



Ana Isabel
Guerreiro Martins

**A influência das condições de cura
em argamassas de cais aéreas com
e sem adição de metacaulino**

Dissertação apresentada para:
cumprimento dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Mestre em Construção Civil,
realizada sob a orientação científica da Professora
Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria
Rodrigues, Professora Coordenadora da Escola
Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto
Politécnico de Setúbal.

Dezembro, 2010

AGRADECIMENTOS

Não teria sido possível realizar esta dissertação, para obtenção do grau de Mestre, sem a ajuda e contributo de um conjunto de pessoas e entidades, às quais quero deixar aqui os meus sinceros agradecimentos:

À Prof. Doutora Paulina Faria, Professora Coordenadora da ESTBarreiro/IPS e orientadora da presente dissertação, deixo o meu especial agradecimento por toda a ajuda facultada, pelos conhecimentos transmitidos, o incentivo e a amizade demonstrada.

Ao Prof. Mestre Rui Neves, da ESTBarreiro/IPS, pelo interesse e atenção disponibilizada durante o processo de cura dos provetes nas câmaras climáticas e na análise dos resultados dos ensaios de carbonatação.

À Prof. Mestre Cristiana Pereira, da ESTBarreiro/IPS, pela amizade e preocupação demonstrada durante aquele telefonema numa tarde de sábado.

À Prof. Otília Dias, à Dra. Ana Gomes e ao Prof. Doutor João Vinagre, da ESTBarreiro/IPS, pela compreensão e pela facilidade dada na troca de horário de trabalho para poder realizar esta dissertação.

Ao Eng.^o Cartaxo da empresa Fradical, pela cal em pasta fornecida para a realização deste trabalho.

Ao Dr.^o Mário Marques e ao Téc. Comercial José Cruz da empresa Lusical, pela cal disponibilizada para a realização deste trabalho e toda a atenção dispensada.

À Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciência e Tecnologia pelo empréstimo dos moldes prismáticos utilizados na preparação dos provetes de argamassa e pela possibilidade de utilização do equipamento de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Ao projecto Metacal, sedado na Universidade de Aveiro pelo fornecimento do metacaulino.

Ao Sr. Alexandre Mourita, ao Sr. Domingos, ao Sr. João Figueiredo e ao Sr. Bruno Alves pela ajuda em algumas tarefas laboratoriais.

Ao meu pai, Olimpio Martins, o meu especial agradecimento pelos sacrifícios que fez por mim, pelos seus ensinamentos, pela preocupação e incentivo demonstrado, fazendo-me ver o lado positivo das coisas e dando-me forças para seguir em frente, sempre que a vida me prega uma partida.

Ao meu namorado, Nuno Vaz, manifesto o meu particular agradecimento pela paciência, pelos fins-de-semana passados em casa a fazer-me companhia enquanto trabalhava nesta dissertação. Pelo apoio e incentivo dados, à ajuda na revisão dos textos e pela compreensão perante a pouca atenção que lhe dei ao longo destes meses.

Ao Luís Vaz e em particular à Maria José (futuros sogros, assim o espero) pela ajuda prestada e todos os almoços e jantares feitos perante a minha indisponibilidade, pela amizade demonstrada e pelas palavras de encorajamento e positivismo proferidas.

À Adélia Alves, companheira do meu pai, pela amizade demonstrada ao longo destes sete anos, pela palavra amiga que tem sempre para dar e disponibilidade demonstrada em ajudar no que for necessário.

E por fim, o agradecimento mais importante, à minha mãe, Ana Paula Martins, embora não esteja presente fisicamente a sua memória prevalece entre nós. Mãe, quero-te deixar a minha sincera gratidão por todos os sacrifícios que fizeste por mim ao longo da tua vida, por todo o apoio e encorajamento que me deste, e que de alguma forma me fizeram chegar até aqui.

Obrigada a todos!

A INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CURA EM ARGAMASSAS DE CAIS AÉREAS COM E SEM ADIÇÃO DE METACAULINO

RESUMO

As argamassas de cal aérea, com ou sem adição de pozolanas, são utilizadas desde a antiguidade na construção de edifícios. Devido à degradação, natural ou acidental, do património edificado é necessário utilizar argamassas de reparação que sejam duráveis e compatíveis com as alvenarias.

Dentro deste contexto, com vista à melhoria das características das argamassas e associado à necessidade de utilização de práticas de construção sustentáveis, com dispêndio de menos energia, utilização de subprodutos industriais e de materiais reciclados, têm vindo a ser estudadas argamassas de cal aérea com adição de pozolanas. Com a finalidade de otimizar as características destas argamassas e a sua aplicabilidade é fundamental estudar a influência das condições de cura a que estas estão sujeitas.

