



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Revestimentos e Isolamentos

Proc. 0803/14/15139

CARACTERIZAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE DE ARGAMASSAS COM BASE EM CAL

(PROJECTO FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002)

Lisboa • Junho de 2007

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 201/2007 – NRI

CARACTERIZAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE DE ARGAMASSAS COM BASE EM CAL

RESUMO

No âmbito do projecto em curso de “Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas” (Projecto FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002), foi realizado um conjunto de ensaios de laboratório, visando a avaliação da higroscopicidade dos elementos constituintes de uma maqueta de parede de alvenaria irregular de pedra e das argamassas de revestimento de paredes antigas recolhidas em diversos casos de estudo.

No presente Relatório identificam-se as amostras analisadas, descreve-se o método de ensaio usado, apresentam-se os resultados obtidos e faz-se uma apreciação desses resultados.

HYGROSCOPICITY CHARACTERIZATION OF LIME BASED MORTARS

CARACTÉRISATION DE L’HYGROSCOPICITÉ DES MORTIERS À BASE DE CHAUX

CARACTERIZAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE DE ARGAMASSAS COM BASE EM CAL

ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	11
2 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	12
3 - HIGROSCOPICIDADE DE MATERIAIS POROSOS.....	13
4 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	17
5 - ENSAIOS REALIZADOS.....	19
6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS	20
7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
8 - CONCLUSÕES	38
9 - NOTA FINAL	39
BIBLIOGRAFIA.....	41

CARACTERIZAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE DE ARGAMASSAS COM BASE EM CAL

ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1 – Identificação das amostras ensaiadas	12
Quadro 2 – Humidade higroscópica dos provetes de argamassa e de pedra da maqueta para diferentes humidades relativas, a 30°C	20
Quadro 3 – Humidade higroscópica de amostras das argamassas dos casos de estudo para diferentes humidades relativas, a 20° C.....	21
Quadro 4 – Coeficientes de capilaridade da argamassa de cal aérea e da pedra calcária da maqueta	21
Quadro 5 – Humidade higroscópica versus coeficientes de capilaridade das argamassas estudadas.....	22

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1 - Curva típica de equilíbrio higroscópico de materiais porosos [5, 6,7].....	14
Fig. 2 - Transporte de humidade durante o humedecimento de materiais porosos (figura retirada de [9])	15
Fig. 3 – Argamassa com base em cal e pedra calcária	17
Fig. 4 – Aspecto das amostras antigas ensaiadas.....	18
Fig. 5 – Câmara usada para o ensaio, amostras em ensaio no interior da câmara.....	19
Fig. 6 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa de cal e areia e da pedra.....	23
Fig. 7 – Absorção e secagem da argamassa de cal aérea	23
Fig. 8 – Absorção e secagem da pedra	23
Fig. 9 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas MAT (grupo I).....	24
Fig. 10 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas MIS (grupo I).....	24
Fig. 11 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas CCAP (grupo I)	25
Fig. 12 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa BCT (grupo II).....	25
Fig. 13– Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas PPE e PPR (grupo III).....	26

Fig. 14 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSAC (grupo IV)	26
Fig. 15 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSMT (grupo IV)	27
Fig. 16 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FBUG (grupo IV)	27
Fig. 17 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas EMT (grupo IV)	28
Fig. 18 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas ESL02J (Grupo IV)	28
Fig. 19 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FOIT (Grupo IV)	29
Fig. 20 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSB (Grupo IV)	29
Fig. 21 – Absorção de água das amostras do grupo I	30
Fig. 22 – Absorção de água da amostra do grupo II	30
Fig. 23 – Absorção de água das amostras do grupo III	31
Fig. 24 – Absorção de água das amostras do grupo IV	31
Fig. 25 – Amostras BCT, EMT e FOIT, respectivamente. Condensação à 95% de HR	36
Fig. 26 – Pormenor dos cristais de sal à superfície da amostra FSB	36
Fig. 27 – Higroscopicidade <i>versus</i> Capilaridade das argamassas mais higroscópicas	37

CARACTERIZAÇÃO DA HIGROSCOPICIDADE DE ARGAMASSAS COM BASE EM CAL

1 - INTRODUÇÃO

No âmbito do projecto em curso de “Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas” (Projecto FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002), foi realizado um conjunto de ensaios de laboratório, visando a avaliação da higroscopicidade dos elementos constituintes de uma maqueta de parede de alvenaria irregular de pedra e das argamassas de revestimento de paredes antigas recolhidas em diversos casos de estudo.

Para além da caracterização dos elementos constituintes de uma maqueta de parede de alvenaria irregular de pedra [1], foi realizada a avaliação da higroscopicidade destes materiais e de um conjunto de argamassas de revestimento de paredes antigas recolhidas em diversos casos de estudo.

A higroscopicidade é uma propriedade dos materiais que caracteriza a sua capacidade de adsorver¹ água sob a forma de vapor. As argamassas e as pedras, como materiais porosos, são materiais higroscópicos já que adsorvem vapor de água do ar, tendendo a retê-la nos seus poros até ser atingida uma situação de equilíbrio com o ambiente.

Resulta interessante para a compreensão dos mecanismos de transporte de humidade, sob a forma líquida ou sob a forma de vapor, o conhecimento das características higroscópicas de um material.

De uma forma geral a higroscopicidade é muito variável de material para material, já que a quantidade de vapor de água absorvida é influenciada pelas condições ambientes (temperatura e humidade relativa), propriedades dos materiais (porosidade, distribuição porosimétrica, superfície específica) e teor de sais.

No presente Relatório identificam-se as amostras analisadas, descreve-se o método de ensaio usado, apresentam-se os resultados obtidos e faz-se uma apreciação desses resultados.

¹ As moléculas de água adsorvida ficam ligadas à superfície dos capilares por forças intermoleculares fracas designadas por forças de Van der Waals.

2 - IDENTIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

No âmbito de diversos estudos do LNEC, alguns dos quais no âmbito do projecto em curso, foram extraídas diversas amostras de revestimentos de paredes de edifícios antigos, que se admite serem, em grande parte, originais.

Algumas amostras recolhidas mostravam-se bastante friáveis, apresentavam dimensões reduzidas e pouca espessura. A análise visual preliminar das amostras indicou que a maior parte delas parece ter como ligante a cal aérea.

No Quadro 1, estão identificadas as amostras extraídas das paredes dos edifícios estudados. Com o objectivo de facilitar a interpretação dos resultados, os casos de estudo foram agrupados segundo o tipo de construção:

Grupo I) Conventos, igrejas

Grupo II) Construção Romana (edifício industrial);

Grupo III) Parede pombalina;

Grupo IV) Fortes, castelos.

Quadro 1 – Identificação das amostras ensaiadas

Identificação da amostra	Edifício	
Grupo I	MAT 1	Igreja Matriz de Viana do Alentejo
	MAT 2	
	MAT 3	
	MIS 1	Igreja da Misericórdia de Viana do Alentejo
	MIS 3	
	CCAP	Convento dos Capuchos
Grupo II	BCT	Base Cetária de Tróia*
Grupo III	PPE	Parede pombalina – argamassa de enchimento
	PPR	Parede pombalina – argamassa de reboco
Grupo IV	FSAC	Forte de Sacavém
	FSMT	Forte de Santa Marta
	FBUG	Forte do Bugio
	EMT	Castelo de Evoramonte – chaminé 2º piso
	ESL-02J	Castelo de Pisece (Eslovênia) - torre principal
	FOIT	Forte dos Oitavos
	FSB	Forte de São Bruno

* Construção usada para salga de peixe

3 - HIGROSCOPICIDADE DE MATERIAIS POROSOS

Quando um material poroso está em contacto com o ar, fica sujeito a um estado de equilíbrio de humidade² determinado pela humidade relativa do ambiente.

Materiais fracamente higroscópicos exibem uma variação ligeira no teor de água em consequência da variação da humidade relativa. Nos materiais fortemente higroscópicos o teor de água varia de forma acentuada.

O comportamento higroscópico de um material é representado graficamente através de (curvas) isotérmicas de adsorção e desadsorção. As isotérmicas representam a relação entre o teor de água de um material na situação de equilíbrio (humidade higroscópica) e a humidade relativa do ar ambiente a uma determinada temperatura.

Em geral, a isotérmica de adsorção é suficiente para caracterizar a capacidade de retenção (ou armazenamento) de água de um material [2] e depende da natureza do material, do tamanho de poros, da área superficial e do espaço poroso total.

Se a isotérmica de adsorção aumenta rapidamente, significa que o material é fortemente higroscópico. Uma isotérmica de adsorção com inclinação pouco acentuada indicia materiais pouco higroscópicos. Muitos materiais higroscópicos apresentam isotérmicas com perfil em forma de S constituindo a parte central do S o intervalo em que as propriedades do material estão mais estáveis.

Em geral, em materiais porosos, a isotérmica de adsorção (1.º ramo, ascendente, da curva - humedecimento) não coincide com a isotérmica de desadsorção (2.º ramo, descendente, da curva - secagem), principalmente a altas humidades. Esta separação das curvas refere-se ao fenómeno de histerese, que significa que na fase de secagem se conserva adsorvida uma determinada quantidade de água a uma pressão menor que a necessária no humedecimento. Assim, num determinado material, para uma mesma Humidade Relativa, podem existir diferentes teores de humidades de equilíbrio.

Relativamente à histerese, fenómeno ainda não explicado completamente, COHAN (citado por Paiva, em 1969 [3,4]) explica que na fase de humedecimento do material poroso, a adsorção de camadas de moléculas de água pelas paredes dos poros abertos faz diminuir a secção livre dos capilares, alterando o regime de circulação nos poros da água no estado líquido. Na fase de secagem, os capilares estão inicialmente saturados e a evaporação dá-se na superfície dos meniscos.

² O material higroscópico atinge a sua "humidade de equilíbrio" ou "humidade higroscópica" depois de estar exposto a um ambiente em condições estáveis de temperatura e humidade relativa durante um período prolongado. Nesta situação, a pressão de vapor de água correspondente à humidade do material é igual à pressão de vapor de água do ar ambiente.

O material tem capacidade de reagir com a humidade do ar absorvendo ou libertando vapor de água nos seus poros. Um material muito pouco poroso entra rapidamente em estado de equilíbrio com o ambiente devido à pequena quantidade de água que pode reter nos seus poros.

Ainda que, para um determinado valor da humidade relativa, os teores de humidade sejam muito variáveis de material para material, o andamento da curva é semelhante para a maioria dos materiais higroscópicos [4].

A Fig. 1 ilustra uma curva típica de equilíbrio higroscópico de materiais porosos [5,6,7], onde é definido o domínio higroscópico, o domínio capilar, o teor de humidade crítica (W_{cr}), o teor de humidade capilar (W_c) e o teor máximo de humidade de saturação nos poros (W_{sat}).

