

Argamassas com Base em Cal Aérea e Cinzas de Casca de Arroz para Conservação do Património Construído



Nuno Gouveia de Almeida
Aluno do mestrado de
Recuperação e Conservação
do Património Construído
do Instituto Superior
Técnico
nunofgalmeida@gmail.com



Paulina Faria
Universidade Nova de
Lisboa
Dpt. de Engenharia Civil
mpr@fct.unl.pt



Ana Paula Pinto
Instituto Superior Técnico
Dpt. Engenharia Civil e
Arquitectura
anapinto@civil.ist.utl.pt

Resumo: Este artigo apresenta os resultados laboratoriais obtidos com argamassas de cal aérea e cinzas de casca de arroz ao traço volumétrico 1:2 (uma comercializada no mercado nacional e posteriormente moída e uma outra obtida através de uma casca de arroz calcinada e moída em laboratório). Como padrão realizou-se uma argamassa só de cal aérea com o mesmo traço. A caracterização laboratorial das argamassas foi efectuada em termos de módulo de elasticidade dinâmico, resistências à compressão e à flexão, porosidade aberta e massa volúmica aparente, absorção capilar, permeabilidade ao vapor de água, resistência à acção de sulfatos e de cloretos.

Palavras-chave: Argamassas de cal aérea, Pozolanas, Cinzas de casca de arroz.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Argamassas de Cal Aérea na Recuperação do Património

“O património dum povo constitui uma das suas heranças mais importantes e, simultaneamente, um legado essencial às gerações futuras, as quais julgarão de forma implacável os erros e omissões cometidos no presente” [1].

Com base nesta citação, e tendo em consideração que todas as construções se degradam com o tempo por inúmeros factores, torna-se necessário por parte dos intervenientes conhecer e dominar as especificidades associadas aos projectos de intervenção em edifícios antigos por forma a garantir o cumprimento dos princípios orientadores destas intervenções: princípio da intervenção mínima, princípio da reversibilidade, princípio da durabilidade e princípio da compatibilização de materiais.

De entre as intervenções com maior volume de trabalhos a efectuar no património edificado destacam-se as que envolvem a substituição de argamassas deterioradas. As novas argamassas podem ser aplicadas em camadas de revestimentos de paredes interiores ou exteriores, no refechamento de juntas ou na consolidação de núcleos centrais de

alvenarias antigas. Estas intervenções são efectuadas com vista à protecção das paredes antigas subjacentes, procurando-se que tenham uma vida útil o mais longa possível. Estes tipos de aplicações necessitam da utilização de argamassas que sejam compatíveis com as alvenarias nas quais são aplicadas, pois só dessa forma a protecção destas poderá ser efectivamente garantida.

As argamassas com cal aérea como ligante único apresentam a necessária compatibilidade com as alvenarias antigas mas possuem determinadas características que não possibilitam a sua utilização quando se pretendem aplicações em locais com fraco contacto com o dióxido de carbono da atmosfera ou em ambientes muito húmidos. A sua aplicação em áreas sujeitas a forte ataque por sais está também de algum modo condicionada [2].

1.2 Argamassas de Cal aérea e Componentes Pozolânicos

Com base neste contexto, têm vindo a ser estudadas argamassas realizadas com base em cal aérea e diferentes componentes pozolânicos. A adição de pozolanas à cal aérea confere a estas argamassas a possibilidade da presa passar a ocorrer também por hidratação (para além de por carbonatação) e resulta geralmente num aumento das resistências não só mecânicas mas especialmente face à acção dos sais solúveis, tão frequentes em edifícios antigos [2].

Os componentes pozolânicos consistem em materiais contendo sílica e alumina que, em granulometrias finas e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio da cal aérea, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Como componentes pozolânicos podem utilizar-se pozolanas naturais (materiais de origem vulcânica e rochas sedimentares com composição química apropriada) ou pozolanas artificiais (como sejam os casos de caulinos ou outras argilas activados por tratamento térmico ou de cinzas volantes - subprodutos industriais resultantes das centrais termoeléctricas que laboram a carvão mineral).

Associando a melhoria de características à questão da reciclagem e tendo em conta a premente necessidade de sustentabilidade da construção, têm vindo a ser estudados mais alguns produtos resultantes de subprodutos industriais, como sejam os casos de caulinos rejeitados da indústria do papel, pós de tijolo rejeitados da indústria cerâmica de barro vermelho e casca de arroz resultante da orizicultura que, após serem sujeitos a tratamento térmico, apresentam as características de pozolanidade requeridas.