Esta dissertação descreve o estudo efectuado sobre argamassas de cal aérea em pó e em pasta, com e sem adição de metacaulino, quando sujeitas a quatro condições de cura distintas, fazendo variar a humidade relativa e o teor em dióxido de carbono.

Foram estudadas as características mecânicas, de estrutura interna e físicas das argamassas, fazendo-se a sua análise e comparação. Os benefícios revelados por algumas argamassas estão directamente relacionados com as condições de cura a que foram sujeitas em laboratório.

PALAVRAS – CHAVE

Argamassa, cal aérea, metacaulino, condição de cura.

THE INFLUENCE OF CURE CONDITIONS ON LIME AND LIME-METAKAOLIN MORTARS

ABSTRACT

Air lime mortars, with or without, pozzolans are utilized since ancient times in buildings. Because of the natural or accidental degradation it is often necessary to repair the buildings with the utilization of mortars. This mortars need to be durable and compatible with the support masonries.

In this context and driven by the need to support sustainable building practices (with lower energy conception and the use of industrial by products and recycled naturals), lime mortars with or without pozzolans have been studied. A crucial question, in order to optimize the characteristics and applicability of the mortars, are the curing conditions they are subjected to.

This dissertation describes the study about mortars with air lime in powder and as a putty, with or without metakaolin, when subjected to four distinct curing conditions (in terms of relative humidity and quantity of carbon dioxide).

Mechanical and physical characteristics and internal of the mortars were studied, analyzed and compared by this study. The benefits revealed by same mortars are directly related to the curing condition of the mortar samples.

KEY – WORDS

Mortar, air lime, metakaolin, curing condition.

ÍNDICE DE TEXTO

Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Organização do texto	3
Capítulo 2.Estado da arte	5
2.1. Argamassa.....	5
2.2. Matérias-Primas	6
2.2.1. Cais.....	6
2.2.2. Pozolanas	9
2.2.3. Areias.....	9
2.3. Ensaios	10
2.3.1. Análise granulométrica	10
2.3.2. Determinação do volume de vazios	10
2.3.3. Determinação da baridade.....	11
2.3.4. Determinação da consistência por espalhamento	11
2.3.5. Profundidade de carbonatação	12
2.3.6. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	12
2.3.7. Determinação da resistência à compressão	13
2.3.8. Determinação da aderência por ensaio de arrancamento	13
2.3.9. Determinação da absorção de água por capilaridade e da secagem ...	14
2.3.10. Porosidade aberta.....	16

Capítulo 3. Matérias-primas	17
3.1. Cais.....	17
3.2. Pozolanas	18
3.3. Areias.....	18
Capítulo 4. Descrição do desenvolvimento experimental	19
4.1. Enquadramento geral	19
4.2. Caracterização das matérias-primas	20
4.2.1. Análise granulométrica por peneiração mecânica	20
4.2.2. Determinação do volume de vazios (V_v).....	22
4.2.3. Determinação da massa volúmica (M_{vol})	23
4.2.4. Determinação da baridade (Ba).....	24
4.2.5. Determinação do teor em água da cal em pasta	25
4.3. Preparação das argamassas, caracterização no estado fresco e colocação em diferentes condições de cura.....	26
4.3.1. Preparação das argamassas.....	26
4.4. Caracterização das argamassas no estado endurecido	34
4.4.1. Verificação da retracção no molde	35
4.4.2. Profundidade de carbonatação.....	35
4.4.3. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E).....	37
4.4.4. Determinação da resistência à tracção por flexão (R_t)	38
4.4.5. Determinação da resistência à compressão (R_c).....	39
4.4.6. Determinação da aderência ao suporte e visualização da fissuração nos tijolos.....	40
4.4.7. Determinação da absorção de água por capilaridade	44

4.4.8. Secagem.....	46
4.4.9. Porosidade aberta (P_{ab}) e massa volúmica aparente (M_{vol})	48
Capítulo 5. Análise dos resultados	53
5.1. Resultados da caracterização das matérias-primas.....	53
5.1.1. Análise granulométrica por peneiração mecânica	53
5.1.2. Volume de vazios (V_v) das areias	55
5.1.3. Massa volúmica (M_{vol}) das areias	56
5.1.4. Baridade (B_a) das areias, cais e metacaulino.....	56
5.1.5. Teor em água da cal em pasta	57
5.1.6. Massa dos constituintes das argamassas e traços ponderais	57
5.2. Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado fresco ..	60
5.2.1. Consistência por espalhamento.....	60
5.3. Resultados referentes à caracterização das argamassas no estado endurecido	61
5.3.1. Visualização da retracção no molde	62
5.3.2. Avaliação da profundidade de carbonatação	64
5.3.3. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico	66
5.3.4. Avaliação da resistência à tracção por flexão em três pontos	73
5.3.5. Avaliação da resistência à compressão.....	78
5.3.6. Avaliação da aderência ao suporte e visualização da fissuração nos tijolos	83
5.3.7. Avaliação da absorção de água por capilaridade	84
5.3.8. Avaliação da secagem.....	95
5.3.9. Avaliação da porosidade aberta e da massa volúmica aparente	99