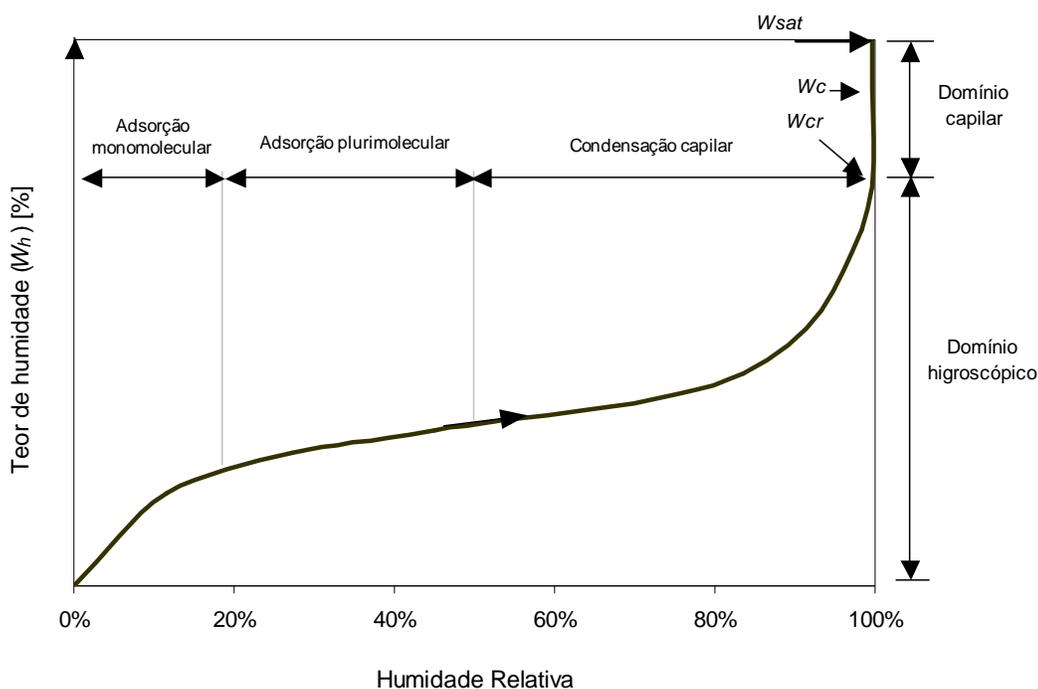


Fig. 1 - Curva típica de equilíbrio higroscópico de materiais porosos [5, 6,7]

Para muitos materiais, o **domínio higroscópico** é definido como o intervalo de 0 até 98% de HR; o **teor de água do material poroso** (W_h) é resultante da absorção do vapor de água até ao estado de equilíbrio a 98%. Se W_h tende para 0, o material não é higroscópico. Acima de 98% dá-se início à condensação capilar (condensação da humidade nos poros). Este

processo continua até um **teor de humidade crítico** (W_{cr}) ser estabelecido, que corresponde ao menor teor de humidade necessário para iniciar o transporte de humidade na fase líquida. Abaixo deste valor, o transporte de humidade dá-se unicamente na fase de vapor. O valor de teor de humidade crítico tem grande importância na velocidade de secagem dos materiais e é, em geral, elevado para materiais com distribuição de tamanho de poros menos homogénea [7,8].

O **teor de humidade capilar** (W_c) corresponde ao máximo teor de humidade possível que um material poroso pode absorver e reter nos seus capilares quando em contacto com água.

Tendo em conta a presença de ar no interior dos materiais, somente em experiências laboratoriais, através da aplicação de pressão e preenchimento dos poros com água, é possível atingir o **teor máximo de humidade de saturação** nos poros (W_{sat}).

A Fig. 1 ilustra ainda as diferentes etapas do processo de fixação de água por adsorção em materiais porosos [6]: fixação de uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros (adsorção monomolecular); fixação de várias camadas de moléculas de água sobre a primeira (adsorção plurimolecular) e condensação de água nos capilares de menor diâmetro (condensação capilar).

Ainda no domínio do humedecimento dos materiais porosos por transferência de vapor de água, vários trabalhos [4,8,9] têm referido as diversas fases do processo de humedecimento desde o estado seco até ao de saturação que, segundo Rose [10,11], se processa como ilustrado na Fig. 2.

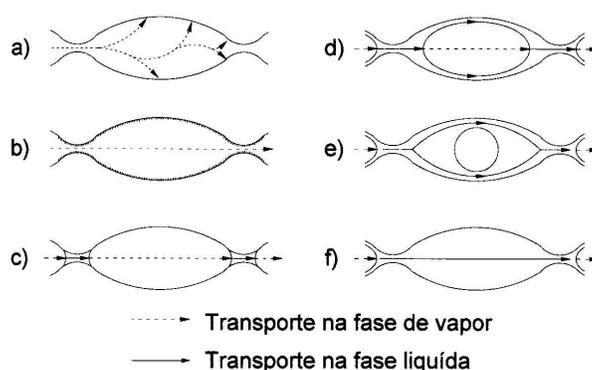


Fig. 2 - Transporte de humidade durante o humedecimento de materiais porosos (figura retirada de [9])

A seguir, transcreve-se sinteticamente da bibliografia consultada todo o processo de humedecimento de materiais porosos:

- a) Adsorção;
- b) Transmissão livre do vapor através dos poros;
- c) Condensação de vapor de água nos capilares de menor diâmetro;
- d) Constituição de uma película de água no estado líquido ao longo das paredes dos poros, sem que haja propriamente um escoamento líquido;
- e) Escoamento líquido não saturado;
- f) Escoamento líquido através dos poros saturados.

Quanto maior é a humidade relativa do ambiente, maiores são os diâmetros dos capilares saturados [4]. Enquanto os poros de menor diâmetro saturam completamente a HR= 98%, é necessário $HR \geq 98\%$ para que se dê o preenchimento com água dos capilares com raios $\geq 0,05\mu\text{m}$ [4]. Assim, os materiais com maior volume de pequenos poros são os mais higroscópicos.

Nos grandes poros não se dá a condensação a valores de HR inferiores a 98%, verificando-se, portanto, transporte de água por difusão de vapor e não sob a forma líquida [2].

De referir ainda que, quanto maior a higroscopicidade de um material, maior a quantidade de humidade absorvida e restituída.

É sabido que os sais solúveis são geralmente muito mais higroscópicos que as argamassas e os materiais porosos de suporte, como a pedra e o tijolo [12,13]. Assim, as argamassas com elevados teores de sais solúveis apresentam teores de humidade higroscópica muito mais elevados que as isentas de sais, sendo portanto facilmente distinguíveis. O teor de humidade higroscópica (HMC) é, inclusivamente, utilizado como método para identificar a presença de sais solúveis nesses materiais porosos e mesmo para uma avaliação do seu grau de contaminação com sais embora apenas em termos comparativos (para a mesma argamassa e idênticos tipos de sais) [12]. Recorde-se ainda que o cloreto de sódio (NaCl), presente na água do mar e na atmosfera das zonas marítimas, é um dos sais mais higroscópicos de entre os mais comuns nas construções. Assim, nas argamassas extraídas de obra e contaminadas com sais solúveis, a humidade higroscópica é condicionada principalmente pelo teor de sais solúveis, mascarando a influência da estrutura porosa do material.

No que se refere à secagem de um material poroso, estão envolvidos dois processos distintos: i) fase 1 – a taxa constante a água é trazida à superfície através dos poros maiores por capilaridade e é evaporada para o ar que circula; ii) fase 2 – a taxa decrescente ocorre a difusão do vapor e a difusão superficial, que são responsáveis pela remoção da água adsorvida a partir dos poros mais pequenos.

4 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Previamente à realização dos ensaios, as amostras de argamassas recolhidas nos edifícios foram limpas com a ajuda de um pincel ou levemente escovadas de forma a remover as partículas soltas de sujidades e a colonização biológica aderente.

Para a realização do ensaio de higroscopicidade, as amostras foram previamente secas a $70^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante.

Antes da realização do ensaio, procurou-se extrair o acabamento do reboco, – em geral constituído por uma camada de caiação, pintura ou barramento – com o objectivo de deixá-lo à vista, minimizando assim a influência do acabamento na absorção do vapor de água. No entanto, nalguns casos, não foi possível a extracção completa da camada de acabamento.

Usaram-se para termos de comparação argamassas com base em cal preparadas em laboratório e amostras de pedra calcária – material usado na confecção das maquetas de alvenaria de pedra irregular, em estudo no projecto em curso. Na altura da realização do ensaio, a argamassa de cal tinha idade superior a 90 dias, admitindo-se que se encontraria já carbonatada, na totalidade ou pelo menos até uma profundidade significativa.

As amostras usadas para comparação (argamassa de cal aérea e pedra calcária) e as amostras antigas são ilustradas na Fig. 3 e na Fig. 4.



Fig. 3 – Argamassa com base em cal e pedra calcária

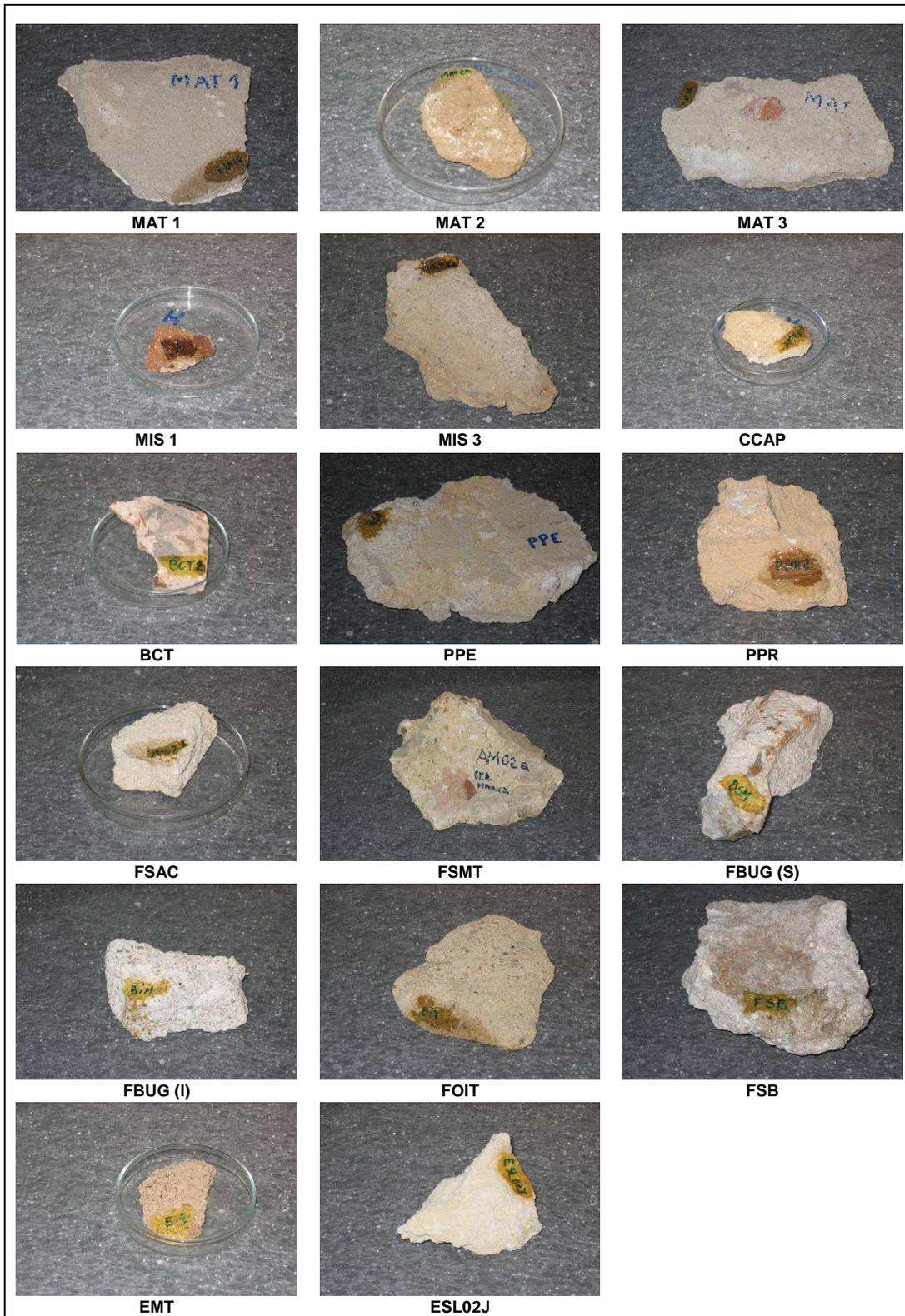


Fig. 4 – Aspecto das amostras antigas ensaiadas

5 - ENSAIOS REALIZADOS

As amostras de argamassas antigas extraídas de casos de estudo, depois de secas em estufa, foram colocadas numa câmara (Fig. 5), expostas a uma temperatura constante (20°) e a um incremento gradual de humidade relativa (30%, 50%, 70%, 90%, 95%) até atingir massa constante. Em seguida, ainda à mesma temperatura, as amostras foram expostas a um decréscimo da humidade relativa (95%, 90%, 70%, 50%, 30%), até atingir de novo massa constante.

