

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES E COMUNICAÇÕES

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
NÚCLEO DE REVESTIMENTOS E ISOLAMENTOS

Procº 0803/14/15139 e 0803/14/15752

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO DE
RESULTADOS.**

RELATÓRIO /2006 — NRI

Lisboa, Agosto de 2006

Estudo efectuado no âmbito do Projecto “Desenvolvimento de metodologias para a
avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas”

(FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia)
I&D
EDIFÍCIOS

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO
DE RESULTADOS.**

Resumo

O conhecimento das características físicas das argamassas antigas é muito importante no momento de seleccionar argamassas de substituição ou reparação e planear adequadamente a intervenção. É necessário definir métodos de ensaio de caracterização aplicáveis às amostras irregulares e friáveis para avaliar tais características.

Neste relatório descreve-se um método de ensaio para avaliar a resistência à compressão e apresentam-se e analisam-se alguns resultados obtidos em amostras de argamassas antigas de Portugal.

A comparação com resultados obtidos para argamassas novas, usando o mesmo método e, em paralelo, o método preconizado pela Norma Europeia, ajuda a extrair conclusões sobre as possibilidades de uso do método.

Os resultados dos ensaios são ainda correlacionados com os valores das várias características físicas e químicas estudadas.

**RESISTANCE EVALUATION OF HISTORIC MORTAR SAMPLES
EXTRACTED FROM SITE. METHODOLOGY AND CORRELATION OF
RESULTS.**

Abstract

The knowledge of physical characteristics of ancient mortars is very important to select substitution or repair mortars and to plan adequately the intervention. There is a need to define characterization test methods applicable to irregular, friable samples to assess those characteristics.

In the present work a test method is described to evaluate the compressive resistance and some results from Portuguese old mortars are presented and discussed.

A comparison with results obtained for new mortars, using the same method and also the method proposed by EN standards, helps to extract conclusions of the method's possibilities.

The test results are also correlated to the values obtained for several physical and chemical characteristics studied.

**ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE D' ÉCHANTILLONS DE MORTIERS
HISTORIQUES EXTRAITS DE L'ŒUVRE. MÉTHODOLOGIE ET
CORRÉLATION DE RÉSULTATS.**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO
DE RESULTADOS.**

(Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002)

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. TÉCNICA DE ENSAIO.....	3
2.1 Generalidades	3
3. DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS ENSAIADAS.....	5
4. DEGRADAÇÃO DAS ARGAMASSAS	9
5. RESULTADOS OBTIDOS	15
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS	18
6.1 Argamassas novas	18
6.2 Argamassas antigas e argamassas da 2ª metade do século XX	19
6.2 Análise global	26
7. SÍNTESE DA ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
8. CONCLUSÕES	31
9. NOTA FINAL	32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO
DE RESULTADOS.**

ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
1. Características dos edifícios antigos (com revestimentos antigos)	11
2. Características dos edifícios antigos (com revestimentos da 2ª metade do século XX)	12
3. Características das amostras analisadas Características dos edifícios antigos	13
4. Características das argamassas preparadas em laboratório usadas para validação do método	15
5. Características de absorção capilar das argamassas preparadas em laboratório ..	15
6. Resultados de resistência à compressão das amostras recolhidas "in situ"	16
7. Composições mais usadas vs produtos de degradação mais comuns dos revestimentos estudados	24
8. Análise global das argamassas antigas	27
9. Argamassas antigas. Quadro síntese	28

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO
DE RESULTADOS.**

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
1. Absorção de água de amostras de argamassas preparadas em laboratório. Método das argamassas irregulares	17
2. Absorção de água de amostras de algumas argamassas antigas. Método das argamassas irregulares	17
3. Argamassas novas. Correlação entre as resistências à compressão obtidas através dos métodos normalizado e adaptado	18
4. Absorção capilar por contacto aos 5 min vs Resistência (método adaptado)	19
5. Amostras antigas Absorção capilar por contacto durante os 5 primeiros minutos <i>versus</i> resistência à compressão	20
6. Absorção capilar por contacto aos 5 primeiros minutos <i>versus</i> resistência à compressão das amostras de argamassas da 2ª metade do século XX	21
7. Resistência à compressão das argamassas antigas <i>versus</i> época de construção do edifício	22
8. Resistência à compressão das argamassas antigas <i>versus</i> tipo de agregado usado na composição da argamassa	23
9. Resistência à compressão de argamassas com um só tipo de agregado na sua composição: agregado de natureza siliciosa.....	23
10. Percentuais das composições mais usadas.....	24
11. Composições mais comuns <i>vs</i> resistência à compressão	26
12. Representação esquemática dos intervalos dos coeficientes de capilaridade por contacto aos 5 minutos (Ccc5) e da resistência à compressão (Rc) apresentados no quadro 11	28

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS
HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO
DE RESULTADOS.**

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Pormenor de amostras preparadas com a argamassa de confinamento sobre as duas faces mais paralelas das amostras	3
2. Conjunto de amostras preparadas para o ensaio de compressão	4
3. Amostras antes do ensaio de resistência à compressão	4
4. Forte do Bugio.....	6
5. Forte de São Bruno.....	6
6. Igreja Matriz de Viana do Alentejo	6
7. Torre do Rio (Mértola)	7
8. Sé de Elvas	7
9. Recolha e estado de conservação de alguns casos de estudo	8
10. Forte dos Oitavos (Cascais). Degradação elevada do revestimento: erosão, perda de coesão, manchas de humidade, eflorescências e criptoflorescências	9

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE ARGAMASSAS HISTÓRICAS RECOLHIDAS EM OBRA. METODOLOGIA E CORRELAÇÃO DE RESULTADOS.

1. INTRODUÇÃO

De uma forma geral as intervenções a realizar em paredes de edifícios antigos implicam o uso de revestimentos de substituição ou de reparação compatíveis e duráveis e, portanto, com comportamento físico-químico semelhante aos materiais existentes. Importa assim conhecer as características químicas, físicas e mecânicas das argamassas antigas.

No que se refere à caracterização química e mineralógica de revestimentos antigos, as técnicas actuais permitem a determinação bastante rigorosa da composição relativamente aos constituintes minerais existentes e aos compostos químicos formados que podem causar a degradação.

Estas informações, no entanto, não são suficientes para se reproduzir uma argamassa antiga com um comportamento semelhante, tendo em conta que argamassas com composição idêntica podem ter comportamentos muito diferentes consoante as condições de aplicação, as tecnologias usadas, as características do suporte, etc. [1].

No que se refere às características físicas e mecânicas das argamassas, existem algumas dificuldades na sua avaliação já que, muitas vezes, é impossível extrair amostras de revestimentos antigos em quantidade suficiente para a realização de ensaios e que, mesmo quando essa extracção é possível, a utilização directa de métodos normalizados é frequentemente impraticável, devido à sua reduzida coesão e à sua forma irregular.

O LNEC, num projecto conjunto com a Universidade de Ljubljana (Eslovénia) e com o Instituto de Mecânica Aplicada (República Checa), procurou desenvolver um método simples de ensaio para avaliar a resistência à compressão de amostras irregulares recolhidas “in situ” [2], que consiste numa adaptação do método de determinação da resistência à compressão preconizado pela Norma Europeia.

No presente trabalho descreve-se o método de ensaio desenvolvido, apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos em argamassas novas preparadas em laboratório e em diversas amostras de argamassas antigas recolhidas “in situ”, comparam-se e

correlacionam-se os resultados obtidos com outras características das argamassas. Finalmente faz-se uma comparação da classificação quanto ao estado de conservação inicialmente atribuída por análise visual com uma classificação resultante do conjunto das análises feitas e extraem-se conclusões sobre as possibilidades de uso do método.

O presente trabalho insere-se no âmbito de dois Projectos de Investigação co-financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), em curso no LNEC: POCTI/ECM/46323/2002 – “Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas” – e POCI/HEC/57915/2004 – “Caracterização e Conservação de Argamassas Tradicionais Históricas de Edifícios Religiosos do Alentejo”.

2. TÉCNICA DE ENSAIO

2.1 Generalidades

O método consiste na realização do ensaio de compressão em amostras irregulares utilizando a prensa convencional para ensaios de compressão de provetes prismáticos de reboco (EN 1015-11 [3]).

a) Preparação das amostras, argamassa de confinamento

Após a selecção de exemplares de amostras recolhidas "in situ", estas são suavemente escovadas com o objectivo de remover partículas soltas de sujidade e de colonização biológica e são preparadas para o ensaio.

Para adaptar a forma da amostra recolhida à máquina recorre-se a uma argamassa de confinamento que deve ter resistência superior à da amostra de revestimento que se pretende ensaiar. Assim, é aplicada sobre duas faces paralelas (aproximadamente) das amostras irregulares uma camada uniforme de uma argamassa de cimento e areia ao traço volumétrico 1:3 (CEM II, 32,5: areia) – "argamassa de confinamento" – com o objectivo de adaptar a amostra aos "pratos" do aparelho de compressão usado nos ensaios de resistência à compressão preconizados na EN 1015-11 (fig. 1).



Fig. 1 – Pormenor de amostras preparadas com a argamassa de confinamento sobre as duas faces mais paralelas das amostras

A área e a espessura da argamassa de confinamento em contacto com a superfície das amostras de revestimento podem variar em função das irregularidades destas e da altura disponível na máquina de compressão. De uma forma geral, deve-se assegurar uma argamassa com superfície plana e tanto quanto possível perpendicular ao eixo da máquina de compressão (fig. 2).

A figura 3 ilustra exemplos de amostras irregulares antes do ensaio de resistência à compressão.