1.3 Produção de Pozolanas a partir de Casca de Arroz.

Os produtos agrícolas, durante a sua produção, adquirem inúmeros minerais e silicatos do terreno sendo que os materiais inorgânicos, especialmente os silicatos, encontram-se em maiores proporções nas plantas de crescimento anual do que nas árvores com longos períodos de desenvolvimento. Produtos como a casca de arroz, o trigo, a planta de tabaco entre outros contêm uma percentagem considerável de sílica na sua constituição [3], com um potencial elevado de reutilização.

Neste sentido, dada a elevada produção de arroz a nível mundial e o desperdício que representa a casca de arroz, aproximadamente 0,20 toneladas por cada tonelada de arroz [4][5], diversos investigadores têm vindo a desenvolver trabalhos em diversas áreas com o intuito de um reaproveitamento deste desperdício agrícola, destacando-se a sua reutilização como pozolanas no fabrico de argamassas e betões. No entanto, para que seja

viável, torna-se fundamental conhecer a sua composição química e o seu processo de transformação.

Quanto à composição química da casca de arroz e apesar de depender de vários factores, ano de produção, condições climáticas e geográficas, grande parte dos estudos efectuados apontam para que contenha cerca de 73% de matéria orgânica (lenhina e celulose) [4] sendo o restante constituinte a sílica, a qual, segundo Jaubertine et al. [6], encontra-se em maiores concentrações na face externa da casca, menores na face interna e praticamente inexistentes no seu interior.

A transformação da casca de arroz em produtos com propriedades que permitam a sua reutilização consiste na realização da sua calcinação, a qual envolve processos exotérmicos que conferem à produção de cinza uma perda de massa considerável. O produto obtido é uma cinza com cerca de 90 % de sílica, geralmente no estado cristalino [4].

No entanto, e conforme é sabido, a calcinação de materiais inorgânicos poderá originar novas fases cristalinas ou a cristalização de materiais amorfos dependendo de factores como o tempo e a temperatura a que é realizada. Assim, para se obter um produto com concentrações de sílica amorfa de elevada reactividade pozolânica, torna-se fundamental proceder a uma calcinação controlada da casca, em termos dos factores enumerados, que permita a decomposição térmica da matéria orgânica e inviabilize a formação de sílica cristalina. Outro factor condicionante da qualidade do material é a quantidade de oxigénio presente durante a calcinação uma vez que condiciona a micro-porosidade e quantidade de carbono do produto final [5].

Apesar dos inúmeros estudos desenvolvidos neste sentido, os limiares de temperatura e período de calcinação para obtenção de sílica no estado amorfo, apresentados por diversos investigadores, são bastante diversificados, conforme reportado por Nehdi et al. [7]. A nível nacional, Sousa [5] realizou uma incineração da casca de arroz com um período de aquecimento de 5 horas entre os 270 e os 540 °C, e 2 horas a 540°C. A cinza obtida por este processo apresentou cerca de 83% de sílica na sua constituição. No mesmo estudo é citado Sampaio que, para um período de incineração de 2 horas a 540°C, obteve cinza com cerca de 94% de teor de sílica [5].

Outra constatação que pode ser realizada relaciona-se com a cor da cinza obtida. Sidheswaran P. et al. citado em [4], para períodos de incineração de 2 horas, obteve cinzas bastante escuras até aos 400°C, obtendo ainda dois intervalos de temperatura, 400-500°C e 800-850°C, nos quais se verificaram decréscimos acentuados da presença de cinza de cor escura. Estas diferenças de tonalidade poderão estar relacionadas com teores de carbono elevados nas cinzas escuras e maiores concentrações de sílica para cores mais claras.

Assim, poder-se-á concluir que, para além dos factores temperatura e tempo de calcinação, a metodologia utilizada - desde fornos de vértice, de leito fluidizado, de leito fixo até a incinerações precedidas de tratamentos com ácido - é bastante condicionante da constituição química e da estrutura cristalina da cinza obtida.

Para que a cinza produzida, pelos mais diversos métodos, possa ser utilizada como pozolana na realização de argamassas de cal aérea, deverá ainda ser moída em partículas finas [3]. A sílica amorfa da cinza vai reagir com o hidróxido de cálcio da cal aérea,

formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, responsáveis pelo desenvolvimento de compostos hidratados. Esta reacção, tanto mais evidente quanto maior for a reactividade pozolânica do material, depende de parâmetros como a instabilidade termodinâmica, a superfície específica e a composição química [3]. A sua aferição poderá ser estudada através de análises mecânicas, químicas e físicas.