Os provetes de argamassa de cal e de pedra constituintes das maquetas foram submetidos em simultâneo ao mesmo ensaio de higroscopicidade, sendo expostos às temperaturas de 30° C, 20° C e 10° C e às mesmas condições de humidade citadas anteriormente. Tendo em conta que o primeiro ciclo (temperatura = 30° C) é o que melhor representa as curvas de adsorção a partir do estado seco do provete³, o gráfico apresentado na Fig. 6 refere-se às humidades de equilíbrio para a temperatura de 30° C.

Realizaram-se também ensaios de absorção de água por capilaridade dos materiais da maqueta e das amostras recolhidas “in situ”. No caso dos materiais da maqueta utilizou-se o método descrito na Norma EN 1015-18 e efectuou-se o ensaio com água pura e também com água adicionada de 2,7 % de cloreto de sódio, para avaliar o efeito dos sais solúveis na absorção de água (Fig. 7e Fig. 8). Para as amostras recolhidas “in situ” usou-se o método da absorção de água por capilaridade de contacto, descrito em [14 e 15], desenvolvido para amostras irregulares e friáveis, sendo efectuado apenas com água.



Fig. 5 – Câmara usada para o ensaio, amostras em ensaio no interior da câmara

³ Os demais ciclos, com temperaturas de 20° e 10° apresentam valores de humidade de equilíbrio com alguma humidade residual do ciclo anterior, já que as amostras não voltaram a ser secas antes de reiniciar o ensaio.

6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios realizados sintetizam-se nos Quadros 2 a 5 e nas Figuras 6 a 24. Nos Quadros 2 e 3 ilustram-se valores de humidade higroscópica dos elementos constituintes da maqueta de alvenaria de pedra e das argamassas dos casos de estudo analisados para diferentes humidades relativas. No Quadro 4 apresentam-se os coeficientes de capilaridade dos elementos constituintes da maqueta (argamassa de cal e pedra). No Quadro 5 faz-se uma comparação dos valores de humidade higroscópica e coeficientes de capilaridade dos materiais constituintes da maqueta e das amostras recolhidas “in situ”, determinados num ambiente com 95%.

Tendo em conta o número de casos e a dificuldade para usar a mesma escala vertical para todos os gráficos de higroscopicidade dos grupos estudados, optou-se por homogeneizá-los usando 3 escalas: 5%, 10% e 25%. Os grupos com escalas de 10% e de 25% apresentam teores de sais significativos.

Os resultados de higroscopicidade das argamassas FBUG (S e I) são muito próximos, pelo que se apresenta a média destes valores. No que se refere à capilaridade, as velocidades de absorção são bem diferentes para cada uma das amostras (S e I), pelo que se apresentam as curvas individuais destas.

Quadro 2 – Humidade higroscópica dos provetes de argamassa e de pedra da maqueta para diferentes humidades relativas, a 30°C

Identificação do provete	Humidade higroscópica (%)								
	Adsorção				máx.	Desadsorção			
	30%	50%	70%	90%	95%	90%	70%	50%	30%
Argamassa	0,12	0,18	0,37	1,58	1,80	1,58	1,31	1,22	1,13
Pedra	0,11	0,18	0,28	0,52	0,74	0,58	0,33	0,22	0,14

Quadro 3 – Humidade higroscópica de amostras das argamassas dos casos de estudo para diferentes humidades relativas, a 20° C

Identificação da amostra		Humidade higroscópica (%)									
		Adsorção				máx.	Desadsorção				
		30%	50%	70%	90%	95%	90%	70%	50%	30%	
Grupo I	MAT 1	0,14	0,24	0,36	0,80	1,43	0,94	0,54	0,39	0,23	
	MAT 2	0,19	0,40	0,97	4,09	7,99	4,13	1,23	0,70	0,37	
	MAT 3	0,16	0,27	0,40	0,74	1,01	0,83	0,54	0,41	0,23	
	MIS 1	0,34	0,61	0,91	1,53	1,87	1,70	0,87	0,59	0,20	
	MIS 3	0,33	0,67	1,15	2,33	2,93	2,53	1,55	1,04	0,40	
	CCAP	0,25	0,47	0,80	1,99	2,85	2,23	1,07	0,78	0,60	
Grupo II	BCT	1,16	2,67	5,06	11,17	18,87	11,69	6,38	4,33	2,66	
Grupo III	PPE	0,07	0,14	0,26	0,79	1,54	0,93	0,37	0,25	0,15	
	PPR	0,05	0,10	0,18	0,49	0,89	0,55	0,24	0,14	0,08	
Grupo IV	FSAC	0,08	0,16	0,27	0,58	0,92	0,67	0,37	0,29	0,15	
	FSMT	0,36	0,74	1,36	3,50	5,73	4,11	1,88	1,18	0,74	
	FBUG	0,66	1,38	3,45	9,18	15,30	9,84	4,04	2,18	1,42	
	EMT	0,43	1,17	3,38	11,31	21,17	10,93	3,60	1,63	0,88	
	ESL-02J	0,05	0,10	0,17	0,41	0,62	0,42	0,21	0,14	0,07	
	FOIT	0,04	0,13	0,40	2,15	4,12	2,11	0,61	0,19	0,04	
	FSB	0,54	1,08	1,97	5,44	9,16	7,33	4,03	2,53	2,05	

Quadro 4 – Coeficientes de capilaridade da argamassa de cal aérea e da pedra calcária da maqueta

Identificação da amostra	Origem	Coeficiente de capilaridade*	Absorção total
		($kg/m^2 \cdot min^{1/2}$)	(kg/m^2)
		10min	24 h
Argamassa de cal aérea (água)	Maqueta	8,74	37,28
Argamassa de cal aérea (água + sal)		7,71	37,38
Pedra calcária (água)		0,10	1,89
Pedra calcária (água + sal)		0,16	1,61

*Coeficiente de capilaridade aos 10 minutos, determinado pelo método normalizado da EN 1015-18.

Quadro 5 – Humidade higroscópica versus coeficientes de capilaridade das argamassas estudadas

Identificação da amostra	Origem		Humidade higroscópica para HR=95% (%)	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$)		Absorção total (kg/m^2)	
				5 min	24 h		
Argamassa de cal aérea	Maqueta		1,80	8,74*	37,28*		
Pedra calcária	Maqueta		0,74	0,10*	1,89*		
Grupo I	MAT 1	Igreja Matriz de Viana do Alentejo	1,43	1,06	3,36		
	MAT 2		7,99	-	-		
	MAT 3		1,01	0,82	2,81		
	MIS 1	Igreja da Misericórdia de Viana do Alentejo	1,87	0,99	2,97		
	MIS 3		2,93	2,59	6,29		
		CCAP	Convento dos Capuchos	2,85	0,64	3,46	
Grupo II	BCT	Base Cetária de Tróia	18,87	0,37	4,57		
Grupo III	PPE	Parede pombalina – argamassa de enchimento		1,54	0,91	6,29	
	PPR	Parede pombalina – argamassa de reboco		0,89	1,31	4,96	
Grupo IV	FSAC	Forte de Sacavém		0,92	2,75	8,86	
	FSMT	Forte Santa Marta		5,73	0,44	6,61	
	FBUG	Forte do Bugio	(S) Superior muralha	14,65	1,17	14,29	
			(I) Inferior muralha	15,96	4,17	15,49	
	EMT	Castelo de Evoramonte – chaminé 2º piso		21,17	0,51	10,43	
	ESL-02J	Castelo de Pisece (Eslovênia) – torre principal		0,62	0,71	2,90	
	FOIT	Forte dos Oitavos		4,12	0,21	1,18	
FSB	Forte de São Bruno		9,16	0,18	4,28		

*Coeficiente de capilaridade aos 10 minutos, determinado pelo método normalizado da EN 1015-18.

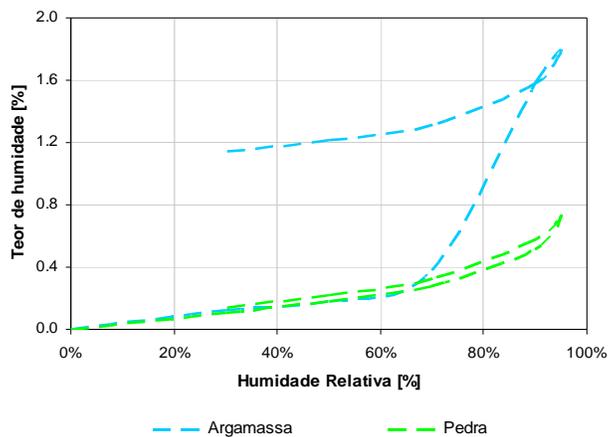


Fig. 6 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa de cal e areia e da pedra