The figure consists of two side-by-side photographs of a blue mechanical testing machine, likely a universal testing machine (UTM), used for material testing. The machine has a blue frame with a red and white horizontal band near the base. A black cylindrical base is visible. The specimen is held between two grips. In the left photo, the specimen is labeled 'CC' and appears to be a light-colored, porous material. In the right photo, the specimen is labeled 'AM 02' and appears to be a darker, more uniform material. The machine is mounted on a blue surface.

3. DESCRIÇÃO DAS AMOSTRAS ENSAIADAS

a) Argamassas de comparação

Para calibração do ensaio, cinco provetes de diferentes argamassas com base em cal preparadas em laboratório foram sujeitas a ensaios de resistência à compressão através da técnica desenvolvida e os respectivos resultados foram comparados com os valores anteriormente obtidos em ensaios realizados pelo método preconizado pela Norma Europeia EN 1015-11.

Os provetes utilizados tinham dimensões de cerca de 20 mm x 40 mm x 80 mm, resultantes do corte de prismas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, ficando com faces paralelas entre si, ou aproximadamente paralelas no caso das faces de corte que ficaram também, propositadamente, com alguma irregularidade.

A cura destas argamassas de comparação foi efectuada em condições ambientes caracterizadas por 23 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ HR durante, pelo menos, 90 dias. Na altura dos ensaios verificou-se que essas argamassas se encontravam completamente carbonatadas.

Os provetes de argamassas com base em cal foram usadas para avaliar a correlação entre o ensaio normalizado e o método de ensaio proposto para as amostras irregulares, visando a calibração da nova técnica de ensaio e a comparação entre as argamassas com base em cal, novas e antigas.

b) Amostras de argamassas antigas

Diversos edifícios históricos foram incluídos no estudo, sendo as amostras neles recolhidas sujeitas ao ensaio de compressão adaptado para amostras irregulares e friáveis. Os casos seleccionados referem-se a edifícios antigos com idades de construção que variam desde o século IV ao século XX (figs. 4 a 8).

Nalguns casos não foi possível extrair mais de uma amostra de argamassa devido à sua fraca coesão, o que reduziu a representatividade dos resultados obtidos nesses edifícios.

As amostras recolhidas têm espessura variável, distinguindo-se por vezes mais de uma camada. As camadas mais exteriores nem sempre apresentam a cal como ligante e sim o cimento ou algum ligante hidráulico, datando certamente de reparações ou de substituições realizadas em épocas mais recentes.

De uma forma geral, a tipologia dos casos analisados é bastante variada: compreende edifícios militares (fortes, castelos), religiosos (igrejas, conventos), palácios ou edifícios industriais (um moinho, um aqueduto, uma cetária), monumentos do período romano (um criptopórtico, uma torre) e ainda um edifício corrente (construção pombalina), localizados em diversas zonas do País.



Fig.4 – Forte do Bugio



Fig. 5 – Forte de São Bruno



Fig.6 – Igreja Matriz de Viana do Alentejo



Fig.7 – Torre do Rio (Mértola)



Fig.8 – Sé de Elvas

O nível de degradação dos revestimentos é variável consoante as condições ambientais a que estão expostos os edifícios, a sua época de construção, a composição das argamassas e as condições de utilização e grau de manutenção a que foram sujeitas. As principais anomalias encontradas nos revestimentos dos edifícios em estudo referem-se, quer a problemas superficiais – colonização biológica, sujidade, heterogeneidade superficial (material e textura), manchas, etc. – quer a problemas mais graves devidos a eflorescências salinas, criptoflorescências, desagregação e fendilhação do revestimento.

As figuras 9a a 9d ilustram a recolha de amostras e o estado de conservação dos revestimentos de alguns casos estudados.



Fig. 9 – Recolha de amostras e estado de conservação de alguns casos de estudo: a) Castelo de Amieira do Tejo; b) Torre do Rio (Mértola); c) Criptopórtico (Mértola); d) Forte Santa Marta (Cascais)

Observa-se que algumas argamassas de cal antigas, embora sujeitas a condições severas de exposição, se mostram bastante resistentes e duráveis, apresentando anomalias apenas superficiais.

Nos casos em que se verifica terem existido intervenções, as novas argamassas que substituíram as argamassas antigas nem sempre se mostram compatíveis com as características do suporte. Nestes casos, os problemas mais sérios relacionam-se com a perda de coesão, eflorescências e criptoflorescências e ainda com perda de aderência (destacamentos).

4. Degradação das argamassas

As causas da degradação dos revestimentos podem, nos casos estudados, estar relacionadas com diversos factores, agravando-se conforme a severidade ambiental da região em que está situado o edifício: argamassas sujeitas a condições ambientais mais agressivas - proximidade do mar e elevado teor de humidade relativa do ar - apresentam sintomas de degradação mais evidentes, como é o caso de alguns Fortes (fig. 10).



Fig. 10 – Forte dos Oitavos (Cascais). a) e b): Degradação elevada do revestimento: erosão, perda de coesão, manchas de humidade, eflorescências e criptoflorescências

A origem da degradação das argamassas ocorre por diferentes mecanismos de natureza química, física, mecânica e biológica que actuam isoladamente ou em simultâneo.

O estabelecimento de uma identificação da cadeia de causas da degradação torna-se por vezes complicado já que um mecanismo pode ser consequência de outro; por exemplo, um processo de alteração química ou biológica pode ter um efeito físico ou mecânico sobre a argamassa.

Particularmente no que se refere à degradação química, salienta-se a importância da identificação dos *produtos de degradação* que são formados a partir de reacções de natureza química entre os componentes da argamassa e os agentes agressivos.

Os produtos de degradação distinguem-se dos produtos de reacção por serem nocivos, podendo causar a decomposição ou a degradação da argamassa e afectar as suas características físicas, sobretudo a resistência.

No geral verifica-se a existência de diversos produtos de degradação nas argamassas estudadas.

Alguns dos processos de degradação mais comuns observados em argamassas estão associados ainda à dissolução e lixiviação¹ dos constituintes hidratados da argamassa, à interacção da argamassa com os poluentes atmosféricos, à cristalização de sais solúveis, ao efeito dos ciclos de gelo-degelo, às reacções expansivas, à alteração de volume devido a variações térmicas ou à presença de água, à degradação devida a causas biológicas, etc. [4,5].

Com o objectivo de sistematizar a informação relevante no que se refere às principais características dos revestimentos dos diferentes casos estudados, foi previamente definido o nível de degradação com base na observação visual “in situ” das anomalias visíveis nestes revestimentos. O nível de degradação foi ajustado de acordo com a intensidade observada em cada edifício.

Sintetizam-se nos quadros 1 (edifícios com revestimentos antigos) e 2 (edifícios com revestimentos da 2ª metade do séc. XX) as características mais importantes de cada um dos edifícios analisados.

No quadro 3 estão sintetizadas as principais informações² no que se refere à existência de produtos de reacção e de degradação, bem como à composição e ao traço aproximado de algumas argamassas em estudo.

¹ O fenómeno da lixiviação consiste na separação dos principais elementos solúveis contidos nos materiais, por meio de lavagem e dissolução em água.

² Informações extraídas dos Relatórios [6 a 16].

Quadro 1 – Características dos edifícios antigos (com revestimentos antigos)

Edifício	Amostra	Tipo	Época de construção do edifício	Grau de degradação *	Principais defeitos encontrados nos revestimentos de parede
Forte de Sacavém (Lisboa)	FSAM01 (1A) FSAM02 (1FT) FSAM07 (2FT)	Militar	Séc. XIX	Médio	Manchas, colonização biológica, fendilhação superficial
Forte Santa Marta (Cascais)	FSM AM01		Séc. XVII	Reduzido	Manchas, perda de coesão localizada
	FSM AM02b			Elevado	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos
	FSM zona1			Reduzido	Manchas, perda de coesão localizada
Forte de São Julião da Barra (Carcavelos)	FSJB		Séc. XVI	Médio	Fendilhação superficial, colonização biológica, sujidade. Erosão elevada nas paredes sul em contacto com o mar.
Forte de São Bruno (Oeiras)	FSB		Séc. XVII	Reduzido	Fendilhação superficial, colonização biológica, sujidade.
Forte do Bugio (Oeiras)	BSM		Séc. XVI	-	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos
	BIM			Elevado	
Castelo (Evoramonte)	EMT2		Séc. XII	Reduzido	Indícios de contaminação biológica
Castelo (Amieira do Tejo)	AAM02		Séc. XIV	Médio	Erosão
Castelo (Viana do Alentejo)	AAM01		Séc. XIV	Médio	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos
Criptopórtico (Mértola)	AAM05		Séc. IV-V	Reduzido	Sujidades, pulverulência
Torre do Rio (Mértola)	AAM07		Séc. IV	Reduzido	Erosão, pulverulência
Santa Casa da Inquisição (Monsaraz)	SCI AM06	Religioso	Séc. XVII	Reduzido	Erosão, pulverulência
Sé de Elvas (revestimento interior)	AAM04		Séc. XVI	-	-
Capela da Amieira do Tejo (ext.-int)	ATe - ATi		Séc. XVI	Elevado	Manchas de humidade, criptoflorescências, perda de coesão e aderência, sujidades
Igreja Matriz (Viana do Alentejo)	MAT1A - MAT1B		Séc. XVI	-	-
Igreja da Misericórdia (Viana do Alentejo)	MIS3A-MIS1		Séc. XVI	Elevado	Heterogeneidade da argamassa, perda de coesão e aderência, manchas de humidade, eflorescências
Santuário de Nossa Sra. da Boa Nova – reboco do campanário (Flor da Rosa)	AAM03		Séc. XVII	Reduzido	Sujidades, colonização biológica
Igreja Matriz – interior do Mirab (Mértola)	AAM06		Séc. XII	Médio	Manchas de humidade
Paço de Maiorca	PMAM04	Palácio	Séc. XVIII	Reduzido	Contaminação por sulfatos, cloretos de sódio e col. Biológica
Parede pombalina – enchimento	P7	Corrente	Séc. XVIII-XIX	-	-
Parede pombalina interior – reboco	P5		Séc. XVIII-XIX	-	-
Moinho de SO (Queluz)	MSO AM03	Industrial	Desconhecida	Reduzido	Manchas, fissuração superficial, s/ degradação química ou biológica
Cetária – enchimento (Tróia)	CT1		Séc. I - VI	-	Manchas superficiais
Cetária – reboco (Tróia)	CT2				
Base da Cetária de Tróia – reboco	BCT				
Aqueduto das Águas Livres (Lisboa)	AAL		Séc. XVIII	Reduzido	-