No presente estudo, foram realizados ensaios que permitem determinar a influência da adição de duas cinzas de casca de arroz distintas, a nível do comportamento mecânico das argamassas endurecidas, do comportamento face à acção da água, bem como do comportamento face à acção de sais solúveis (sulfatos e cloretos).

2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiais Utilizados

Para a realização das diferentes argamassas utilizou-se areia de rio (**ar**), cal aérea hidratada em pó (CL 90) (**c**), cinza de casca de arroz comercial e moída em laboratório (**cca,c**) e por último cinza de casca de arroz calcinada e moída em laboratório (**cca,l**). Sendo que as cinzas de casca de arroz foram sujeitas a tratamento em laboratório, proceder-se-á no subcapítulo seguinte à descrição dos métodos de calcinação e moagem efectuados.

2.2 Cinza de Casca de Arroz

2.2.1 Calcinação

A calcinação da casca de arroz realizou-se numa mufla com exaustão, de modo a permitir alguma circulação de ar e consequentemente a libertação do carbono resultante da calcinação.

Conforme já mencionado, a temperatura, o período de calcinação e o respectivo gradiente térmico inicial, são factores fundamentais para obtenção de cinzas com elevados teores de sílica amorfa. Assim, com base em trabalhos desenvolvidos com casca de arroz por Sousa [5], e nos quais se obteve cinzas de elevada qualidade, optou-se por se submeter a cinza ao diagrama de temperaturas apresentado na Figura 1.

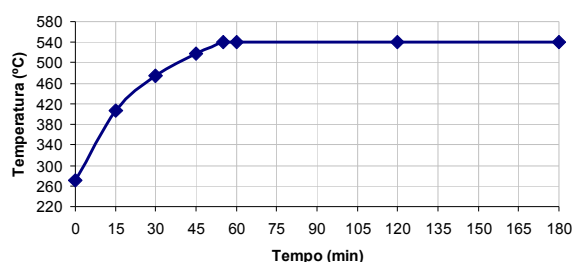


Figura 1 – Gradiente térmico do processo de calcinação da cinza.

Para a obtenção da quantidade de material necessária, e dadas as dimensões da mufla utilizada, foi necessário efectuar diversas calcinações. Deste modo, a calcinação foi realizada colocando num tabuleiro casca de arroz em quantidades reduzidas que permitissem que todo o material recebesse oxigénio durante a calcinação.

Observou-se que a cinza obtida por este processo em cada calcinação apresentava diferenças em termos de coloração e de granulometria, desde uma cinza de cor esbranquiçada e com granulometria mais fina até uma cinza de cor mais escura com granulometria e forma quase idêntica ao da casca de arroz antes da calcinação, conforme se constata nas imagens, obtidas através de uma lupa binocular, apresentadas nas figuras 2 e 3.

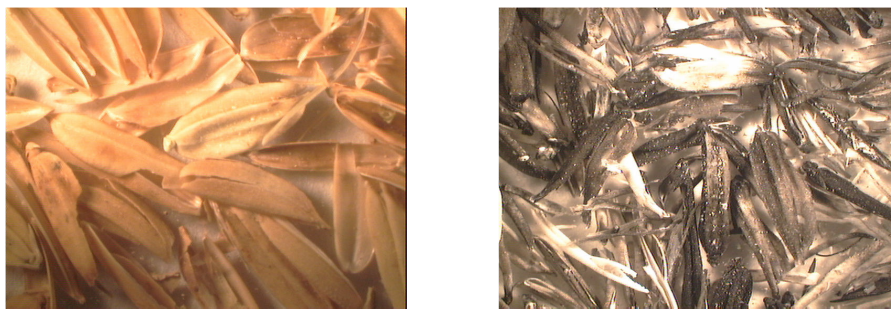


Figura 2.a e 2.b – Fotografias obtidas por observação à lupa binocular, antes da calcinação (esquerda) e após a calcinação (direita) (ampliação 6x)