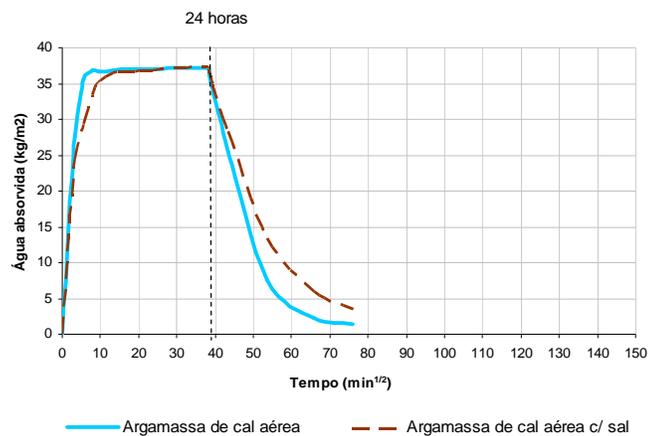


Fig. 7 – Absorção e secagem da argamassa de cal aérea

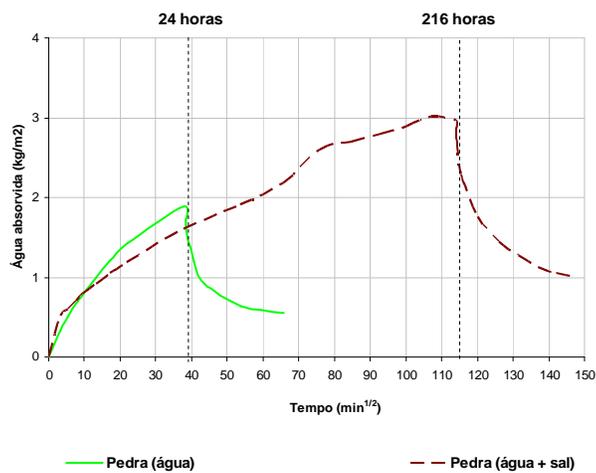


Fig. 8 – Absorção e secagem da pedra

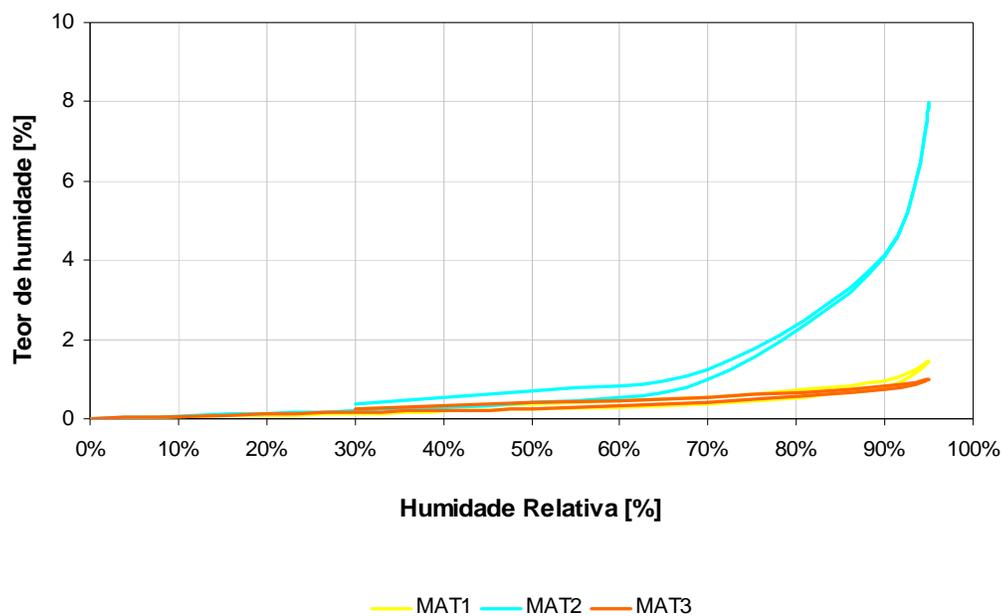


Fig. 9 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas MAT (grupo I)

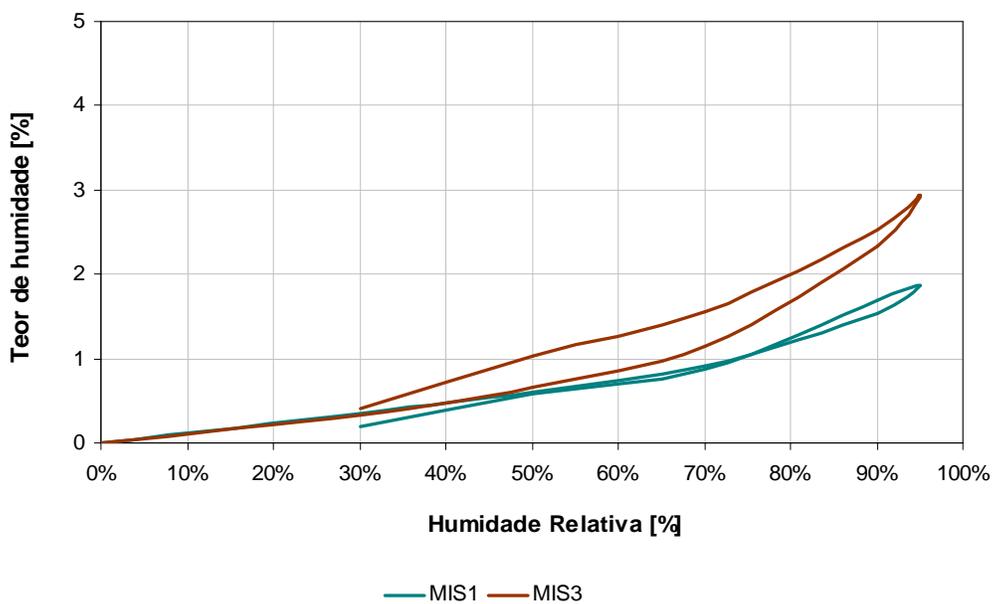


Fig. 10 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas MIS (grupo I)

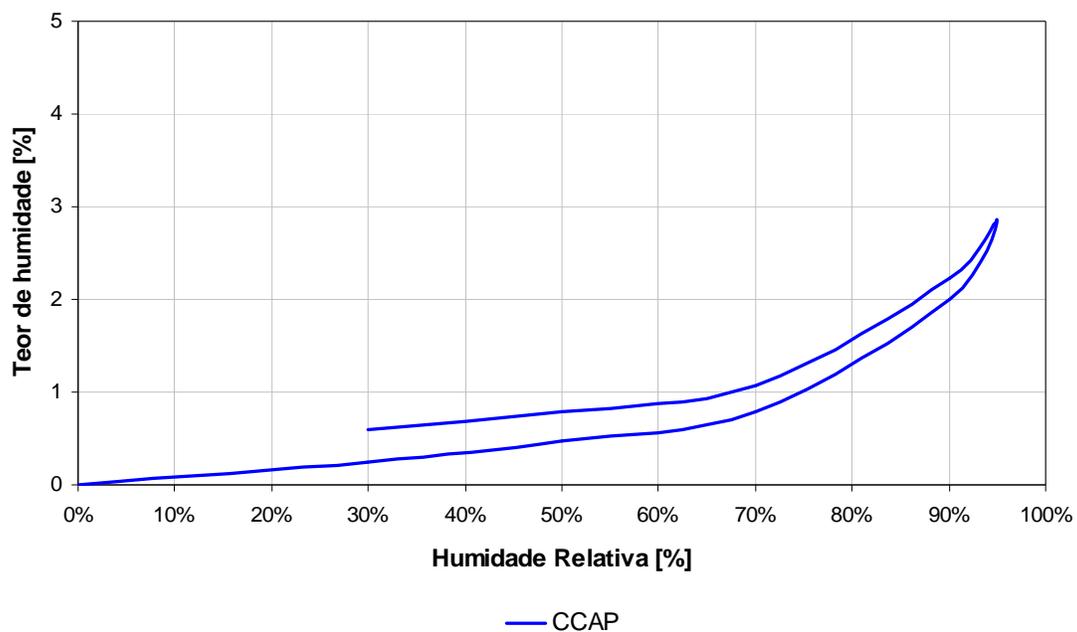


Fig. 11 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas CCAP (grupo I)

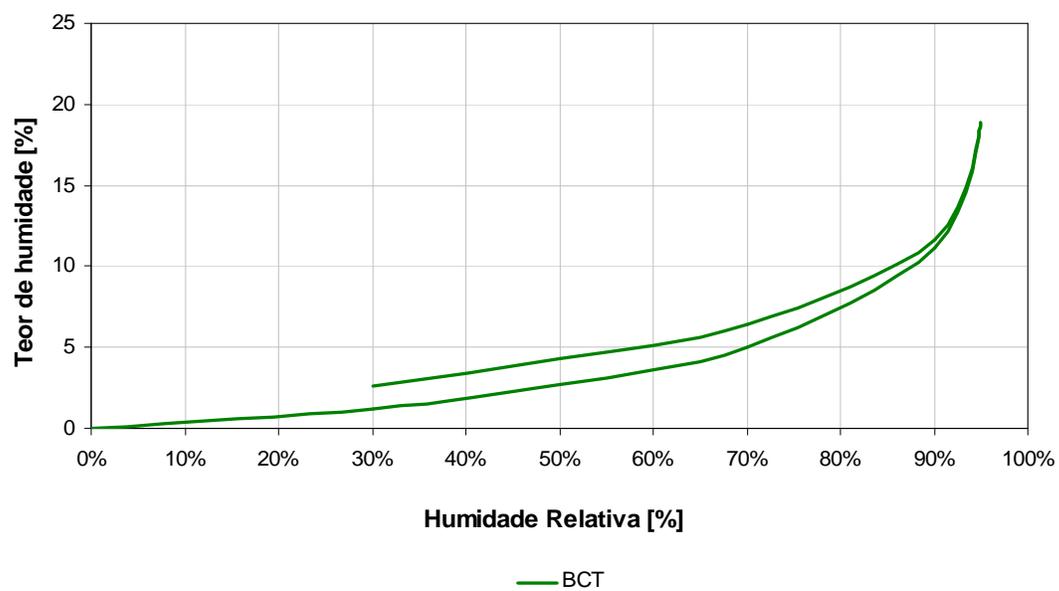


Fig. 12 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa BCT (grupo II)

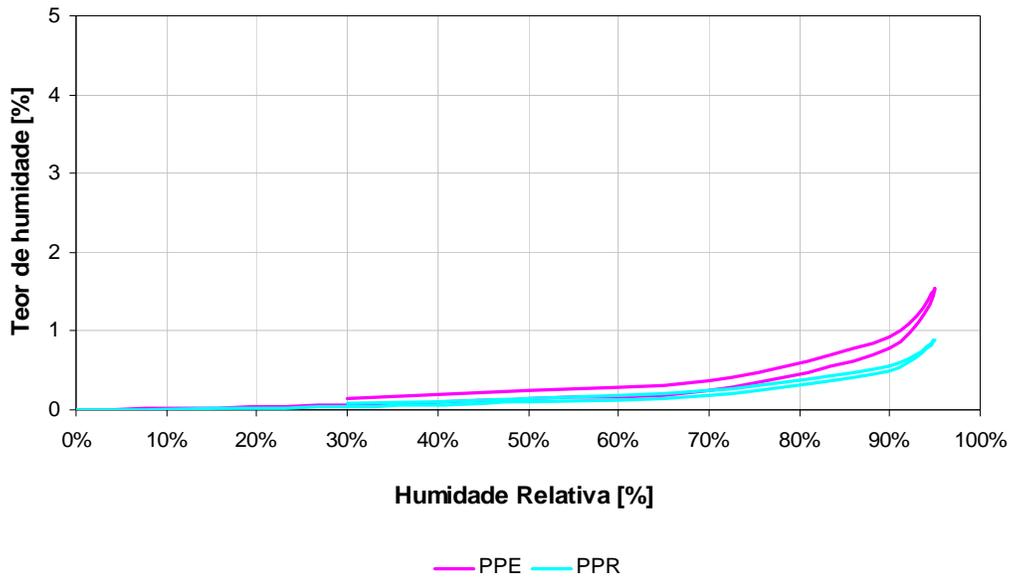


Fig. 13– Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas PPE e PPR (grupo III)

