
- ❖ São inúmeras as aplicações da cal ao longo do tempo, destacando-se o caso de uma máscara cuidadosamente polida, do período Neolítico (9000-8000 a.C.), encontrada na Mesopotâmia, de argamassas de cal encontradas na Grande Pirâmide de Gizé, no Egito (2500 a.C.) ou de argamassas hidráulicas, obtidas através da mistura de cal e barro batido, aplicadas em diversos reservatórios de água potável em Jerusalém, no período do rei Salomão (1000 a.C.).
- ❖ Em *Madhya Pradesh*, Índia, terão sido usadas as primeiras argamassas hidráulicas, no tempo do imperador Ashoka (século II a.C.). A *Stupa Sanchi* nesse séc. foi reconstruída com pedra e coberta por uma argamassa de cal, areia, pó de tijolo, resina natural e açúcar, com uma espessura de um pouco mais de trinta centímetros.



Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.

❑ Cal – contexto histórico

A Grécia destacou-se na construção de aquedutos, cisternas e portos, onde eram utilizadas pozolanas naturais, no fabrico de argamassas hidráulicas. Exemplo disso é a famosa cisterna de *Kamiros*, em Rodes construída em 500 a.C.



Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.

❑ Cal – contexto histórico

Na antiguidade, foram os Romanos quem melhor soube aproveitar as potencialidades das argamassas de cal, adaptando-as às suas necessidades



https://en.wikipedia.org/wiki/Pantheon,_Rome

❑ Cal – contexto histórico

Os Romanos foram também os 1ºs a desenvolver as primeiras aplicações da cal em geotecnia, com o objetivo de secar os terrenos e aplicar um ligante de fixação das lajes às plataformas, nos locais onde passavam algumas das suas estradas monumentais.



<https://www.flickr.com/photos/lisartdesign/6754576535>



<http://www.janelaitalia.com/roma-um-passeio-pela-via-appia/>

❑ Cal dolomítica – origem

O termo “dolomite” deriva de *Dolomite Mountains* nos Alpes, na região do Tirol na Áustria e Norte da Itália, onde o calcário tem um alto teor em magnésio



http://www.dolomitemountains.com/res/photo/gallery/940x400/3204_1.jpg

□ Calcários dolomíticos em Portugal Continental (?)



Fonte: Teresa Freire, *Restoration of ancient Portuguese interior plaster coatings: Characterization and development of compatible gypsum-based products*, Dissertação Doutoral, IST, 2016.

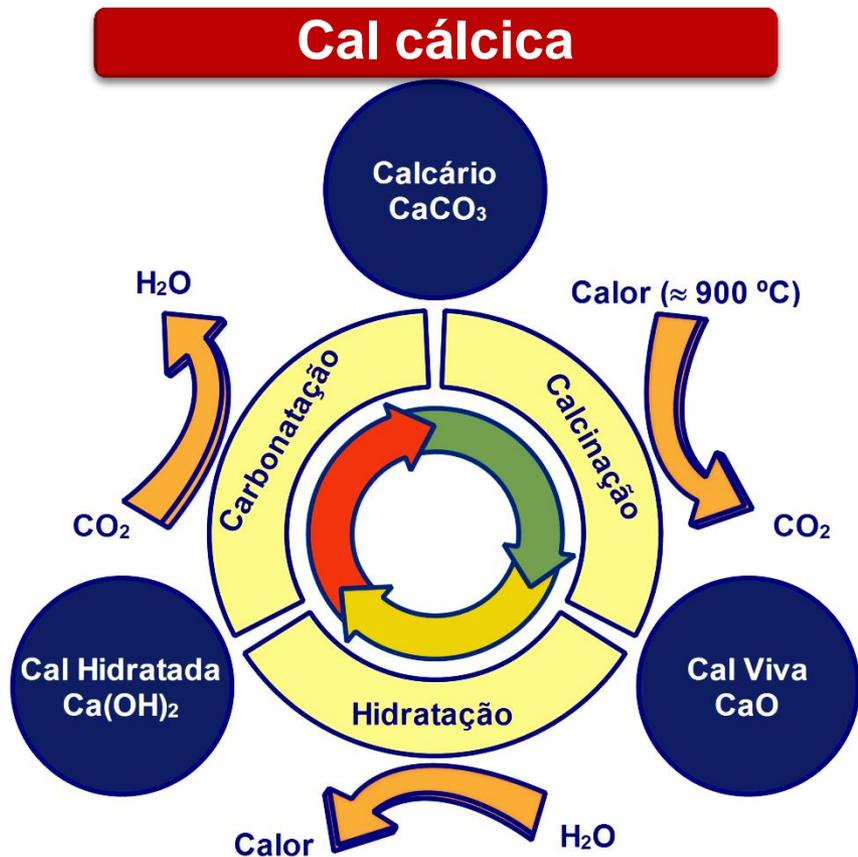


Fonte: Maria Goreti Margalha, *Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*, Dissertação de Doutorado, IST, 2009.

Artigos no V FICAL

- **Daniel Vale** - Revestimentos Exteriores Tradicionais na Terra Fria Transmontana (pág. 63)
- **Lúcia Miguel, Pedro Braga** - Magra 3 – Um complexo industrial de produção de cal em época romana (pág. 75)
- **Inês Cardoso, Joaquim Carvalho, António Santos Silva, António Candeias, José Mirão** - Fornos de cal da Região de Marvão (pág. 95)
- **Marluci Menezes** - Falas de quem faz a cal (pág. 129)
- **Maria Goreti Margalha** - Fornos tradicionais do Alentejo: processo de fabrico da cal (pág. 229)
- **Paulo Jorge Custódio, Altino Rocha, Sofia Salema, Maria Goreti Margalha** - Os fornos de cal do baixo Guadiana, contributo para um estudo arquitetónico (pág. 239)

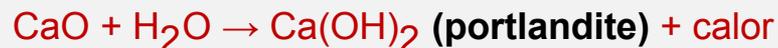
❑ Ciclo da cal



- **CALCINAÇÃO**



- **HIDRATAÇÃO (apagamento)**



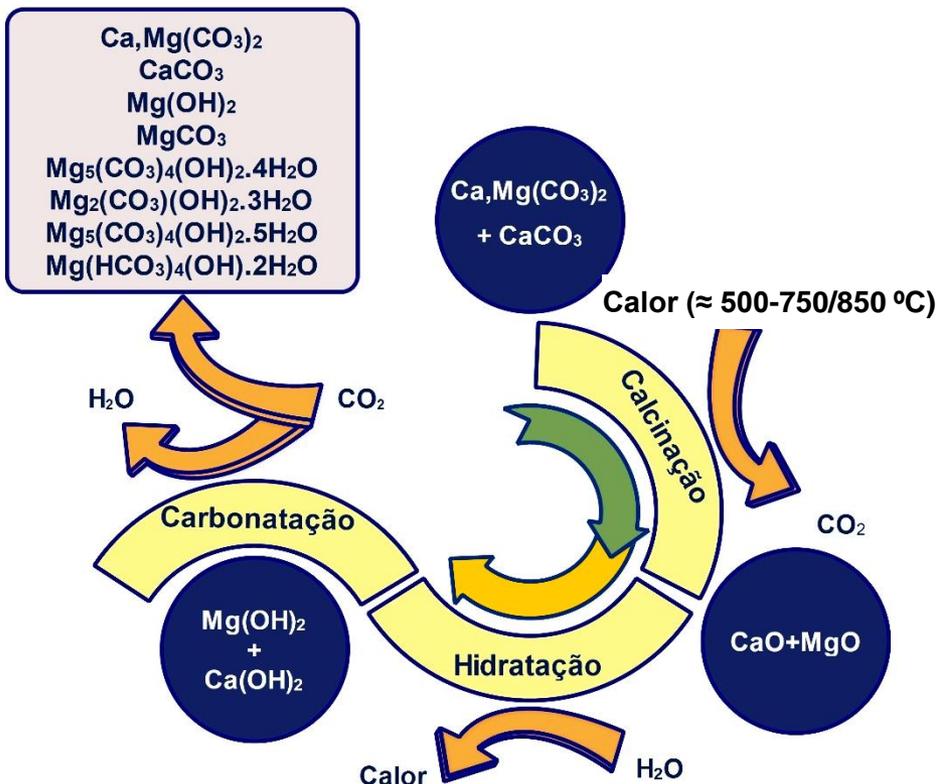
- **CARBONATAÇÃO (endurecimento)**



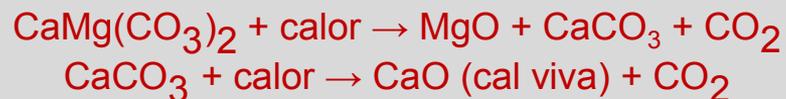
Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.