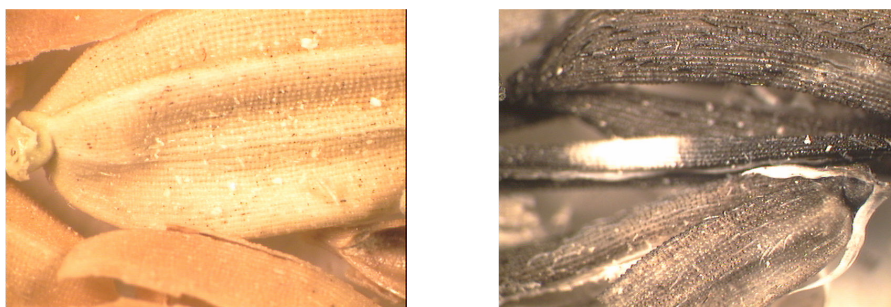


Figura 3.a e 3.b - Fotografias obtidas por observação à lupa binocular, antes da calcinação (esquerda) e após a calcinação (direita) (ampliação 25x)

Para além desta variação na espessura da camada de cinza, constatou-se também que as cinzas que se encontravam junto da porta da mufla apresentavam uma cor mais esbranquiçada, concluindo-se que a porta da mufla não era completamente estanque à entrada de ar, criando, assim, um fluxo de ar entre a porta e o orifício de exaustão, situado no topo no fundo da mufla. Tais fenómenos, registados em todas as calcinações efectuadas, poderão ser indicativos das diferenças de oxigenação a que o material se encontrava sujeito no interior da mufla.

De salientar, e à semelhança de bibliografia consultada, o baixo rendimento deste processo, 14,90% da massa inicial de casca.

2.2.2 Moagem

Com o intuito de se obterem maiores superfícies específicas, ambas as CCA foram moídas num moinho de bolas durante um período de 3 minutos com iguais velocidades de rotação e semelhantes quantidades de material introduzidas nas diferentes moagens realizadas para constância do processo.

Após a moagem de ambas as cinzas, observou-se que a cinza calcinada e moída em laboratório apresentava uma cor mais clara comparativamente à cinza comercial, à semelhança do que já se observava antes da calcinação. Posteriormente, as cinzas foram submetidas a uma análise granulométrica por difracção laser (CILAS 1064 Liquid), tendo-se registado uma distribuição granulométrica muito semelhante (uma vez que o processo de moagem foi idêntico), apesar da CCA obtida em laboratório apresentar uma granulometria ligeiramente inferior.

2.3 Argamassas realizadas

Com base nos materiais referidos em 2.1, efectuaram-se três formulações distintas de argamassas, mantendo o traço volumétrico 1:2 (cal aérea ou cal aérea e pozolana : areia de rio), uma argamassa exclusivamente à base de **c** e tomada como padrão (**P**), outra com **c** e **cca,c** (**C**) e por fim uma com **c** e **cca,l** (**L**). As argamassas foram sujeitas a uma cura de $65\% \pm 5\%$ de humidade relativa (HR), e a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, denominada no presente estudo por normal, sendo que as argamassas **C** e **L** foram ainda sujeitas a uma cura húmida (**h**), $95\% \pm 5\%$ Hr e $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, (**Ch** e **Lh**). As formulações volumétricas e a respectiva cura das diferentes argamassas encontram-se representadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Argamassas realizadas

Argamassa (denominação)	Traço volumétrico (materiais)				Tipo de cura
	c	Cca,c	Cca,l	Ar	
P	1			2	Normal
C	1	0,5		3	Normal
Ch	1	0,5		3	Húmida
L	1		0,5	3	Normal
Lh	1		0,5	3	Húmida

Todas as amassaduras foram realizadas com um misturador de laboratório normalizado, segundo a Ficha de Ensaio Fe 19 [8], tendo sido elaborados por amassadura 6 provetes com dimensões de 4cmx4cmx16cm, obtidos em moldes metálicos correntes, e 3 provetes de configuração circular.

2.4 Ensaios efectuados

De modo a aferir as características mecânicas, comportamento face à acção da água e comportamento face à acção de sais solúveis, foi realizado o seguinte conjunto de ensaios sobre as argamassas endurecidas: i - Módulo de elasticidade dinâmico; ii - Resistência à tracção por flexão; iii - Resistência à compressão; iv - Absorção de água por capilaridade; v - Massa volúmica aparente e Porosidade aberta; vi - Resistência à acção dos cloretos; vii - Resistência à acção dos sulfatos; viii - Permeabilidade ao vapor de água.

Devido à especificidade das argamassas com base em cal aérea e ao facto da maior parte das normas de ensaio de argamassas ter sido desenvolvida para argamassas de ligantes hidráulicos correntes, foram seguidos procedimentos de ensaio específicos [8], desenvolvidos e implementados desde há vários anos nos laboratórios onde decorreram os trabalhos. Algumas dessas especificações de ensaio foram criadas de raiz, enquanto outras se basearam em recomendações da RILEM que mais recentemente têm servido de base à implementação de normas europeias, principalmente para o ensaio de pedra.