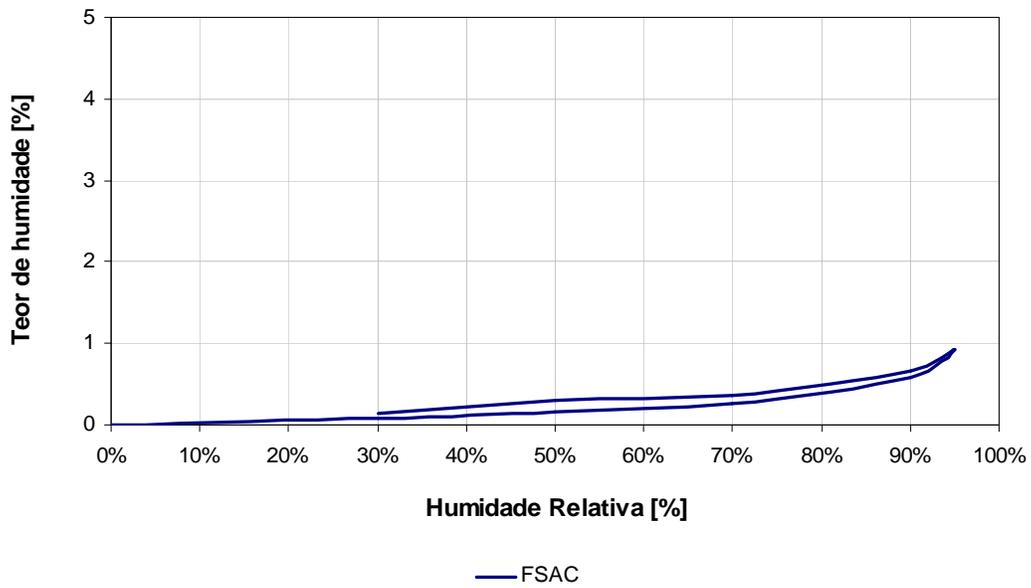


Fig. 14 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSAC (grupo IV)

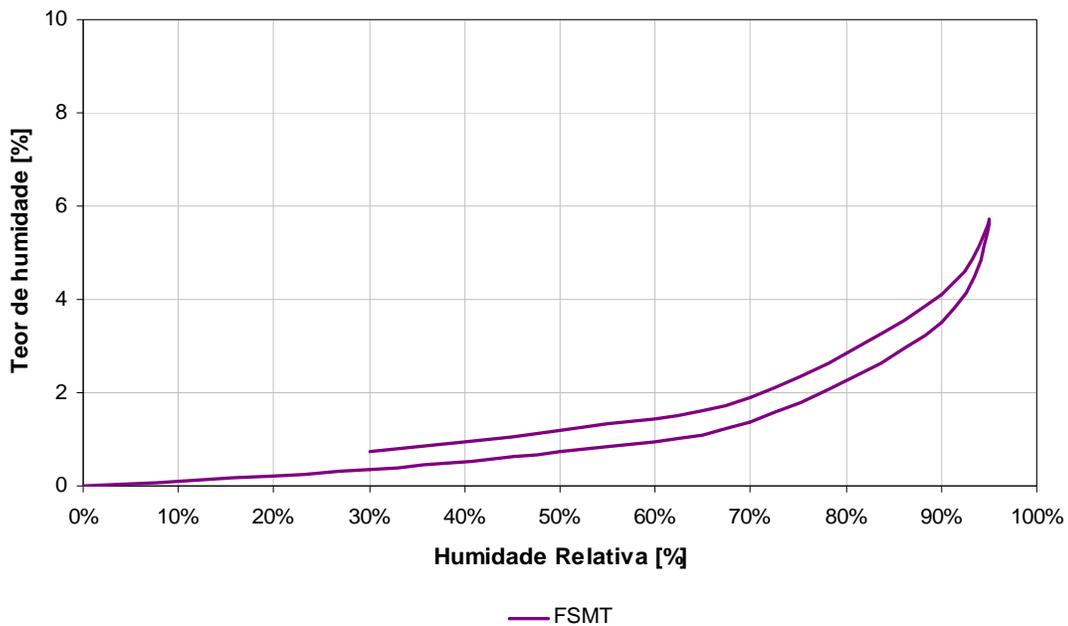


Fig. 15 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSMT (grupo IV)

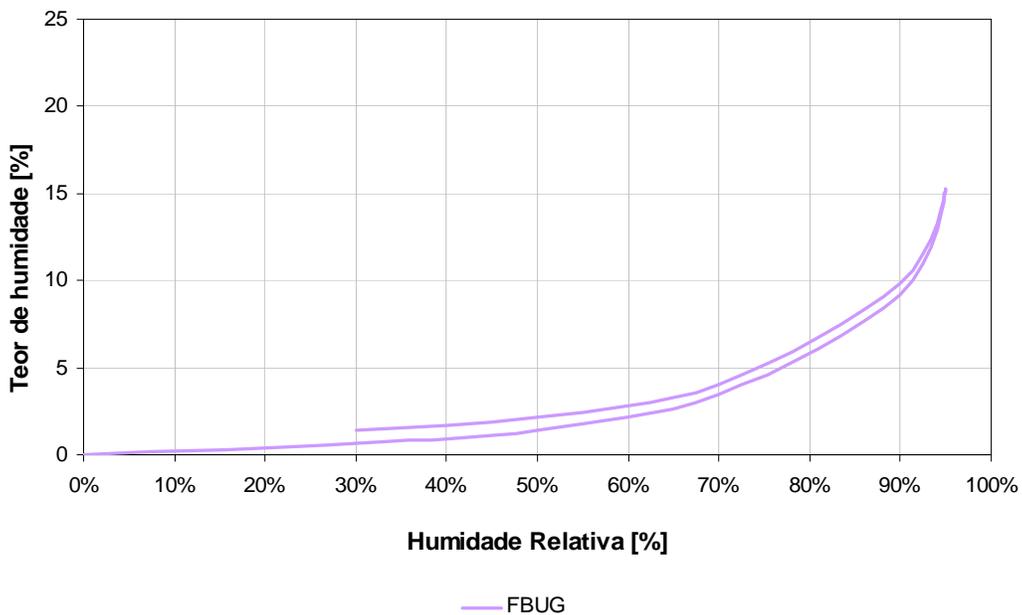


Fig. 16 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FBUG (grupo IV)

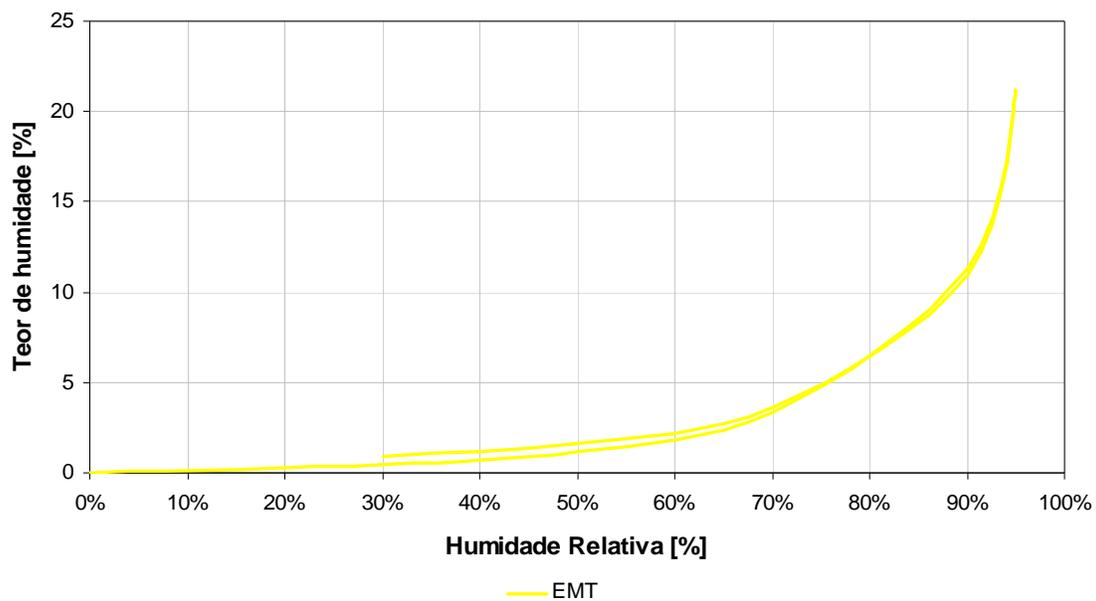


Fig. 17 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas EMT (grupo IV)

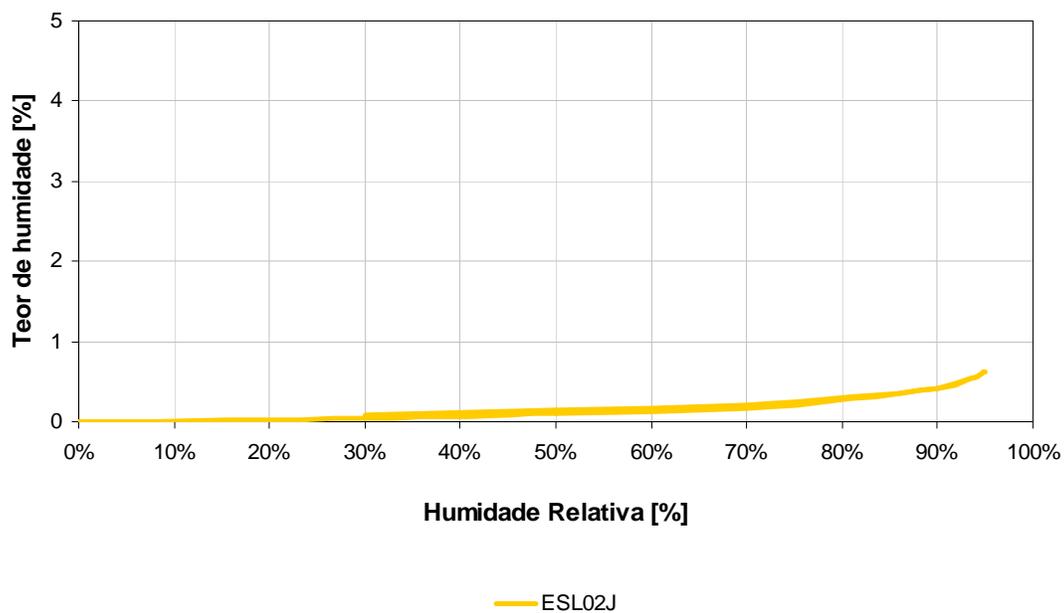


Fig. 18 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas ESL02J (Grupo IV)