❑ Ciclo da cal

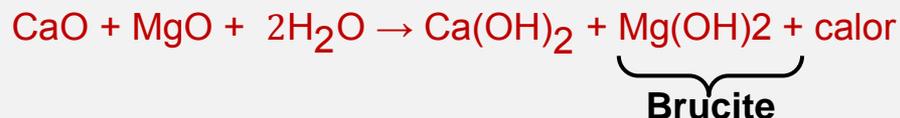
Cal dolomítica



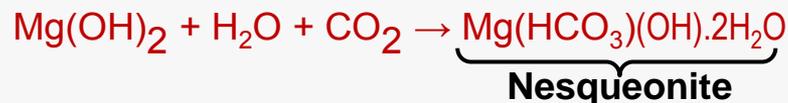
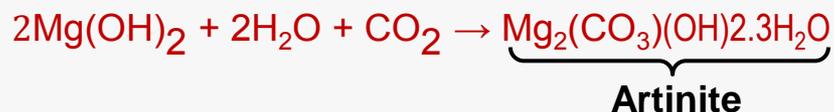
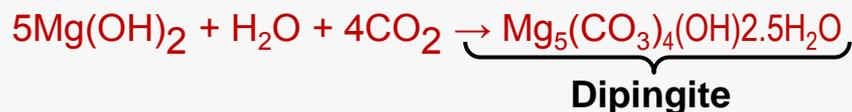
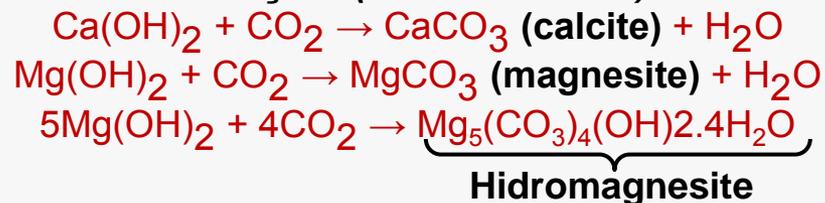
• **CALCINAÇÃO**



• **HIDRATAÇÃO (apagamento)**

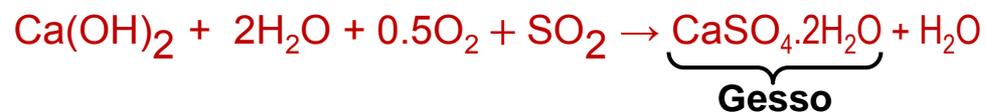
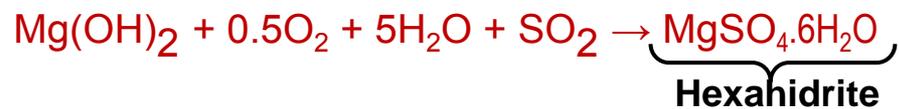
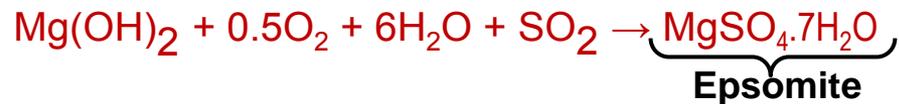


• **CARBONATAÇÃO (endurecimento)**



Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.

☐ Cal dolomítica – produtos de alteração



<http://www.qub.ac.uk/geomaterials/geomonumental/friarsbush.htm>



Fonte: Diekamp, A., Konzett, J., Tartarotti, P and Mirwald, P., Dolomitic lime mortar and the impact of SO₂-pollution, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone Columbia University, New York, 2012

Solubilidade em água, Tamb.

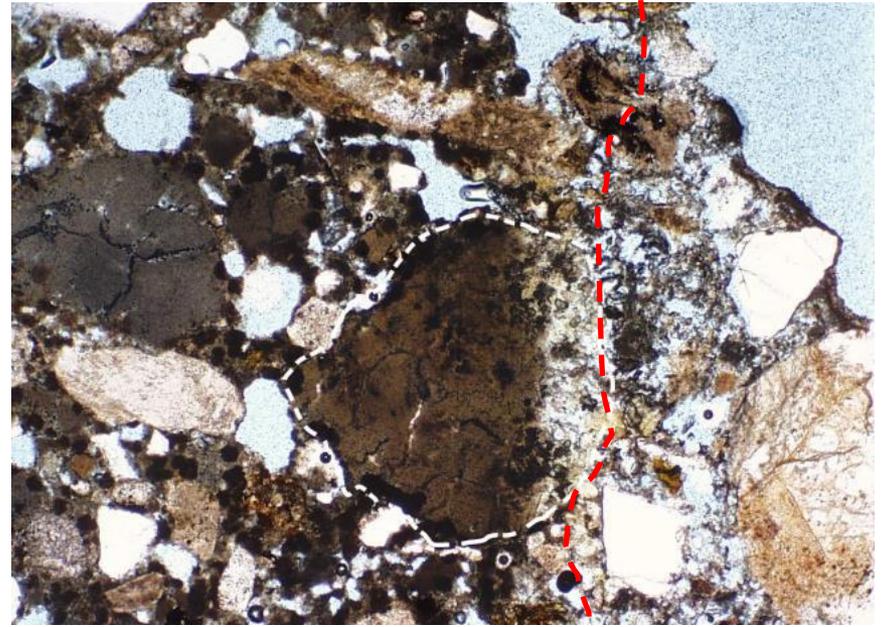
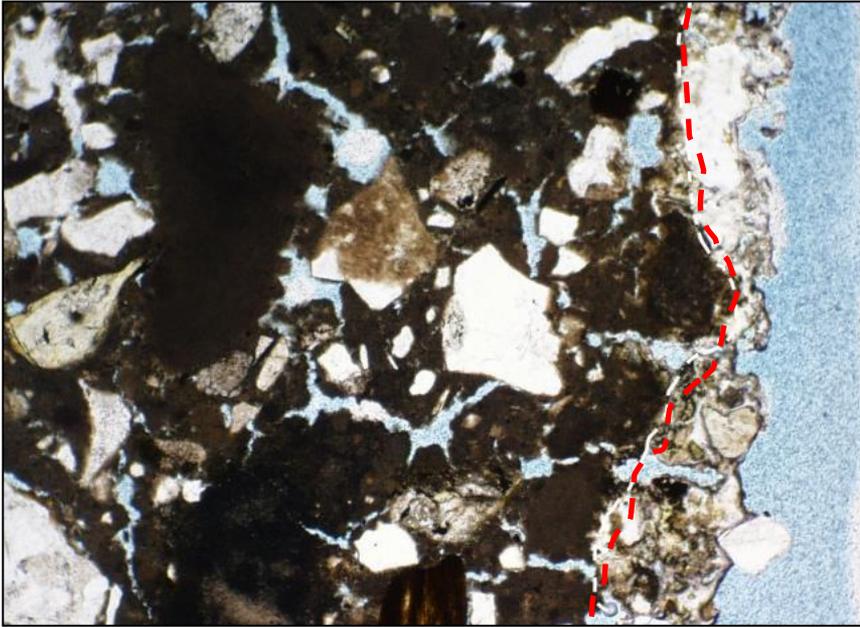
Epsomite – 71 g/100 mL

Gesso – 0.24 g/100 mL

Portlandite – 0.12 g/100 mL

Calcite – 0.015 g/100 mL

❑ Cal dolomítica – suscetibilidade aos sulfatos?



Fonte: Diekamp, A., Konzett, J., Tartarotti, P and Mirwald, P., Dolomitic lime mortar and the impact of SO₂-pollution, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone Columbia University, New York, 2012

Resultados contraditórios:

- x Coultrone, G.; Arizzi, A.; Rodriguez-Navarro, C; Sebastian, E. , Sulfation of calcitic and dolomitic lime mortars in the presence of diesel particulate matter, *Environmental Geology*, Vol. 56, No. 3-4, December, 2008.
- x Lopez-Arce, P.; Garcia-Guinea, J.; Benavente, D.; Tormo, L.; Doehne, E., Deterioration of dolostone by Magnesium Sulphate Salt: An example of incompatible building materials at Bonaval Monastery, Spain, *Construction And Building Materials* ,23 (2009): 846-855.
- ✓ Montoya, C.; Lanas, J.; Arandigoyen, M.; Navarro, I.; García Casado, P.J.; Alvarez, J.I., Study of ancient dolomitic mortars of the Church of Santa María de Zamarce in Navarra (Spain): Comparison with simulated standards,”*Thermochimica Acta*, 398 (2003): 107-122.
- ✓ Berman, Scott, Frage, Debera F.; Tate, Michael J., The effect of acid rain on magnesium hydroxide contained in cement-lime mortar, *Masonry: Opportunities for the 21st Century*, ASTM STP 1432, ed. D. Throop and R.E. Klingner (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003).
- ✓ Diekamp, A., Konzett, J., Tartarotti, P and Mirwald, P., Dolomitic lime mortar and the impact of SO₂-pollution, 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone Columbia University, New York, 2012