*Classificação com base na análise visual
(-) sem degradação

Quadro 2 – Características dos edifícios antigos (com revestimentos da 2ª metade do século XX)

Edifício	Amostra	Tipo	Época de construção do edifício	Grau de degradação*	Principais defeitos encontrados nos revestimentos de parede
Forte dos Oitavos (Cascais)	OIT	Militar	Séc. XVII	Elevado	Erosão, perda de coesão, manchas de humidade, eflorescências, criptoflorescências
Convento dos Capuchos (Setúbal)	CLis	Religioso	Séc. XVI	Médio	Manchas de humidade (sais higroscópicos)
Igreja Matriz (Viana do Alentejo)	MAT3B		Séc. XVI	Elevado	Manchas de humidade, criptoflorescências, destacamentos generalizados
Palácio Bensaúde (Lisboa)	BS05 – BS06	Palácio	Séc. XX	Elevado	Perda de coesão, destacamentos generalizados, fendas

*Classificação com base na análise visual

Quadro 3 – Características das amostras analisadas [6 a 16]

Amostra	Produtos de reacção	Produtos de degradação	Composição	Traço ponderal aproximado (ligante: agregado)
FSAM01 (1A)	Formas semi-cristalizadas de aluminossilicatos de cálcio associados a produtos de reacção pozolânica entre a cal e os agregados	Colonizações biológicas	Cal aérea hidratada e areia siliciosa	1:6
FSAM02 (1FT)				1:4
FSAM07 (2FT)				1:5
FSJB	Carboaluminatos de cálcio hidratados	Halite (NaCl), cloroaluminatos de cálcio, gesso	Cal aérea hidratada e areia siliciosa. Presença de compostos hidráulicos resultantes da acção pozolânica entre a cal e os minerais reactivos da areia indiciando inclusão de materiais pozolânicos na argamassa	Não foi possível determinar ⁽²⁾
FSB	Vaterite, aragonite	Cloroaluminatos de cálcio hidratados, etringite	Cal aérea hidratada e dois tipos de areia (siliciosa e calcária)	Não foi possível determinar ⁽²⁾
BSM	Aluminatos de cálcio hidratados, óxidos de ferro, vaterite, aragonite	Brucite, etringite, gesso, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, monossulfoaluminato de cálcio hidratado	Cal aérea talvez com adição de gesso e areia de natureza siliciosa	Não foi possível determinar ⁽³⁾
BIM	Carboaluminatos de cálcio hidratados	Etringite, gesso, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratado		
EMT2	Geles de aluminossilicatos de magnésio hidratados	Colonização biológica	Cal aérea e areia siliciosa, podendo ter sido usada uma areia rica em material argiloso ou uma mistura de areia e argila	1:6
AAM02	-	Sulfato de sódio, sulfato de potássio, gesso, hidróxido de sódio	Cal aérea e areia siliciosa	1:3
AAM05	-	Colonização biológica	Cal aérea hidratada, com agregado silicioso	1:3
AAM07	Carboaluminatos de cálcio hidratado	-	Cal aérea do tipo calcítica rica em agregado do tipo silicioso	1:5
CLis	Silicatos anidros do clínquer portland	Gesso (sulfato de cálcio), tenardite (sulfato de sódio), mirabilite (sulfato de sódio), halite (cloreto de sódio)	Cal hidráulica ou cimento e areia siliciosa	1:10 (areia com algum calcário)
AAM04	Aragonite	Halite	Cal aérea essencialmente calcítica com agregados de rochas ígneas (silicioso e calcário)	1: 3,5 (3 agregado silicioso/0.5agregado o calcário)
AAM06	-	Gesso	Argamassa constituída essencialmente por gesso e uma pequena quantidade de agregados do tipo silicioso e calcário	1 (agregado): 0,2 (Ca (OH) ₂): 6,5 (gesso)

Quadro 3 – Características das amostras analisadas (continuação)

Amostra	Produtos de reacção	Produtos de degradação	Composição	Traço ponderal aproximado (ligante: agregado)
PMAM04	-	Colonização biológica, gesso e cloreto de sódio (halite)	Cal aérea e areia siliciosa e alguma calcária	1:10
P7	-	Sem produtos de degradação	Cal aérea e areia de natureza essencialmente quartzosa	1:3
P5				nd
MSO AM03	Aluminossilicatos de cálcio associados a produtos de reacção pozolânica entre a cal e o agregado	Sem indícios de degradação química ou biológica	Cal aérea e areia siliciosa	1:6
CT1	-	Halite	Cal aérea e areia siliciosa	1:5
CT2	Aragonite	Colonizações biológicas, halite	Cal aérea e areia de três tipos: siliciosa, calcária, dolomítica	4:1:12 (cal: areia siliciosa: pedra calcária)
BCT	Aragonite	Cloroaluminato de cálcio hidratado, halite	Cal aérea e areia siliciosa, dolomítica e pó de tijolo	Não foi possível determinar ⁽⁴⁾
AAL	Carboaluminatos de cálcio hidratados, aragonite, vaterite.	Etringite, cloroaluminatos de cálcio hidratados	Cal aérea e dois tipos de areia (siliciosa e basáltica)	Não foi possível determinar ⁽²⁾

- (1) Algumas investigações mais recentes apontam para que a obra do Castelo seja dos finais do século XV ou do início do século XVI.
- (2) Presença na argamassa de geles de silicato hidratado resultantes do desenvolvimento de reacções pozolânicas entre a cal e os constituintes activos das areias.
- (3) Processamento ao longo dos anos de reacções de carácter pozolânico entre os reagentes reactivos e reacções de troca catiónica entre os iões de cálcio e o magnésio.
- (4) Presença de produtos de alteração solúveis. Seria necessário efectuar-se a análise química para saber o teor real do ligante utilizado inicialmente.
- (nd) – não determinado

5. RESULTADOS OBTIDOS

Sintetizam-se no quadro 4 as principais características das argamassas preparadas em laboratório (argamassas de comparação) e os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados sobre elas, quer usando o método adaptado para amostras de argamassa irregulares quer usando o método normalizado.

Quadro 4 – Características das argamassas preparadas em laboratório usadas para validação do método

Argamassa	Dosagem volumétrica	Composição	Idade	Resistência à compressão (N/mm ²)		
				Método normalizado (R _{Cn}) *	Método argamassas irregulares (R _{Cir})	R _{Cn} /R _{Cir}
CHF (R3/02-2A)	1:3	Cal hidrófuga: areia do rio Tejo e areia de Corroios	2 anos	0,6	1,0	0,6
CACI (R4/01-CACI)	1:3:12	Cimento: cal aérea: areia (granulometria estudada)	3 anos	1,9	2,5	0,8
CA (R4/01-CA)	1:3	Cal aérea: areia (granulometria estudada)	3 anos	1,3	2,0	0,7
CH (R3/02-1B)	1:3	Cal hidráulica artificial: areia do rio Tejo e areia de Corroios	2 anos	3,1	3,8	0,8
CACH (RI1/03)	1:1:(3+3)	Cal aérea: cal hidráulica artificial: areia do rio e areia de Corroios	1 ano	0,6	0,8	0,8
CAPZ (R4/01 –CAPZ)	1:2,5:2,5	Cal hidratada: pozolana: areia (granulometria estudada)	3 anos	1,8	1,9	0,9

*Resultados obtidos aos 90 dias

Adicionalmente, e para ajudar a interpretação dos resultados do ensaio de compressão, são apresentados no quadro 5 os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade destas argamassas, determinados pelo método normalizado e por um método desenvolvido para amostras irregulares e apresentado em anteriores trabalhos [17, 18].

Quadro 5 – Características de absorção capilar das argamassas preparadas em laboratório

Argamassa	Coeficiente de absorção capilar (kg/m ² .h ^{1/2})						
	Método argamassas irregulares			Método normalizado (C)		Factor C ₍₉₀₋₁₀₎ / C _{CC(90-10)}	Factor C _(24h) / C _{CC(24h)}
	CCC (5mm)	CCC ₍₉₀₋₁₀₎	CCC _(24h)	C ₍₉₀₋₁₀₎	C _(24h)		
CHF (R3/02-2A)	1,4	0,7	0,4	0,2	0,2	0,3	0,6
CACI (R4/01-CACI)	15,2	3,7	2,1	9,3	3,5	2,5	1,7
CA (R4/01-CA)	12,7	4,0	1,8	10,5	2,9	2,6	1,6
CH (R3/02-1B)	11,9	4,5	1,8	15,4	3,7	3,4	2,1
CACH (RI1/03)	20,2	1,2	1,9	14,2	6,9	11,9	3,6
CAPZ (R4/01 –CAPZ)	nd	nd	nd	9,6	3,2	nd	nd

*nd – não determinado

No quadro 6 apresentam-se os resultados da resistência à compressão das diversas amostras analisadas. Nestes mesmos quadros registam-se os resultados do ensaio de absorção capilar por contacto, método de ensaio desenvolvido no LNEC [17] e efectuado segundo a FE Pa 40 [18], sobre as mesmas amostras recolhidas "in situ".