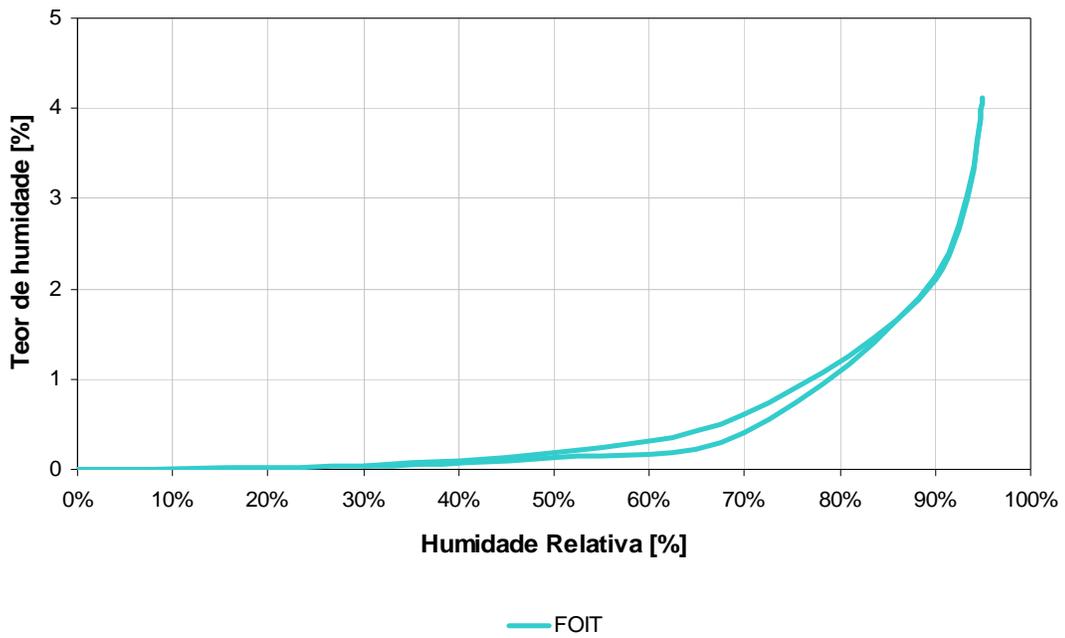


Fig. 19 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FOIT (Grupo IV)

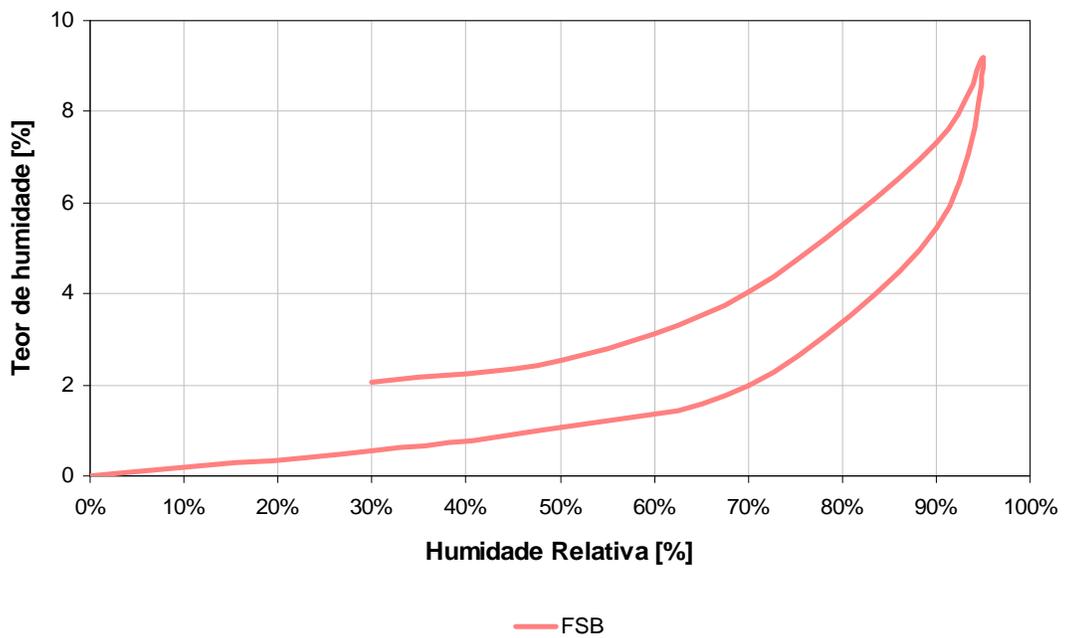


Fig. 20 – Curvas de equilíbrio higroscópico das argamassas FSB (Grupo IV)

