



Universidade de Aveiro
2012

Departamento de Engenharia Civil

**MARIA JOÃO
MATOS**

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CAL E
METACAUULINO EM SUPORTES DE ADOBE**



**MARIA JOÃO
MATOS**

**DESEMPENHO DE ARGAMASSAS DE CAL E
METACAUULINO EM SUPORTES DE ADOBE**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Luísa Velosa, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, e coorientação científica da Doutora Slávka Andrejkovičová, Investigadora Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro.

Aos meus pais e irmã.

o júri

presidente

Prof. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Maria Isabel Morais Torres
Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Doutora Slávka Andrejkovičová
Investigadora auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Toda a colaboração de forma direta ou indireta na realização desta dissertação reflecte-se no trabalho aqui apresentado. Como tal, gostaria de fazer referência àqueles que contribuíram para que finalizasse mais esta etapa da minha vida académica.

À professora Ana Velosa, orientadora da dissertação, agradeço a partilha de saber, incentivo e sugestões ao longo deste projeto.

À Slávka, coorientadora deste trabalho, obrigada pela constante disponibilidade, incansável orientação científica, esclarecimentos, opiniões e confiança que sempre me concedeu. D'akujem!

Ao pessoal do laboratório, em especial à engenheira Maria Carlos, ao engenheiro João Festas e ao sr. Vitor Rodrigues pelo apoio prestado.

Ao Diogo Pires e ao David Monteiro pelos conselhos e críticas ao meu trabalho.

Aos meus colegas e amigos que mostraram todo o seu apoio, paciência e carinho ao longo deste processo, especialmente à Filipa Rodrigues, Beatriz Martins, Sofia Oliveira, Pedro Narra, Joel Castanheira, Vitor Silva, Daniela Rodrigues, Soraia Silva, David Lourenço, Filipe Soares, Rui Martins, Andreia Coutinho, Ana Neves, Pedro Ferreira, Luís Pereira, João Teles e Inês Quirino.

Quero ainda agradecer à minha família. Um especial obrigada aos meus pais, Nuno Matos e Fátima Matos, e à minha irmã, Beatriz Matos, pelo constante sorriso, amizade e incentivo sempre demonstrados.

palavras-chave

cal aérea, metacaulino, adobe

resumo

O estudo do comportamento de diferentes composições de argamassas de cal aérea em suportes de adobe é a base do presente trabalho.

Pretende-se saber qual a composição que melhor se adequa a este tipo de suporte, tendo como objetivo a substituição de argamassas disfuncionais em construções de adobe.

Para tal, foram realizados diversos ensaios físicos e químicos que permitem comparar o comportamento das diferentes misturas e fazer uma avaliação crítica dos resultados.

Num estudo como este não é possível obter uma argamassa ideal para aplicação em qualquer situação, mas sim parâmetros que influenciam na escolha da mesma.

A resposta das várias argamassas realizadas em ambiente controlado irá permitir fazer uma analogia a situações reais, permitindo seleccionar a argamassa que melhor responde a determinados requisitos.

keywords

air lime, metakaolin, adobe

abstract

This thesis aims to study the behaviour of different air lime mortars on adobe brick walls.

The main objective is to comprehend the best composition of air lime mortar to be employed in a replacement of deteriorated mortar intervention, in adobe buildings.

A campaign of mechanical and chemical tests has been carried out with the purpose of comparing the influence of different blends. Next, a critical analysis of the results was performed.

In a study like this one it is not possible to obtain an ideal mortar for application in any situation, but some parameters that influence the its choice.

Using the response of mortars produced in controlled ambient conditions, it was possible to yield an analogy to real life situations and consequently, select the mortar that best fits the desired requirements.

ÍNDICE GERAL

Índice Geral	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Simbologia e Acrónimos	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo do trabalho	1
1.2. Organização da tese	2
2. Enquadramento.....	3
2.1. Argamassas e seus constituintes	3
2.1.1. Ligantes	3
2.1.2. Aditivos	5
2.2. Argamassas para conservação do património em adobe	7
2.3. Principais patologias das construções em adobe	7
3. Trabalho experimental.....	13
3.1. Materiais base	13
3.2. Argamassas	13
3.3. Preparação das argamassas em ambiente laboratorial.....	15
3.3.1. Provetes	15
3.3.2. Argamassas em bloco de adobe.....	17
3.3.3. Argamassas em parede de adobe	17
3.4. Métodos e ensaios.....	19
3.4.1. Determinação da massa volúmica aparente.....	20
3.4.2. Análise mineralógica	22
3.4.3. Ensaio de espalhamento.....	22
3.4.4. Determinação do módulo de elasticidade dos provetes de argamassa	22
3.4.5. Determinação da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas aplicadas em suporte de adobe	23
3.4.6. Ensaio de resistência à flexão.....	24
3.4.7. Ensaio de resistência à compressão	24
3.4.8. Ensaio de carbonatação	25
3.4.9. Ensaio de capilaridade e absorção de água sob pressão	26

3.4.10.	Ensaio de “pull-off”	29
3.4.11.	Câmara climática com imposição de ciclos para envelhecimento acelerado	30
3.4.12.	Recolha de imagens recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento – SEM “scanning electron microscope”	32
4.	Análise de Resultados	33
4.1.	Massa volúmica aparente	33
4.1.1.	Análise mineralógica.....	34
4.1.2.	Ensaio de espalhamento	38
4.1.3.	Propriedades mecânicas dos provetes de argamassas	38
4.1.4.	Determinação da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas aplicadas em suporte de adobe.....	42
4.1.5.	Ensaio de carbonatação	43
4.1.6.	Ensaio de capilaridade e de absorção de água sob pressão	46
4.1.7.	Ensaio de “pull-off”	52
4.1.8.	Argamassa em blocos de adobe, com imposição de ciclos para envelhecimento acelerado	54
4.1.9.	Recolha de imagens recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento – SEM “scanning electron microscope”.....	54
5.	Conclusões e Trabalho Futuro.....	57
6.	Referências bibliográficas	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localização das técnicas construtivas em (a) taipa ; (b) adobe	1
Figura 2. Estrutura da sepiolite - referência aos canais zeólitos.....	6
Figura 3. Esmagamento localizado.....	8
Figura 4. Fissuras nos vãos das aberturas.....	9
Figura 5. Empolamento e destacamento dos revestimentos	9
Figura 6. Manchas e humidades	10
Figura 7. Fissuração na junta das paredes	10
Figura 8. Degradação do adobe	11
Figura 9. Degradação dos revestimentos	11
Figura 10. Preparação das argamassas de acordo com as dosagens definidas	15
Figura 11. Mistura dos componentes.....	15
Figura 12. Execução dos provetes	16
Figura 13. Provetes em cura na câmara climática a $65\pm 5\%$ HR e $20\pm 2^{\circ}\text{C}$	16
Figura 14. As diferentes aplicações das argamassas nos blocos de adobe e a percentagem de água em cada camada	17
Figura 15. Aplicação das argamassas na parede de adobe e percentagem de água em cada camada.....	18
Figura 16. Aplicação da camada de chapisco na parede de adobe	18
Figura 17. Parede de adobe com as diferentes argamassas aplicadas	18
Figura 18. Pesagem de argamassa num volume conhecido	21
Figura 19. Verificação do valor de espalhamento	22
Figura 20. ERUDITE MKIV – PC1004	23
Figura 21. Ensaio com o PUNDIT nas argamassas em parede de adobe.....	23
Figura 22. Ensaio à flexão	24
Figura 23. Ensaio à compressão	25
Figura 24. Estado de carbonatação em provete de argamassa.....	25
Figura 25. Ensaio de carbonatação em argamassa em bloco de adobe	26
Figura 26. Ensaio de carbonatação em argamassa em parede de adobe.....	26
Figura 27. Amostras no exsiccador	27
Figura 28. Ensaio de capilaridade.....	27

Figura 29. Ensaio de absorção de água a argamassa em bloco de adobe.....	28
Figura 30. Ensaio de absorção de água a argamassa em parede de adobe.....	28
Figura 31. Ensaio de “pull-off” a argamassa em bloco de adobe	29
Figura 32. Ensaio de “pull-off” a argamassa em parede de adobe.....	29
Figura 33. Tipos de rotura adesiva.....	30
Figura 34. Tipo de rotura coesiva.....	30
Figura 35. Câmara de imposição de ciclos para envelhecimento acelerado	31
Figura 36. Blocos de adobe submetidos aos ciclos de envelhecimento	31
Figura 37. Difração raio-x dos materiais constituintes das argamassas.....	35
Figura 38. Difração raio-x das amostras aos 28 dias de cura.....	36
Figura 39. Difração raio-x das amostras aos 90 dias de cura.....	36
Figura 40. Difração raio-x das amostras aos 180 dias de cura.....	37
Figura 41. Comparação do módulo de elasticidade das argamassas nas diferentes fases de cura	39
Figura 42. Comparação da resistência à flexão das argamassas nas diferentes fases de cura	40
Figura 43. Comparação da resistência à compressão das argamassas nas diferentes fases de cura	41
Figura 44. Estado de carbonatação dos provetes de argamassas aos 28, 90 e 180 dias de cura	43
Figura 45. Evolução do processo de carbonatação dos provetes de argamassa.....	44
Figura 46. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 28 dias de cura	47
Figura 47. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 90 dias de cura	48
Figura 48. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 180 dias de cura	49
Figura 49. Partículas observadas na superfície da argamassa após ensaio de envelhecimento acelerado	54
Figura 50. Imagens observadas no SEM.....	55
Figura 51. Imagens observadas no SEM.....	55
Figura 52. Análise mineralógica da fração E presente na Figura 48-B.....	56
Figura 53. Análise mineralógica da fração F presente na Figura 49-D.....	56

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Percentagem de substituição de cal aérea por aditivos em cada argamassa	14
Tabela 2. Ensaios e medidas realizadas aos materiais constituintes das argamassas	19
Tabela 3. Ensaios realizados aos provetes de argamassas	19
Tabela 4. Ensaios realizados às argamassas em blocos de adobe	20
Tabela 5. Ensaios realizados às argamassas em parede de adobe	20
Tabela 6. Ciclos a que foram submetidos os blocos de adobe	32
Tabela 7. Massa volúmica aparente e D_{50} dos componentes das argamassas	33
Tabela 8. Massa volúmica aparente das argamassas realizadas	34
Tabela 9. Análise química dos materiais utilizados na realização das argamassas	34
Tabela 10. Velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT	42
Tabela 11. Percentagem de carbonatação dos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.....	43
Tabela 12. Tipo de rotura e percentagem de carbonatação das argamassas em blocos de adobe.....	45
Tabela 13. Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura	50
Tabela 14. Tempo de absorção de secagem dos diversos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura	50
Tabela 15. Tempo de absorção de água sob pressão nas argamassas aplicadas em parede de adobe.....	51
Tabela 16. Resultados do ensaio de "pull-off" às argamassas em blocos de adobe com 1 mês de cura	52
Tabela 17. Resultados do ensaio de "pull-off" às argamassas em blocos de adobe com 3 meses de cura.....	53

SIMBOLOGIA E ACRÓNIMOS

DRX	difração raio-x
D ₅₀	dimensão característica de um dado material granular, tal que 50% dos grãos do material têm diâmetro inferior a este tamanho
HR	humidade relativa no ar
MV	massa volúmica aparente
m _a	massa da argamassa
m _c	massa do recipiente + argamassa
m _r	massa do recipiente
pH	indicador de acidez, neutralidade ou alcalinidade de um meio
v	volume do recipiente

1. INTRODUÇÃO

Em Portugal, a reabilitação e a recuperação de edifícios em terra tem vindo a merecer uma atenção crescente, constituindo já uma grande área de investimento e desenvolvimento no âmbito da preservação do património. Estas ações são particularmente notadas em centros históricos e também em zonas rurais onde este tipo de edifícios assume maior expressão.

No nosso país encontramos este tipo de construção no sul e centro litoral, predominando a construção em taipa no sul e a construção em adobe no centro litoral (Fernandes *et al.*, 2010), tal como se pode verificar na Figura 1.

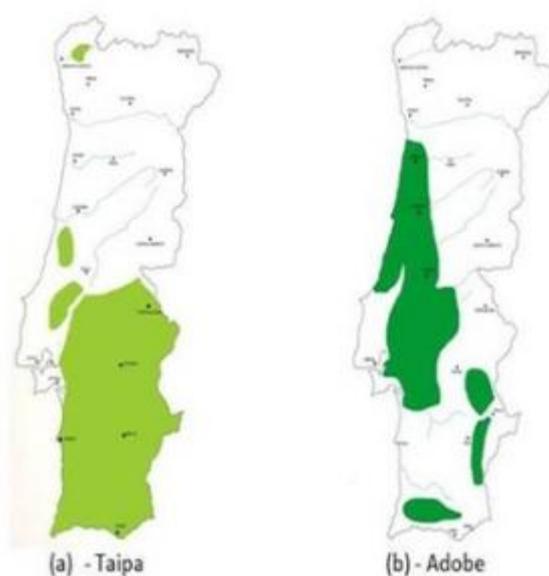


Figura 1. Localização das técnicas construtivas em (a) taipa ; (b) adobe (Gonçalves, 2010)

1.1. Objetivo do trabalho

O presente trabalho tem como principal objetivo o estudo do comportamento de diferentes composições de argamassas com potencial para substituir argamassas degradadas em suporte de adobe.

Assim, pretende-se analisar a resposta de várias argamassas, em ambiente controlado, permitindo inferir o comportamento das mesmas em situações reais. Para o

conseguir, foi efetuado um trabalho experimental que deverá permitir a seleção das composições que melhor se adequam a ambientes pré-definidos.

1.2. Organização da tese

No capítulo 1 são apresentados os objetivos e organização do trabalho realizado.

Na segunda parte, capítulo 2, apoiados na pesquisa bibliográfica efetuada, faz-se o enquadramento do estudo, descrevendo a constituição geral das argamassas e a sua utilização na conservação do património em adobe. São ainda identificados alguns problemas que podem surgir com a sua utilização.

No capítulo 3 apresenta-se o trabalho laboratorial desenvolvido, no qual foram caracterizados os materiais base e desenvolvidas e testadas as composições objeto de estudo.

Segue-se o capítulo 4, onde é feita uma análise de resultados e comentários a cada ensaio realizado. São ainda elaboradas algumas comparações entre o comportamento das várias argamassas em estudo.

É finalmente apresentado um capítulo com as conclusões, onde são deixadas ideias para trabalhos a realizar futuramente.

Com os resultados obtidos espera-se contribuir para a formulação de misturas química e mecanicamente compatíveis com o suporte, o adobe, adequadas ao tipo de aplicação e ao ambiente a que serão expostas.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Argamassas e seus constituintes

Argamassa é o material resultante da mistura de areia, um ligante e água. De acordo com as características pretendidas para a sua aplicação podem incorporar-se outros materiais, entre os quais, os aditivos. As características e propriedades de uma argamassa dependem essencialmente do ligante usado. Esta é a razão pela qual a rapidez da evolução das argamassas, está intimamente relacionada com o desenvolvimento de materiais cimentícios artificiais (Palomo *et al.*, s.d.).

As argamassas utilizadas nesta tipologia construtiva têm duas funções fundamentais: realizar a conexão entre blocos ou efetuar o seu revestimento. Para tal, é necessário conhecer o seu comportamento ao longo do tempo, bem como as características que melhor se adequam ao suporte e, também, ao ambiente a que serão expostas (Arizzi *et al.*, 2011).