❑ Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



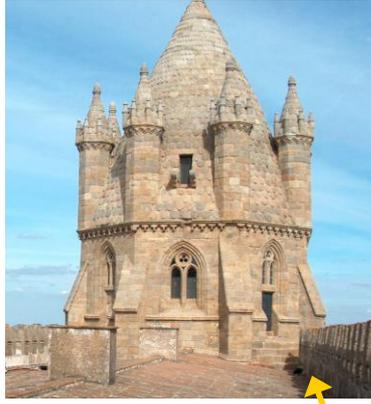
❑ Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



Exterior da catedral –
terraço (SEV 1)



Parede interna da
torre do Zimbório
(SEV 6 e 7)



Lado Sul da nave
Pilar 25 (SEV 3)



Lado Norte da nave
Pilar 2 (SEV 2)



Coro alto (SEV 8)



Interior da torre do relógio
(SEV 4)

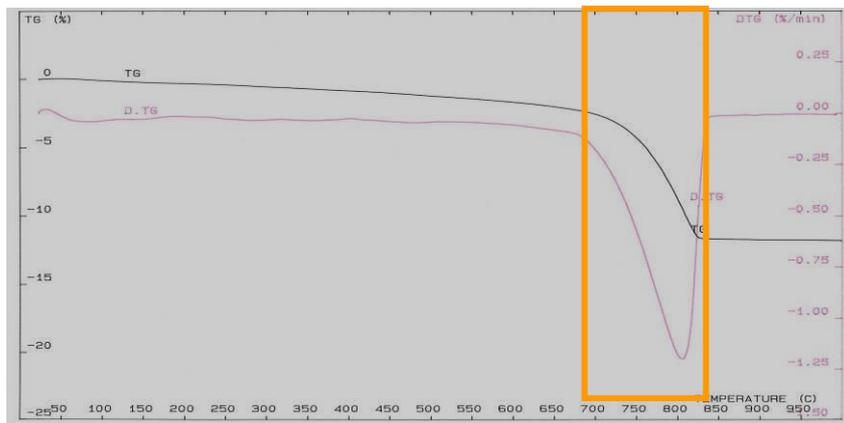
Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



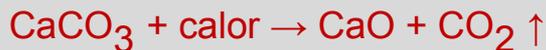
Estratigrafia do revestimento: in-situ

Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora

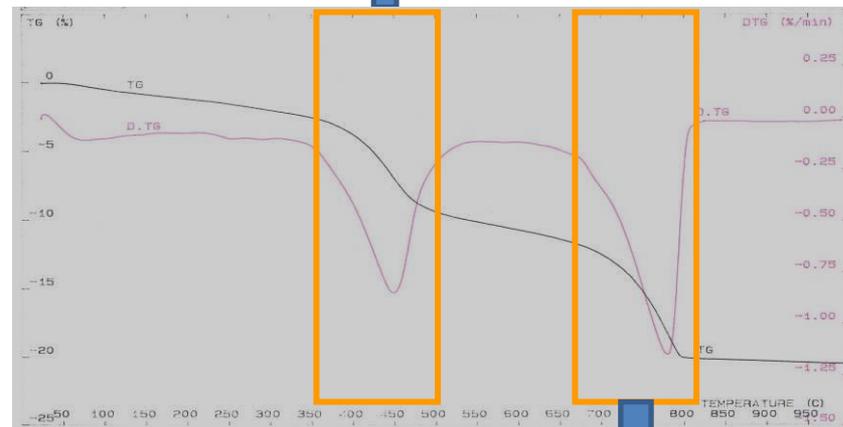
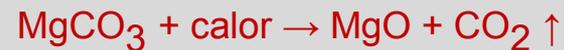
Amostras da torre do Zimbório (SEV 6 , SEV 7)



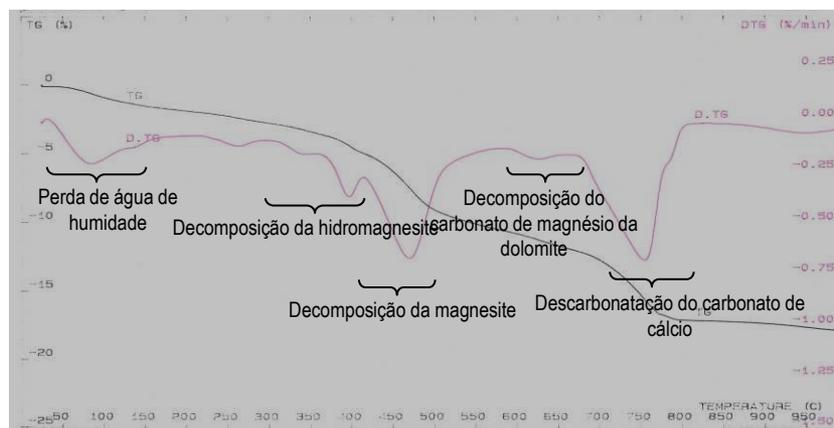
Termogramas típicos de cal aérea cálcica



Maioria das amostras



Termogramas típicos de cal aérea dolomítica



Amostras –
lado norte ou
mais expostas
à água

□ Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora

Composição química (em %) da fração solúvel das várias amostras

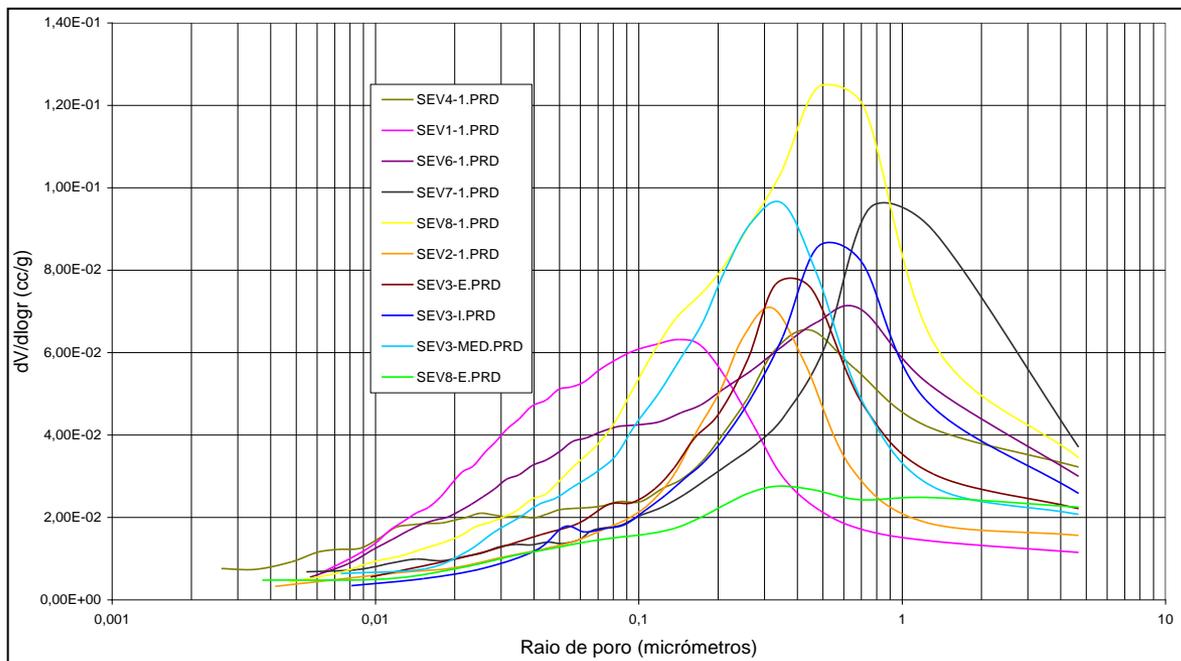
Amostras		CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cl ⁻	SO ₃
SEV1		15,47	0,09	0,05	8,34	0,48	0,12
SEV2		15,78	3,08	2,36	5,45	0,85	0,12
SEV3	INT	10,41	1,87	0,68	6,94	0,18	0,10
	IM	11,51	1,79	0,88	6,98	0,23	0,10
	EXT	10,30	0,97	0,59	6,18	0,16	0,10
SEV4		9,14	0,90	0,51	7,08	0,62	0,28
SEV6		8,86	0,07	0,34	1,39	0,06	0,18
SEV7		8,75	0,12	0,45	1,79	0,06	0,15
SEV8	INT	8,46	0,46	0,37	5,69	0,53	0,23
	EXT	9,46	0,60	0,35	9,64	0,49	0,38

Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora

Composição química (em %) da fração solúvel das várias amostras

Amostras		CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Cl ⁻	SO ₃
SEV1		15,47	0,09	0,05	8,34	0,48	0,12
SEV2		15,78	3,08	2,36	5,45	0,85	0,12
SEV3	INT	10,41	1,87	0,68	6,94	0,18	0,10
	IM	11,51	1,79	0,88	6,98	0,23	0,10
	EXT	10,30	0,97	0,59	6,18	0,16	0,10
SEV4		9,14	0,90	0,51	7,08	0,62	0,28
SEV6		8,86	0,07	0,34	1,39	0,06	0,18
SEV7		8,75	0,12	0,45	1,79	0,06	0,15
SEV8	INT	8,46	0,46	0,37	5,69	0,53	0,23
	EXT	9,46	0,60	0,35	9,64	0,49	0,38

Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



Porosidade compreendida entre
11% (SEV 8-EXT) e 28% (SEV 8-INT)

Porosidade total e raio médio de poro

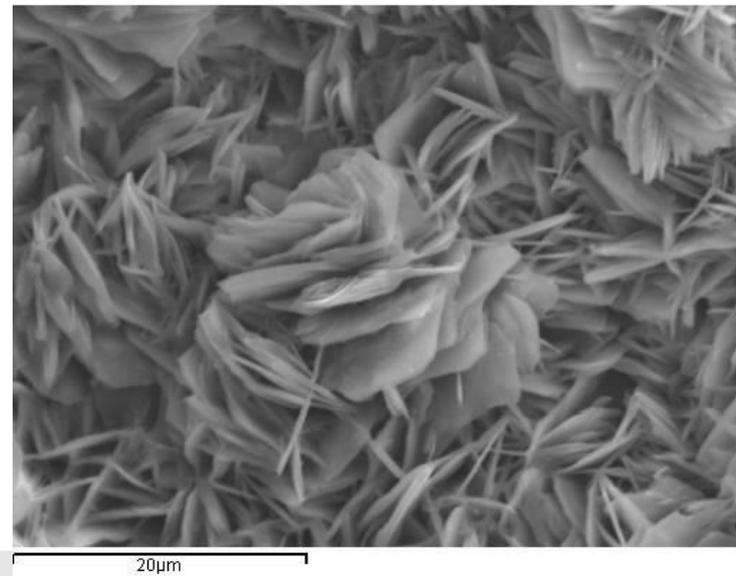
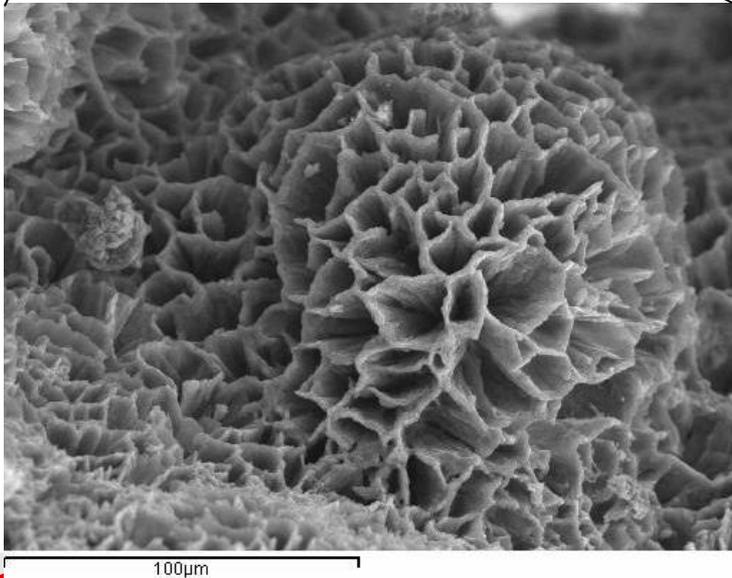
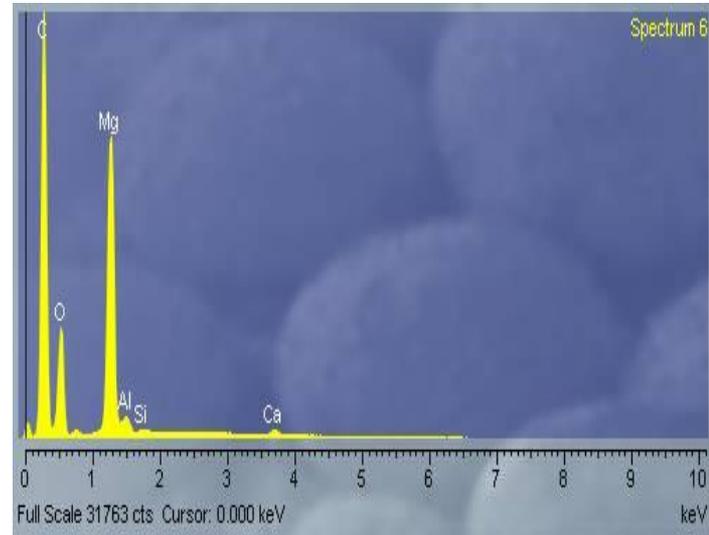
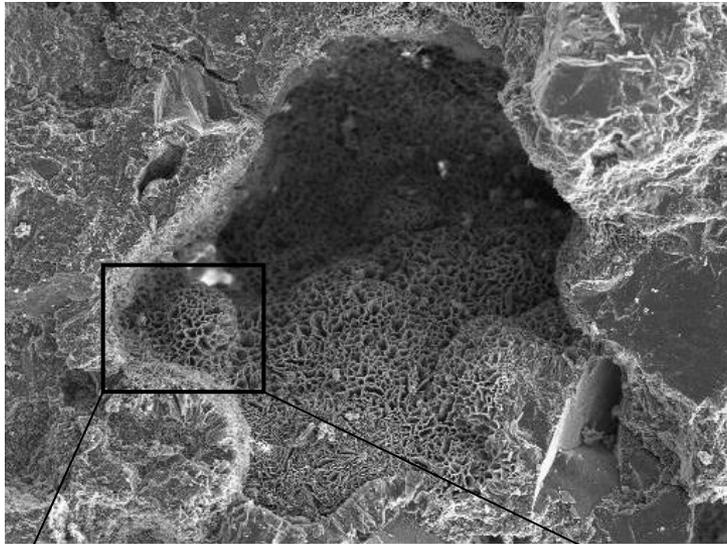
Curvas de distribuição do tamanho de poro das amostras

As amostras SEV6 e SEV7 são argamassas de matriz calcítica e apresentam valores de raio médio de poro mais elevados.

A presença de hidromagnesite e de magnesite estimula o desenvolvimento do ligante, através do preenchimento dos espaços vazios nas interfaces agregado/ligante

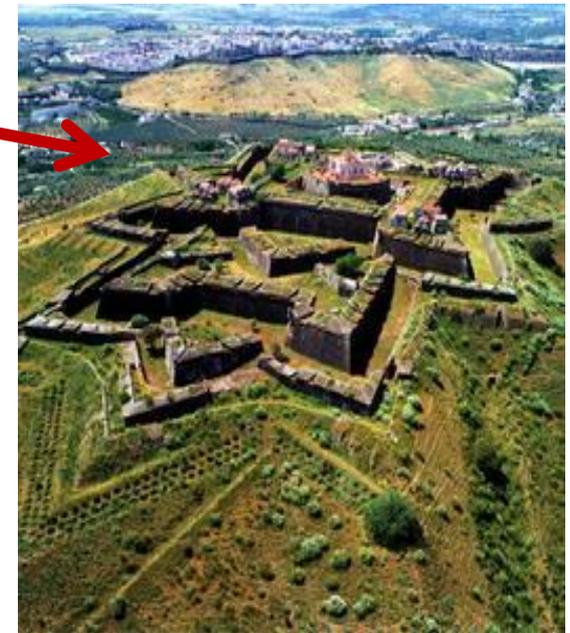
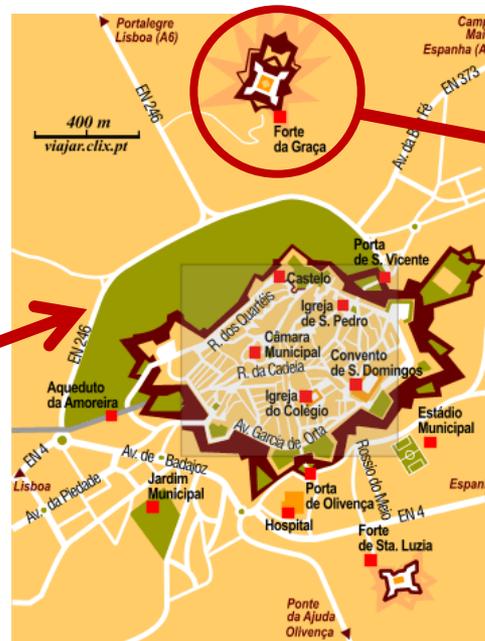
Amostra		Porosidade total (%)	Raio médio do poro (µm)
SEV1		18,7	0,14
SEV2		14,8	0,32
SEV3	INT	19,0	0,48
	IM	21,7	0,35
	EXT	17,0	0,33
SEV4		19,2	0,45
SEV6		22,4	0,69
SEV7		21,1	0,75
SEV8	INT	27,7	0,48
	EXT	11,0	0,34

Cal dolomítica – usos em Portugal – Sé de Évora



□ Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça

- Localiza-se a norte da **cidade de Elvas**, no Monte de Nossa Senhora da Graça e a sua construção teve o *objetivo de completar o circuito defensivo da cidade*.