Capítulo 6. Discussão cruzada dos resultados	103
Capítulo 7. Conclusão e desenvolvimentos futuros	109
Referências bibliográficas	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquartelamento das areias.....	22
Figura 2 – Peneiração mecânica.....	22
Figura 3 – Ensaio de volume de vazios.....	23
Figura 4 – Dispositivo para ensaio de baridade	25
Figura 5 – Areia fina e areia grossa peneiradas.....	28
Figura 6 – Homogeneização da matéria-prima a seco.....	28
Figura 7 – Colocação dos constituintes secos sobre a água na cuba do misturador mecânico.....	29
Figura 8 – Paragem na amassadura, para raspar o material acumulado na parte interna da cuba	29
Figura 9 – Preenchimento do molde tronco-cónico	30
Figura 10 – Medição do espalhamento	30
Figura 11 – Preenchimento dos moldes.....	31
Figura 12 – Simulação da energia de aplicação da argamassa em obra.....	32
Figura 13 – Aspecto do tijolo revestido	32
Figura 14 – Utilização dos provetes de argamassa.....	34
Figura 15 – Inspeção visual da retracção longitudinal de um provete no molde	35
Figura 16 – Corte da fatia do provete.....	36
Figura 17 – Exemplo de uma fatia não carbonatada (esquerda) e uma fatia totalmente carbonatada (direita)	36
Figura 18 – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico [Faria, 2004]	37
Figura 19 – Ensaio de resistência à tracção por flexão.....	38
Figura 20 – Visualização dos resultados do ensaio de resistência à tracção.....	39
Figura 21 – Dispositivo para ensaio de compressão.....	40

Figura 22 –Ensaio de compressão	40
Figura 23 – Inspeção da fissuração nos tijolos através da lupa de fendas	41
Figura 24 – Tijolo com argamassa de teste, entalhes e colagem das pastilhas	41
Figura 25 – Entalhes nos tijolos	43
Figura 26 – Colagem das “pastilhas metálicas”	43
Figura 27 – Ensaio Pull-off.....	43
Figura 28 – Exemplo de uma zona de rotura (interface argamassa/tijolo)	43
Figura 29 – Caixa para ensaio de absorção de água por capilaridade	45
Figura 30 – Reposição de água no ensaio de absorção de água por capilaridade.....	45
Figura 31 – Limpeza do material solto dos provetes.....	49
Figura 32 – Pesagem dos provetes secos	49
Figura 33 – Dispositivo para ensaio de porosidade aberta	49
Figura 34 – Pesagem hidrostática dos provetes	50
Figura 35 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias.....	55
Figura 36 – Carbonatação aos 30 dias da argamassa A4*C	65
Figura 37 – Carbonatação aos 30 dias da argamassa A2C	65
Figura 38 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias de idade das argamassas..	68
Figura 39 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A2.....	68
Figura 40 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A3.....	68
Figura 41 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A4*	70
Figura 42 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A5.....	70
Figura 43 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura seca	71
Figura 44 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura padrão.....	71

Figura 45 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura com CO ₂	72
Figura 46 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura húmida.....	72
Figura 47 – Resistência à tracção aos 60 dias de idade das argamassas diversificadas	74
Figura 48 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A2	75
Figura 49 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A3	75
Figura 50 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A4*	76
Figura 51 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A5	76
Figura 52 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura seca.....	76
Figura 53 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura padrão	77
Figura 54 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura CO ₂	77
Figura 55 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura húmida	78
Figura 56 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias de idade das argamassas diversificadas.....	80
Figura 57 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A2	81
Figura 58 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A3	81
Figura 59 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A4*	82
Figura 60 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A5	82
Figura 61 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A2	86
Figura 62 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A3	87
Figura 63 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A4*	88