2.1.1. Ligantes

O papel dos ligantes na mistura constituinte da argamassa é ganhar presa, oferecendo-lhe a rigidez esperada para as várias aplicações. Por outro lado, os ligantes, como o próprio nome indica, aglomeram os outros constituintes da argamassa, para que esta possa unir os diversos materiais de construção (Velosa e Veiga, 2007).

A cal aérea (hidróxido de carbono) é o ligante mais sustentável, uma vez que é o material que consome menos energia na sua produção, tem uma baixa emissão de dióxido de carbono (CO₂) e, durante a vida útil, absorve CO₂ por carbonatação (Velosa e Veiga, 2007).

As argamassas de cal foram utilizadas na civilização Romana em todo o seu Império. Desde essa época, o hidróxido de cálcio tem vindo a ser utilizado de forma regular como ligante em argamassas (Velosa *et al.*, 2007). Com a descoberta dos ligantes hidráulicos, em meados do século XIX, a cal aérea foi sendo gradualmente substituída pela cal hidráulica e mais tarde pelo cimento (Martínez-Ramírez *et al.*, 1995), pois este tem um endurecimento mais rápido, maior resistência e longevidade (Miguel, 2008). Contudo, na reabilitação da construção, as argamassas feitas à base de cimento têm sido alvo de grandes críticas devido

à elevada quantidade de sais, excessiva rigidez, retração e suscetibilidade de fendilhação (Feilden, 1994, Maravelaki-Kalaitzaki *et al.*, 2003). Para além disso, o uso do cimento é geralmente inadequado para argamassas destinadas à aplicação em edifícios antigos, uma vez que essas argamassas possuem uma baixa porosidade relativamente às argamassas de cal e, conseqüentemente, uma baixa permeabilidade ao vapor de água. Desta forma, as argamassas à base de cal aérea são preferíveis para que haja a compatibilidade necessária que acima foi referida.

O uso de cal aérea em argamassas incorpora nestas algumas características como (BritishLimeAssociation):

- flexibilidade - a cal, tendo um endurecimento mais lento que o cimento, faz com que a alvenaria tenha maior capacidade de acomodar as tensões geradas pelo movimento da própria construção, sem causar grandes fendas;
- espalhamento - a cal melhora a capacidade plástica e a espalhamento da argamassa; ao mesmo tempo que fornece à argamassa um elevado grau de coesão, faz com que a mesma seja fácil de aplicar com espátula;
- capacidade de retenção de água – esta capacidade faz com que a penetração de água em fendas nas juntas de argamassa já endurecida seja reduzida;
- resistência – o uso de cal em argamassas reduz a sua capacidade de resistência à compressão e flexão; assim, as argamassas que contêm cal, ao contrário das argamassas excessivamente resistentes, minimizam as tensões impostas pelos movimentos estruturais, evitando a ocorrência de fissuras;
- capacidade resistente ao gelo-degelo – as argamassas que contêm cal, ao reduzirem a entrada de água, fazem com que a acção gelo-degelo seja reduzida, evitando a deterioração da construção;
- capacidade de permeabilidade ao vapor de água – a permeabilidade ao vapor de água melhora com o aumento do teor em cal na argamassa; uma argamassa com alto teor em cal, permite que o vapor de água passe do interior para o exterior, fazendo com que a construção “respire”;
- capacidade de auto cura – se houver aparecimento de fissuras na argamassa, a combinação de cal, humidade e CO₂ do ar ajuda a fechar a fenda, através da formação de carbonato de cálcio.

2.1.2. Aditivos

Os aditivos são componentes cada vez mais utilizados na elaboração de argamassas, salientando-se as pozolanas. As pozolanas, na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos de silicato e aluminato de cálcio, que conferem resistência mecânica à argamassa (Jorge, 2007). Esta relação é favorecida quando as pozolanas têm elevada superfície específica (moídas) ou são alvo de uma calcinação.

Devido à necessidade de endurecimento rápido de argamassas de cal em ambientes húmidos ou locais onde o CO₂ não tem fácil acesso, como é o caso de painéis de azulejos, surge a incorporação de metacaulino nas misturas destinadas à conservação de edifícios (Velosa *et al.*, 2009). Como resultado, a aplicação e endurecimento são mais rápidos e a argamassa apresenta uma maior durabilidade, mantendo os requisitos de compatibilidade (Velosa e Veiga, 2007). As argamassas de cal aérea com pozolanas, quando constituídas com as proporções corretas dos diversos materiais, são adequadas para a conservação de edifícios, pois garantem compatibilidade mecânica e física, resistência aos sais, assim como fraca suscetibilidade de fendilhação (Velosa *et al.*, 2007).

O metacaulino é um material pozolânico artificial, obtido através da calcinação de argilas caulínicas a uma temperatura que varia entre 500 °C a 800 °C (eConf.info, 2009, Siddique e Klaus, 2008).

A utilização do metacaulino como material pozolânico em argamassas ganhou um grande interesse nos últimos anos quer pelo facto de se ter começado a reduzir o consumo de cimento Portland (mais económico, mas prejudicial ao meio ambiente), quer pelo facto de conferir maior durabilidade às argamassas (Sabir *et al.*, 2001).

Para a reabilitação de edifícios o uso do metacaulino em argamassas de cal aérea apresenta as seguintes vantagens: (Siddique e Klaus, 2008):

- aumento da resistência à compressão e flexão;
- redução da permeabilidade à água;
- aumento da resistência a ataques químicos;
- aumento da durabilidade;
- confere melhor espalhamento à argamassa.

Como tal, o fabrico de argamassas de cal e metacaulino tem sido alvo de numerosas investigações para que, desta forma, se consigam conhecer as melhores combinações de materiais.

Para além das pozolanas, os aditivos que se podem introduzir numa argamassa de cal também são importantes para que se possa otimizar o seu desempenho. A sepiolite é um exemplo desses materiais que tem vindo a ser estudado, devido à sua capacidade de adsorção. A sepiolite ajuda a reter humidade após a mistura e aplicação da argamassa, actuando como um reservatório para a água (Andrejkovičová *et al.*, 2011).

A sepiolite é uma argila mineral – $\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{OH}_2)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, que exhibe partículas com diâmetros de 2-10 μm . As suas extraordinárias propriedades de adsorção e absorção são devidas à sua microestrutura, Figura 2, que é composta por camadas de tetraedros de silício ligados através de átomos de oxigénio ao centro de um plano octaédrico de átomos de magnésio.

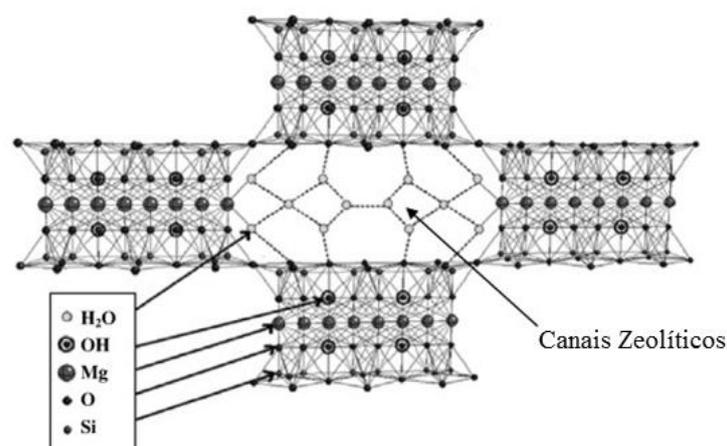


Figura 2. Estrutura da sepiolite - referência aos canais zeólitos (Chivraca *et al.*, 2009)

Os tetraedros de silício formam canais denominados de zeolíticos, que conferem à sepiolite uma elevada área de contacto específica, de aproximadamente 340 m^2/g . Para além disso, a sepiolite tem uma grande estabilidade volúmica, química e estrutural (Martínez-Ramírez *et al.*, 1996). Estudos dos mesmos autores revelaram que a incorporação de uma percentagem de sepiolite inferior a 5% do peso total da argamassa não influencia o comportamento mecânico da argamassa, mas nota-se uma redução da resistência mecânica quando é substituída 10% da cal.

Andrejkovičová *et al.* (2011) testaram argamassas de cal com adição de sepiolite e zeólito A e observaram que existiu uma redução do tempo de carbonatação das argamassas. Contudo, a resistência mecânica das argamassas não foi afetada

negativamente. Concluíram ainda que as propriedades mecânicas das argamassas de cal com sepiolite e zeólito A apresentam valores mais elevados, principalmente aos 90 e 180 dias de cura, do que as argamassas que apenas contêm cal. Nas argamassas estudadas observou-se um módulo de elasticidade que varia entre 2.3 GPa e 3.6 GPa. Assim, estas argamassas têm uma adequada capacidade de deformação sendo, portanto, boas para o uso em trabalhos de conservação (Andrejkovičová *et al.*, 2011).

2.2. Argamassas para conservação do património em adobe

As argamassas de junta e de reboco para os adobes devem adaptar-se aos mesmos, trabalhando em conjunto e conferindo ao edifício propriedades que os próprios adobes não asseguram, como sejam: a resistência à penetração da chuva, a durabilidade do paramento em adobe face às ações externas ou o preenchimento de zonas de descontinuidade para melhoria do isolamento. Sendo a construção em adobe um dos tipos de construção em terra, é fácil perceber o desgaste que sofre, tanto a nível físico como a nível químico.

Para que as argamassas e os blocos de adobe possam desempenhar adequadamente a sua função em conjunto, os revestimentos devem possuir as seguintes propriedades (Jorge, 2007):

- aderência suficiente, mas não excessiva, ao suporte;
- módulo de elasticidade igual ou inferior ao do suporte, decrescendo das camadas interiores para as exteriores;
- resistência à compressão e flexão iguais ou inferiores às do suporte;
- permeabilidade ao vapor de água igual ou superior à do suporte;
- reduzido teor de sais;
- espalhamento aceitável, mas sem adição excessiva de água;
- variações dimensionais compatíveis com as do suporte.

2.3. Principais patologias das construções em adobe

À semelhança das construções com outro tipo de materiais, também as construções em adobe apresentam patologias, das quais se salientam (Achenza *et al.*, 2006):

- esmagamento localizado (Figura 3);

- fissuras provocadas por movimentação estrutural (Figura 4);
- empolamento e destacamento dos revestimentos (Figura 5);
- fissuração na junção das paredes (Figura 7);
- presença de manchas e humidades (Figura 6);
- degradação do próprio adobe (Figura 8);
- degradação dos revestimentos (Figura 9).

A Figura 3 representa a patologia denominada de esmagamento localizado. Esta anomalia deve-se ao comprimento deficiente dos lintéis de reforço. Por esta razão, a força exercida no topo do vão não é bem distribuída, levando à ocorrência de cargas concentradas e, conseqüentemente, fissuras nos locais de maior fragilidade.



Figura 3. Esmagamento localizado
(Matos, 2011)

Tal como na Figura 3, também na Figura 4 se podem observar fissuras nos vãos das aberturas, mas, neste caso, a patologia poderá estar associada tensões provocadas por movimentação estrutural.

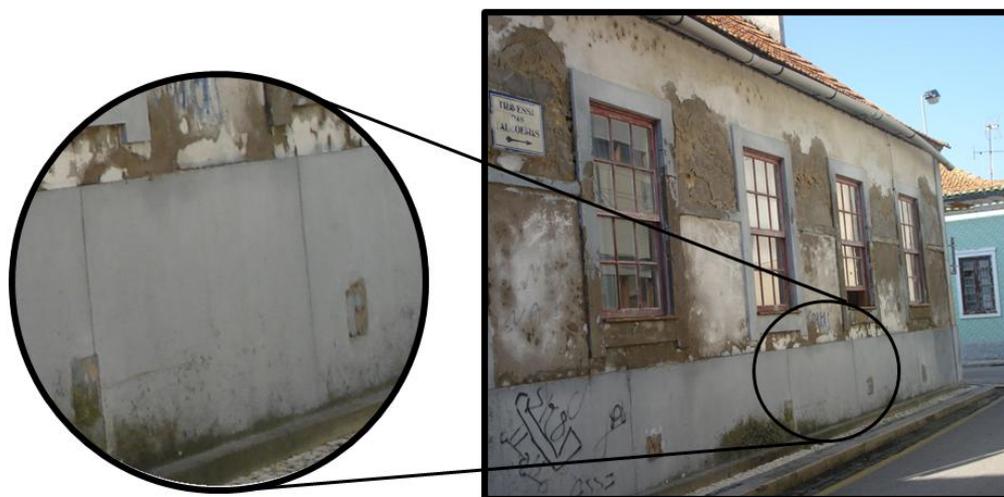


Figura 4. Fissuras nos vãos das aberturas
(Matos, 2011)

Na Figura 5 pode observar-se o empolamento e destacamento dos revestimentos. Esta patologia ocorre normalmente quando as paredes de adobe estão em contacto com solos húmidos, o que favorece a ascensão capilar.

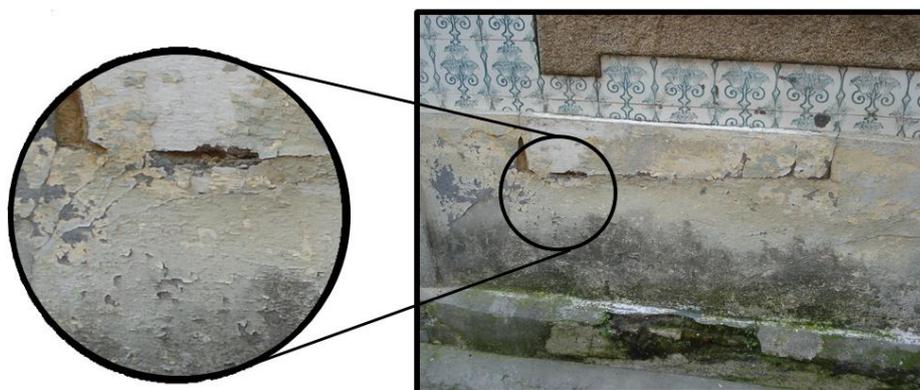


Figura 5. Empolamento e destacamento dos revestimentos
(Matos, 2011)

Tal como a patologia observada na Figura 5, também na Figura 6 se pode constatar que as manchas presentes na parede de adobe são devidas à ascensão capilar da água presente no solo. Duas das consequências deste fenómeno são o aparecimento de manchas nos revestimentos e a acumulação de sais na superfície da parede, eflorações, tal como se pode observar na figura que se segue.



Figura 6. Manchas e humidades
(Matos, 2011)

A alteração presente na parede apresentada na Figura 7 deve-se a uma ligação deficiente ou mesmo má execução de uma junta vertical contínua. Esta patologia ocorre com frequência na ligação de cunhais. Para que ocorram este tipo de fissuras, basta haver um pequeno assentamento da estrutura ou uma variação da temperatura que provoque a expansão ou contração dos materiais.



Figura 7. Fissuração na junta das paredes
(Matos, 2011)

Na Figura 8 é apresentada a degradação do revestimento e do próprio adobe provocada por ações de meteorização. A argamassa deve ter características que minimizem o impacto destes agentes sobre a estrutura do edifício.



Figura 8. Degradação do adobe
(Matos, 2011)

A patologia presente num muro, apresentada na Figura 9, poderá ser devida a um ou mais fatores associados entre si, tais como a presença de água, comportamento distinto dos diferentes materiais que constituem o muro, utilização de revestimentos muito espessos e desadequados e/ou ação da temperatura.



Figura 9. Degradação dos revestimentos
(Matos, 2011)

As causas das patologias em qualquer edifício devem ser eliminadas procedendo-se à sua reparação ou, caso não seja possível, à substituição de todo o material afetado (Achenza *et al.*, 2006).