Os ensaios iniciaram-se aos 60 dias de idade da argamassa. Os provetes circulares foram utilizados exclusivamente para a permeabilidade ao vapor enquanto os provetes prismáticos foram usados para os restantes ensaios de acordo com o esquema representado na Figura 4.

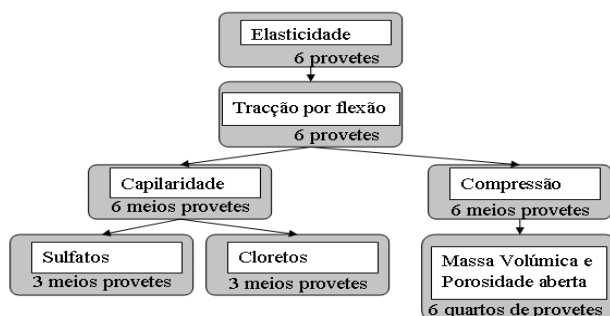


Figura 4 – Esquema de ensaio dos provetes prismáticos

3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS ARGAMASSAS

3.1 Determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico, da Resistência à Tracção por Flexão e da Resistência à Compressão.

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado através da utilização de um equipamento específico para esse fim que identifica a frequência de ressonância do provete em teste de acordo com a ficha de ensaio Fe 08 [8] e semelhante a EN 14146 [9]. Os ensaios de determinação da resistência à tracção por flexão e da resistência à compressão foram efectuados com base na técnica referida na ficha de ensaio Fe 27 [8] semelhante a NP EN 1015-11 [10]. Os valores médios são os indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência à tracção por flexão e da resistência à compressão.

Argamassa	E (MPa)	Flexão (Mpa)	Compressão (MPa)
P	2130	0,30	0,69
C	2720	0,45	1,35
Ch	680	0,16	1,14
L	1340	0,25	1,09
Lh	750	0,18	0,95

3.2 Determinação da Absorção de Água por Capilaridade

Os ensaios de determinação da absorção de água por capilaridade foram efectuados com base na ficha de ensaio Fe 06 [8], com procedimentos semelhantes aos actualmente preconizados na NP EN 1925 [11], e consistiram na colocação dos provetes num leito de água de 2 mm de altura e registo dos valores da massa de água absorvida por unidade de área da face imersa em função de \sqrt{t} (em segundos). O coeficiente de absorção por capilaridade é dado pelo coeficiente angular da curva traçada a partir dos registos mencionados e os valores assintóticos correspondem aos máximos de absorção (variação entre massas sucessivas menores que 1 %). Os valores médios obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Absorção de água por capilaridade e valor assintótico

Argamassa	Coef. capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$)	Valor assintótico (kg/m^2)
P	0,27	18,4
C	0,19	19,2
Ch	0,33	24,0
L	0,28	19,9
Lh	0,36	23,2

3.3 Determinação da Resistência à Acção dos Cloretos

Os ensaios foram realizados segundo a metodologia preconizada na ficha de ensaio Fe 12 [8] mediante a imersão dos provetes (3 metades de provetes prismáticos após a realização do ensaio de capilaridade), numa solução saturada de cloreto sódio por um período de 24 horas. Findo esse período, deixaram-se secar durante 1 hora ao ar e colocaram-se numa estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até se atingir massa constante. Posteriormente, colocaram-se os provetes numa câmara climática, sujeitando-os a ciclos de 12 horas em ambiente húmido (HR de 90%), e 12 horas em ambiente seco (HR de 40%). No final dos ciclos secos, determinou-se a massa de cada provete, de modo a aferir a variação de massa em relação à massa inicial. Os resultados obtidos ao fim de n ciclos são os apresentados na Tabela 4 e a Figura 5 representa as variações de massa ocorridas ao longo do ensaio.