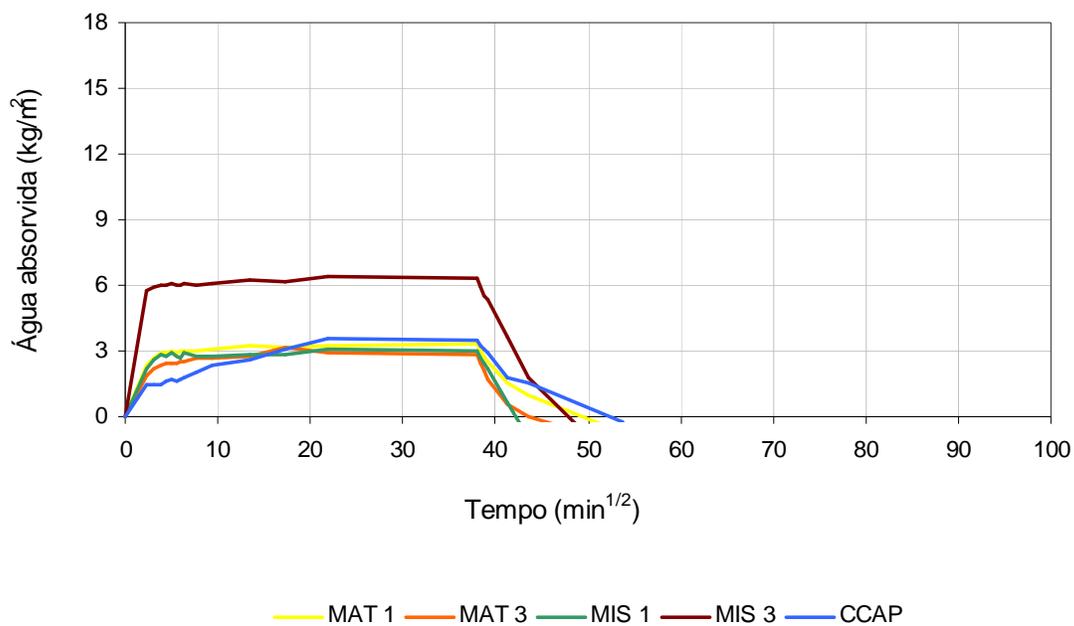


Fig. 21 – Absorção de água das amostras do grupo I

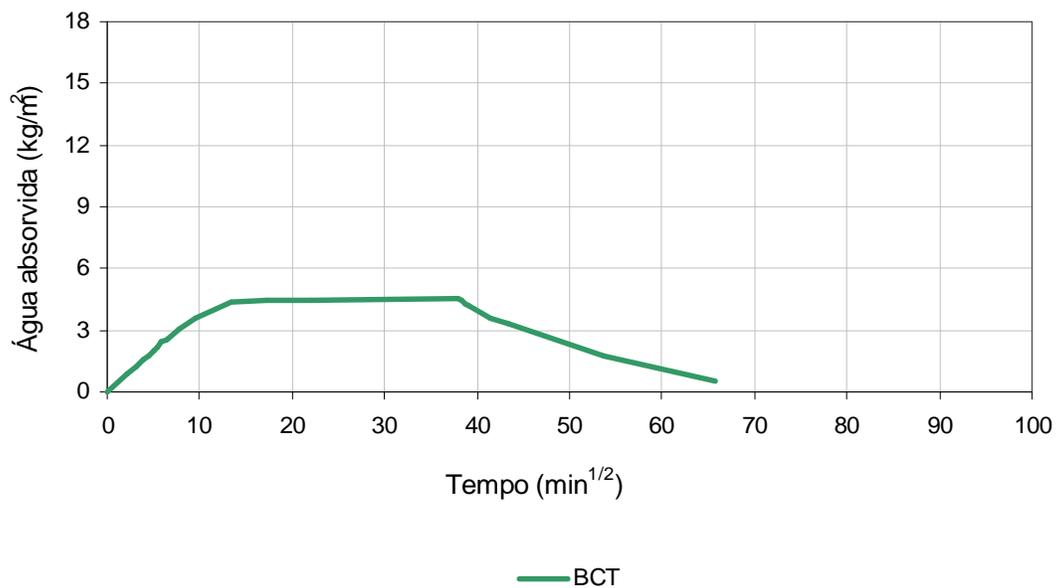


Fig. 22 – Absorção de água da amostra do grupo II

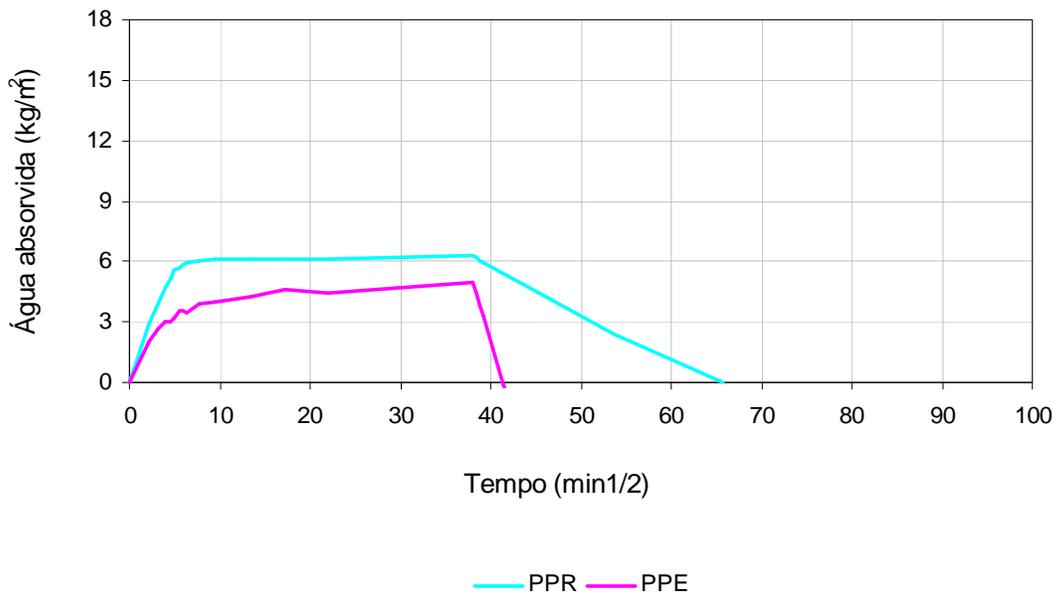


Fig. 23 – Absorção de água das amostras do grupo III

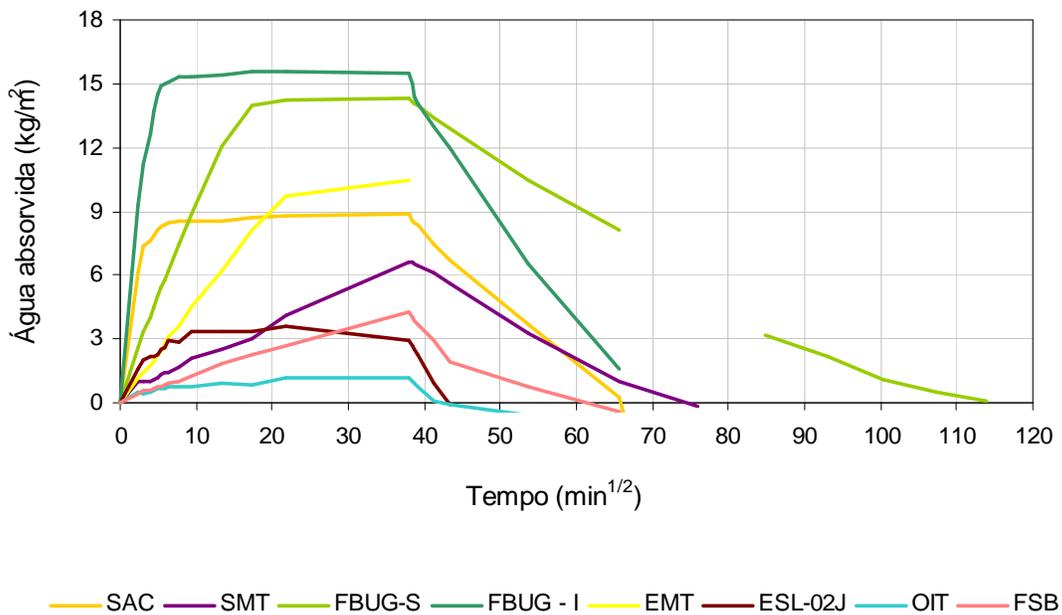


Fig. 24 – Absorção de água das amostras do grupo IV

7 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

7.1 – Materiais constituintes da maqueta, presumivelmente isentos de sais

- A argamassa de cal, como material higroscópico, apresenta uma isotérmica com forma aproximadamente de “S”, onde se evidenciam dois ramos distintos na fase de adsorção. No primeiro ramo, correspondente a baixos teores de humidade (até cerca de 60%), a curva é praticamente paralela ao eixo de HR. Nesta zona, um grande aumento da humidade relativa apenas tem como resultado aumentar ligeiramente o teor de humidade da argamassa. No segundo ramo, a curva é quase vertical, o que traduz que pequenas variações na humidade relativa do ambiente dão origem a grandes alterações da humidade higroscópica. Nesta mesma curva, verificam-se valores muito superiores da humidade de equilíbrio da isotérmica de desadsorção em relação à isotérmica de adsorção, traduzindo o fenómeno de histerese, referido antes.
- A pedra, como era de esperar, apresenta um comportamento bastante diferente da argamassa de cal. Não se verifica a mesma forma de “S” que apresenta a curva da argamassa de cal, sendo pouco acentuada a inclinação da curva de adsorção. A reduzida inclinação da curva durante a adsorção indicia variações ligeiras no teor de humidade mesmo para elevados valores de HR. Verifica-se ainda reduzida histerese, ou seja pouca diferença entre as humidades de equilíbrio nas fases de humedecimento (adsorção) e secagem (desadsorção).
- No que se refere aos valores de humidade higroscópica para as condições de 95% de humidade relativa, observa-se que a argamassa de cal é cerca de três vezes mais higroscópica que a pedra.
- Relativamente à absorção capilar, verifica-se, como era de esperar, que a absorção da argamassa de cal aérea se processa rapidamente desde os primeiros minutos de contacto da base do provete com a água, enquanto o transporte capilar na pedra é bastante lento. Não é possível tirar conclusões quanto à absorção total da pedra, porque o ensaio não foi prolongado até à saturação.
- As curvas de secagem da argamassa de cal e da pedra mostram que a secagem é mais lenta que a molhagem, apresentando a argamassa de cal uma secagem mais rápida que a pedra.
- Para ambos os materiais, o ensaio de absorção de água com cloreto de sódio revelou absorção e secagem ligeiramente mais lentas em relação ao ensaio com água pura, mas com curvas muito semelhantes.

- Em relação a estes dois materiais, verifica-se que a argamassa tem maior higroscopicidade, portanto, em princípio, maior volume de pequenos poros, mas maior coeficiente de capilaridade que a pedra, indicando que este último material terá menor volume global de poros capilares.

7.2 – Amostras extraídas de obra

De um modo geral, as curvas de equilíbrio higroscópico das amostras antigas não apresentam forma de S embora mostrem também maiores alterações de humidade higroscópica a partir de um valor de humidade relativa variável entre 60 e 90%.

a) Amostras do grupo I (conventos, igrejas)

- Das amostras do grupo I, a MAT 2 revelou higroscopicidade de ordem de grandeza superior às outras amostras do grupo. Nas condições de 95% HR, esta amostra apresentava-se húmida, revelando a ocorrência de condensação capilar, o que indica uma proporção significativa de pequenos poros ($< 0,05 \mu\text{m}$). O valor de humidade higroscópica indicia a existência provável de sais higroscópicos.
- As restantes amostras deste grupo, incluindo as duas outras amostras do mesmo monumento (MAT 1 e MAT 3), apresentam curvas higroscópicas com troço final da adsorção semelhante à da argamassa da maqueta, embora as amostras MIS3 e CCAP apresentem valores um pouco mais elevados.
- Nas amostras MIS 3 e CCAP verifica-se que as isotérmicas não coincidem, sendo bem visível o fenómeno de histerese.
- Os valores de absorção de água por capilaridade das amostras do grupo I são semelhantes entre si, com excepção da amostra MAT 2 (em que o ensaio não foi realizado) e a MIS 3, que mostra coeficiente de capilaridade e absorção total superiores. As medições de validação do método de ensaio do coeficiente de capilaridade por contacto conduziram a um factor C/C_{cc} de cerca de 2,5 [15]. Assim, os valores do coeficiente de capilaridade por contacto das amostras extraídas de obra devem ser comparados, não com os valores de coeficiente de capilaridade indicados no quadro para os provetes de materiais da maqueta, mas sim com esses valores divididos por 2,5: 3,5 (argamassa) e 0,3 (pedra). Verifica-se, assim, que a maior parte das amostras de argamassas de obra têm coeficientes de capilaridade inferiores aos da argamassa da maqueta, embora superiores aos da pedra. A

comparação da absorção total destas amostras com a dos materiais constituintes da maqueta não é possível devido à diferença de volume dos provetes.

b) Amostras do grupo II (construção Romana – edifício industrial)

- A amostra do grupo II apresenta higroscopicidade aos 95% HR muito elevada e revelou também condensação capilar nestas condições (Fig. 25). A higroscopicidade elevada indicia teores de sais solúveis particularmente elevados, facilmente explicáveis pelo contacto com soluções salinas, dado que a amostra BCT foi extraída de um depósito para salga de peixe. A existência de condensação capilar a 95% visível revela uma proporção significativa de pequenos poros ($< 0,05 \mu\text{m}$).
- A absorção de água desta amostra é, pelo contrário, muito reduzida, o que é explicável por se tratar de uma argamassa romana com composição especialmente cuidada para garantir uma boa impermeabilidade, nomeadamente através da adição de pó de tijolo e de fragmentos de tijolo.

c) Amostras do grupo III (parede pombalina)

- As amostras do grupo III apresentam higroscopicidades da mesma ordem de grandeza da argamassa da maqueta, embora mais reduzidas, sendo a de reboco, PPR, já próxima da higroscopicidade da pedra da maqueta. Estas argamassas não indiciam a presença de sais higroscópicos, o que é consistente com o facto de serem argamassas interiores e com o tipo de uso e localização do edifício.
- A histerese é visível na amostra PPE.
- Estas amostras apresentam curvas de absorção / secagem de água semelhantes às dos outros grupos e coeficientes de capilaridade da mesma ordem de grandeza.

d) Amostras do grupo IV (fortes, castelos)

- As amostras do grupo IV apresentam, de um modo geral, higroscopicidades muito elevadas, indiciando a presença de sais higroscópicos. Este facto é explicável pela sua localização em Fortes junto ao mar no caso das amostras FSMT, FBUG, FOIT e FSB. A amostra EMT foi extraída da chaminé do castelo de Evoramonte e verificou-se, na altura da recolha, a presença de eflorescências em grande quantidade em

argamassas novas aplicadas noutras zonas do mesmo edifício, indicando a contaminação da alvenaria antiga com sais.

- A argamassa com características hidrófugas (amostra FOIT) apresenta valores iniciais de humidade de equilíbrio inferiores aos da argamassa de cal. A partir de 70% de HR, passa a absorver mais humidade que a argamassa de cal, chegando aos 95% com o dobro do valor absorvido por esta. Na fase final da desadsorção (aos 30% de HR), contrariamente à argamassa de cal, a amostra FOIT volta a alcançar o seu valor inicial, o que significa que enquanto a argamassa de cal manteve retida ainda alguma humidade adsorvida, a argamassa hidrófuga libertou todo o vapor adsorvido. Isto pode estar relacionado com as diferentes características de composição da argamassa, porosidade e distribuição do tamanho de poros.
- Refere-se ainda que durante a realização do ensaio, sob humidade relativa de 95%, se observou alguma condensação de água das amostras EMT e FOIT (Fig. 25), cujos teores de água são superiores a 20% e a 4%, respectivamente, indiciando percentagens significativas de pequenos poros ($< 0,05 \mu\text{m}$).
- Apenas as amostras FSAC – do Forte de Sacavém, que fica situado mais afastado do mar (recaído em relação ao Rio Tejo e relativamente longe da foz deste) – e ESL-02J – de um castelo da Eslovénia, situado no interior daquele País – têm curvas higroscópicas indicativas de argamassas sem cristais salinos. Estas amostras apresentam teores de água higroscópica inferiores ao da argamassa da maqueta e próximos da pedra.
- No que se refere à absorção de água, as amostras muito higroscópicas mostram coeficientes de capilaridade variáveis, sendo a FSMT, a EMT e a FSB as que apresentam menor coeficiente de capilaridade, a par com a argamassa hidrofugada FOIT. Esta diferença marcada entre o comportamento à água líquida e ao vapor de água confirma que a elevada higroscopicidade se deve aos sais existentes no seu interior. As amostras FBUG, também muito higroscópicas, têm coeficientes de capilaridade um pouco mais elevados, principalmente no caso da extraída da zona inferior da muralha. As argamassas FSAC e ESL-02J, com higroscopicidades próprias de argamassas sem sais, têm coeficientes de capilaridade intermédios mas bastante diferentes, sendo o do Forte de Sacavém bastante mais elevado. Durante o ensaio, verificou-se ainda, em zonas localizadas da amostra FSB, à humidade relativa de 95%, o surgimento de pequenos cristais salinos (Fig. 26).