Contudo, existem situações em que, mesmo após intervenções de recuperação, surgem graves problemas relacionados com a incompatibilidade química e mecânica dos

materiais usados, com a excessiva protecção/impermeabilização de rebocos exteriores ou mesmo com o reforço estrutural exagerado da construção (Fernandes *et al.*, 2010).

Para minimizar estas ocorrências, é necessário preparar estratégias de conservação do património edificado em terra, baseadas na compatibilidade entre materiais.

A deformabilidade das argamassas de revestimento é um parâmetro importante a ser considerado, pois estas devem ter a capacidade de se adaptar às retrações inerentes à secagem bem como às variações de tensão devidas a carregamentos ou diferenças de temperatura (Bastos *et al.*, 2010).

A fissuração é um fenómeno comum associado à não capacidade de deformação das argamassas. Esta patologia pode comprometer tanto a estética como a durabilidade dos edifícios (Bastos *et al.*, 2010).

3. TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste trabalho foi efectuada a caracterização química e mecânica dos materiais de base usados na preparação de vários tipos de argamassas, a definição da sua composição, bem como a preparação das misturas definidas. Em seguida realizaram-se os ensaios necessários à avaliação do seu comportamento.

3.1. Materiais base

Foram analisadas argamassas de cal aérea, com incorporação de aditivos.

Os materiais utilizados na realização das argamassas estudadas foram:

- areia do rio;
- cal aérea comercial (AL do inglês “air lime”) - Lusical H100, Portugal com classificação de CL90;
- metacaulino comercial 1200S (MK do inglês “metakaolin”) - AGS Mineraux, França;
- sepiolite comercial (S) - Sepiolite 15/30, Minas de Paracuellos del Jarama, Madrid, Espanha.

3.2. Argamassas

Foram estudadas três diferentes composições de argamassas de cal aérea, cuja designação e composição a seguir se descreve:

- AL - usada como referência. Contém um traço volumétrico de cal aérea e areia de 1:3;
- AL20MK – preparada com base na composição da argamassa AL, mas substituindo 20% da massa de cal aérea por metacaulino;
- AL20MK5S – preparada com base na da argamassa AL, mas substituído 20% da cal aérea por metacaulino e 5% por sepiolite;

- AL20MK5S (M) – preparada como indicado para a argamassa AL20MK5S, mas sujeita a maturação durante 7 dias sendo a sua cura, após esse período, feita de igual maneira que as restantes argamassas (ver item 3.3.1).

O processo de maturação é obtido através da seguinte sequência:

- misturar a areia, cal aérea e água na dose definida;
- acrescentar água de modo a cobrir o preparado em cerca de 2 cm para que este não fique em contacto com o ar;
- deixar em repouso 7 dias;
- retirar a água colocada em excesso no passo 2;

Adicionar o metacaulino e a sepiolite aos restantes componentes da argamassa.

Estas dosagens foram escolhidas de acordo com os resultados obtidos por Andrejkovičová *et al.* (2011), embora a origem dos materiais usados não seja a mesma. Estas dosagens estão expressas na Tabela 1.

Tabela 1. Percentagem de substituição de cal aérea por aditivos em cada argamassa

Argamassa	Metacaulino (%)	Sepiolite (%)
AL	-	-
AL20MK	20	-
AL20MK5S	20	5
AL20MK5S (M)	20	5

Cada uma destas argamassas foi estudada de três formas diferentes:

1. Em provetes em ambiente laboratorial;
2. Em bloco de adobe em laboratório;
3. Numa parede de adobe em laboratório;

3.3. Preparação das argamassas em ambiente laboratorial

3.3.1. Provetes

Para a obtenção dos provetes efetuou-se inicialmente a mistura dos componentes secos das argamassas tipo AL, AL20MK e AL20MK5S e efetuou-se a mistura AL20MK5S(M) passível de maturação, como se pode observar na Figura 10.



Figura 10. Preparação das argamassas de acordo com as dosagens definidas (Matos, 2012)

Juntaram-se os componentes sólidos com a água na misturadora durante 90 segundos, Figura 11.

A água adicionada à mistura foi de aproximadamente 21% da massa total de componentes. Esta quantidade de água confere à argamassa a espalhamento (Figura 19) pretendida (cerca de 130-140 mm medido na mesa de espalhamento).



Figura 11. Mistura dos componentes (Matos, 2012)

Prepararam-se três provetes para cada tempo de cura (28, 90 e 180 dias).

No total foram realizados nove provetes de cada tipo de argamassa de dimensões 40 x 40 x 160 mm (Figura 12).

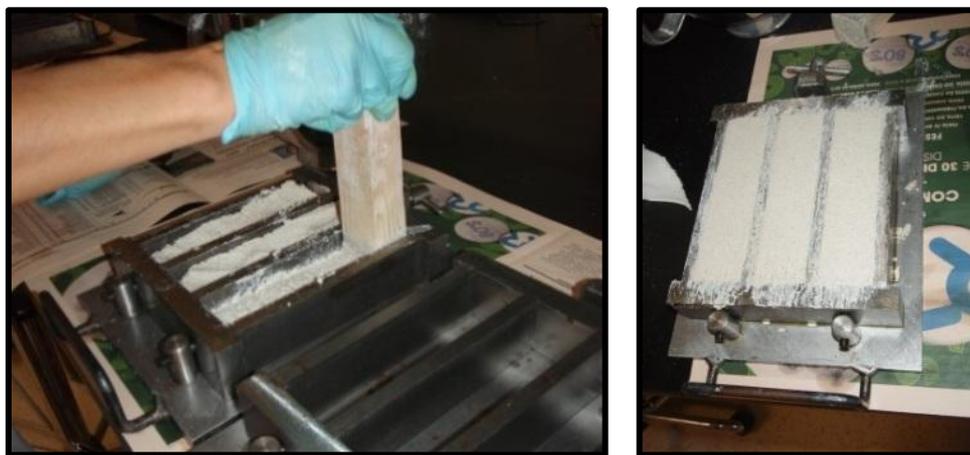


Figura 12. Execução dos provetes
(Matos, 2012)

Fez-se a cura das argamassas de acordo com o seguinte processo:

Os provetes estiveram 7 dias numa câmara climática, 5 dias nos moldes e 2 dias fora dos moldes, a $95\pm 5\%$ de humidade relativa no ar (HR) e à temperatura de $20\pm 2^\circ\text{C}$. A restante cura, 21 dias, foi feita a $65\pm 5\%$ HR e a $20\pm 2^\circ\text{C}$, Figura 13. Este procedimento foi realizado conforme as exigências normativas (NP EN 1015-11).



Figura 13. Provetes em cura na câmara climática a $65\pm 5\%$ HR e $20\pm 2^\circ\text{C}$
(Matos, 2012)

3.3.2. Argamassas em blocos de adobe

As argamassas executadas nesta parte do trabalho têm a mesma composição que a dos provetes de argamassas estudados em ambiente laboratorial, variando apenas a percentagem de água. As percentagens de água utilizadas foram 22,5% para as camadas normais e 30% para o chapisco.

Para cada tipo de argamassa foram elaboradas três diferentes aplicações de revestimento em blocos de adobe (Figura 14):

- uma camada de argamassa de 2 cm;
- duas camadas de argamassa de 2 cm cada;
- uma camada de chapisco e uma camada de argamassa de 2 cm.

No que diz respeito à segunda e terceira aplicações, a segunda camada de argamassa foi aplicada um dia após a aplicação da primeira camada ou do chapisco.

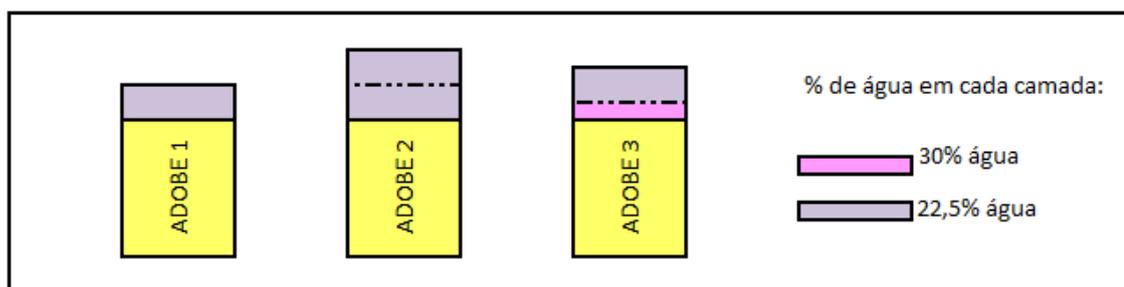


Figura 14. As diferentes aplicações das argamassas nos blocos de adobe e a percentagem de água em cada camada (Matos, 2012)

3.3.3. Argamassas em parede de adobe

As argamassas executadas nesta parte do trabalho têm a mesma composição que os provetes de argamassas estudados em ambiente laboratorial, variando apenas a percentagem de água. As percentagens de água utilizadas foram 22,5% para as camadas normais e 30% para o chapisco, como se pode observar na Figura 15.

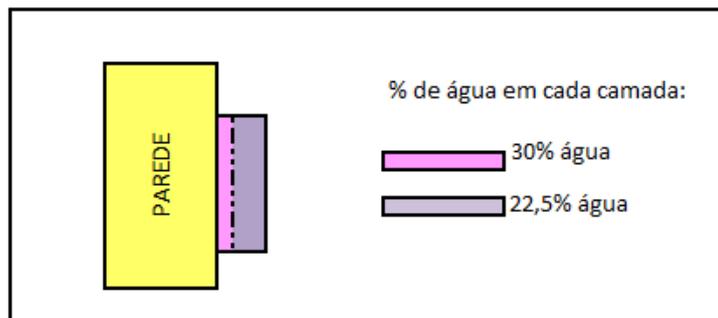


Figura 15. Aplicação das argamassas na parede de adobe e percentagem de água em cada camada (Matos, 2012)

Na parede foi aplicado um reboco com os 4 tipos de argamassas. Esta aplicação foi feita em camada de chapisco (Figura 16) seguida de uma camada de 1,5 cm de argamassa (Figura 17). Esta camada de 1,5 cm de argamassa foi aplicada um dia após a aplicação da camada de chapisco.



Figura 16. Aplicação da camada de chapisco na parede de adobe (Matos, 2012)

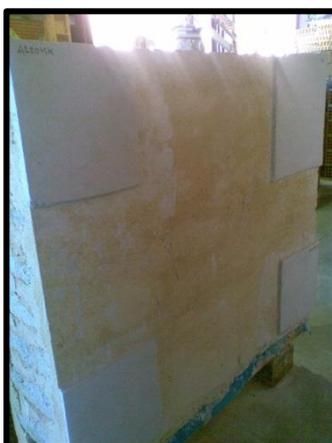


Figura 17. Parede de adobe com as diferentes argamassas aplicadas (Matos, 2012)

3.4. Métodos e ensaios

Para se efetuar a caracterização dos materiais e das argamassas foram realizados ensaios e medidas descritas nas seguintes subsecções.

Os ensaios realizados aos materiais e argamassas encontram-se sistematizados na Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5.

Tabela 2. Ensaios e medidas realizadas aos materiais constituintes das argamassas

Ensaio	Materiais			
	Areia	Cal aérea	Metacaulino	Sepiolite
Massa volúmica aparente	✓	✓	✓	✓
D ₅₀	✓	✓	✓	✓
DRX	✓	✓	✓	✓

Tabela 3. Ensaios realizados aos provetes de argamassas

Ensaio	Provetes			
	AL	AL20MK	AL20MK5S	AL20MK5S (M)
Massa volúmica aparente	✓	✓	✓	✓
Espalhamento	✓	✓	✓	✓
Módulo de elasticidade	✓	✓	✓	✓
Resistência à flexão	✓	✓	✓	✓
Resistência à compressão	✓	✓	✓	✓
Carbonatação	✓	✓	✓	✓
Capilaridade	✓	✓	✓	✓
SEM	✓	✓	✓	✓

Tabela 4. Ensaio realizados às argamassas em blocos de adobe

Ensaio	Blocos de adobe			
	AL	AL20MK	AL20MK5S	AL20MK5S (M)
Massa volúmica aparente	✓	✓	✓	✓
Espalhamento	✓	✓	✓	✓
Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	✓	✓	✓	✓
Carbonatação	✓	✓	✓	✓
Capilaridade	✓	✓	✓	✓
“Pull-off”	✓	✓	✓	✓
Ciclos envelhecimento	✓	✓	✓	✓

Tabela 5. Ensaio realizados às argamassas em parede de adobe

Ensaio	Paredes de adobe			
	AL	AL20MK	AL20MK5S	AL20MK5S (M)
Massa volúmica aparente	✓	✓	✓	✓
Espalhamento	✓	✓	✓	✓
Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas	✓	✓	✓	✓
Carbonatação	✓	✓	✓	✓
Capilaridade	✓	✓	✓	✓
“Pull-off”	✓	✓	✓	✓

3.4.1. Determinação da massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente foi determinada para cada argamassa fresca, através do preenchimento de um volume conhecido.

Um recipiente de volume e massa conhecidos foi preenchido com 2 camadas de argamassa (Figura 18), compactando-se 15 vezes com o auxílio de uma vara de compactação no final de cada camada. A massa deste conjunto, m_c , foi obtida e a esse

valor retirou-se a massa do recipiente, m_r , obtendo-se a massa da argamassa nele contida, m_a . Em seguida dividiu-se m_a pelo volume do recipiente, V , obtendo-se a massa volúmica aparente da argamassa, MV , como se pode observar nas equações (1) e (2).

$$MV = \frac{m_a}{V} \quad (1)$$

ou

$$MV = \frac{m_c - m_r}{V} \quad (2)$$

onde:

MV – massa volúmica aparente (kg/m^3);

m_a – massa da argamassa (kg);

V – volume do recipiente (m^3).

m_c – massa do recipiente + argamassa (kg);

m_r – massa do recipiente (kg);

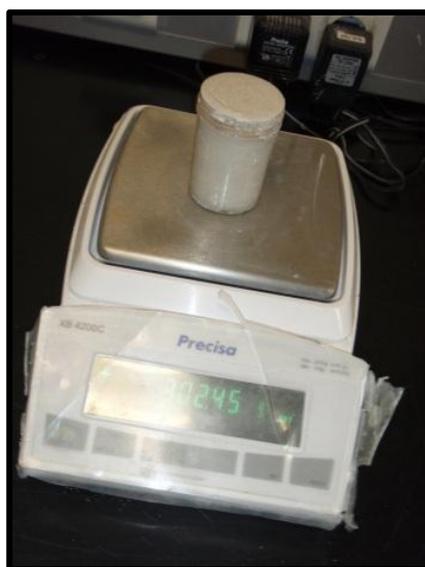


Figura 18. Pesagem de argamassa num volume conhecido (Matos, 2012)

3.4.2. Análise mineralógica

A análise mineralógica foi efetuada por difração de raios-x (DRX), para cada argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura e para cada material constituinte das argamassas. O aparelho de medição utilizado foi o Philips X'Pertdiffractometer, equipado com radiação $\text{CuK}\alpha$.

Para cada um dos materiais foi também feita uma análise química, usando o Panalytical Axios X-ray Fluorescence Spectrometer.

3.4.3. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado segundo a pr EN 1015-3.

Verificou-se a espalhamento pretendida na mesa de espalhamento (Figura 19).

Este ensaio consiste em preencher um molde com argamassa fresca em 2 camadas, compactando cada camada 25 vezes. Após o preenchimento do molde, este é retirado da mesa de espalhamento e procede-se à execução de 25 pancadas em cerca de 15 segundos. No fim do ensaio verifica-se o diâmetro da amostra de argamassa.