Tabela 4 – Percentagem de cloretos retidos e variações de massa das argamassas, sob a acção de cloretos, ao fim de n ciclos

Argamassa	Cloretos retidos (%)	Variação de massa ao fim de n ciclos (%)				
		7	14	21	28	35
P	3,58	2,29	-3,62	-9,60	-18,20	-27,29
C	3,15	2,43	2,46	2,00	1,08	0,36
Ch	4,40	2,59	2,99	3,17	3,04	2,22
L	3,53	1,76	1,71	1,74	1,32	0,45
Lh	4,30	2,12	2,59	2,92	2,84	2,40

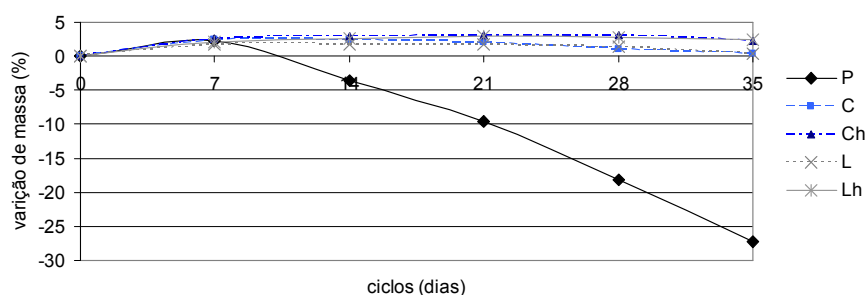


Figura 5 – Cloretos - Variações de massa ao longo do ensaio

3.4 Determinação da Resistência à Acção dos Sulfatos

O ensaio de determinação da resistência aos sulfatos foi efectuado de acordo com o especificado na ficha de ensaio Fe 11 [8], desenvolvida com base na NP EN 12370:2002 [12] através da colocação dos provetes numa solução a 6% de sulfato de sódio anidro. Com esses provetes procedeu-se alternadamente a ciclos de imersão durante 2 horas e secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante um período superior a 21 horas. Em cada um

desses ciclos foi determinada a perda de massa em relação à massa inicial de cada provete e avaliado o seu estado de integridade. Os resultados obtidos ao fim de n ciclos são apresentados na Tabela 5 e na Figura 6.

Tabela 5 – Variação de massa das argamassas, sob acção dos sulfatos, ao fim de n ciclos.

Argamassa	Variação de massa ao fim de n ciclos (%)		
	5	15	25
P	3,15	5,07	-100,00
C	1,85	-0,37	-25,82
Ch	4,40	2,21	-20,25
L	2,53	3,81	4,34
Lh	4,27	-3,26	-34,99

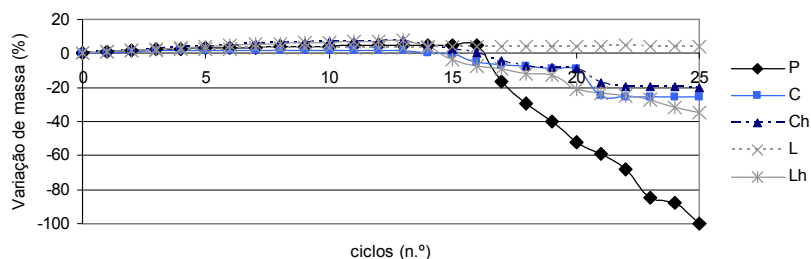


Figura 6 – Sulfatos - variação de massa das argamassas no decorrer do ensaio

3.5 Determinação da Massa Volúmica e da Porosidade Aberta

Os ensaios foram efectuados segundo as fichas de ensaio Fe 01 [8] para as massas volúmicas aparentes e Fe 02 [8] para a porosidade aberta, semelhantes a NP EN 1936 [13], através da saturação sob vácuo e pesagem hidrostática. Os valores médios para ambas as grandezas são indicados na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa volúmica aparente e Porosidade aberta

Argamassa	Massa Volúmica (kg/m ³)	Porosidade aberta (%)
P	1730	33
C	1810	31
Ch	1710	34
L	1810	31
Lh	1700	34

3.6 Determinação da Permeabilidade ao Vapor de Água

Para a determinação da permeabilidade ao vapor de água foi realizado o ensaio preconizado na ficha de ensaio Fe 05 [8], baseada na NP EN 1015-19 [14]. Colocou-se 1 cm de altura de água no interior de cápsulas, nas quais foram fixados os provetes. A zona de contacto entre o provete e a cápsula foi devidamente vedada para que a humidade relativa no interior fosse de 100%. Posteriormente o conjunto (cápsula e provete) foi introduzido no interior de uma câmara climática com um ambiente de 40% de humidade relativa e uma temperatura de 20°C. Efectuaram-se pesagens periódicas aos conjuntos de ensaio, até que se atingisse um regime estacionário, de modo a aferir a quantidade de

vapor de água difundida através do provete. Deste modo obtiveram-se os seguintes valores médios apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Permeabilidade ao vapor de água (P.V) e espessura de camada de ar de difusão equivalente (Sd)