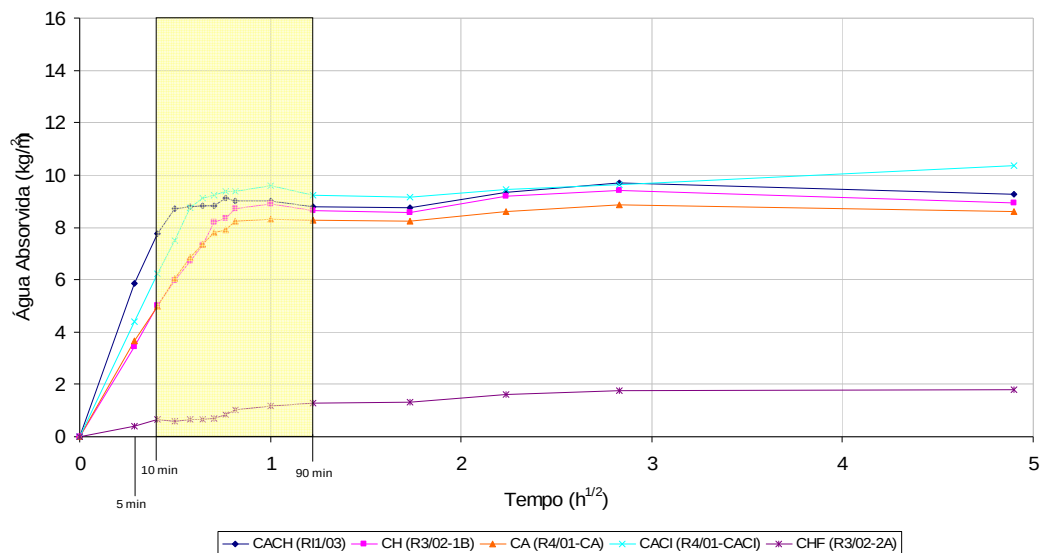
Quadro 6 – Resultados de resistência à compressão das amostras recolhidas "in situ"

Amostra	Coeficiente de capilaridade por contacto (kg/m².h ^{1/2})		Força de Compressão Máxima (N)	Resistência à compressão (N/mm²)
	Ccc5	Ccc90-10		
Edifícios antigos com revestimentos antigos				
FSAM01	5,4	5,3	1926	1,2
FSAM02	27,9	1,0	2792	1,8
FSAM07	14,7	1,8	4810	3,0
FSM AM01	5,7	2,2	3787	2,4
FSM AM02b	6,8	4,0	2109	1,3
FSM zona1	3,4	1,4	5798	3,6
FSJB	10,9	7,0	3684	2,3
FSB	1,4	0,8	11314	7,1
BSM	9,1	6,8	2869	1,8
BIM	32,3	5,0	1692	1,1
EMT2	nd	nd	2572	1,6
AAM02	5,5	0,26	5820	3,6
AAM05	5,4	8,7	2334	1,5
AAM07	2,3	6,1	5482	3,5
SCI AM06	13,2	0,4	3939	2,5
AAM04	5,0	0,2	9481	5,9
ATE	7,6	1,1	1849	1,2
ATi	9,5	1,0	3875	2,4
MAT1B	7,4	0,8	3941	2,5
MAT3B	6,3	0,56	2571	1,6
MIS1	7,7	0,2	1507	0,9
MIS3A	20,0	0,2	1291	0,8
AAM01	10,5	3,3	3873	2,4
AAM03	2,3	1,58	2971	1,9
AAM06	25,3	0,3	5527	3,5
PMAM04	8,1	0,6	3340	2,1
P7 (enchimento)	7,1	1,7	1320	0,8
P5 (reboco)	10,2	2,7	1648	1,0
MSO AM03	9,4	0,9	3493	2,2
CT1 (enchimento)	17,2	0,5	4057	2,5
CT2 (reboco)	3,3	1,5	7158	4,5
BCT	2,9	2,9	8801	5,5
AAL	24,8	3,3	3492	2,2
Edifícios antigos com revestimentos da 2ª metade do séc. XX				
OIT	1,6	0,5	824	0,5
CLis	5,0	1,2	7541	4,7
MAT3B	6,3	0,56	2571	1,6
BS	6,9	0,5	4415	2,8

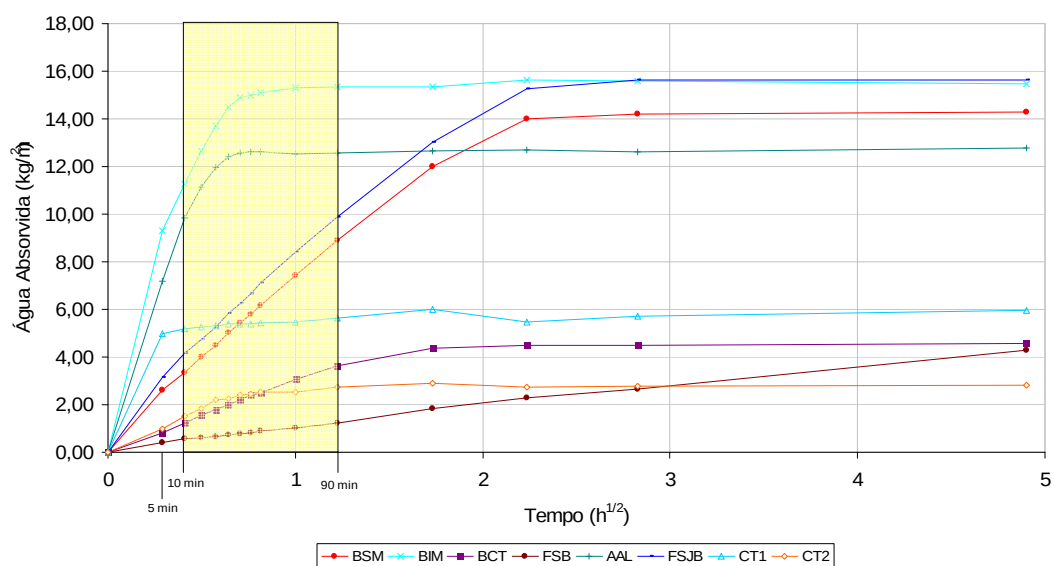
nd – não determinado

Os valores de coeficientes de capilaridade entre os 10 e os 90 minutos, para as argamassas com base em cal, podem em alguns casos não ter significado no que se refere ao comportamento à água das argamassas, já que neste intervalo de tempo

estas podem atingir a saturação, como ilustram algumas rectas de absorção capilar (gráficos 1 e 2) de algumas amostras analisadas no presente estudo.



Gráf. 1 – Absorção de água de amostras de argamassas preparadas em laboratório. Método das argamassas irregulares.

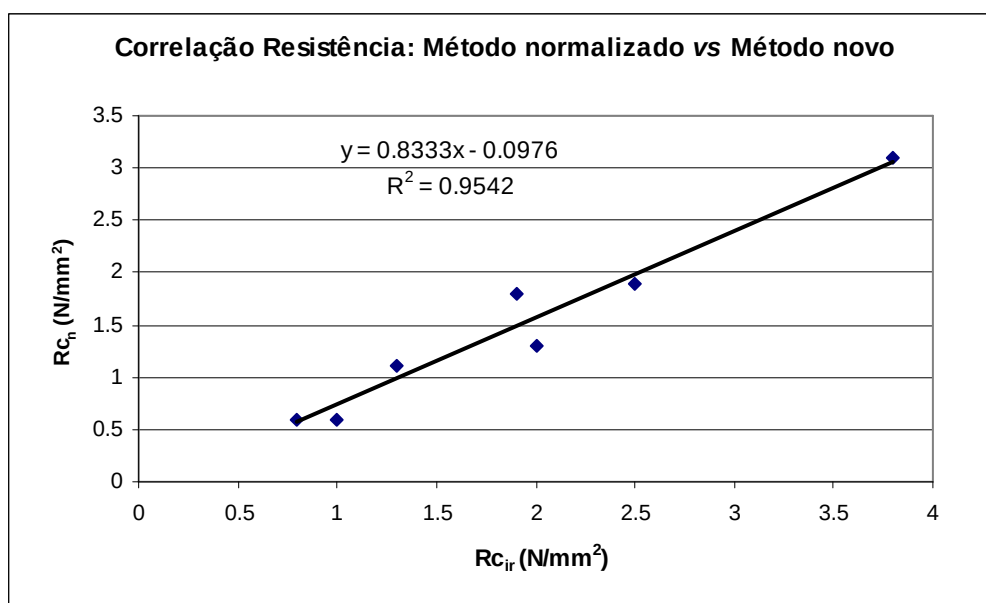


Gráf. 2 – Absorção de água de amostras de algumas argamassas antigas. Método das argamassas irregulares.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Argamassas novas

No que se refere às argamassas novas, a comparação entre as resistências à compressão obtidas pelo método normalizado (R_{c_n}) e as resistências à compressão determinadas pelo método adaptado às argamassas irregulares ($R_{c_{ir}}$) mostra que existe alguma correlação entre estes resultados, com $R_{c_n} / R_{c_{ir}}$ variando de 0,6 a 0,9 (quadro 4), o que parece aceitável tendo em conta o previsível aumento de resistência do material de revestimento ao longo do tempo (gráfico 3). Na altura da realização dos ensaios de resistência à compressão sobre as argamassas de comparação, que se efectuou em períodos de um a três anos após a aplicação do método de ensaio padronizado, é provável que já tivesse havido uma maior carbonatação dessas argamassas e, portanto, um acréscimo da resistência.