Figura 19. Verificação do valor de espalhamento
(Matos, 2012)

3.4.4. Determinação do módulo de elasticidade dos provetes de argamassa

O módulo de elasticidade foi determinado para provetes em ambiente laboratorial, com recurso a ERUDITE MKIV (PC1004) para cada argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura. Este ensaio foi realizado segundo as normas do fabricante (Operating Instructions - ERUDITE MKIV (PC1004)), Figura 20;

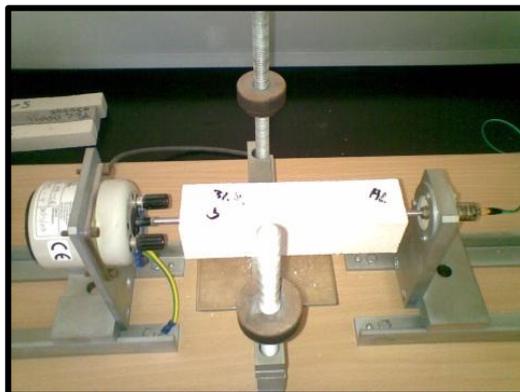


Figura 20. ERUDITE MKIV – PC1004
(Matos, 2012)

3.4.5. Determinação da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas aplicadas em suporte de adobe

Foi determinada a velocidade de propagação das onda emitidas pelo PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) em argamassas em suporte de adobe, em cada 1, 2 e 3 meses de cura. Para a realização deste ensaio, calibrou-se o aparelho e observaram-se os valores a 10 cm de distância entre as células para as argamassas em bloco de adobes e os valores a 5, 10 e 20 cm de distância entre as células para as argamassas em parede de adobe, Figura 21. Foi em seguida calculada a velocidade de propagação das ondas e feita uma análise comparativa das variações desta no tempo e nas diferentes argamassas.



Figura 21. Ensaio com o PUNDIT nas argamassas em parede de adobe
(Matos, 2012)

3.4.6. Ensaio de resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão foi efetuado de acordo com pr EN 1015-11(1999), para cada provete de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.

O provete foi colocado na Máquina Universal de Ensaios (SHIMADZU: AG-IC 100 kN), centrado perpendicularmente à célula de carga e aos apoios. Aproximou-se a célula de carga da superfície do provete para que se iniciasse o ensaio, Figura 22. A força aplicada na amostra foi aumentada gradualmente até à rotura. O valor da tensão de rotura à flexão considerado neste trabalho é a média dos valores obtidos nos 3 provetes.



Figura 22. Ensaio à flexão
(Matos, 2012)

3.4.7. Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi efetuado de acordo com pr EN 1015-11(1999), para cada provete de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura.

Neste ensaio foi utilizado metade de cada provete testado à flexão. Tal como no ensaio da resistência à flexão, centrou-se cada provete entre os pratos da Máquina Universal de Ensaios (SHIMADZU: AG-IC 100 kN), Figura 23. A força foi aplicada gradualmente até à rotura.

O valor da tensão de rotura à compressão considerado é a média dos valores obtidos nos 3 provetes.



Figura 23. Ensaio à compressão
(Matos, 2012)

3.4.8. Ensaio de carbonatação

Este teste permite determinar o estado de carbonatação de cada tipo de argamassa.

Foi utilizada uma solução de fenolftaleína, uma vez que o processo de carbonatação conduz à redução do pH da argamassa. Assim, a zona carbonatada apresenta uma coloração menos intensa, relativamente à zona não carbonatada.

O ensaio dos provetes de argamassa foi efetuado aos 28, 90 e 180 dias de cura, utilizando a parte não esmagada do provete testado à compressão (Figura 24). Com auxílio de uma craveira, mediu-se a parte carbonatada de cada amostra.



Figura 24. Estado de carbonatação em provete de argamassa
(Matos, 2012)

Este ensaio às argamassas em blocos de adobe (Figura 25) e às argamassas em parede de adobe (Figura 26) foi efetuado em cada 1, 2 e 3 meses de cura, após corte da argamassa.

Foi medida a distância entre a face superior da argamassa e a frente de carbonatação (onde começa a observar-se a coloração púrpura), para se observar a evolução da carbonatação do material ao longo dos 3 meses de ensaios.



Figura 25. Ensaio de carbonatação em argamassa em bloco de adobe (Matos, 2012)

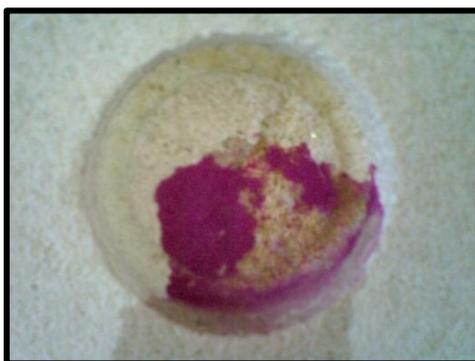


Figura 26. Ensaio de carbonatação em argamassa em parede de adobe (Matos, 2012)

3.4.9. Ensaio de capilaridade e absorção de água sob pressão

Para os provetes de argamassa, o teste de capilaridade foi efetuado segundo a EN 1015-18 (2002).

Foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade à metade dos provetes restante dos ensaios anteriores.

Os provetes foram deixados na estufa a $65\pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas para a estabilização da sua massa e, de seguida, foram colocados no exsiccador para que arrefecessem lentamente, com pouca humidade ambiente (Figura 27).



Figura 27. Amostras no exsicador
(Matos, 2012)

Para a realização do ensaio foi utilizado um tabuleiro e um esfregão, garantindo durante todo o ensaio cerca de 2 mm de água acima deste. Os provetes foram colocados ao alto e fez-se o registo da sua massa de 30 em 30 segundos até aos 6 minutos e 30 segundos e, de seguida, de 1 em 1 minuto até à estabilização da massa dos provetes, Figura 28.

De seguida, os provetes foram deixados à temperatura ambiente e foi feito o registo da sua massa até à estabilização da mesma.



Figura 28. Ensaio de capilaridade
(Matos, 2012)

Para as argamassas em bolcos de adobe o ensaio de capilaridade foi realizado com recurso a Tubos de Karsten. Nestes testes foi vedado o tubo com plasticina e introduzida água até aos 4 cm de altura. Mediu-se o tempo que a água demora a ser absorvida pela argamassa a cada 1 cm, Figura 29.



Figura 29. Ensaio de absorção de água a argamassa em bloco de adobe (Matos, 2012)

Os ensaios de capilaridade em argamassas aplicadas em parede de adobe foi realizado tal como descrito anteriormente para as misturas em blocos de adobe. No entanto, o vedante utilizado foi silicone, Figura 30.



Figura 30. Ensaio de absorção de água a argamassa em parede de adobe (Matos, 2012)

3.4.10. Ensaio de “pull-off”

O ensaio de “pull-off” foi efetuado de acordo com a EN 1015-12 (2000).

Cada argamassa aplicada em bloco de adobe, Figura 31, e em parede de adobe, Figura 32, foi testada a 1, 2 e 3 meses de cura.

Para este ensaio foi usado o “pull-off”.

Observou-se a tensão e o modo de rotura em cada tipo de argamassa.



Figura 31. Ensaio de “pull-off” a argamassa em bloco de adobe (Matos, 2012)



Figura 32. Ensaio de “pull-off” a argamassa em parede de adobe (Matos, 2012)

Podem ser verificados dois tipos de rotura: adesivo ou coesivo. Para ajudar nesta avaliação foram consideradas a Figura 33 e a Figura 34 que são exemplificativas desses tipos de rotura.

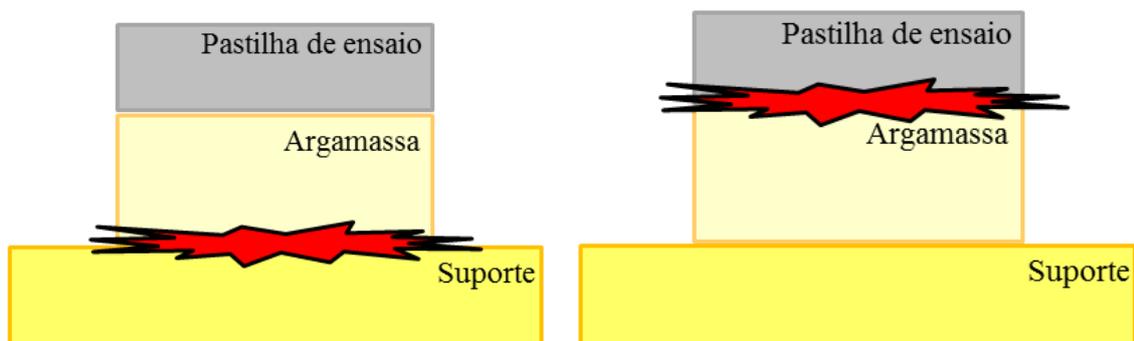


Figura 33. Tipos de ruptura adesiva (Matos, 2012)

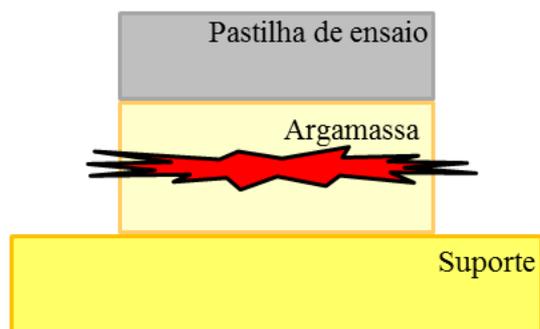


Figura 34. Tipo de ruptura coesiva (Matos, 2012)

3.4.11. Câmara climática com imposição de ciclos para envelhecimento acelerado

Foram realizadas as 4 misturas de argamassas (AL, AL20MK, AL20MK5S e AL20MK5S(M)) e aplicadas em bolcos de adobe como descrito no item 3.3.2.

Os blocos de adobe foram submetidos a ciclos de verão/inverno na Câmara de ensaios climáticos (ESPEC: ARL-680), tal como se pode observar na Figura 35 e na Figura 36.



Figura 35. Câmara de imposição de ciclos para envelhecimento acelerado (Matos, 2012)



Figura 36. Blocos de adobe submetidos aos ciclos de envelhecimento (Matos, 2012)

O ciclo elaborado para a realização deste ensaio tem a duração de 48 horas.

Este ciclo está dividido em duas fases denominadas por “verão” e “inverno”, cada uma com 24 horas. No final da fase “inverno”, o ciclo inicia-se novamente e é repetido durante cerca de dois meses.

Estes ciclos impõem na argamassa um envelhecimento acelerado para que se possa prever o seu comportamento.

Na Tabela 6 encontram-se esquematizadas as fases a que são submetidas as amostras. Estes valores são o resultado de um estudo ao clima de Ovar, onde se majoraram os valores máximos e minoraram os valores mínimos da temperatura.

Tabela 6. Ciclos a que foram submetidos os blocos de adobe

Fases do ciclo	Subfases (hora)	Temperatura (°C)	Humidade relativa no ar (%)
"Verão" (24 horas)	3	60	95
	3	10	40
"Inverno" (24 horas)	3	30	95
	3	-5	95

3.4.12. Recolha de imagens recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento – SEM “scanning electron microscope”

A morfologia das argamassas estudadas foi estudada com recurso a um microscópio eletrónico de varrimento - Carl Zeiss-EVO 40HV. Antes do processo de digitalização, todas as amostras foram revestidas a ouro para aumentar a condutividade dos eletrões por este emitidos.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados aos ensaios descritos anteriormente.

Com a análise destes resultados pretende-se averiguar qual ou quais as argamassas mais adequadas para aplicação em suportes de adobe.

4.1. Massa volúmica aparente

Na Tabela 7 é apresentada a massa volúmica aparente e o D_{50} de cada componente das argamassas.

Tabela 7. Massa volúmica aparente e D_{50} dos componentes das argamassas

Material	D_{50} (μm)	Massa volúmica aparente (g/dm^3)
Areia	375,0	1559,3
Cal aérea	7,2	380,0
Metacaulino	1,1	296,0
Sepiolite	2,4	526,0

O valor de D_{50} é uma dimensão característica de um dado material granular, tal que 50% dos grãos do material têm diâmetro inferior a este tamanho. Este valor foi obtido por análise granulométrica dos materiais.

Através desta análise, pode-se observar que a areia é o material que contém maior massa volúmica ($1559,3 \text{ g}/\text{dm}^3$) e ainda o valor mais elevado de D_{50} ($375,0 \mu\text{m}$). Pode ainda observar-se que o metacaulino é o material com grãos mais finos, tendo o valor mais baixo de D_{50} ($1,1 \mu\text{m}$) e de massa volúmica ($296,0 \text{ g}/\text{dm}^3$).

De seguida são apresentados os valores da massa volúmica de cada argamassa fresca, Tabela 8.

Tabela 8. Massa volúmica aparente das argamassas realizadas

Argamassa	Massa volúmica aparente (g/dm ³)
AL	1968,9
AL20MK	1994,9
AL20MK5S	1985,6
AL20MK5S (M)	1996,3

Embora o metacaulino seja o componente com menor densidade, a argamassa AL20MK é a que tem o maior valor. Isto acontece devido à grande capacidade de absorção de água por parte do metacaulino, o que faz com que haja menor quantidade de poros vazios do que na argamassa AL.

4.1.1. Análise mineralógica

Na Tabela 9 apresentam-se os resultados obtidos na análise química dos materiais utilizados na realização das argamassas.

Na Tabela 9 apresentam-se os resultados obtidos por DRX de cada material que constitui as argamassas desenvolvidas e na Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam-se os resultados do ensaio de DRX às argamassas efetuadas.

Tabela 9. Análise química dos materiais utilizados na realização das argamassas

Material	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% MnO	% MgO	% CaO	% Na ₂ O	% K ₂ O	% TiO ₂	% P ₂ O ₅
Cal aérea LUSICAL	nd	0,01	0,15	0,01	3,09	76,74	nd	0,02	0,04	0,01
Areia do rio	96,45	2,01	0,20	0,01	nd	0,09	nd	1,14	0,09	0,02
Metacaulino 1200S	54,39	39,36	1,75	0,01	0,14	0,10	nd	1,03	1,55	0,06
Sepiolite	56,62	4,22	1,29	0,04	19,28	4,85	nd	0,96	0,19	0,06

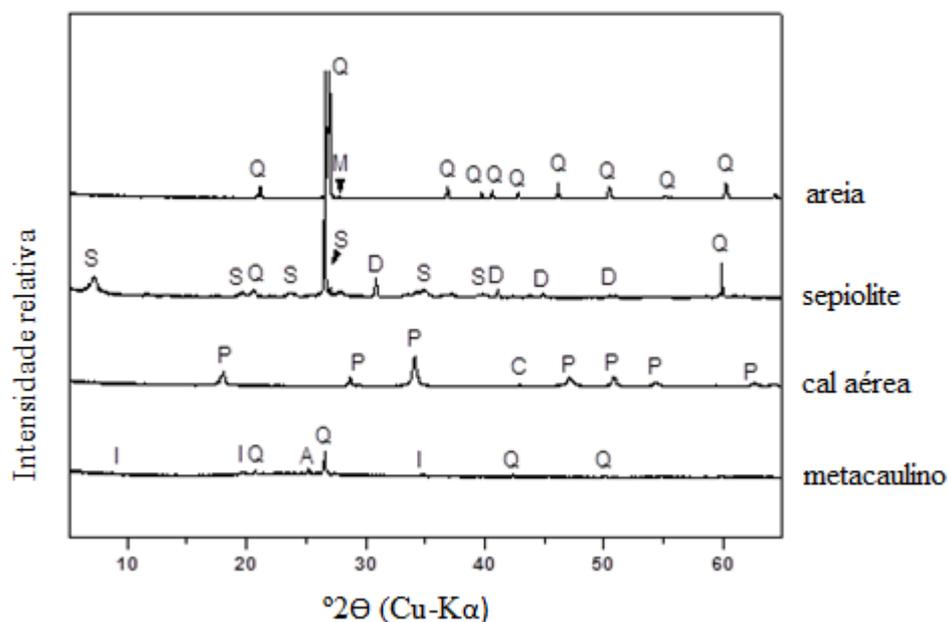


Figura 37. Difração raio-x dos materiais constituintes das argamassas

Através da análise da difração raio-x dos compostos das argamassas (Figura 37) é possível fazer corresponder os elementos observados na análise química com os minerais presentes nos materiais utilizados.