Fig. 25 – Amostras BCT, EMT e FOIT, respectivamente. Condensação à 95% de HR

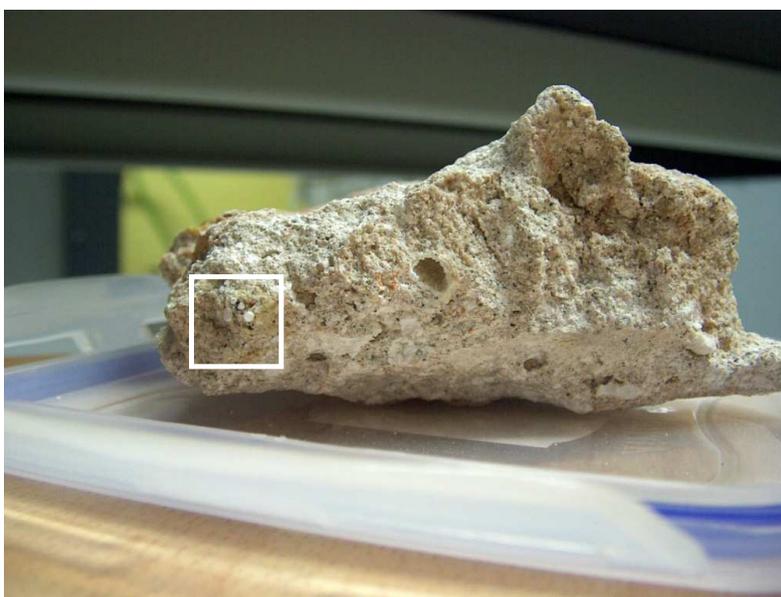


Fig. 26 – Pormenor dos cristais de sal à superfície da amostra FSB

Síntese dos resultados:

Parte das amostras recolhidas *in situ* contêm teores significativos de sais higroscópicos, como é revelado pelas higroscopicidades, de ordem de grandeza superior à da argamassa da maqueta e às das restantes amostras. Estes valores variam entre cerca de 4% e 21%. O facto de essas amostras manterem coeficientes de capilaridade da mesma ordem de grandeza dos correspondentes às outras amostras extraídas de obra – variando entre 0,2 e 4,1 kg/m².min^{1/2} – confirma a influência dos sais na higroscopicidade.

A localização destas amostras junto ao mar, ou o seu uso em actividades industriais envolvendo sal (salga de peixe) explica os elevados teores de sais que contêm.

Das amostras consideradas isentas de teores significativos de sais, devido aos valores moderados de higroscopicidade, estes valores variaram entre 0,6% e 3%. Para as mesmas amostras, os coeficientes de capilaridade variaram entre 0,6 e 2,8 kg/m².min^{1/2}.

De um modo geral, a maiores higroscopicidades correspondem maiores capilaridades (Fig. 27). Exceptuam-se as amostras CCAP – que provavelmente ainda conterà um baixo teor de sais higroscópicos, o que explicaria uma higroscopicidade relativamente elevada em relação ao baixo coeficiente de capilaridade – e FSAC – que poderá ter predominância de grandes poros, o que implica uma elevada absorção de água que não se traduz em grande higroscopicidade.

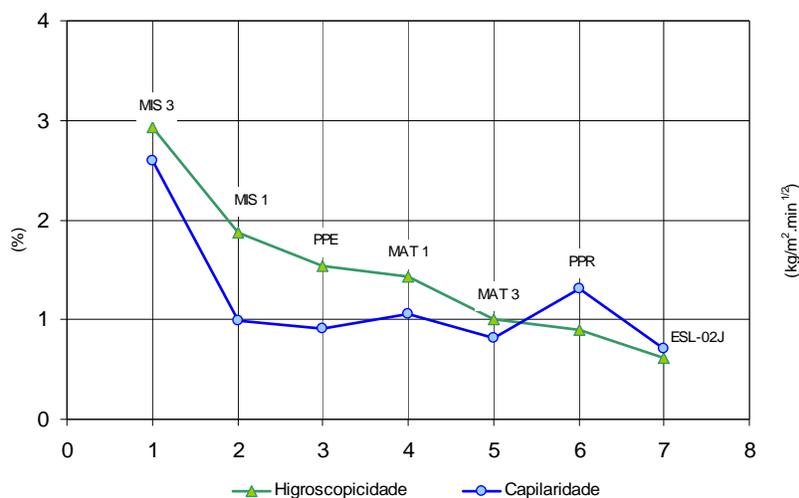


Fig. 27 – Higroscopicidade *versus* Capilaridade das argamassas mais higroscópicas

A ocorrência de condensação capilar mostra que as amostras MAT 2, BCT, EMT e FOIT têm uma proporção significativa de pequenos poros (< 0,05 μm). No entanto, todas estas amostras são muito higroscópicas, pelo que os teores de sais que contêm podem influenciar a estrutura porosimétrica do material.

As amostras MIS 3, CCAP, BCT, PPE, FSMT e FSB apresentam isotérmicas de adsorção / desadsorção não coincidentes, revelando uma histerese significativa, ou seja, uma maior quantidade de água conserva-se adsorvida durante a fase de secagem em relação à fase de humedecimento. Este fenómeno não tem ainda uma explicação global, parecendo indicar a existência de proporções significativas de pequenos poros. Com efeito, os pequenos poros saturam mais rapidamente que os grandes poros, originando, portanto, maior influência da camada de moléculas de água adsorvidas no regime de transporte de água. No entanto, como algumas destas argamassas têm coeficientes de capilaridade relativamente elevados, isso significa que têm, também, uma gama relevante de grandes poros. Assim, a maior histerese indicará que existem gamas mais extensas de raios dos poros.

8 - CONCLUSÕES

Os ensaios realizados evidenciam os seguintes aspectos:

A argamassa de cal tem uma adsorção higroscópica inicialmente lenta, mas bastante rápida a partir de 70% de humidade relativa. A secagem (desadsorção) processa-se a uma taxa relativamente constante. As fases de adsorção e desadsorção da pedra decorrem de forma mais lenta que as da argamassa, como era de esperar.

No que diz respeito à absorção de água líquida, a existência de cloreto de sódio dissolvido na água modifica o comportamento à água, nomeadamente atrasando a absorção e a secagem dos materiais, quer no caso da cal aérea quer no caso da pedra da maqueta.

As amostras antigas analisadas apresentam valores de higroscopicidade extremamente variável. Algumas destas amostras, devido aos baixos valores de humidade higroscópica e à forma das curvas de adsorção e desadsorção, apresentam comportamento similar à pedra. Tendo em conta que a higroscopicidade é influenciada também pela estrutura porosa (porosidade, distribuição porosimétrica, superfície específica) do material, é possível que as argamassas mais antigas, ao estarem mais carbonatadas e apresentarem poros de menores dimensões, se comportem de forma semelhante à pedra.

O fenómeno de histerese parece ser pouco pronunciado para algumas amostras de argamassa estudadas. Nestes casos os teores de humidade higroscópica são muito próximos entre si para as mesmas condições de ambiente, tanto na adsorção como na desadsorção. Nos casos em que se verifica uma histerese mais significativa, as amostras podem apresentar gamas mais alargadas de raios dos poros.

A análise das isotérmicas das amostras consideradas isentas de teores significativos de sais, devido aos valores moderados de higroscopicidade, revela valores variáveis entre 0,6% e 3%. Os resultados dos ensaios de absorção de água mostram, para as mesmas amostras, coeficientes de capilaridade variáveis entre 0,6 e 2,8 kg/m².min^{1/2}. De um modo geral, os valores de higroscopicidade e capilaridade variam no mesmo sentido, embora essa relação possa ser invertida por outros factores, como seja a predominância de grandes poros.

A análise da humidade higroscópica de um material juntamente com outras características de comportamento à água (absorção capilar, teor de água, porosidade) pode permitir uma melhor compreensão dos fenómenos relacionados com o transporte de água sob a forma líquida e de vapor no interior das paredes e conseqüentemente uma melhor interpretação dos efeitos da humidade sobre estas. No entanto, nas amostras de argamassa extraídas de

obra, a influência da estrutura porosa da argamassa na humidade higroscópica é mascarada pela presença de sais solúveis com higroscopicidade muito mais elevada.

Estes resultados serão numa fase seguinte cruzados com os resultados dos ensaios de porosimetria de modo a obter-se uma visão mais global sobre o comportamento higrício dos materiais constituintes das paredes antigas.

9 - NOTA FINAL

Os ensaios de higroscopicidade e os ensaios de absorção capilar tiveram a colaboração do Auxiliar Técnico de Ensaios José Carlos Matos e da Técnica de Apoio à Investigação Dora Santos (bolseira) do Departamento de Edifícios do LNEC.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Junho de 2007.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de
Revestimentos e Isolamentos



Jorge Grandão Lopes

O Director do Departamento
de Edifícios



José A. Vasconcelos Paiva

AUTORIA



Ana Cristian Magalhães
Eng.^a Civil, Bolseira de Investigação



Maria do Rosário Veiga
Eng.^a Civil, Investigadora Principal

BIBLIOGRAFIA

1. MATIAS, L.; MAGALHAES, A.; VILHENA, A.; SANTOS, C.; VEIGA, M. – Ensaios de capilaridade e análise termográfica para visualização da secagem de um murete de alvenaria de pedra. Lisboa: LNEC, Janeiro de 2007. Relatório 22/2007-NRI.
2. KUNZEL, H.M. – Simultaneous heat and moisture transport in building components. One – and two – dimensional calculation using simple parameters. Tese de doutoramento apresentada ao Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, 1995.
3. COHAN, L.H. – Sorption hysteresis and the vapour pressure of concave surfaces. Journal of the American Chemical Society, 60, 433 (1938).
4. PAIVA, J.V. – Humidade nas edificações. Lisboa: LNEC, 1969. Tese apresentada a concurso para Especialista do LNEC.
5. VALEN M.S. – Moisture transfer in organic coatings on porous materials. The influence of varying environmental conditions. Tese de doutoramento apresentada à Universidade de Ciência e Tecnologia da Noruega, Trondheim, 1998. (artigo disponível em <http://www.bygg.ntnu.no/batek/personal/valen/dravh.htm>).
6. RAMOS, Nuno – Modelação da variação da humidade relativa no interior dos edifícios. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
7. VEAS, Leonardo – Development and application of a methodological model that allow evaluate and compare the behaviour of external walls exposed to moisture phenomenons. Tese de doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências Aplicadas da Universidade Católica de Louvain. Abril de 2006.
8. GONÇALVES, T.; PEL L.; RODRIGUES J.D. – Drying of salt-contaminated masonry: MRI laboratory monitoring. Environmental Geology Journal, 52, Dec. 2007, p. 293-302.
9. VILHENA, A. – Anomalias devido à humidade na superfície corrente de paredes. Dissertação de mestrado apresentada na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2002.

10. ROSE, D.A. – Water movement in porous materials. Part 1: Isothermal vapour transfer. British Journal of Applied Physics, 14 (5), May 1963, p.256-262. (citado por [4])
11. ROSE, D.A. – Water movement in porous materials. Part 2: The separation of the components of water movement. British Journal of Applied Physics, 14 (8), August 1963, p. 491–496. (citado por [4])
12. GONÇALVES, T.; RODRIGUES, J. – Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behaviour. Part 1: Fundamentals, scope and accuracy of the method. J. of Cultural Heritage, 7, p. 79-84.
13. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE) – Rising damp in walls: diagnosis and treatment. Garston (UK): BRE, 1989. BRE Digest 245.
14. SANTOS, D.; VEIGA, M. Rosário – Ficha de Ensaio de revestimentos de paredes FE Pa 40. Revestimentos de paredes. Ensaio de absorção de água por capilaridade para amostras irregulares e friáveis. Lisboa: LNEC, Agosto de 2004.
15. VEIGA, M. Rosário; MAGALHAES, Ana Cristian; BOSILIKOV, Violeta B. - Capillary tests on historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results, in Proc. 13th Int. Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, 2004, 10 pp.