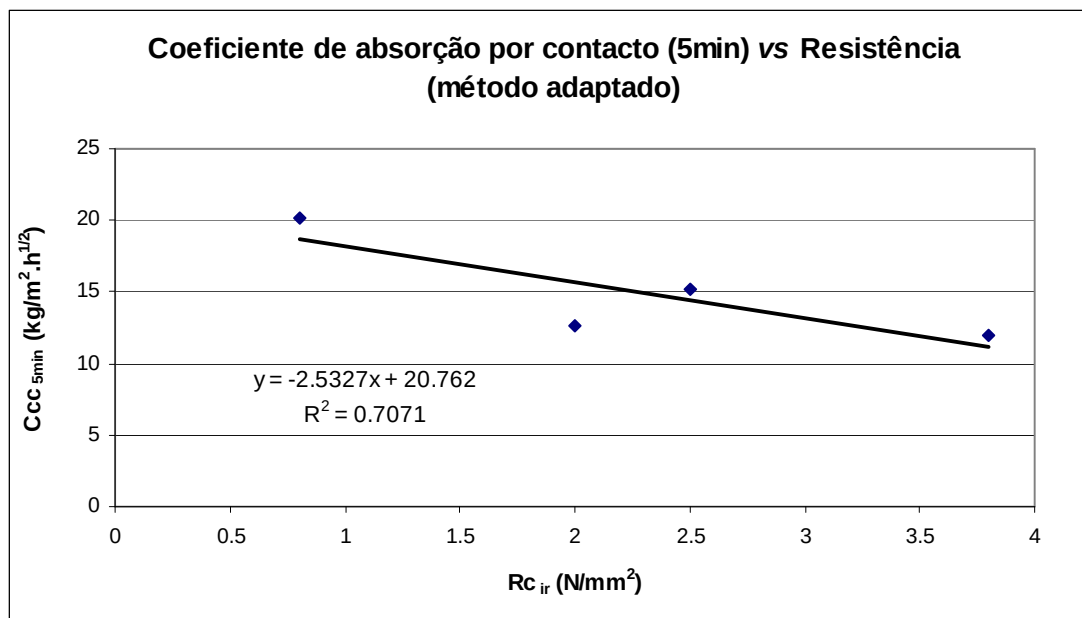
Gráf. 3 – Argamassas novas. Correlação entre as resistências à compressão obtidas através dos métodos normalizado e adaptado.

A possível correlação entre os resultados de resistência à compressão obtidos pelo método adaptado às argamassas irregulares ($R_{c_{ir}}$) e os coeficientes de capilaridade por contacto aos 5 minutos ($C_{cc_{(5min)}}$) está ilustrada no gráfico 4.

Foram excluídos na representação deste gráfico os resultados do revestimento hidrófugo (CHF), tendo em conta que os valores bastante reduzidos de absorção

capilar deste tipo de revestimento não são correlacionáveis com a resistência à compressão, por se deverem ao efeito do hidrófugo e não à compacidade.

O gráfico 4 parece pôr em evidência a tendência de redução na resistência à compressão nas argamassas com coeficientes de capilaridade por contacto elevados durante os 5 primeiros minutos.



Gráf. 4 – Argamassas novas. Absorção capilar por contacto aos 5 min vs Resistência à compressão (método adaptado).

6.2 Argamassas antigas e argamassas da 2ª metade do século XX

Tendo em conta a variabilidade dos casos analisados, bem como das características observadas nos revestimentos – diferentes épocas de construção, heterogeneidade na composição, diferentes níveis de degradação, etc. –, foi estabelecido um critério de análise dos resultados segundo correlações possíveis:

- coeficiente de capilaridade por contacto vs resistência;
- época de construção do edifício vs resistência;
- aspectos da composição (natureza do agregado) vs resistência;
- composições mais usadas vs produtos de degradação mais comuns.

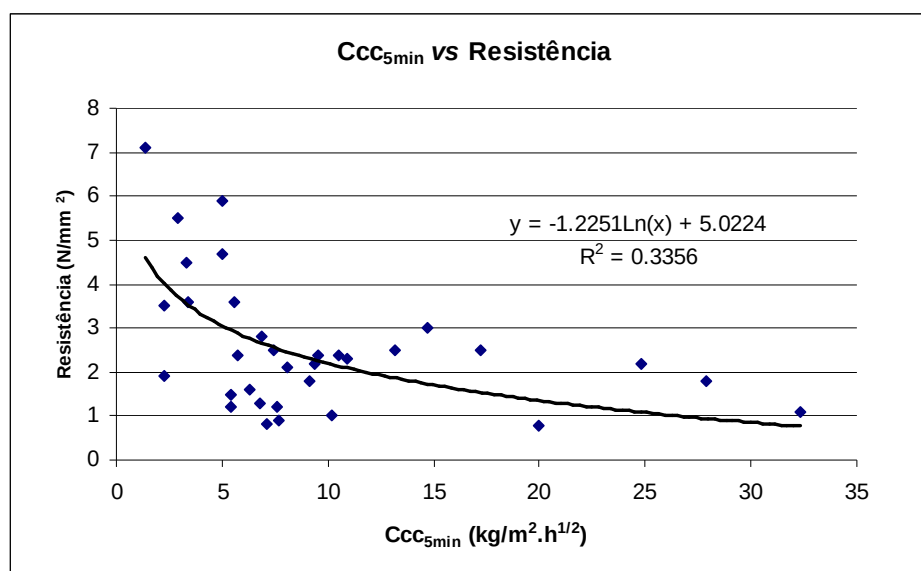
Por escassez de dados mais completos, não foi possível estabelecer correlações entre a resistência à compressão e o tipo de edifícios, e entre a resistência à compressão e o traço da argamassa de revestimento.

Muitas vezes não é possível calcular o traço das amostras quando há produtos de degradação que mascaram os dados, principalmente no que se refere às argamassas sujeitas a condições ambientais agressivas (Fortes, por exemplo) com sintomas de degradação bem evidentes.

A seguir faz-se uma análise individual de cada um dos aspectos mencionados.

a) Ccc *vs* Resistência

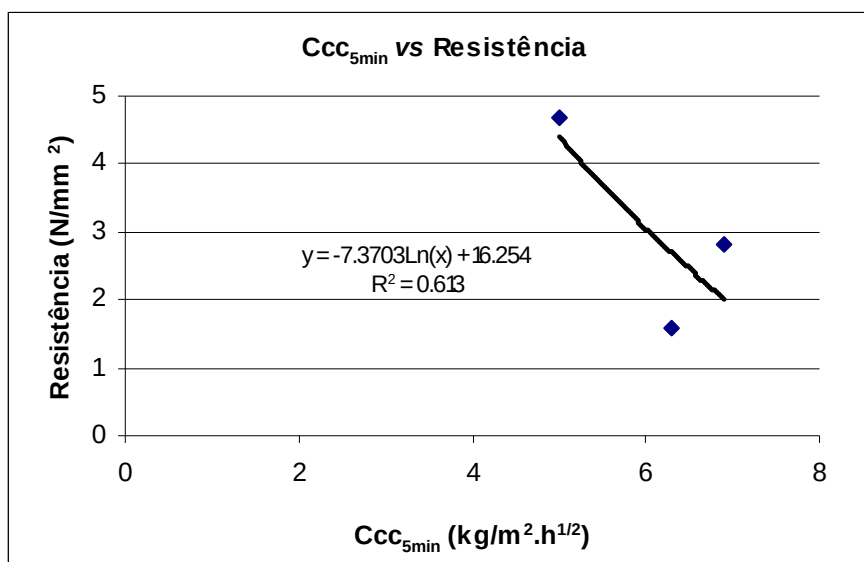
Os resultados obtidos com as diversas amostras recolhidas permitem uma comparação entre a resistência à compressão e a absorção capilar por contacto (Ccc) aos 5 minutos. Uma curva de correlação entre estes dois parâmetros foi desenhada (gráfico 5), sendo determinada a melhor equação que traduz essa correlação e o coeficiente de correlação (R^2). Verifica-se que entre os resultados da resistência à compressão e os coeficientes de capilaridade por contacto durante os primeiros minutos há uma correlação perceptível, sendo observável uma tendência para um aumento da absorção com a redução da resistência.



Gráf. 5 – Amostras antigas. Absorção capilar por contacto durante os 5 primeiros minutos *versus* resistência à compressão.

Relativamente às argamassas da 2ª metade do século XX, o número de casos estudados foi muito pouco representativo para extrair conclusões (gráfico 6).

Obs: neste caso, para o desenho da curva, tal como sucedeu nas curvas de correlação das argamassas preparadas em laboratório (item 5.1), excluiu-se um dos casos de estudo (Forte dos Oitavos) pelo facto de as características hidrófugas da argamassa se sobreporem aos factores relacionados também com a compressão, nomeadamente a compacidade da argamassa.