Assim, observa-se que “a areia apresenta uma grande quantidade de SiO_2 (~96%) devido ao quartzo nela presente e baixas quantidades de Al_2O_3 (~0,01%) e de K_2O (~0,02%) atribuídas à presença reduzida de feldspato alcalino. A análise mostra que a cal aérea é o material que contém a maior percentagem de CaO (~77%), valor atribuído à presença de portlandite e de calcite” (Andrejkovičová *et al.*, 2011).

Amostras das argamassas em estudo, AL, AL20MK, AL20MK5S e AL20MK5S(M), foram também submetidas a ensaios de DRX aos 28, 90 e 180 dias de cura.

Os padrões raios-x dessas argamassas nas diferentes fases de cura são apresentados na Figura 38, Figura 39 e Figura 40, respetivamente.

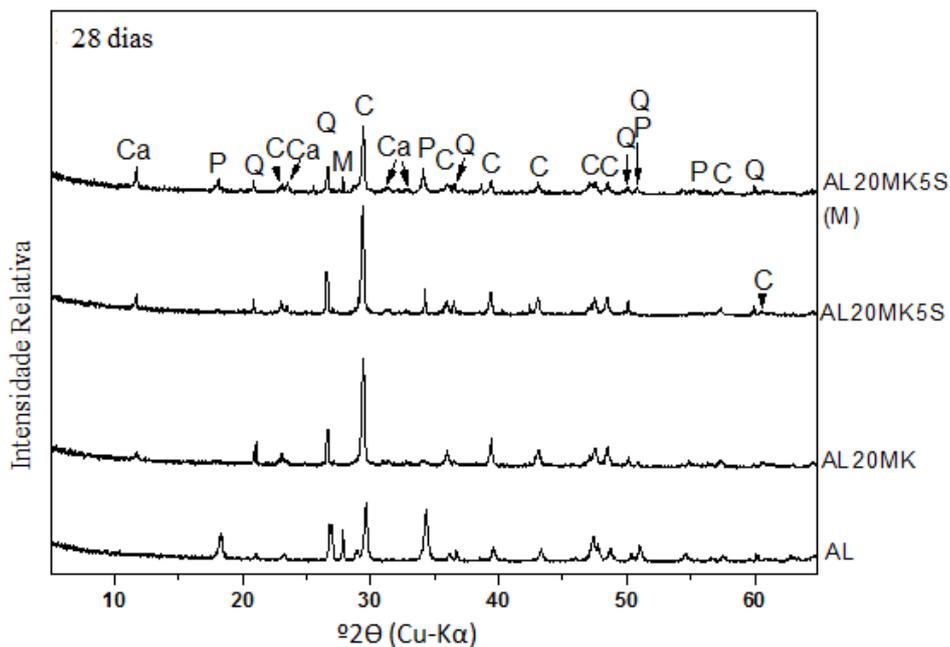


Figura 38. Difração raio-x das amostras aos 28 dias de cura

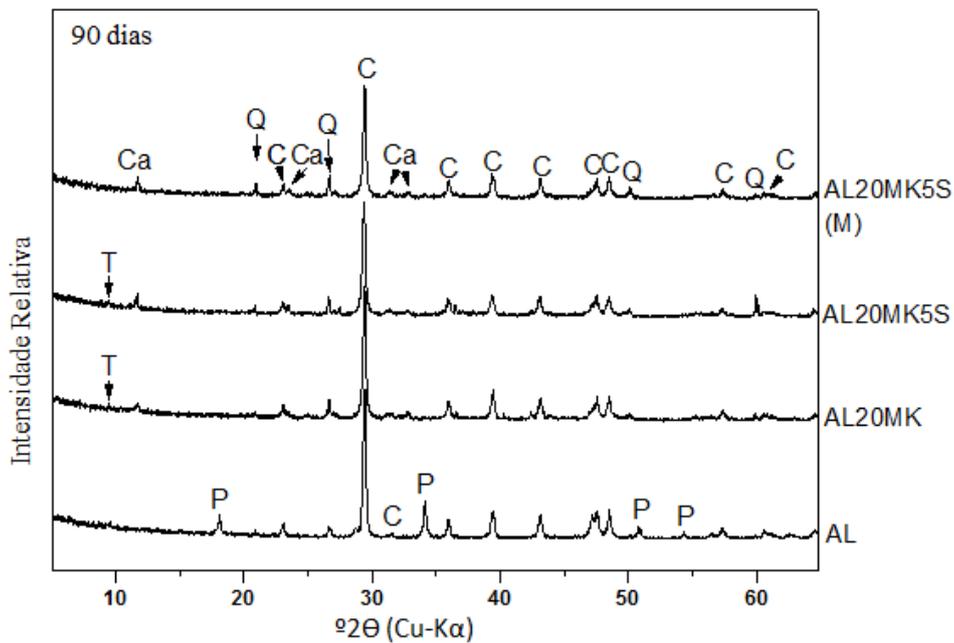


Figura 39. Difração raio-x das amostras aos 90 dias de cura

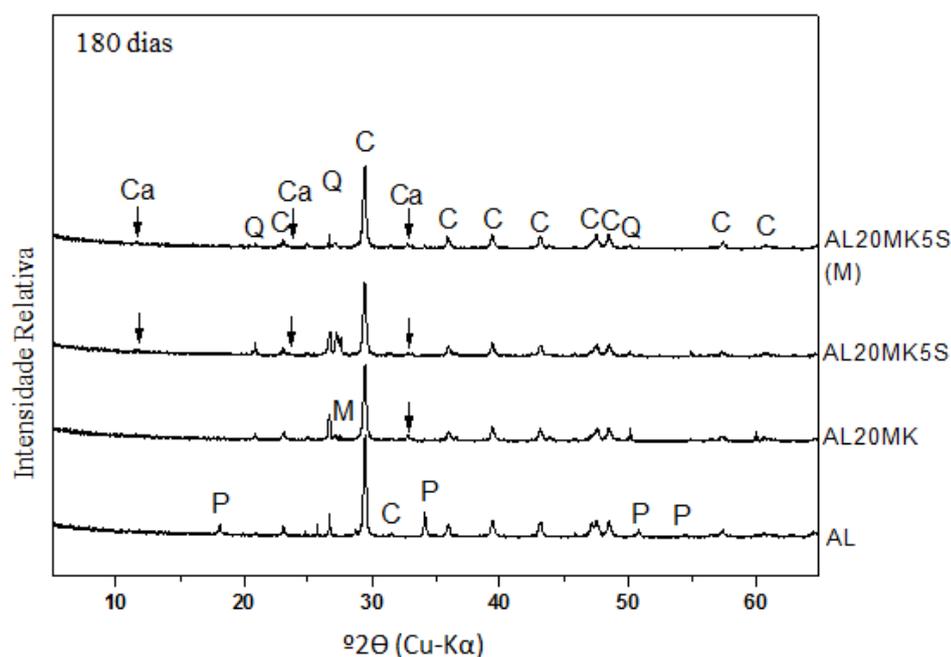


Figura 40. Difração raio-x das amostras aos 180 dias de cura

onde:

- Ca: $C_4A\bar{C}H_{11}$ - monocarboaluminato;
- P: portlandite;
- C: calcite;
- Q: quartzo;
- M: microcline;
- T: tobermorite;
- I: ilite;
- A: anatase;
- D: dolomite;
- S: sepiolite.

Aos 28 dias de cura, para além de quartzo, todas as argamassas contêm picos correspondentes a portlandite e a calcite. Os picos característicos de portlandite aos $18,1^\circ$ e $34,2^\circ$ mostram valores de maior intensidade nas argamassas AL e AL20MK5S (M). Isto deve-se ao facto de o consumo de portlandite ser interpretado como ocorrência de carbonatação e/ou existência de reações pozolânicas. Estes valores elevados de portlandite estão em concordância com os resultados obtidos no ensaio de carbonatação, Figura 44,

onde se observa que a argamassa AL e AL20MK5S(M) têm uma maior zona não carbonatada quando comparadas com as argamassas AL20MK e AL20MK5S.

Por comparação com o processo de carbonatação observado na Figura 44 e na Figura 45 pode-se afirmar que aos 90 dias de cura apenas a argamassa AL ainda contém portlandite, pois o seu processo de carbonatação ainda não está completo, não estando o provete totalmente endurecido. Aos 90 dias de cura as argamassas AL20MK e AL20MK5S não contêm portlandite, tendo sido este mineral totalmente consumido em reações pozolânicas e/ou no processo de carbonatação, estando estas argamassas totalmente endurecidas, tal como acontece com a argamassa AL20MK5S (M), Figura 43.

Aos 180 dias de cura, nota-se a presença de picos de calcite ($29.4^\circ 2\theta$) nos gráficos de DRX de todas as argamassas. O resultado da análise de DRX da amostra da argamassa AL aos 180 dias de cura é igual ao resultado da análise de DRX da mesma amostra aos 90 dias de cura. Da análise desta argamassa, notaram-se ainda picos correspondentes a portlandite. No entanto, o teste de carbonatação, Figura 44, mostra que, aos 180 dias de cura, todas as amostras de argamassa se encontram completamente carbonatadas. Os picos aos $9.4^\circ 2\theta$, atribuídos à presença de tobermorite nas argamassas AL20MK e AL20MK5S, desaparecem aos 180 dias devido à sua decomposição (Klimesch e Ray, 1998). Pode-se ainda afirmar que o monocarboaluminato, $C_4A\bar{C}H_{11}$, está ainda presente em todas as argamassas que contêm metacaulino na sua composição, mas a sua intensidade é mais baixa do que a verificada aos 90 dias de cura. Esta redução foi também verificada por Gameiro *et al.* (2011).

4.1.2. Ensaio de espalhamento

O ensaio de espalhamento permitiu confirmar que a água utilizada nas misturas foi a adequada para as argamassas pretendidas devido ao facto de atingirem valores similares de trabalhabilidade e dentro dos parâmetros anteriormente estipulados.

4.1.3. Propriedades mecânicas dos provetes de argamassas

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos nos ensaios mecânicos das argamassas.

Foram testados o módulo de elasticidade, a resistência à flexão e a resistência à compressão dos provetes. A análise foi feita comparando os resultados das diferentes misturas e a sua evolução ao longo do tempo.

Os gráficos que se seguem apresentam a evolução referida do módulo de elasticidade (Figura 41), da resistência à flexão (Figura 42) e da resistência à compressão (Figura 43) dos provetes de argamassa.

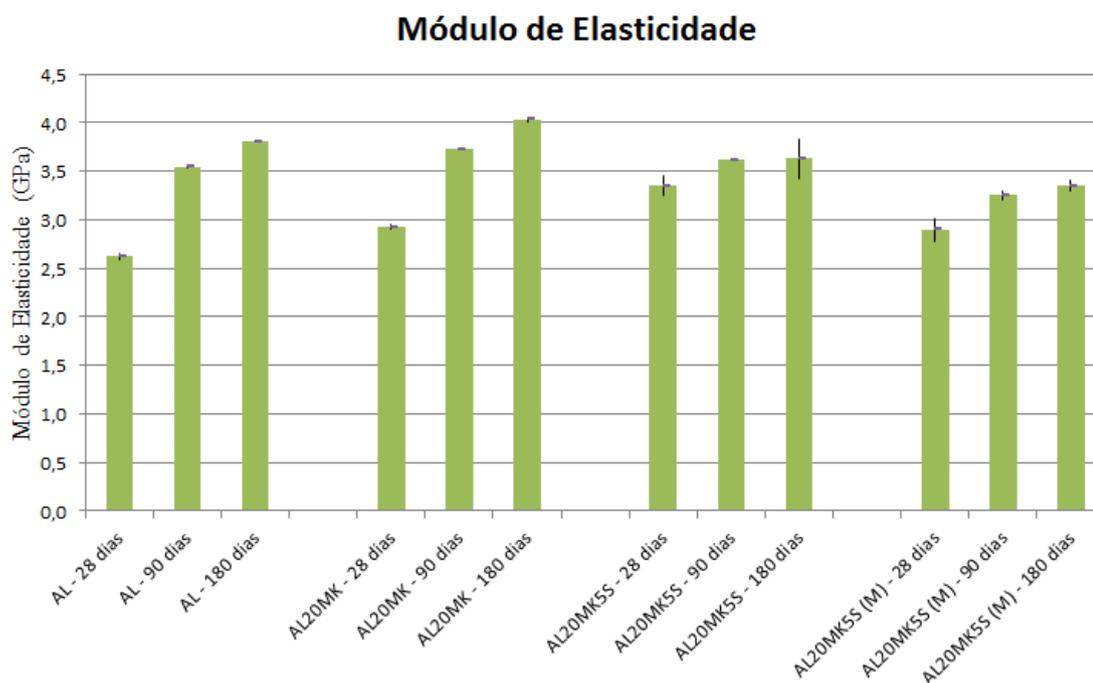


Figura 41. Comparação do módulo de elasticidade das argamassas nas diferentes fases de cura

Aos 28 dias de cura a argamassa que apresenta o módulo de elasticidade mais elevado é a AL20MK5S. No entanto, ao longo do seu tempo de cura, não se verifica grande evolução deste valor, conseguindo as restantes argamassas atingir valores mais elevados com uma maior idade.

Em todas as argamassas é possível verificar uma crescente evolução no valor do seu módulo de elasticidade, podendo-se afirmar que, ao fim de 180 dias de cura, a argamassa AL20MK é a que apresenta o valor mais elevado desta característica. E a argamassa AL20MK5S(M) é a que apresenta o valor mais baixo.

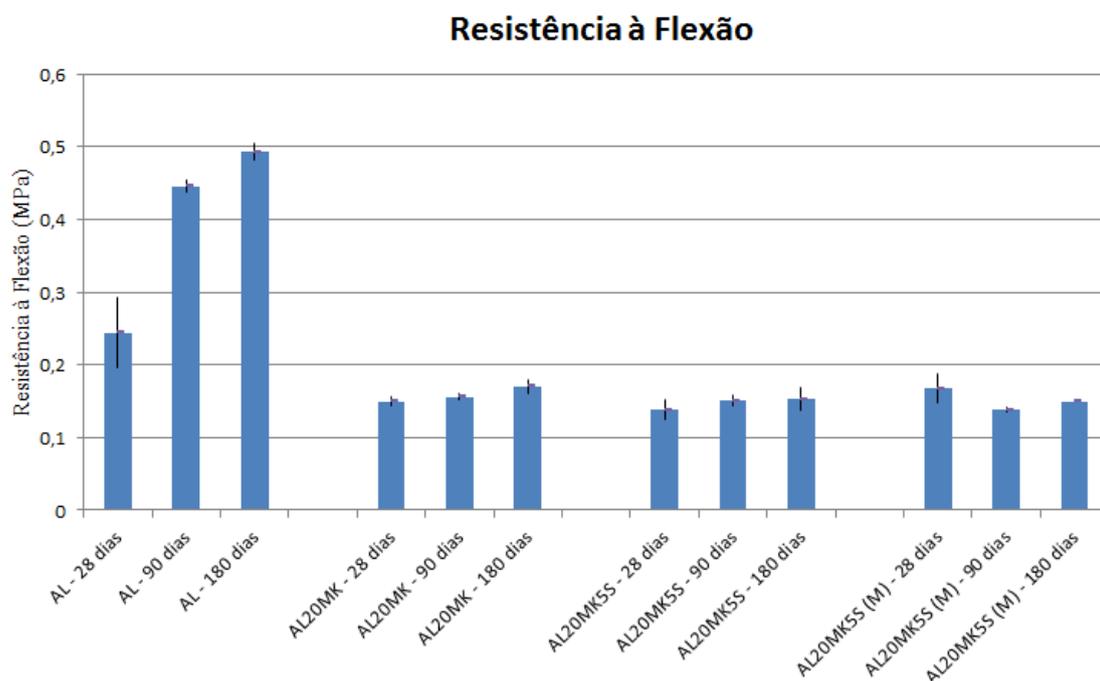


Figura 42. Comparação da resistência à flexão das argamassas nas diferentes fases de cura

A resistência à flexão da argamassa AL é bastante elevada, quando comparada com as restantes argamassas. Desta forma, pode-se afirmar as argamassas com incorporação deste tipo de aditivo, nas quantidades referidas no início do trabalho, têm uma grande quebra na sua resistência à flexão.