❑ Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça

- Edificado durante o **século XVIII** é considerada uma obra única da arquitetura militar europeia, e um dos símbolos máximos das fortalezas abaluartadas em zonas fronteiriças.
- Durante o século XIX, foi criada no Forte uma companhia de correção e serviu como depósito disciplinar; em 1910 serviu para reter os presos políticos.



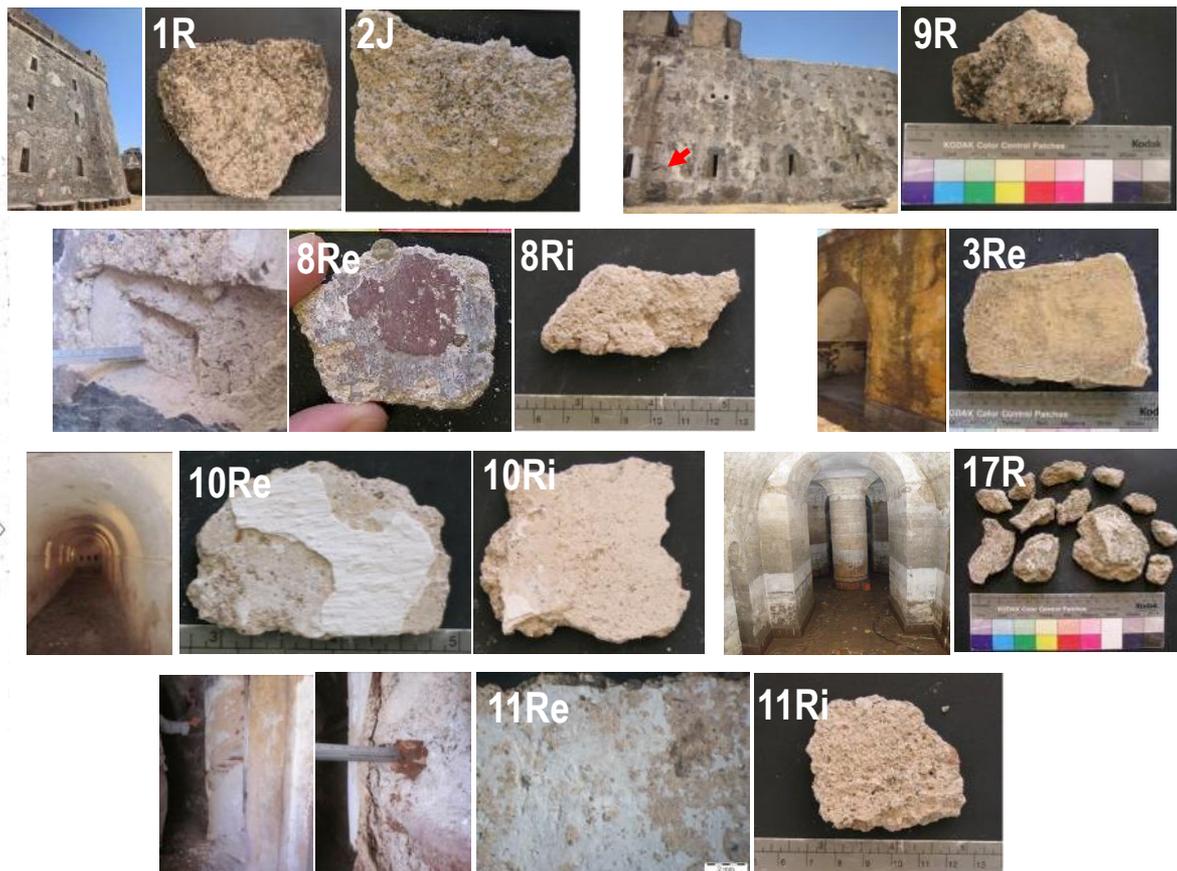
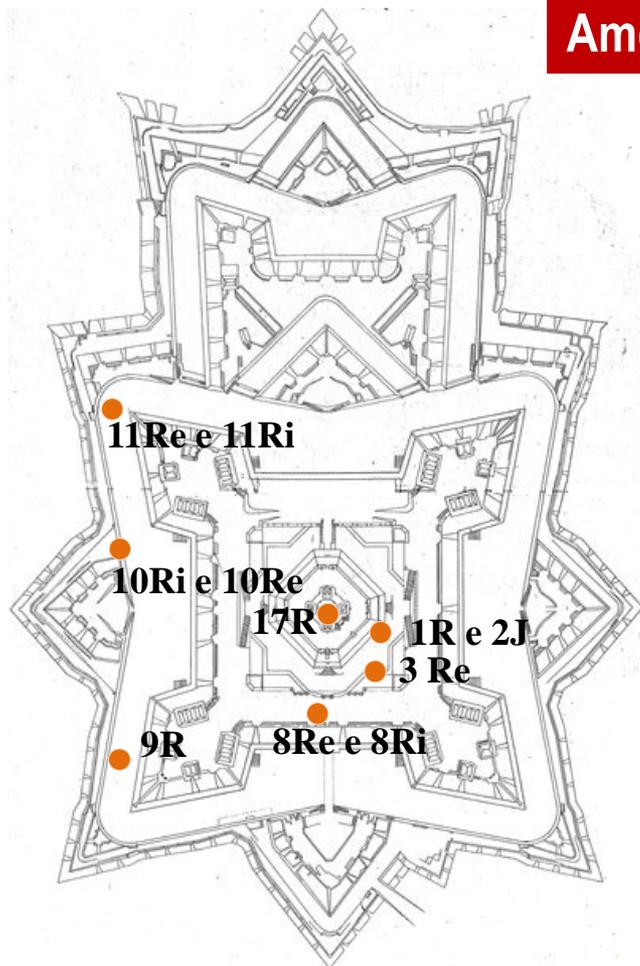
❑ Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça

- Na construção utilizaram-se pedras e terras sobrantes das minas abertas no maciço rochoso do monte de Nossa Senhora da Graça, assim como outros materiais existentes nas proximidades do local da construção, tal como areia e material cerâmico.