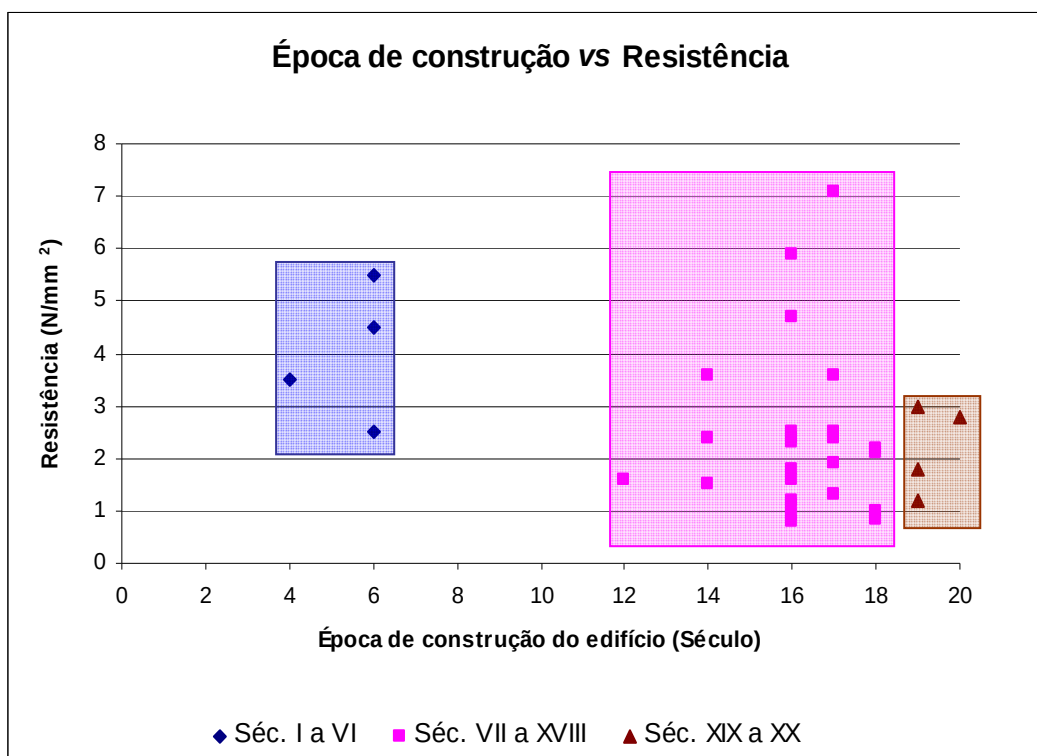
Gráf. 6 – Absorção capilar por contacto aos 5 primeiros minutos *versus* resistência à compressão das amostras de argamassas da 2ª metade do século XX.

b) Época de construção do edifício *vs* resistência

Para simplificar a análise dos casos de estudo segundo a sua época de construção, os edifícios analisados foram assim classificados:

- Edifícios construídos entre os séculos I e VI (romanos);
- Edifícios construídos entre o século VII e o século XVIII;
- Edifícios dos séculos XIX e XX.

Grande parte dos casos analisados refere-se a edifícios com idade de construção entre os séculos VII e XVIII, como é possível verificar no gráfico 7. Encontrar uma correlação entre a resistência do revestimento antigo e a época de construção do edifício não parece possível tendo em conta a grande variabilidade de resultados e o reduzido número de edifícios construídos entre os séculos I e VI e os construídos entre os séculos XIX a XX.



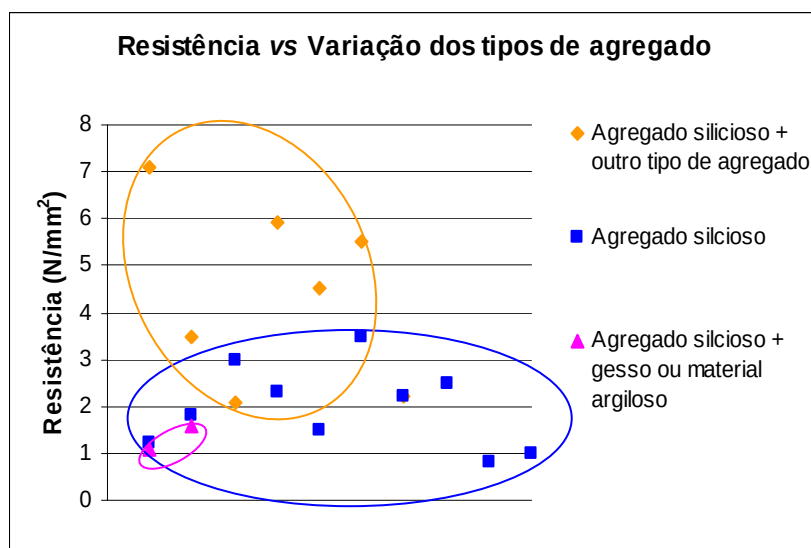
Gráf. 7 – Resistência à compressão das argamassas antigas *versus* época de construção do edifício.

c) Aspectos da composição (natureza do agregado) *vs* resistência

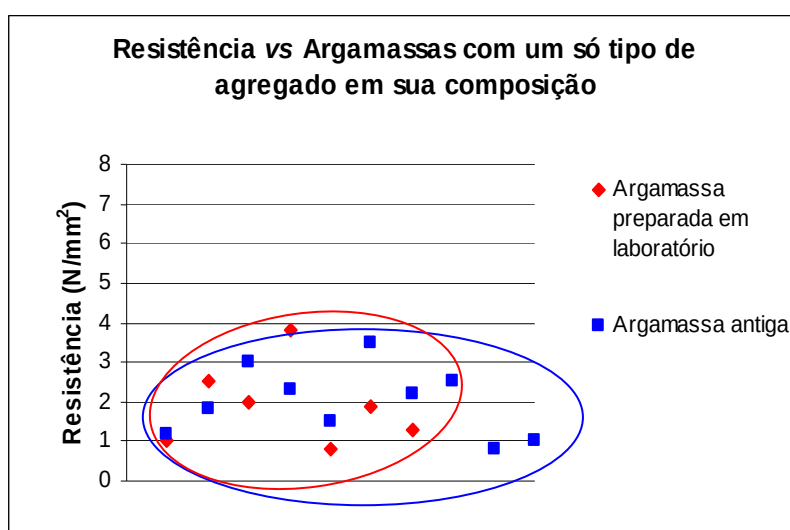
A análise mineralógica efectuada a algumas amostras antigas evidencia, como era de esperar, a predominância do uso de cal aérea como ligante. O agregado utilizado em praticamente todos os casos analisados foi de natureza siliciosa (quadro 4), verificando-se nalguns casos a existência de mais de um tipo de agregado, normalmente agregados de natureza siliciosa conjugados com agregados calcários, dolomíticos ou basálticos. Identificou-se um caso pontual de argamassa com agregado de natureza siliciosa, calcária e dolomítica em simultâneo.

Os resultados de resistência mecânica (quadro 6) apontam que argamassas com agregado silicioso adicionado a outro tipo de agregado (calcário, dolomítico ou basáltico) – parecem conferir maiores resistências em relação às amostras com agregado de natureza unicamente siliciosa (gráfico 8). Neste último caso, os resultados indiciam resistências médias muito próximas das obtidas para as argamassas novas preparadas em laboratório só com este tipo de agregado (gráfico 9).

A incorporação de argila e de gesso na composição da argamassa implica resistências reduzidas (gráfico 8).



Gráf. 8 – Resistência à compressão das argamassas antigas *versus* tipo de agregado usado na composição da argamassa.



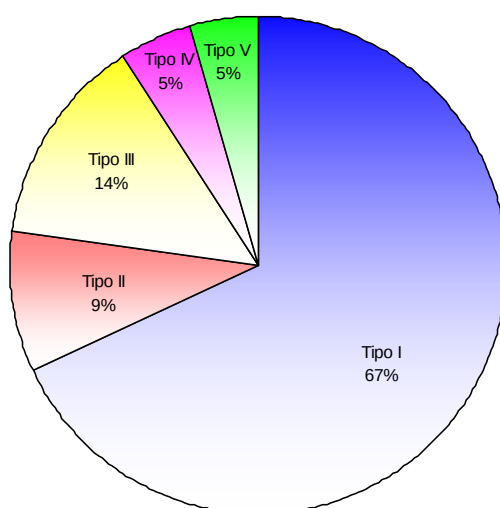
Gráf. 9 – Resistência à compressão de argamassas com um só tipo de agregado na sua composição: agregado de natureza siliciosa.

e) Composições mais usadas *vs* produtos de degradação mais comuns

Para essa análise, as argamassas foram classificadas em 5 grupos, conforme ilustra o quadro 7, e, para cada tipo de argamassa foram identificados os produtos de degradação mais comuns. A divisão dos tipos de argamassas pelas composições mais usadas apresenta-se também no gráfico 10.

Quadro 7 – Composições mais usadas *vs* produtos de degradação mais comuns dos revestimentos estudados

Composições mais usadas	Tipo	Nº de casos	Produtos de degradação mais comuns
Cal aérea e areia	I	15	Colonização biológica, etringite, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados
Cal aérea, areia e material pozzolânico (pó de tijolo)	II	2	Halite, gesso, cloroaluminato de cálcio hidratados
Cal aérea, areia e gesso	III	3	Halite, brucite, etringite (amb. marinho), cloro
Cal aérea, areia e argila	IV	1	Colonização biológica
Cal hidráulica (?),cimento e areia	V	1	Gesso, ternadite, mirabilite, halite



Gráf. 10 – Proporções das composições mais usadas

A análise do quadro 7 e do gráfico 10 permite apontar para as seguintes conclusões:

- as argamassas apenas com cal aérea e areia representam a grande maioria dos casos estudados, cerca de 70%, enquanto num caso apenas foi identificada uma argamassa de cal aérea, areia e argila, o mesmo se passando no caso das argamassas de cal hidráulica/cimento e areia.
- o cloreto de sódio (halite), o sulfato de cálcio (gesso) e o trissulfatoaluminato de cálcio (etringite) aparecem como os produtos de degradação mais comuns em vários casos analisados, excepto na argamassa de cal aérea e argila;

- os sulfatos de sódio (ternadite e mirabilite) e os cloroaluminatos de cálcio hidratados apresentam-se também nalguns casos analisados;
- a brucite (hidróxido de magnésio) aparece apenas nas argamassas de cal aérea e areia adicionadas de gesso.