Aos 180 dias de cura é possível observar que as argamassas AL20MK, AL20MK5S e AL20MK5S(M) não atingem valores tão elevados como a argamassa AL aos 28 dias de cura.

A incorporação de metacaulino em argamassas de cal aérea leva à existência de reações pozolânicas, o que conduz ao seu rápido endurecimento e rápido consumo de portlandite. Assim, o material não atinge a resistência que poderia atingir, caso a sua carbonatação fosse feita de uma forma lenta e gradual.

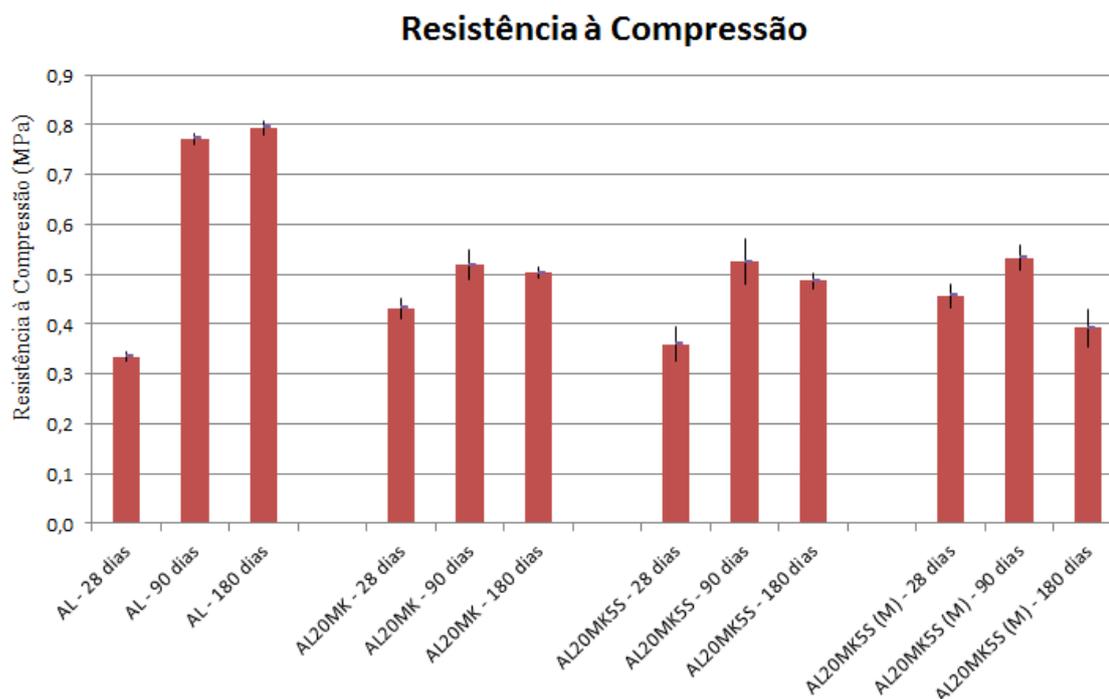


Figura 43. Comparação da resistência à compressão das argamassas nas diferentes fases de cura

Da análise dos resultados referentes ao ensaio de resistência à compressão pode concluir-se que a argamassa AL é aquela que apresenta um menor valor desta característica aos 28 dias de cura. No entanto, é também esta argamassa que tem uma maior evolução no tempo, atingindo aos 180 dias de cura a resistência à compressão mais elevada.

Da análise dos dados obtidos nestes ensaios pode-se verificar que, como esperado, os valores da resistência mecânica das argamassas vai crescendo ao longo do tempo.

A argamassa AL é a que apresenta maior resistência à flexão e compressão quando comparada com as argamassas que contêm aditivos e é ainda a que tem um aumento significativo ao longo do tempo no que diz respeito à resistência à flexão. Segundo Andrejkovičová *et al.* (2011) a substituição de 5% da cal aérea por sepiolite não afeta a resistência da argamassa, mas quando substituído 10% da cal aérea, nota-se um decréscimo nesses valores.

Analisando as propriedades mecânicas conforme a Figura 41, a Figura 42 e a Figura 43, pode-se observar que a argamassa AL apresenta menor módulo de elasticidade, mas maior resistência à flexão e à compressão.

4.1.4. Determinação da velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas aplicadas em suporte de adobe

Foi determinada a velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas em blocos e parede de adobe (Tabela 10). Este aparelho de medição fornece um tempo em micro segundos (μs) e o espaçamento utilizado entre as duas células foi de 10 cm.

Tabela 10. Velocidade de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT

Tempo de cura	Amostra	Tipo de camada	Velocidade (km/s)	
			Blocos	Parede
2 meses	AL	1 camada	1,1	-
		2 camadas	1,2	-
		2 camadas (ch)	1,6	2,6
	AL20MK	1 camada	1,5	-
		2 camadas	1,5	-
		2 camadas (ch)	1,4	2,1
	AL20MK5S	1 camada	1,4	-
		2 camadas	1,6	-
		2 camadas (ch)	1,6	2,0
	AL20MK5S (M)	1 camada	1,6	-
		2 camadas	1,5	-
		2 camadas (ch)	1,5	2,1

(ch) – a 1ª camada foi realizada com chapisco

A análise das velocidades de propagação das ondas emitidas pelo PUNDIT nas argamassas em blocos de adobe não é conclusiva. Como se pode observar na Tabela 10, as argamassas AL e AL20MK5S apresentam maior velocidade de propagação quando aplicadas duas camadas de argamassa. No entanto, o contrário é verificado para as argamassas AL20MK e AL20MK5S(M).

A velocidade de propagação das ondas nas argamassas aplicadas em suporte de adobe é maior na mistura AL do que nas restantes. A propagação neste tipo de suporte é maior do que em blocos de adobe. Este fenómeno pode dever-se ao facto de as ondas não atravessarem só a argamassa, mas também o suporte, visto que o suporte de adobe da parede e os blocos não era o mesmo.

4.1.5. Ensaio de carbonatação

A percentagem de carbonatação ocorrido nos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura são apresentados na Tabela 11 e a evolução do estado de carbonatação é mostrada na Figura 44 e na Figura 45. Entenda-se por estado de carbonatação a distância compreendida entre a face do provete e a frente de carbonatação.

Tabela 11. Percentagem de carbonatação dos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura

Tempo de cura	Argamassa	Percentagem de carbonatação (%)
28 dias	AL	43,75
	AL20MK	51,00
	AL20MK5S	51,00
	AL20MK5S (M)	38,75
90 dias	AL	83,38
	AL20MK	94,75
	AL20MK5S	100,00
	AL20MK5S (M)	100,00
180 dias	AL	100,00
	AL20MK	100,00
	AL20MK5S	100,00
	AL20MK5S (M)	100,00

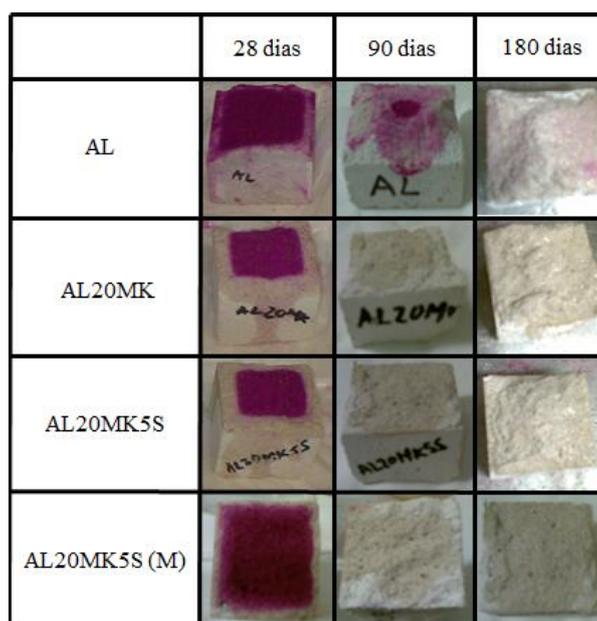


Figura 44. Estado de carbonatação dos provetes de argamassas aos 28, 90 e 180 dias de cura (Matos, 2012)

Tal como foi referido no item 4.1.1, a argamassa AL é aquela que tem um processo de carbonatação mais lento, logo é o provete que demora mais tempo a ficar totalmente endurecido. Tal fenómeno é possível observar na Figura 44 onde, aos 90 dias de cura, apenas a argamassa AL apresenta coloração após o teste com fenolftaleína.

A Figura 45 mostra a evolução do processo de carbonatação dos provetes de argamassa e, como já se pôde constatar pela análise da Tabela 11 e da Figura 44, a argamassa AL é a que apresenta maior lentidão neste processo.

Aos 90 dias de cura observa-se total carbonatação das argamassas AL20MK5S e AL20MK5S (M), estando estas argamassas totalmente endurecidas nesta fase da cura.

Aos 180 dias de cura, constata-se que todos os provetes estão totalmente carbonatados e, assim, totalmente endurecidos.

É clara a influência positiva da adição de sepiolite às argamassas de cal, fomentando uma carbonatação mais rápida, como é possível verificar-se aos 90 dias de idade.

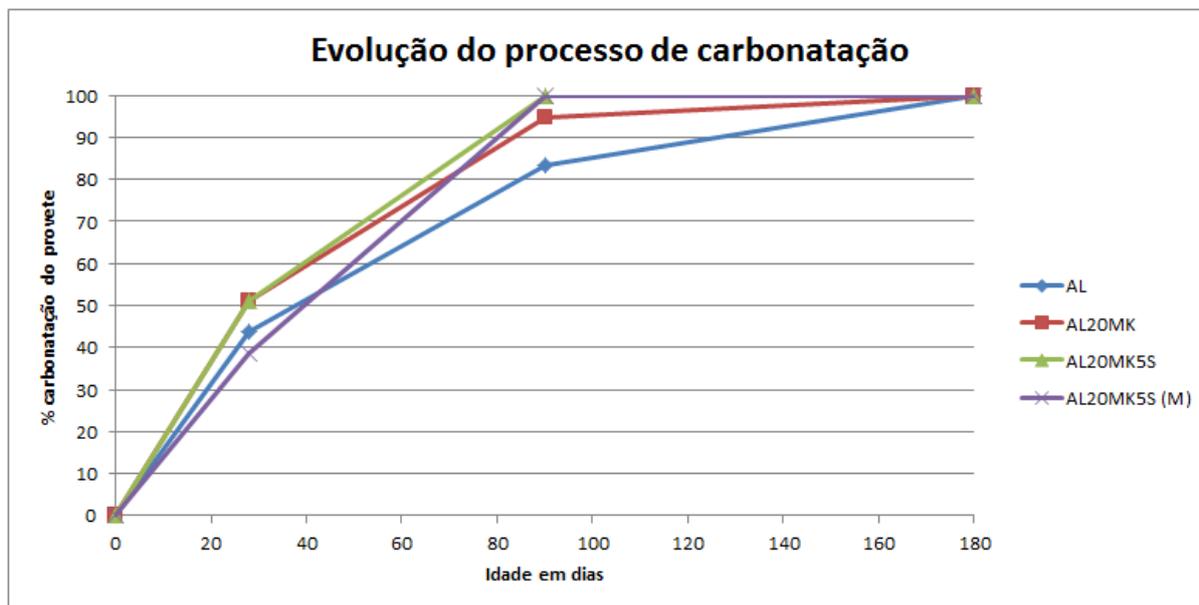


Figura 45. Evolução do processo de carbonatação dos provetes de argamassa

Relativamente aos blocos de adobe, os resultados do ensaio de carbonatação a 1, 2 e 3 meses de cura apresentam-se na Tabela 12.

Tabela 12. Tipo de rotura e percentagem de carbonatação das argamassas em blocos de adobe

Tempo de cura	Argamassa	Tipo de camadas	Tipo de rotura	Estado de carbonatação (%)
1 mês	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	45
		2 camadas	-	15
		2 camadas (ch)	adesivo	20
	AL20MK	1 camada	maioritariamente coesivo	55
		2 camadas	maioritariamente coesivo	25
		2 camadas (ch)	adesivo	25
	AL20MK5S	1 camada	maioritariamente coesivo	65
		2 camadas	adesivo	15
		2 camadas (ch)	maioritariamente coesivo	15
	AL20MK5S (M)	1 camada	adesivo	45
		2 camadas	maioritariamente coesivo	5
		2 camadas (ch)	adesivo	17,5
2 meses	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	70
		2 camadas	-	30
		2 camadas (ch)	adesivo	32,5
	AL20MK	1 camada	maioritariamente coesivo	100
		2 camadas	maioritariamente coesivo	52,5
		2 camadas (ch)	adesivo	100
	AL20MK5S	1 camada	maioritariamente coesivo	100
		2 camadas	maioritariamente coesivo	40
		2 camadas (ch)	adesivo	42,5
	AL20MK5S (M)	1 camada	adesivo	100
		2 camadas	adesivo	100
		2 camadas (ch)	adesivo	37,5
3 meses	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	80
		2 camadas	-	37,5
		2 camadas (ch)	adesivo	37,5
	AL20MK	1 camada	maioritariamente coesivo	100
		2 camadas	maioritariamente coesivo	75
		2 camadas (ch)	-	100
	AL20MK5S	1 camada	maioritariamente coesivo	100
		2 camadas	maioritariamente coesivo	62,5
		2 camadas (ch)	maioritariamente coesivo	100
	AL20MK5S (M)	1 camada	adesivo	100
		2 camadas	maioritariamente coesivo	100
		2 camadas (ch)	adesivo	100

(ch) – a 1ª camada foi realizada com chapisco

Tal como se observou nos provetes de argamassa, a argamassa AL é a que tem um processo de carbonatação mais lento quando aplicada em duas camadas.

Aos 180 dias de cura, nem todas as argamassas se apresentam totalmente endurecidas. A argamassa AL continua a ser a que demora mais tempo a ficar totalmente carbonatada.

O processo de carbonatação obtido em argamassas colocadas em parede de adobe foi o mesmo observado nas argamassas em blocos de adobe (2 camadas, em que a primeira camada foi aplicada em chapisco).

4.1.6. Ensaio de capilaridade e de absorção de água sob pressão

A Figura 46, a Figura 47 e a Figura 48 apresentam, em forma de gráfico, os resultados dos ensaios de capilaridade aos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura, respetivamente. Neles é possível observar o comportamento das diferentes argamassas à absorção e secagem de água por capilaridade, bem como a sua evolução no tempo.