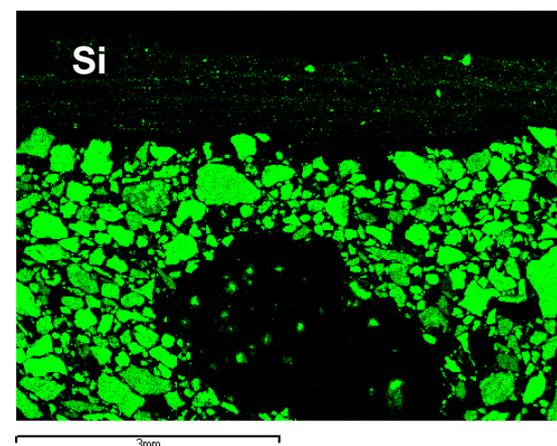
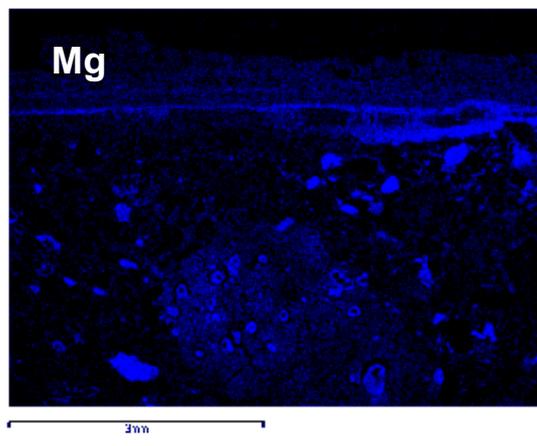
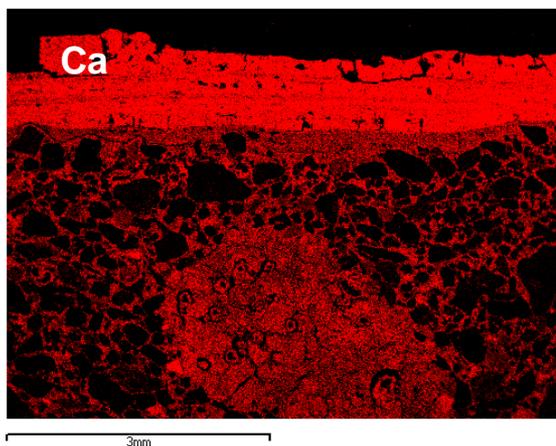
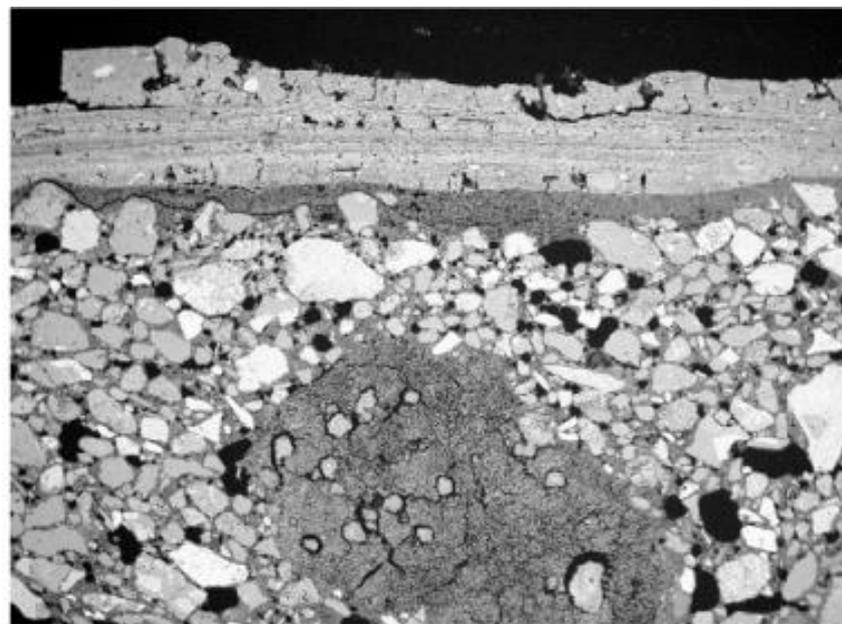
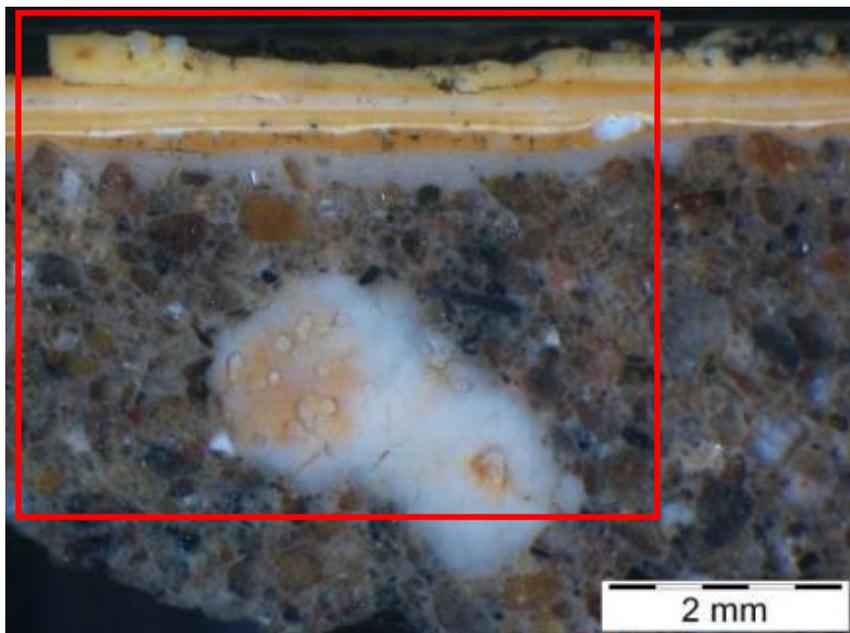


Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça

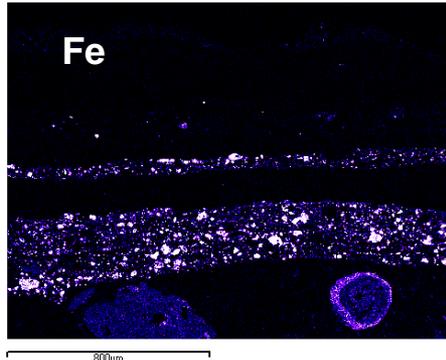
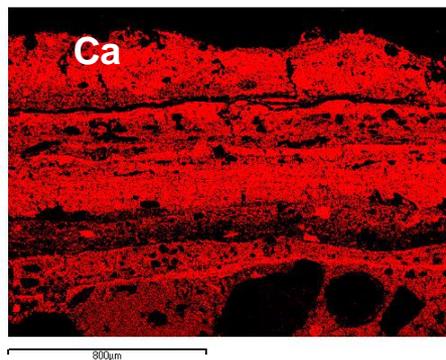
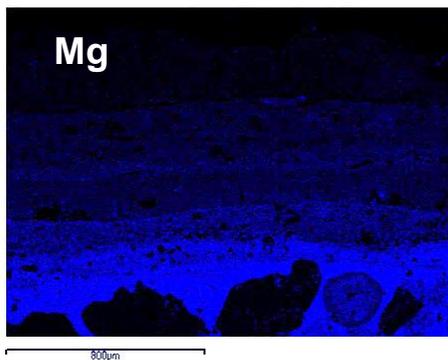
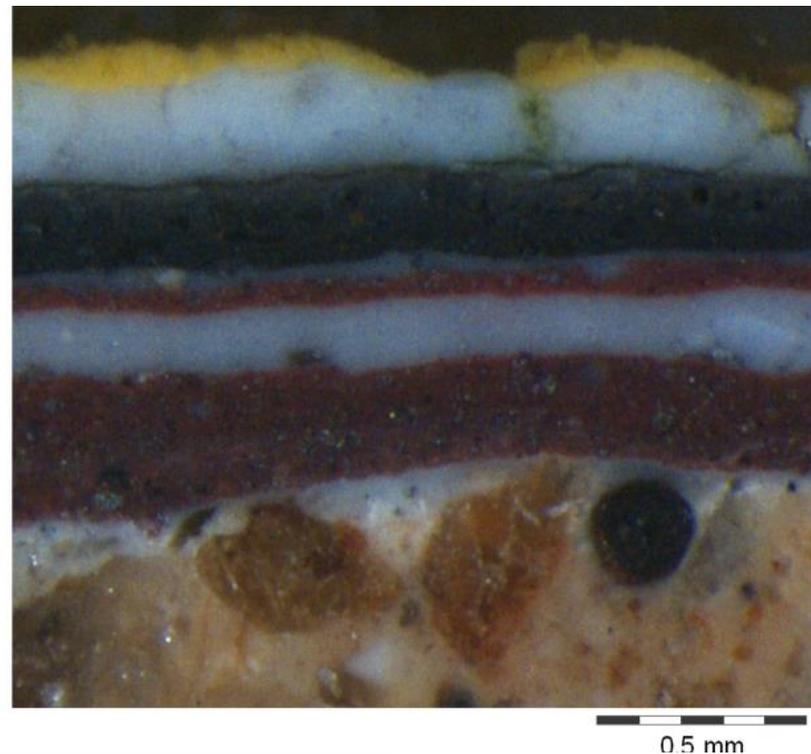
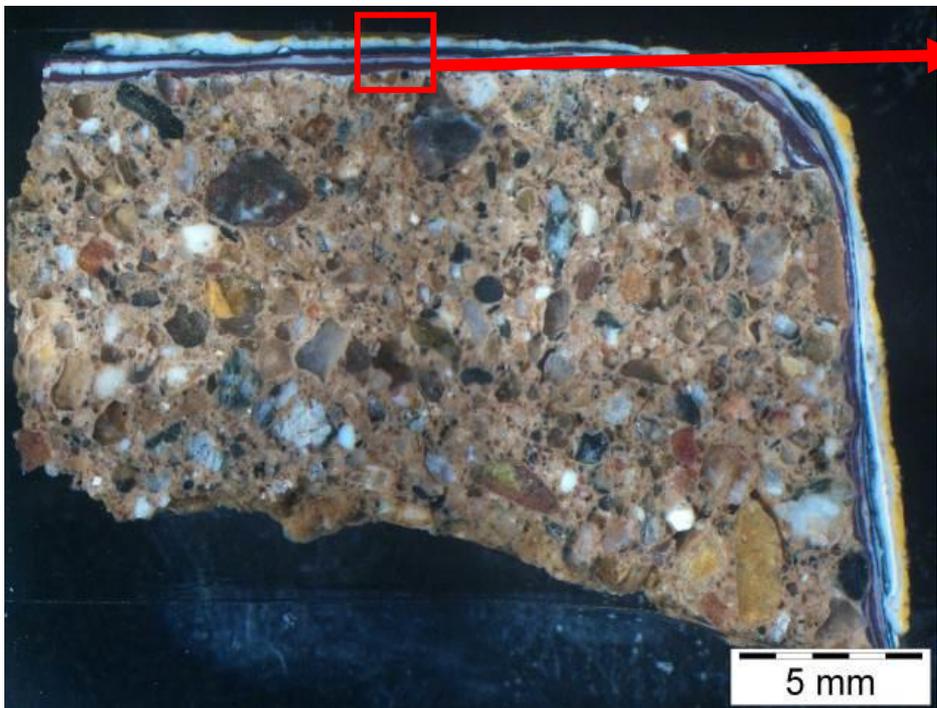
Amostras de argamassas – revestimento (R) e assentamento (J)