No que se refere aos produtos de degradação encontrados, estes podem causar danos nas argamassas através de diferentes mecanismos. A seguir descrevem-se em linhas gerais as particularidades de cada um dos compostos encontrados.

Alguns sais, como o cloreto de sódio (halite), só provocam danos devido à cristalização [19]. A cristalização deste sal pode dar origem ao desenvolvimento de tensões ou pressões de dilatação (expansão), o que provoca roturas no sistema poroso e a consequente degradação do revestimento.

Os sulfatos podem originar degradações de duas formas: devido à cristalização ou à sua hidratação [19]. As reacções químicas expansivas que envolvem os sais de sulfatos causam degradação principalmente pela transição entre fases (mirabilite/tenardite e gesso/anidrite) [20,21].

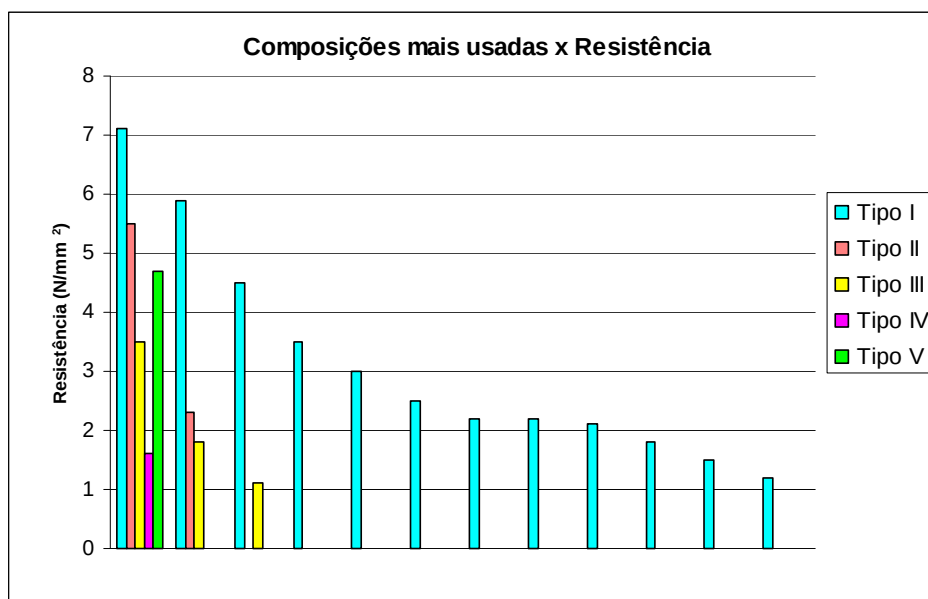
A etringite (trissulfoaluminato de cálcio hidratado) é um composto fortemente expansivo cuja presença nas argamassas é em geral associada à reacção entre os aluminatos provenientes das reacções pozolânicas na argamassa e os sulfatos presentes, quer devido à utilização do gesso, quer provenientes do meio exterior.

Os cloroaluminatos de cálcio hidratados são produtos resultantes das reacções entre os aluminatos e os sais de cloretos; em geral são compostos instáveis e não são expansivos, mas podem formar a etringite em presença de sulfatos [4].

A brucite é um composto extremamente insolúvel cuja formação remove os iões, hidróxidos fragilizando as argamassas por remoção das propriedades ligantes [20].

A observação do gráfico 11, em que se procura relacionar as composições mais comuns com a resistência à compressão, permite verificar que as argamassas de cal e areia apresentam resistências muito variáveis. O número reduzido de amostras de cada um dos restantes tipos de composição analisados não possibilita extrair quaisquer conclusões.

(Obs: as resistências de cada tipo de argamassas foram introduzidas no gráfico por ordem decrescente)



Gráf. 11 – Composições mais comuns *vs* resistência à compressão

6.3 Análise global

A seguir, faz-se uma análise global da informação recolhida sobre as argamassas dos diversos casos de estudo, confrontando a classificação inicial do seu grau de degradação com os parâmetros estudados: resistência à compressão, coeficiente de capilaridade por contacto e produtos de degradação.

Uma compilação das informações mais relevantes é apresentada nos quadros 8 e 9.

O gráfico 12 ilustra de uma forma esquemática os valores mínimos e máximos do coeficiente de capilaridade por contacto aos 5 minutos e de resistência à compressão em relação aos diferentes graus de degradação considerados.

Quadro 8 – Análise global das argamassas antigas

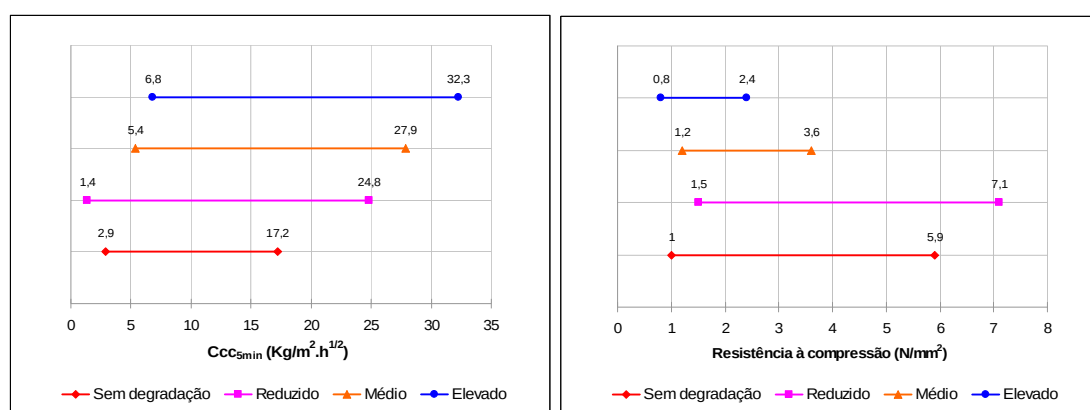
Amostra	Grau de degradação*	Principais defeitos encontrados nos revestimentos de parede	Ccc5 (kg/m ² .h ^{1/2})	Rc (N/mm ²)	Produtos de degradação
FSAM01 (1A)	Médio	Manchas, colonização biológica, fendilhação superficial	5,4	1,2	Colonizações biológicas
FSAM02 (1FT)			27,9	1,8	
FSAM07 (2FT)			14,7	3,0	
FSM AM01	Reduzido	Manchas, perda de coesão localizada	5,7	2,4	nd
FSM AM02b	Elevado	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos	6,8	1,3	nd
FSM zona1	Reduzido	Manchas, perda de coesão localizada	3,4	3,6	nd
FSJB	Médio	Fendilhação superficial, colonização biológica, sujidade, erosão elevada nas paredes sul em contacto com o mar	10,9	2,3	Halite (NaCl), cloroaluminatos de cálcio, gesso
FSB	Reduzido	Fendilhação superficial, colonização biológica, sujidade	1,4	7,1	Cloroaluminatos de cálcio hidratados, etringite
BSM	-	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos	9,1	1,8	Etringite, gesso, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratado
BIM	Elevado	Erosão, perda de coesão, pulverulência, destacamentos	32,3	1,1	Brucite, etringite, gesso, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, monossulfoaluminato de cálcio hidratado
EMT2	Reduzido	Indícios de contaminação biológica	-	1,6	Colonização biológica
AAM02	Médio	Erosão	5,5	3,6	Sulfato de sódio, sulfato de potássio, gesso, hidróxido de sódio
AAM05	Reduzido	Sujidades, pulverulência	5,4	1,5	Colonização biológica
AAM07	Reduzido	Erosão, pulverulência	2,3	3,5	Carboaluminatos de cálcio hidratado
SCI AM06	Reduzido	Erosão, pulverulência	13,2	2,5	nd
AAM04	-	-	5,0	5,9	Halite
ATe -ATi	Elevado	Manchas de humidade, criptoflorescências, perda de coesão e aderência, sujidades	7,6	1,2	nd
			9,5	2,4	
MAT1A	-	-	7,4	2,5	nd
MAT3B			6,3	1,6	
MIS3A	Elevado	Heterogeneidade da argamassa, perda de coesão e aderência, manchas de humidade, eflorescências	20,0	0,8	nd
MIS1			7,7	0,9	
AAM03	Reduzido	Sujidades, colonização biológica	2,3	1,9	nd
AAM06	Médio	Manchas de humidade	25,3	3,5	Gesso
PMAM04	Reduzido	Contaminação por sulfatos, cloretos de sódio e colonização biológica	8,1	2,1	Colonização biológica, gesso e cloreto de sódio (halite)
P7	-	-	7,1	0,8	Sem produtos de degradação
P5	-	-	10,2	1,0	
MSO AM03	Reduzido	Manchas, fissuração superficial, sem degradação química ou biológica	9,4	2,2	Sem indícios de degradação química ou biológica
CT1	-	Manchas superficiais	17,2	2,5	Halite
CT2			3,3	4,5	Colonizações biológicas, halite
BCT			2,9	5,5	Cloroaluminato de cálcio hidratado, halite
AAL	Reduzido	-	24,8	3,3	Etringite, cloroaluminatos de cálcio hidratados

*Classificação com base na análise visual

(-) sem degradação; (nd) – não determinado

Quadro 9 – Argamassas antigas. Quadro síntese

Grau de degradação com base na análise visual	Ccc5 (kg/m ² .h ^{1/2})	Rc (N/mm ²)	Produtos de degradação mais comuns
Sem degradação	Mín. = 2,9 Máx. = 17,2	Mín. = 1,0 Máx. = 5,9	Colonização biológica, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, gesso, etringite
Reduzido	Mín. = 1,4 Máx. = 24,8	Mín. = 1,5 Máx. = 7,1	Colonização biológica, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, gesso, etringite
Médio	Mín. = 5,4 Máx. = 27,9	Mín. = 1,2 Máx. = 3,6	Colonização biológica, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, gesso, sulfato de sódio, sulfato de potássio, hidróxido de sódio
Elevado	Mín. = 6,8 Máx. = 32,3	Mín. = 0,8 Máx. = 2,4	Brucite, halite, cloroaluminatos de cálcio hidratados, gesso, etringite, monossulfoaluminato de cálcio hidratado



Gráf. 12 – Representação esquemática dos intervalos dos coeficientes de capilaridade por contacto aos 5 minutos (Ccc5) e da resistência à compressão (Rc) apresentados no quadro 9.