Os resultados obtidos nos blocos de adobe não foram considerados, uma vez que o vedante utilizado não foi eficaz.

Os ensaios de absorção de água sob pressão foram efetuados aos 4,5 meses de cura das argamassas, nas paredes de adobe. Na Tabela 15 estão apresentados os resultados obtidos.

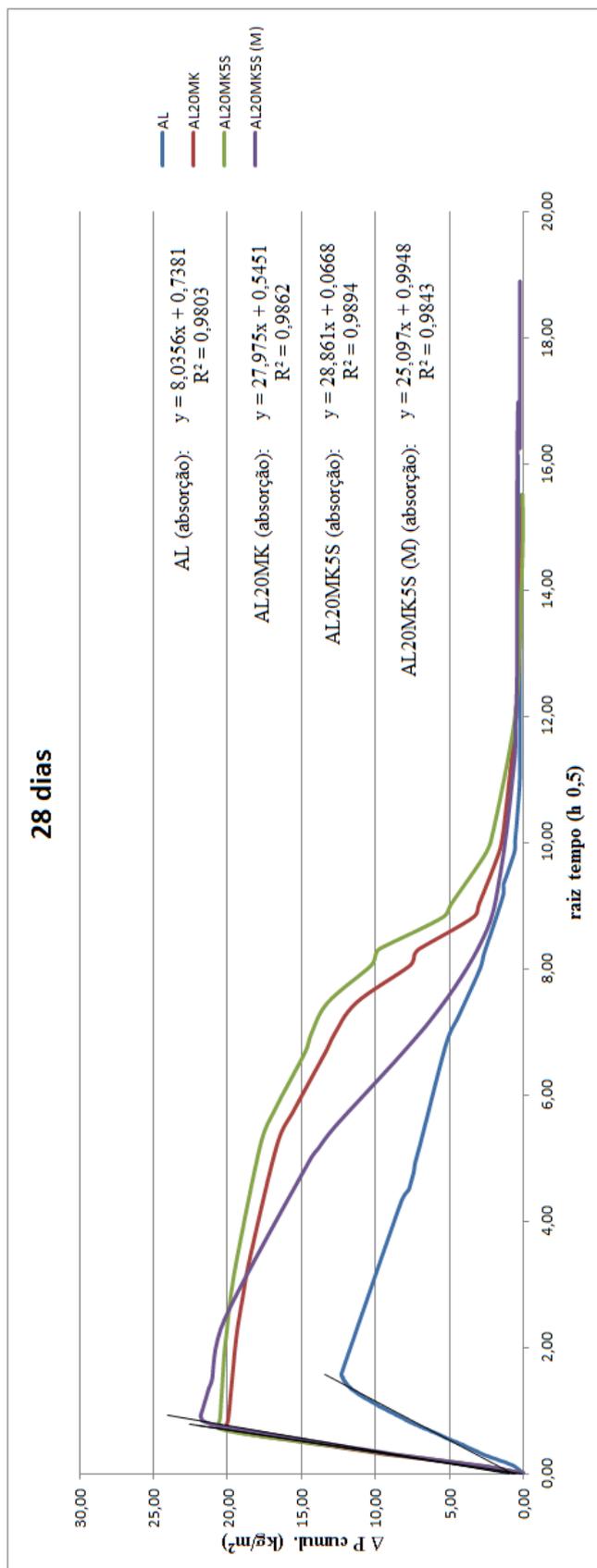


Figura 46. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 28 dias de cura

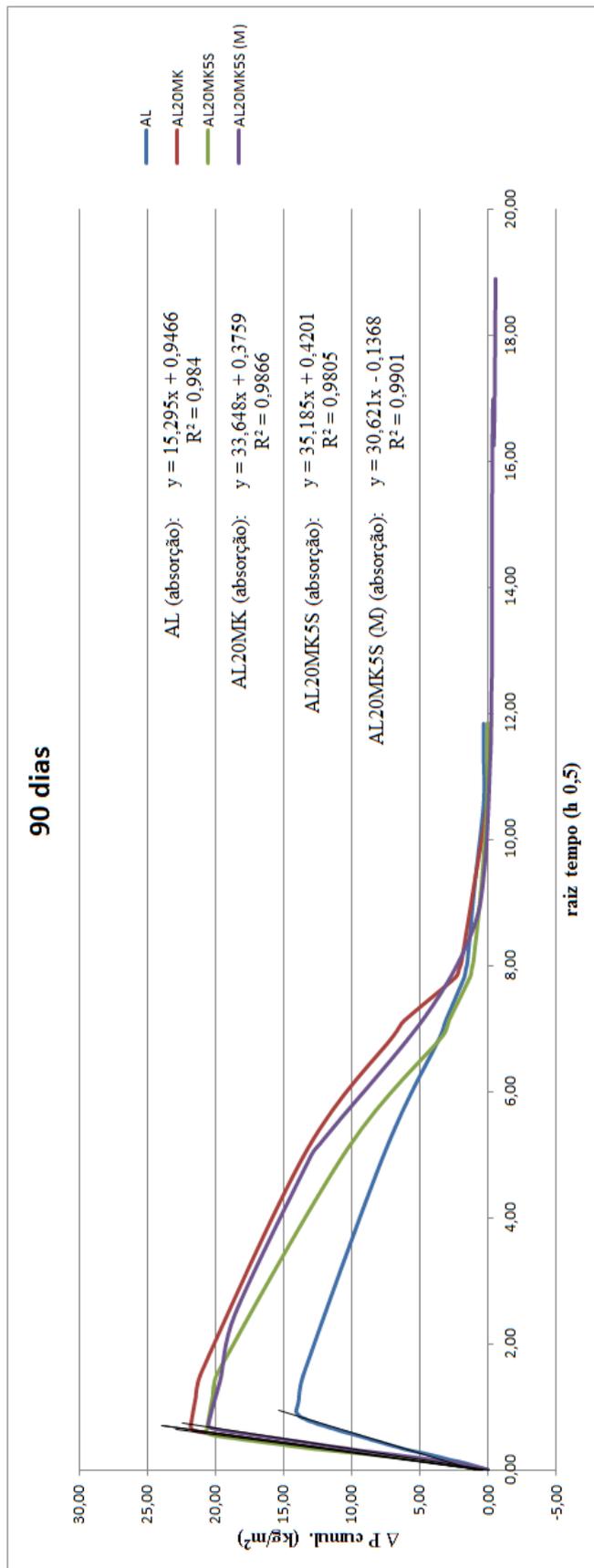


Figura 47. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 90 dias de cura

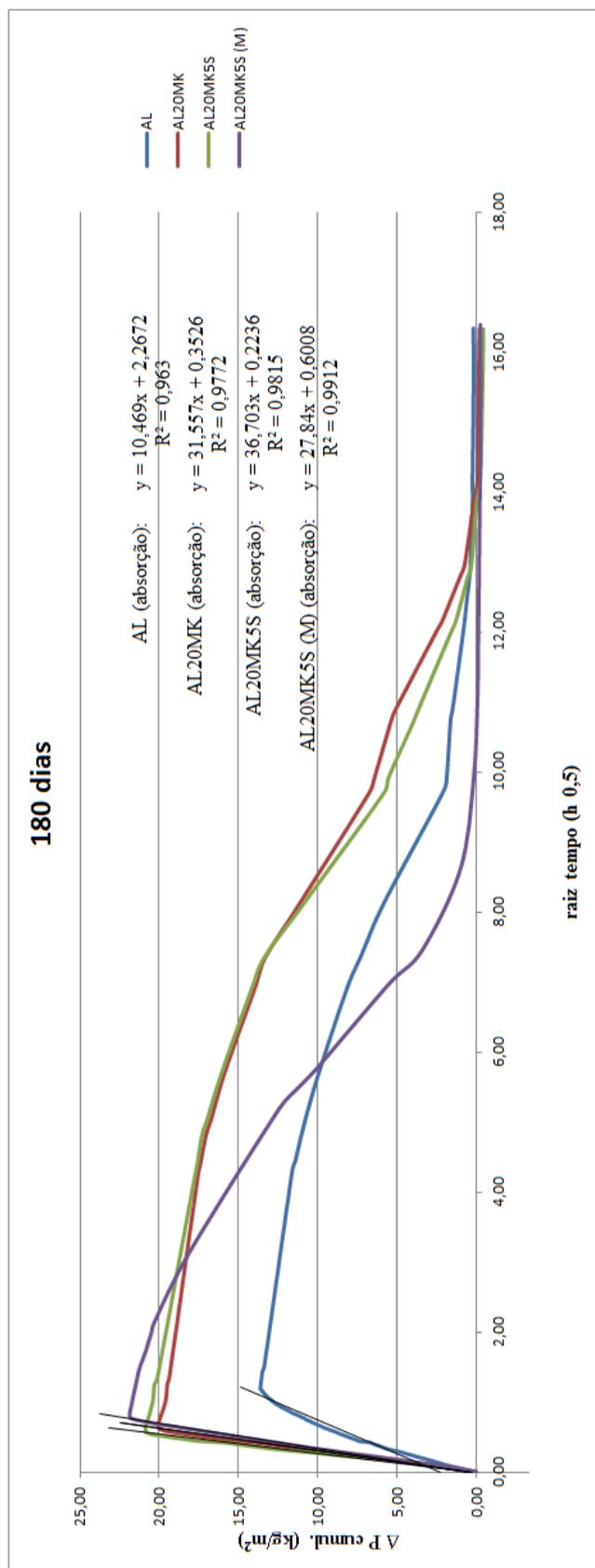


Figura 48. Comportamento capilar (absorção e secagem) dos provetes aos 180 dias de cura

Tendo como base os gráficos apresentados nas figuras anteriores elaboraram-se duas tabelas com os coeficientes de capilaridade de cada provete de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura, Tabela 13, e os tempos totais de absorção e secagem de cada provete de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura, Tabela 14.

Tabela 13. Coeficientes de capilaridade dos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura

Tempo de cura	Argamassa	Coeficiente de Capilaridade (kg/m ² h ^{1/2})
28 dias	AL	8,04
	AL20MK	27,98
	AL20MK5S	28,86
	AL20MK5S (M)	25,10
90 dias	AL	15,30
	AL20MK	33,65
	AL20MK5S	35,19
	AL20MK5S (M)	30,62
180 dias	AL	10,47
	AL20MK	31,56
	AL20MK5S	36,70
	AL20MK5S (M)	27,84

Tabela 14. Tempo de absorção de secagem dos diversos provetes de argamassa aos 28, 90 e 180 dias de cura

Tempo de cura	Argamassa	Tempo absorção (minutos)	Tempo secagem (dias)
28 dias	AL	144,5	5
	AL20MK	31,5	7
	AL20MK5S	31,5	7
	AL20MK5S (M)	47,5	11
90 dias	AL	49,5	5
	AL20MK	26,5	5
	AL20MK5S	21,5	5
	AL20MK5S (M)	30,5	4
180 dias	AL	82,5	8
	AL20MK	24,5	8
	AL20MK5S	21,5	7
	AL20MK5S (M)	39,5	4

O tipo de argamassa “ideal” é aquele em que a absorção de água por capilaridade se faz lentamente e a sua secagem é feita de forma rápida. Este fenómeno é importante em

argamassas de junta e de reboco em suportes de adobe, uma vez que a existência de água nestas argamassas é um dos motivos para a sua degradação.

Como se pode observar na Tabela 14, a argamassa AL é a que absorve a água mais lentamente, sendo também uma das que seca mais rapidamente. A argamassa AL20MK5S (M) embora apresente um período de secagem muito longo aos 28 dias de cura, aos 90 e 180 dias é a argamassa que apresenta o melhor comportamento. Em contrapartida, esta argamassa demonstra um processo de absorção muito rápido em todas as fases de cura.

No que diz respeito à absorção de água por capilaridade, pode-se afirmar que o provete de argamassa de cal aérea (AL) é o que apresenta o melhor comportamento.

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água sob pressão com o auxílio de Tubos de Karsten nas paredes de adobe foram bastante diferentes os descritos anteriormente, pois o tempo de cura das argamassas nela aplicadas foi de 4,5 meses. Na Tabela 15 estão apresentados os tempos de absorção de água sob pressão nas diferentes misturas de argamassa. Existe uma clara diferença imposta, quer pelo tempo de cura, quer pelo facto das argamassas terem sido aplicadas na parede. A própria aplicação e absorção de água pelo suporte criam uma estrutura porosa distinta. Dos resultados obtidos, nota-se uma clara influência da adição de sepiolite, que favorece uma absorção mais lenta da água.

Tabela 15. Tempo de absorção de água sob pressão nas argamassas aplicadas em parede de adobe

Coluna de água (cm)	Tempo de absorção (s)			
	AL	AL20MK	AL20MK5S	AL20MK5S(M)
1	5,03	6,76	69,00	30,71
2	9,07	16,63	153,03	72,53
3	19,57	28,48	252,25	124,65
4	35,63	43,04	365,11	186,97

Na Tabela 15 é possível observar que, aos 4,5 meses de cura, a argamassa AL20MK5S tem o melhor comportamento à absorção de água por capilaridade. Comparando com os resultados obtidos nos provetes de argamassa, pode dizer-se que, embora nos ensaios aos provetes a argamassa AL tenha sido aquela que apresentava um tempo de absorção mais elevado, aos 4,5 meses de cura das argamassas aplicadas em parede de adobe, com cura em ambiente não controlado, a argamassa AL20MK5S é aquela que tem um tempo de absorção mais alto.

4.1.7. Ensaio de “pull-off”

Na Tabela 16 e Tabela 17 são apresentados os tipos de rotura em cada argamassa com 1, 2 e 3 meses de cura.

Tabela 16. Resultados do ensaio de "pull-off" às argamassas em blocos de adobe com 1 mês de cura

Tempo de cura	Argamassa	Tipo de camadas	Tipo de rotura	Força de adesão (kN)	
1 mês	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas	-	-	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	
	AL20MK	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,0	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	
	AL20MK5S	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas	adesivo	0,0	
		2 camadas (ch)	maioritariamente coesivo	0,0	
	AL20MK5S (M)	1 camada	adesivo	0,1	
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,0	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	
	2 meses	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	0,2
			2 camadas	-	-
			2 camadas (ch)	adesivo	0,0
AL20MK		1 camada	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	
AL20MK5S		1 camada	maioritariamente coesivo	0,0	
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,1	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	
AL20MK5S (M)		1 camada	adesivo	0,0	
		2 camadas	adesivo	0,0	
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0	

(ch) – a 1ª camada foi realizada com chapisco

Tabela 17. Resultados do ensaio de "pull-off" às argamassas em blocos de adobe com 3 meses de cura

Tempo de cura	Argamassa	Tipo de camadas	Tipo de rotura	Força de adesão (kN)
3 meses	AL	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1
		2 camadas	-	-
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0
	AL20MK	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,1
		2 camadas (ch)	-	-
	AL20MK5S	1 camada	maioritariamente coesivo	0,1
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,0
		2 camadas (ch)	maioritariamente coesivo	0,1
	AL20MK5S (M)	1 camada	adesivo	0,0
		2 camadas	maioritariamente coesivo	0,1
		2 camadas (ch)	adesivo	0,0

(ch) – a 1ª camada foi realizada com chapisco

Antes do tratamento dos resultados expressos nas tabelas anteriores, é importante referir que o valor da força de adesão de todas as argamassas nos diferentes tempos de cura não é uniforme, variando entre 0,0 e 0,2 kN.

Os valores registados no “pull-off” em argamassas colocadas em parede de adobe foram os mesmos observados nas argamassas em blocos de adobe (2 camadas, em que a primeira camada foi aplicada em chapisco).