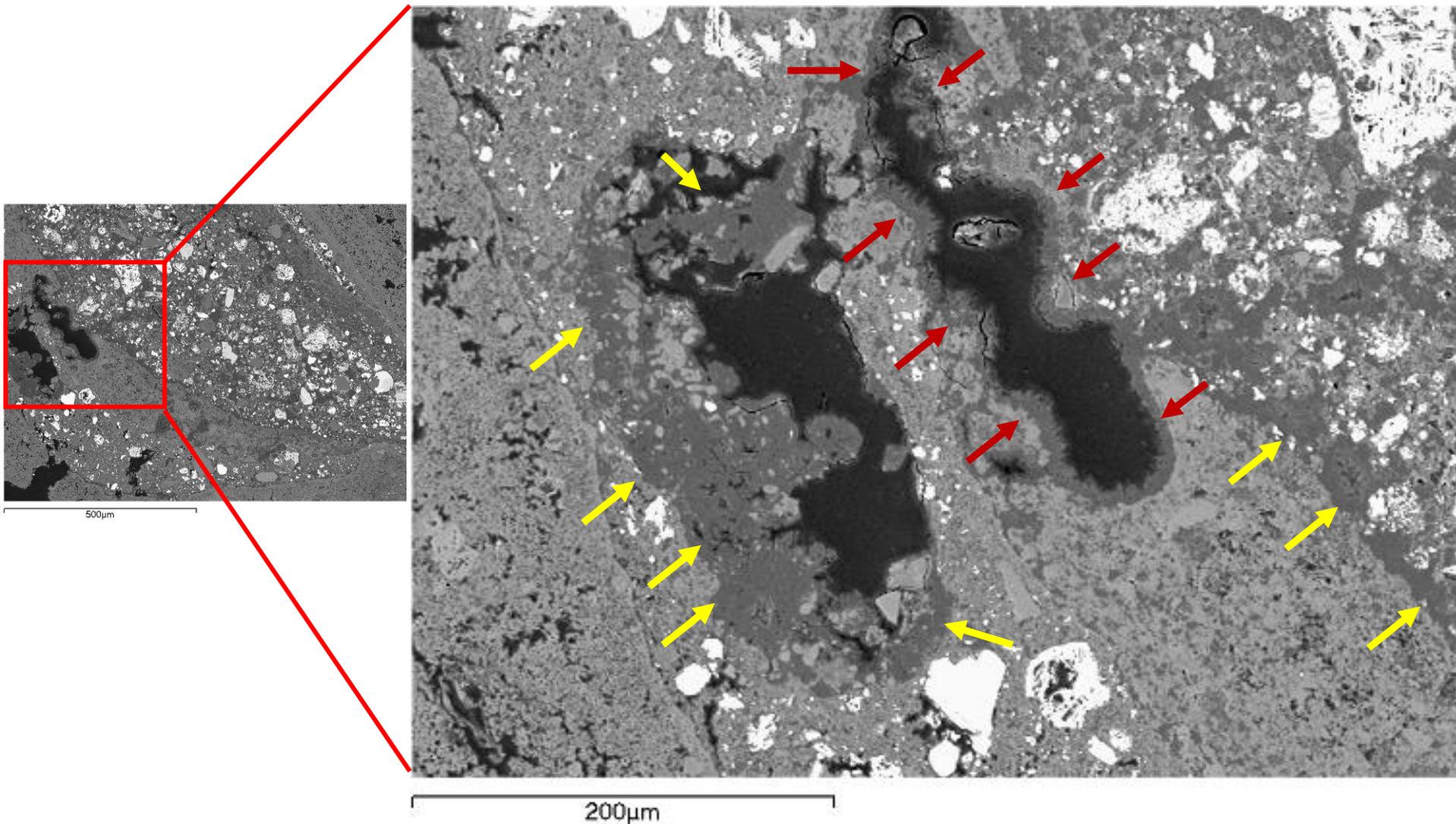
Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça



Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça



Cal dolomítica – usos em Portugal – Forte de N^a Sra. da Graça



Lubelli, B., Nijlandb, T.G., van Hees, R. P.J., Simulation of self-healing of dolomitic lime mortar, *13th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials 14-18 June 2011, Ljubljana, Slovenia*

❑ Cal dolomítica – usos recentes em Portugal

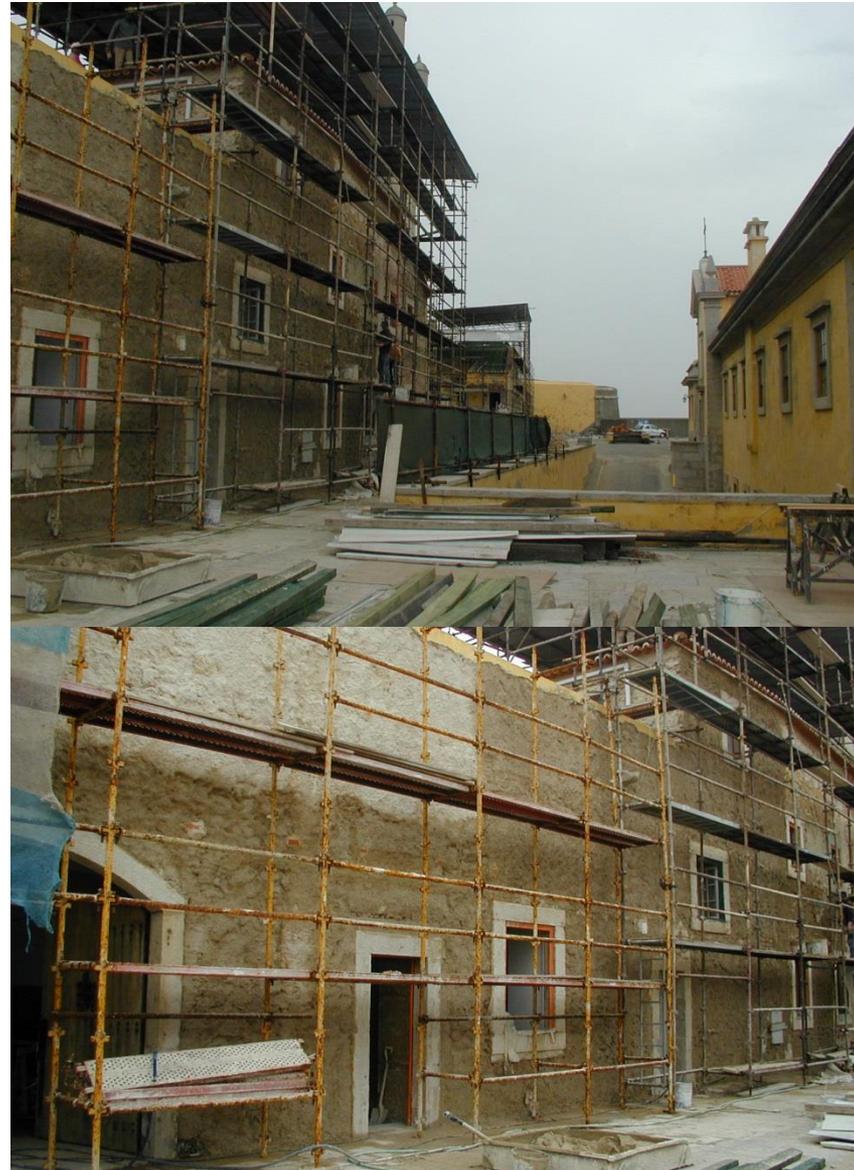


Igreja de São Francisco – Évora – Fonte: <http://olhares.uol.com.br/igreja-de-s-francisco-evora-foto3339314.html>

❑ Cal dolomítica – usos recentes em Portugal



Forte de S. Julião da Barra - Residências



❑ Cal dolomítica – requisitos normativos atuais

Cal dolomítica (NP EN 459-1 2015):