A análise dos quadros 8 e 9 e do gráfico 12 permite fazer as seguintes observações em relação aos casos analisados:

- as argamassas com grau de degradação elevado apresentam maior Ccc5 e menor resistência à compressão, enquanto que as argamassas com grau de degradação reduzido apresentam menor Ccc5 e maior resistência à compressão.
- argamassas com classificação atribuída inicialmente "sem degradação" revelam em alguns casos a existência de produtos de degradação, embora a observação *in situ* não acusasse indícios de anomalias.
- a etringite apareceu nas argamassas com diferentes níveis de degradação (sem degradação, reduzido e elevado) enquanto que a brucite, outro produto de degradação de elevada gravidade, só apareceu em argamassas com elevado nível de degradação.

7. Síntese da análise dos resultados

A análise sintetizada dos resultados obtidos permite extrair as seguintes conclusões:

a) Técnica de ensaio de resistência à compressão para amostras irregulares

- As análises efectuadas a um número extensivo de casos de estudo permitiram a avaliação da adequabilidade do método no que diz respeito ao seu uso como técnica auxiliar de ensaio para avaliação do estado de conservação dos revestimentos antigos de edifícios. O método de ensaio adaptado para amostras de argamassas irregulares, juntamente com outras técnicas de ensaio "in situ" e de laboratório, contribui de forma válida para a caracterização do estado de conservação do revestimento.

b) Correlações entre a resistência à compressão e os diversos aspectos analisados:

Resistência *vs* coeficiente de capilaridade por contacto aos 5 minutos: a correlação evidenciada entre estes dois aspectos aponta para um aumento da absorção com a redução da resistência, como seria de esperar.

Resistência *vs* época de construção: a variabilidade dos resultados obtidos e, por vezes, o número reduzido de casos impede a previsão de uma tendência para a relação em causa.

Resistência *vs* aspectos da composição (natureza do agregado): as melhores resistências foram obtidas em argamassas com mistura de agregados de diferentes naturezas; argamassas com um único tipo de agregado apresentaram resistências inferiores. Portanto, a associação, numa mesma composição de argamassas, de agregados de diferentes naturezas (nomeadamente calcários e/ou basálticos) aos agregados siliciosos parece contribuir para o incremento da resistência.

c) Correlação entre a composição usada e os produtos de degradação mais comuns:

Na generalidade dos casos, as argamassas com diferentes ligantes analisadas – cal aérea e areia, cal aérea e material pozolânico, cal aérea e gesso, cal aérea e argila, cal hidráulica e cimento – evidenciaram diferentes produtos de degradação resultantes das reacções entre os componentes das argamassas e os agentes agressivos.

Esses produtos de degradação são constituídos, principalmente, por sais expansivos que, quando presentes no interior do revestimento, ou entre o revestimento e o respectivo suporte, são as causas mais frequentes de perda de coesão desse revestimento e, por vezes, também de perda de aderência.

8. Conclusões

De uma forma geral o estudo, que contemplou alguns casos de edifícios antigos em Portugal, permitiu:

- estabelecer, numa primeira análise, uma correlação entre os resultados da resistência à compressão obtidos através do método de ensaio desenvolvido, adaptado a amostras irregulares de argamassa, e através do método normalizado.
- efectuar uma nova abordagem sobre a avaliação do estado de conservação dos revestimentos antigos a partir da análise das diversas informações obtidas “in situ” (nível de degradação, época de construção) e em laboratório (composição, resistência à compressão, coeficiente de capilaridade e produtos de degradação).
- confirmar a validade do método de ensaio de determinação da resistência à compressão de amostras irregulares: embora esta determinação possa não ser rigorosa em termos absolutos, os valores obtidos permitem extrair conclusões acerca da resistência mecânica dos revestimentos de edifícios antigos e, juntamente com os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade aos 5 minutos, formar uma ideia acerca do estado de conservação dos revestimentos, validando, em maior ou menor grau, os resultados da análise visual.

Na sequência deste estudo prevê-se o aprofundamento desta abordagem, através, nomeadamente, da análise da estrutura porosa e da influência da distribuição do diâmetro dos poros na resistência e na permeabilidade à água das argamassas (antigas e novas) e da correlação destes valores com o comportamento à água e com a resistência mecânica abordados presentemente e em estudos anteriores.

Para complementar esta informação, prevê-se ainda o estabelecimento de uma correlação entre a resistência à compressão das argamassas antigas e o teor de compostos hidratados e, em consequência, também de compostos hidráulicos.

O desenvolvimento da análise do efeito dos vários produtos de degradação nas argamassas é também uma linha de investigação que se pretende prosseguir.

9. Nota Final

Os autores agradecem a colaboração para este trabalho do Investigador Auxiliar António Santos Silva do Departamento de Materiais – Núcleo de Materiais Metálicos, pela partilha de conhecimentos científicos importantes para a interpretação de alguns resultados de ensaios de natureza química.

Agradece-se também a colaboração dedicada da técnica de experimentação Dora Santos do Departamento de Edifícios na preparação das amostras e realização dos ensaios incluídos neste estudo.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em Agosto de 2006.

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – Veiga, M. Rosário et al. – **Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos**. Lisboa: LNEC, Julho de 2004. Coleção Edifícios, CED 9.
- 2 – Válek, Jan; Veiga, M. Rosário – **Characterisation of mechanical properties of historic mortars – testing of irregular samples**. STREMAH 2005 – 9th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture. Malta: University of Malta, 22-24 June 2005.
- 3 – EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION (CEN) - **Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar - EN 1015-11**. Brussels: CEN, August 1999.
- 4 – Paiva, M. João; Santos Silva A. – **Aplicação da caracterização mineralógica no estudo da degradação de argamassas antigas**. Lisboa: LNEC, Julho de 2004. Relatório 196/04 – NM.
- 5 – Palomo, A., Blanco-Varela, M.T.; Martinez-Ramirez, S. – **Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research**. ARIADNE 9 Workshop (Advanced Research Initiation Assisting and Developing Networks in Europe), 4-10 February, 2002. Disponível em <http://www.itam.cas.cz>.
- 6 – Reis, M. Olinda; Santos Silva A. – **Caracterização de argamassas do Aqueduto das Águas Livres. 2ª Fase**. Lisboa: LNEC, Outubro de 1995. Relatório 292/95 – NQ.
- 7 – Reis, M. Olinda; Santos Silva A. – **Caracterização das alvenarias de edifícios antigos. 1ª Fase – Edifício da Baixa Pombalina**. Lisboa: LNEC, Novembro de 1995. Relatório 310/95 – NQ.
- 8 – Santos Silva A.; Reis, M. Olinda – **Caracterização de argamassas do Forte do Bugio**. Lisboa: LNEC, Outubro de 1999. Nota Técnica nº 80/99 – DMC.
- 9 – Santos Silva A.; Reis, M. Olinda – **Caracterização de argamassas antigas do Castelo de Evoramonte**. Lisboa: LNEC, Maio de 2000. Nota Técnica nº 30/2000 – DMC.
- 10 – Santos Silva A. – **Caracterização duma argamassa de reboco do Convento dos Capuchos**. Lisboa: LNEC, Julho de 2001. Nota Técnica nº63/2001 – DMC.

- 11 – Santos Silva A. – **Caracterização de argamassas do Forte de S. Julião da Barra**. Lisboa: LNEC, Junho de 2002. Relatório 157/02 – NQ.
- 12 – Ricardo, J. Miguel, Santos Silva A. – **Caracterização de argamassas romanas**. Lisboa: LNEC, Janeiro de 2005. Relatório 28/05 – NMM.
- 13 – Santos Silva A. – **Caracterização de argamassas de reboco e do Forte de Sacavém**. Lisboa: LNEC, Fevereiro de 2006. Nota Técnica 21/2006 – DM.
- 14 – Santos Silva A. – **Caracterização de uma argamassa de reboco do Paço de Maiorca** – Figueira da Foz. Lisboa: LNEC, Janeiro de 2006. Nota Técnica 11/2006 – DM.
- 15 – Santos Silva A. – **Caracterização de uma argamassa de reboco dum moinho** – Queluz. Lisboa: LNEC, Fevereiro de 2006. Nota Técnica 14/2006 – DM.
- 16 – Adriano, Patrícia; Santos Silva, A. – **Caracterização de argamassas do período romano e árabe da vila de Mértola**. Lisboa: LNEC, Julho de 2006. Relatório 200/06 – NMM.
- 17 – Veiga, M. Rosário; Magalhães, Ana Cristian; Bosilikov, Violeta B, – **Cappillary tests on historic mortar samples extracted from site. Methodology and compared results**. In 13th Int. Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, July 4-7, 2004b.
- 18 – Santos, Dora; 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.
- 19 – Sousa V.; Pereira F.; Brito J. – **Rebocos Tradicionais: principais causas de degradação. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, nº 23,2003**.
- 20 – Velosa, A.; Veiga, M. Rosário – **Development of artificial ageing tests for renders – application to conservation mortars**, 7th International Masonry Conference, London, 2006. A publicar.
- 21 – Velosa, A. – **Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas**. Tese para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Aveiro: Universidade de Aveiro, Julho de 2006.