Analisando a Tabela 16 e Tabela 17, verifica-se que existiram roturas do tipo adesivo, Figura 33, e do tipo coesivo, Figura 34.

As roturas do tipo adesivo sugerem que o valor real da força de adesão é igual ao valor observado no “pull-off”. No então, era objetivo desta parte do trabalho conhecer a força de adesão interna da argamassa. Assim, destes valores não se pode retirar qualquer conclusão.

Segundo a EN 1015-12, as roturas do tipo coesivo remetem para um valor real da força de adesão superior ao lido no aparelho de medição. Desta forma, pode afirmar-se que as argamassas testadas onde se verificou este tipo de rotura têm uma força de adesão

superior à registada no “pull-off”. Esta gama de valores está dentro dos parâmetros esperados no início do trabalho.

4.1.8. Argamassa em blocos de adobe, com imposição de ciclos para envelhecimento acelerado

O ensaio de envelhecimento acelerado de argamassas por imposição de ciclos “verão”/“inverno” decorreu de 12 de Abril a 11 de Junho de 2012. Durante este período foram efetuados 30 ciclos completos.

No final, as variações da massa dos adobes e argamassas não foram significativas. Foram observadas variações entre +0,1% e +2% da massa inicial do provete, mas não são coerentes entre provetes do mesmo tipo de argamassa.

Foi possível observar microfissuras nas argamassas AL, não tendo sido observada qualquer alteração desse tipo nas argamassas AL20MK, AL20MK5S e AL20MK5S(M).

Registou-se o início da degradação superficial das argamassas AL, AL20MK e AL20MK5S(M), onde se observaram partículas de areia solta à superfície.



Figura 49. Partículas observadas na superfície da argamassa após ensaio de envelhecimento acelerado
(Matos, 2012)

4.1.9. Recolha de imagens recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento – SEM “scanning electron microscope”

As microestruturas que se seguem correspondem às imagens obtidas das amostras das argamassas AL, AL20MK, AL20MK5S e AL20MK5S(M) no SEM, Figura 50 e Figura 51.

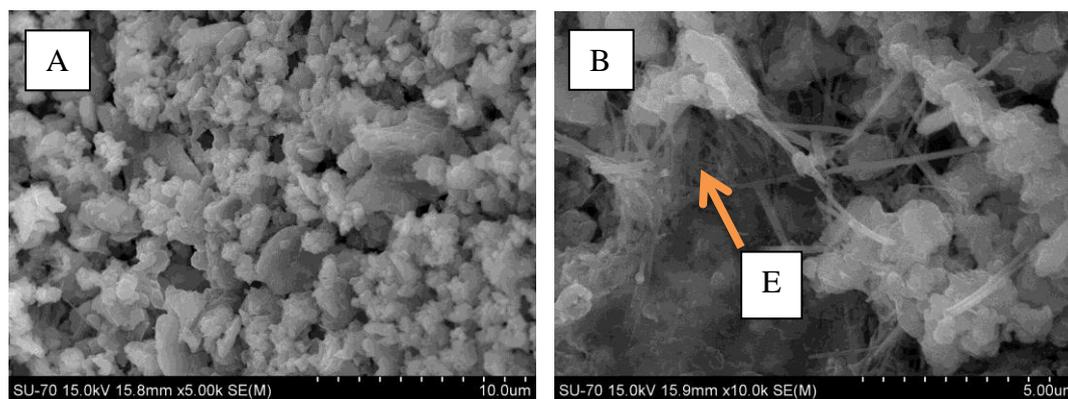


Figura 50. Imagens observadas no SEM
A) AL; B) AL20MK

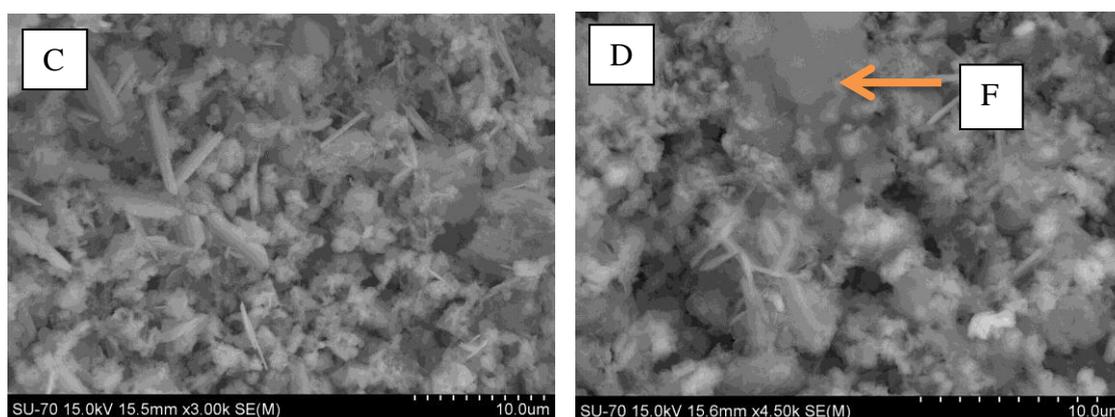


Figura 51. Imagens observadas no SEM
C) AL20MK5S; D) AL20MK5S(M)

A referência E na Figura 50 e a referência F na Figura 51 estão ilustradas e explicadas nas figuras e texto que se seguem.

Na Figura 50-A está ilustrada a matriz típica da cal.

A confirmação da atividade pozolânica do metacaulino é obtida na Figura 50-B na Figura 52 através da observação de alumino-silicato de cálcio na argamassa AL20MK.

Partículas de sepiolite em forma de agulha provocaram uma maior compatibilidade e agregação entre os diferentes materiais que compõem as argamassas, como se pode observar na Figura 51-C.

A formação de uma nova fase pozolânica foi também confirmada na argamassa AL20MK5S(M), visível na Figura 53.

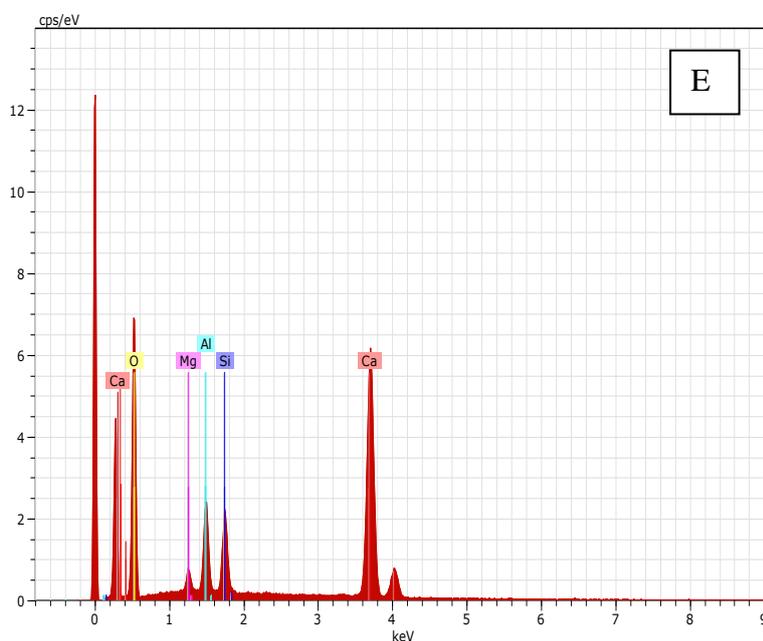


Figura 52. Análise mineralógica da fração E presente na Figura 48-B

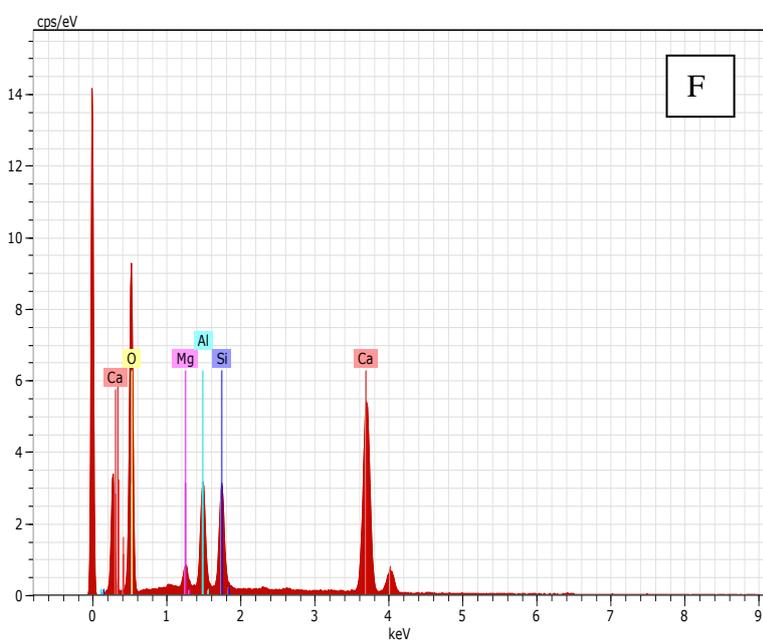


Figura 53. Análise mineralógica da fração F presente na Figura 49-D

5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Após a análise dos resultados obtidos através dos vários ensaios realizados ao longo deste trabalho é importante realçar que neste tipo de suporte, adobe, uma das grandes preocupações relativamente às argamassas de revestimento é o seu comportamento na presença de água.

Embora esta seja uma das características mais importantes, não significa que sejam desprezáveis os resultados obtidos nos restantes ensaios para que se possa seleccionar a argamassa que melhor se adapta ao suporte e ambiente pretendidos.

Uma vez que o adobe é um material extremamente poroso, a argamassa a aplicar deve ter a capacidade de absorver água por capilaridade de forma lenta, bem como secar o mais rapidamente possível.

O provete de argamassa AL é aquele que apresenta uma absorção de água por capilaridade mais lenta e a AL20MK5S(M) é o que tem uma secagem mais rápida. Embora a argamassa AL20MK5S(M) apresente um tempo de absorção de água por capilaridade superior à AL, pode afirmar-se que estas duas composições apresentam o comportamento mais próximo do pretendido.

No entanto, as argamassas aplicadas em parede de adobe, com cura em ambiente não controlado, apresentam resultados diferentes daqueles conseguidos nos provetes de argamassa. A argamassa que apresentou melhor comportamento à absorção de água, aos 4,5 meses de cura, foi a AL20MK5S. verifica-se que a adição de sepiolite às argamassas de cal e metacaulino favorece o seu comportamento à água.

A argamassa de cal aérea, AL, é ainda aquela que apresenta uma resistência mecânica mais elevada, mas é também a que mostrou a ocorrência de microfissuras e uma das argamassas onde se observou degradação superficial com o envelhecimento acelerado. Estas microfissuras são um ponto de propagação de patologias e de entrada de água.

Desta forma, pode-se afirmar que as argamassas que contêm metacaulino ou sepiolite na sua composição são mais compactas e de fácil aplicação, mais resistentes a fatores climáticos e têm um envelhecimento mais lento que a argamassa AL.

É importante realçar que as argamassas com aditivos que foram testadas, embora não sejam as que melhor se comportam relativamente à absorção de água por capilaridade, são as que têm uma maior durabilidade e aquelas que mostram melhores resultados face à água após aplicação, simulando as condições de utilização.

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, poderá ser calculado o módulo de elasticidade das argamassas aplicadas em suporte de adobe utilizando células de PUNDIT que se adaptem à altura da camada das mesmas. Embora tivesse sido calculado o módulo de elasticidade, seria de todo o interesse estimar este valor através da utilização do PUNDIT para que se pudesse comparar resultados.

Estes tipos de argamassas poderão ser ainda testados noutros suportes e em ambientes diferentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achenza, Maddalena; Correia, Mariana; Cadinu, Marco; Serra, Amadeo - Houses and Cities Built with Earth. ARGUMENTUM, 2006.

Andrejkovičová, S.; Ferraz, E.; Velosa, A. L.; Silva, S.; Rocha, F. - Air lime mortars with incorporation of sepiolite and zeolite type A. (2011).

Arizzi, A.; Viles, H.; Cultrone, G. - Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings. Construction and Building Materials. Vol. 28, n.º 1 (2011), p. 807-818.

Bastos, Pedro Kopschitz Xavier; Lemonge, Afonso Celso de Castro; Sigiliano, Vitor Sathler; Resende, Sheyla Castro- Estudo do Módulo de Elasticidade de Argamassas de Revestimento Sujeitas à Sucção de Água pela Base. 2010. Disponível em WWW:<URL:http://www.apfac.pt/congresso2010/comunicacoes/Paper%20105_2010.pdf>.

BritishLimeAssociation - Technical info - Lime in mortars [em linha]. [Consult. Disponível em WWW:<URL:http://www.britishlime.org/tech_lime01.php>.

Chivrac, Frédéric; Polleta, Eric; Schmutzb, Marc; Avérous, Luc - Starch nanobiocomposites based on needle-like sepiolite clays. ELSEVIER. (2009).

eConf.info- Use of metakaolin in air lime mortars for adobe walls. Rússia, 2009. Disponível em WWW:<URL:<http://www.econf.info/CMLM2009/S5/782.html>>.

Feilden, B. M. - Conservation of historic buildings. Architectural Press/Butterworth-Heinemann, Oxford. (1994).

Fernandes, Maria; Correia, Mariana; Jorge, Filipe - Terra em Seminário 2010. ARGUMENTUM, 2010.

Gameiro, A.; Silva, A. Santos; Veiga, AR.; Velosa, A.- Metakaolin-lime hydration products and phase stability: Microscopy analysis: 13th Euroseminar on microscopy, applied to building materials. Ljubljana, Slovenia, 2011.

Gonçalves, Carla - Localização das técnicas construtivas [em linha]. [Consult. Disponível em WWW:<URL:<http://tabiquenaamtqt.blogs.sapo.pt/>>.

Jorge, Filipe - Terra em Seminário 2007. ARGUMENTUM, 2007.

Klimesch, D. S.; Ray, A. - Hydrogarnet formation during autoclaving at 180°C in unstirred metakaolin-lime-quartz slurries. Ciment and Concrete Research. (1998).

Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Bakolas, A.; Moropoulou, A. - Psycho-chemical study of Cretan ancient mortars. (2003).

Martínez-Ramírez, S.; Puertas, F.; Blanco-Varela, M. T. - Stability of sepiolite in neutral and alkaline media at room temperature. (1996).

Martínez-Ramírez, S.; Puertas, F.; Blanco-Varela, M.T. - Carbonation process and properties of a new lime mortar with added sepiolite. (1995).

Matos, M. J.- 2012.

Matos, M. J.- Fotografias de Construções em Adobe. 2011.

Miguel, Patrícia Raquel Esteves - Desenvolvimento de argamassas de reabilitação de edifícios em adobe. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2008.

Operating Instructions - ERUDITE MKIV (PC1004) - England.

Palomo, A.; Blanco-Varela, M. T.; Martinez-Ramirez, S.; Puertas, F.; Fortes, C. - Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research. (s.d.).

Sabir, B. B.; Wild, S.; Bai, J. - Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. Elsevier. (2001).

Siddique, Rafat; Klaus, Juvas - Applied Clay Science - Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. Elsevier. (2008).

Velosa, A. L.; Coroado, J.; Veiga, M. R.; Rocha, F. - Characterisation of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair. Materials Characterization. Vol. 58 (2007), p. 1208-1216.

Velosa, A.; Veiga, R.- Lime-metakaolin mortars - properties and applications: Sustainable Construction, Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium. Lisboa, IST, 2007.

Velosa, A.; Veiga, R.; Rocha, F.- Utilização de metacaulim em argamassas para conservação de edifícios: VIII SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Curitiba-PR-Brasil, 2009.