Argamassa	P. V $\times 10^{-11}$ (kg/m.s.Pa)	Sd (m)
P	1,98	0,099
C	2,03	0,096
Ch	1,26	0,155
L	2,11	0,093
Lh	1,47	0,133

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme já referido, as diferentes argamassas foram ensaiadas de modo a aferir as suas características mecânicas, comportamento face à acção da água e à acção de sais solúveis, fundamentais para avaliar a qualidade de uma argamassa para aplicação em rebocos de edifícios antigos. Deste ponto de vista, e tendo em consideração factores como a protecção do suporte, as argamassas deverão apresentar resistências mecânicas não superiores às do suporte, reduzidas absorções de água e permeabilidades semelhantes às do suporte. A fim de assegurar a durabilidade da própria argamassa, devem apresentar bons comportamentos face à acção de sais solúveis [15].

Relativamente às características mecânicas, destaca-se o incremento da resistência à compressão nas argamassas contendo cinza, em ambos ambientes de cura, e o decréscimo da resistência à flexão das argamassas submetidas a cura húmida, **Ch** e **Lh**. Constata-se também que a argamassa realizada com cinza comercial apresenta valores superiores ao da argamassa com cinza totalmente produzida em laboratório, nos dois ambientes de cura.

Quanto ao comportamento face à acção da água, verifica-se que as argamassas com ambas as cinzas, sujeitas a cura húmida, apresentam piores comportamentos do que as curadas em ambiente normal (conforme denominado em 2.3), o mesmo sucedendo quando comparadas com a argamassa **P**, uma vez que absorvem uma maior quantidade de água a velocidades superiores e apresentam-se como as menos permeáveis ao vapor de água. Contudo, a argamassa **L**, sujeita a cura em ambiente normal, evidenciou comportamento face à água (na forma líquida e de vapor) muito semelhante ao da argamassa **P**. A argamassa **C**, em relação às argamassas **P** e **L**, evidenciou um decréscimo acentuado no coeficiente de capilaridade para um semelhante valor assintótico, ao que poderá estar associada uma baixa porometria que dificultasse a ascensão capilar da água. Tendo por base este facto, e analisando os valores das porosidades abertas (nos quais as argamassas sujeitas a cura húmida obtiveram valores semelhantes aos da argamassa **P** e ligeiramente inferiores em ambiente normal), não foi possível estabelecer uma correspondência directa com os valores indicativos da absorção de água, possivelmente devido à influência da microestrutura interna das argamassas.

No que se refere ao comportamento das argamassas face à acção dos cloretos, numa primeira análise verifica-se uma melhoria de comportamento, bastante acentuada, face à argamassa padrão, uma vez que esta apresenta perdas de massa, em relação à massa inicial, a partir da 2.^a semana, enquanto as restantes argamassas ao 35.^o dia de ensaio

permaneceram sem qualquer perda de massa. Pela análise da Figura 5, em relação às argamassas contendo cinza, é possível observar que ambas se comportam de forma bastante semelhante sujeita aos dois ambientes de cura. Por outro lado, tendo em consideração a percentagem de cloretos retidos, verifica-se a relação destes valores com os da porosidade aberta: a maiores percentagens de cloretos retidos correspondem maiores porosidades. No entanto, a mesma relação não se consegue estabelecer com as variações de massa no decorrer do ensaio, dado que a argamassa **P** apresenta uma maior porosidade do que as argamassas **C** e **L**, e conforme já referido, uma muito menor resistência à acção provocada pelos cloretos. Pressupõe-se que, à semelhança do que ocorrera com análise efectuada para o comportamento face à acção da água, a microestrutura interna poderá desempenhar também um papel fundamental.

Por fim analisam-se os resultados obtidos no ensaio de resistência à acção dos sulfatos. Mediante a observação da Figura 6, observa-se que, no final do 25.º ciclo de ensaio, a argamassa **L** é aquela que denota melhor comportamento e que a argamassa **P** apresenta uma perda de massa de 100% (o que significa que todos os provetes ensaiados se degradaram por completo no decorrer do ensaio). Constata-se também que as diferenças de comportamento são mais acentuadas a partir de 15.º/16.º ciclo, sendo que, com a excepção da argamassa **L**, todas as outras apresentam perdas de massa.