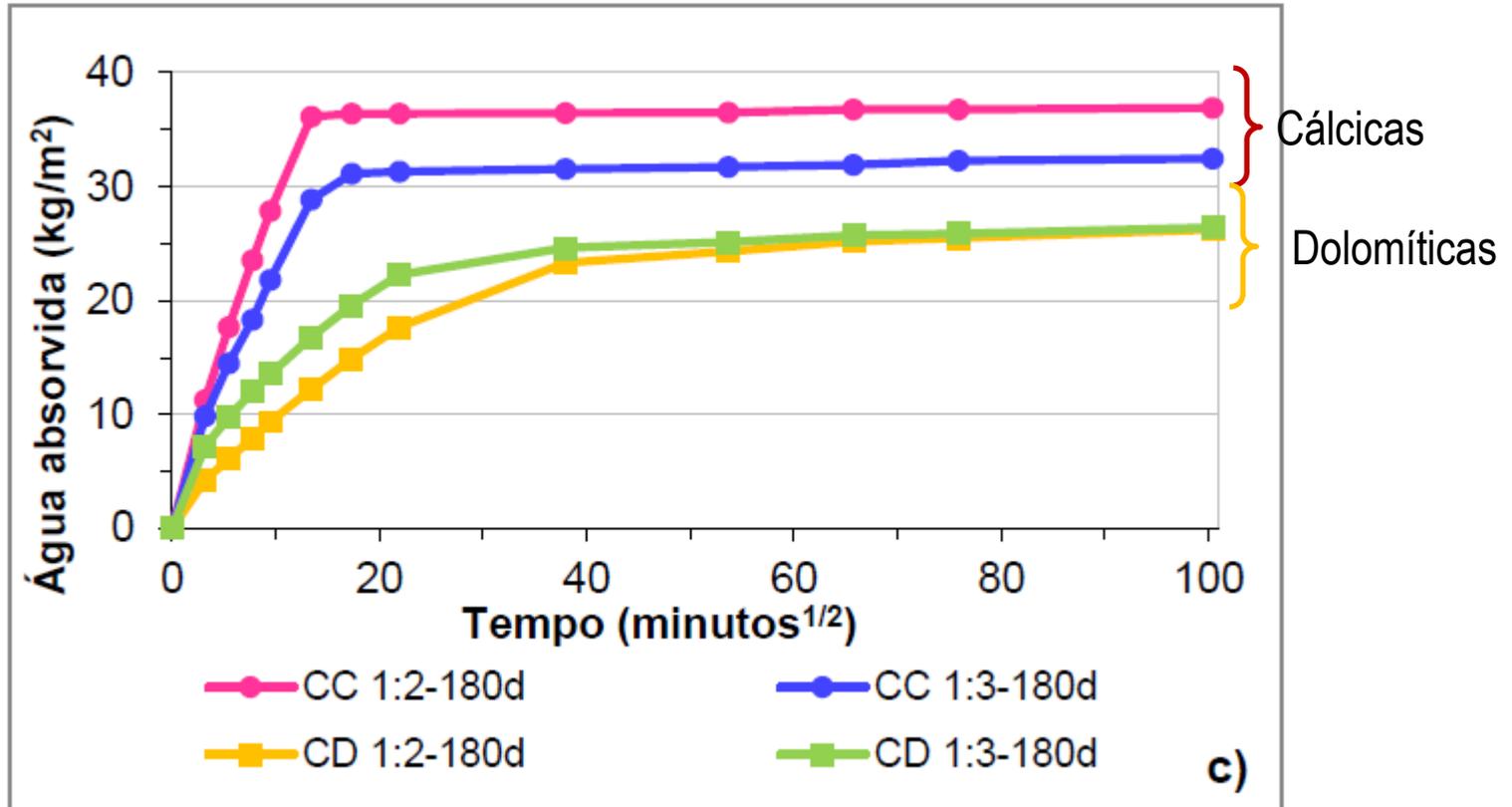
Cal aérea constituída principalmente por óxido ou hidróxido de cálcio e de magnésio, sem qualquer adição hidráulica ou pozolânica.

Tipo de cal dolomítica	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃
DL 90-30	≥ 90	≥ 30	≤ 6	≤ 2
DL 90-5	≥ 90	≥ 5	≤ 6	≤ 2
DL 85-30	≥ 85	≥ 30	≤ 9	≤ 2
DL 80-5	≥ 80	≥ 5	≤ 9	≤ 2

Os valores são aplicáveis a todos os tipos de cal dolomítica. Para a cal viva dolomítica estes valores correspondem ao produto acabado; para a cal dolomítica hidratada os valores são baseados no produto após subtração da sua água livre e da água adsorvida.

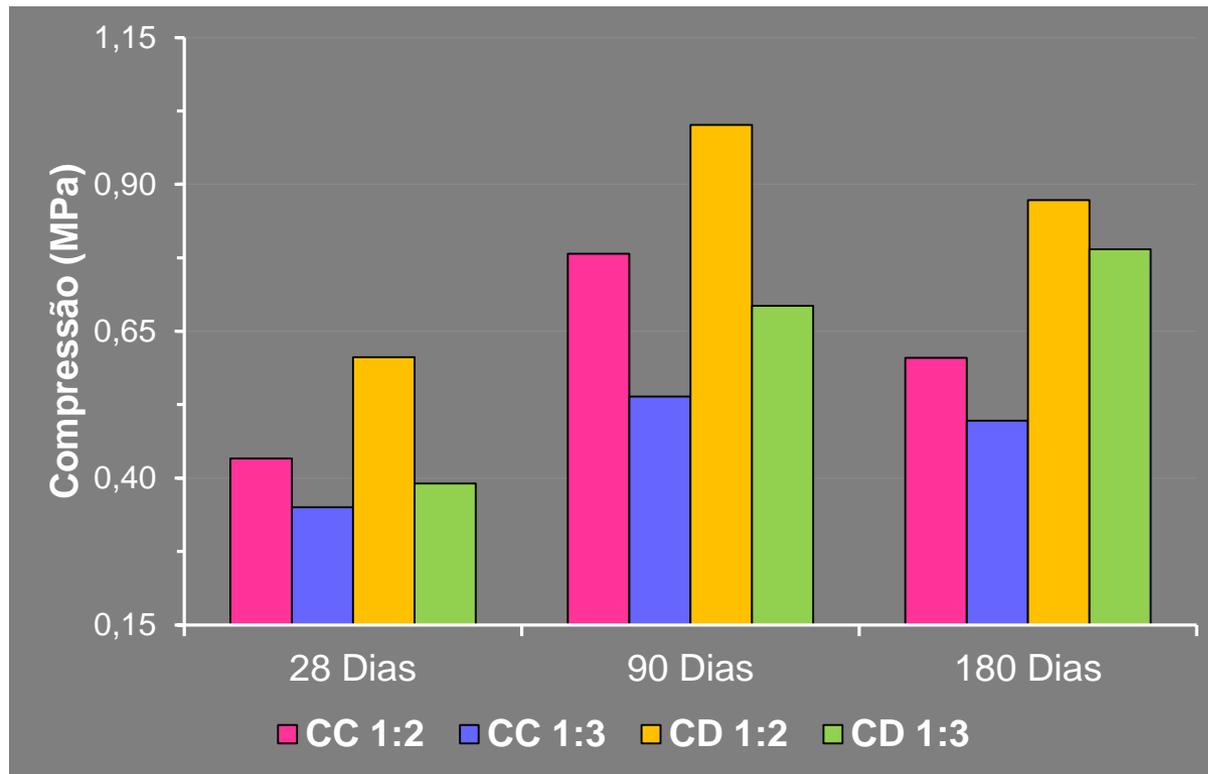
Cal dolomítica – propriedades físicas

Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.



Cal dolomítica – propriedades mecânicas

Fonte: Ana Viangre, *Estudo comparativo entre argamassas de cal calcítica e de cal dolomítica: características mecânicas, físicas, mineralógicas e microestruturais*, Dissertação Mestrado, U. Évora, 2015.



☐ Cal dolomítica – propriedades mecânicas

Tipo	Rf	Rc
100% Mg	1,09	2,48
50% Mg	0,84	1,46
25% Mg	0,84	1,41
10% Mg	0,83	1,16
100% Ca	0,62	1,05

Materials and Structures (2010) 43:283–296
DOI 10.1617/s11527-009-9488-9

ORIGINAL ARTICLE

Physical properties of magnesian lime mortars

L. Chever · S. Pavía · R. Howard



❑ CONCLUSÕES

- ❑ A cal dolomítica é usada desde a antiguidade, com vários exemplos em Portugal e no estrangeiro que atestam as suas boas qualidades.
- ❑ Na viragem do século XIX receios da sua alterabilidade em presença de atmosferas ricas em SO_2 fizeram com que o seu uso fosse questionado. Estudos recentes vieram demonstrar que não são mais suscetíveis à alteração por sulfatos que as cals aéreas cálcicas.

❑ CONCLUSÕES

- ❑ Em Portugal vários monumentos seculares comprovam as boas características de durabilidade das cais dolomíticas.
- ❑ As cais dolomíticas quando devidamente formuladas podem atingir características mecânicas similares a uma cal NHL2, e têm melhor comportamento mecânico e físico que as cais aéreas cálcicas.
- ❑ As cais dolomíticas são mais resistentes à ação da água que as cais cálcicas.

Obrigado

Agradecimentos

- **Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Projetos**
 - DUR-HERITAGE - Durabilidade e caracterização de materiais com interesse histórico
 - PRESERVE - Preservação de revestimentos do património construído com valor cultural: identificação de riscos, contributo do saber tradicional e novos materiais para conservação e proteção
- **Fundação para a Ciência e Tecnologia** no âmbito do projeto DB-HERITAGE - Base de dados de materiais de construção com interesse histórico e patrimonial.
- Rosário Veiga, Ana Rita Santos, Dora Santos, Paula Menezes, Luzia Barracha, Dora Soares, Fátima Llera, Goreti Margalha, José Mirão, António Candeias, Ana Vinagre, Luís Almeida, Patrícia Adriano, Paulina Faria, Mário Marques,
- LUSICAL
- IN SITU