Com base nos pressupostos referidos no início deste capítulo e na análise efectuada, a argamassa **C**, realizada com cinza de casca de arroz comercial e moída em laboratório, foi a que apresentou melhores características para aplicação em edifícios antigos. Tal deve-se, essencialmente, ao facto de ter sido a que apresentou características mecânicas ligeiramente superiores a todas as outras, mas perfeitamente compatíveis com a generalidade dos suportes dos edifícios antigos, melhores comportamentos face à acção da água (para cura normal) e bom comportamento à acção dos cloretos, especialmente quando sujeita a cura em ambientes húmidos. Apenas na resistência à acção dos sulfatos, a argamassa **L**, para cura em ambiente normal, se revelou mais eficaz.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo pretendeu avaliar a influência da adição de cinzas de casca de arroz como pozolanas em argamassas de cal aérea para aplicação em edifícios antigos.

Conforme é sabido, a utilização de pozolanas em argamassas é responsável pelo incremento de resistências mecânicas e pela melhoria de comportamento face à acção de sais solúveis melhorando a sua durabilidade e sem colocar em causa a necessária protecção conferida pelas argamassas aos suportes antigos. Assim, os resultados obtidos para as argamassas formuladas com duas cinzas de casca de arroz distintas permitem concluir que ambas, para curas em ambientes de humidade relativa de $65\% \pm 5\%$ e temperaturas de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, respeitam essas mesmas características. Face à argamassa só de cal aérea apresentaram incrementos de resistências e especialmente maiores resistências aos sais solúveis (cloretos e sulfatos).

Por outro lado, a diversidade de valores (apesar de não muito acentuada) entre as argamassas formuladas com diferentes tipos de cinza permite concluir a influência do tipo de cinza utilizada. No entanto, para melhor aferir esta influência irá proceder-se a uma caracterização química e mineralógica mais rigorosa das cinzas obtidas através de

diferentes tratamentos térmicos (variando temperaturas, período de tratamento e método de calcinação) e respectiva superfície específica, procurando otimizar as metodologias que conduzam à obtenção do produto mais eficiente. Contudo, poder-se-á desde já concluir que a utilização de cinza de casca de arroz, obtida mediante processos de calcinação e moagem adequados, pode introduzir melhorias significativas em termos de durabilidade das argamassas de cal área para aplicações em edifícios antigos, não colocando em causa a sua necessária compatibilidade com o suporte.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Henriques, F. *A conservação do património histórico edificado*; Memória 775, LNEC; Lisboa, 1991
- [2] Faria-Rodrigues, P. *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo de influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2004.
- [3] Biricik, H. *Study of pozzolanic properties of wheat straw ash*. Cement and Concrete Research, Pergamon, 29, 1999, 637-643.
- [4] Chandrasekhar, S. et al. *Review. Processing, properties and applications of reactive silica from rice husk – an overview*. Journal of Materials Science, 38, 2003, 3159-3168.
- [5] Sousa, S. B. *Betões eco-eficientes com cinza de casca de arroz*. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de mestre em Estruturas de Engenharia Civil, 2005.
- [6] Jauberthie, R. et al. *Origin of the pozzolanic effect of rice husks*. Construction and Building Materials, Elsevier, 14, 2000, 419-423.
- [7] Nehdi, M; Duquette, J.; El Damatty, A. *Performance of rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete*. Cement and Concrete Research, Pergamon, 33, 2003, 1203-1210.
- [8] Universidade Nova de Lisboa (UNL) / Departamento de Engenharia Civil (DEC). *Fichas de Ensaio*. Monte da Caparica, UNL/FCT, 1996. Fe 01, Fe 02, Fe 05, Fe 06, Fe 08, Fe 11, Fe12, Fe 19, Fe 27.
- [9] CEN, *Natural stone test methods. Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency)*. Brussels, EN 14146: 2004.
- [10] CEN, *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, EN 1015-11:1999.
- [11] IPQ, *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade*. Lisboa, NP EN 1925: 2000.
- [12] IPQ, *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Lisboa, NP EN 12370: 2002.
- [13] IPQ, *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Lisboa, NP EN 1936: 2001.
- [14] IPQ, *Métodos de ensaio de argamassas para alvenaria – Parte 19: Determinação da permeabilidade ao vapor de água de argamassas de reboco endurecidas*. Lisboa, NP EN 1015-19:2000
- [15] Faria-Rodrigues, P. *Argamassas de cal aérea e componentes pozolânicos*. Construção 2004, Porto, FEUP, Dez. 2004