Figura 64 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A5	89
Figura 65 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 120 dias de idade	90
Figura 66 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A2	93
Figura 67 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A3	93
Figura 68 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A4*	93
Figura 69 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A5	94
Figura 70 – Curvas de secagem da Argamassa A2.....	96
Figura 71 – Curvas de secagem da Argamassa A3.....	96
Figura 72 – Curvas de secagem da Argamassa A4*	97
Figura 73 – Curvas de secagem da Argamassa A5.....	97
Figura 74 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas diversificadas aos 120 dias de idade	100
Figura 75 - Módulo de elasticidade dinâmico/resistência à tracção aos 60 dias de idade das argamassas.....	103
Figura 76 – Resistência à tracção/resistência à compressão das argamassas.....	104
Figura 77 – Porosidade aberta/resistência à compressão das argamassas (120 dias)	105
Figura 78 – Índice de secagem/coeficiente de capilaridade.....	106

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Análise química das cais em pó e em pasta	17
Quadro 2 – Análise química do metacaulino [Gomes, 2010]	18
Quadro 3 – Peneiros utilizados na análise granulométrica	21
Quadro 4 – Resumo das condições de cura e identificação dos provetes de cada argamassa.....	33
Quadro 5 – Análise granulométrica da areia arF.....	53
Quadro 6 – Análise granulométrica da areia arG	54
Quadro 7 – Análise granulométrica da mistura das areias arF e arG no traço volumétrico 1:2.....	54
Quadro 8 – Baridade das areias, cais e metacaulino	57
Quadro 9 – Quantidades das matérias-primas utilizadas nas amassaduras.....	59
Quadro 10 – Quantidades das matérias-primas utilizadas e espalhamento médio obtido nas amassaduras	61
Quadro 11 – Avaliação qualitativa da retração no molde das diversas argamassas consoante o tipo argamassa e de cura	63
Quadro 12 – Módulo de elasticidade dinâmico E aos 60 dias, desvio-padrão e provetes	67
Quadro 13 – Resistência à tracção por flexão, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados.....	74
Quadro 14 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados	79
Quadro 15 – Tensão de aderência das argamassas com cal aérea em pó, desvio-padrão e n.º de ensaios.....	84

Quadro 16 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade aos 120 dias de idade das argamassas	90
Quadro 17 – Valor do índice de secagem e respectivo desvio padrão das argamassas	98
Quadro 18 – Porosidade aberta/massa volúmica aparente aos 120 dias de idade	100
Quadro 19 – Quociente entre R_t e R_c aos 60 dias de idade.....	105

SIMBOLOGIA DE MATERIAIS, ARGAMASSAS, ENSAIOS E DETERMINAÇÕES

MATERIAIS

arF – areia fina lavada 0/2 Herdade da Mesquita, Sesimbra

arG – areia grossa lavada 0/4 Pinhal Conde Cunha 4, Seixal

caL – cal aérea hidratada em pó da Lusical

caF – cal aérea hidratada em pasta hidrofugada da Fradical

MK – metacaulino fornecido pela Universidade de Aveiro

ARGAMASSAS DIVERSIFICADAS

A2 – argamassa de cal aérea hidratada em pó e areia ao traço volumétrico 1:3

A3 – argamassa de cal aérea hidratada em pó com substituição parcial de metacaulino e areia ao traço vol. 1:3

A*4 - argamassa de cal aérea hidratada em pasta e areia ao traço vol. 1:3

A5 – argamassa de cal aérea hidratada em pasta com substituição parcial de metacaulino e areia ao traço vol. 1:3

PROVETES / CONDIÇÕES DE CURA DAS ARGAMASSAS

A2 – argamassa A2 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%

A2S – argamassa A2 / temperatura 20°C, humidade relativa 50%

A2H – argamassa A2 / temperatura 20°C, humidade relativa 95%

A2C – argamassa A2 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%, dióxido de carbono 5%

A3 – argamassa A3 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%

A3S – argamassa A3 / temperatura 20°C, humidade relativa 50%

A3H – argamassa A3 / temperatura 20°C, humidade relativa 95%

A3C – argamassa A3 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%, dióxido de carbono 5%

A4* – argamassa A*4 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%

A4*S – argamassa A*4 / temperatura 20°C, humidade relativa 50%

A4*H – argamassa A*4 / temperatura 20°C, humidade relativa 95%

A4*C – argamassa A*4 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%, dióxido de carbono 5%

A5 – argamassa A5 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%

A5S – argamassa A5 / temperatura 20°C, humidade relativa 50%

A5H – argamassa A5 / temperatura 20°C, humidade relativa 95%

A5C – argamassa A5 / temperatura 20°C, humidade relativa 65%, dióxido de carbono 5%

ENSAIOS E DETERMINAÇÕES

Ader – tensão de aderência

Ba - baridade

Carb – área carbonatada

CC – coeficiente de absorção de água por capilaridade

DP – desvio padrão

E – módulo de elasticidade dinâmico

Esp – consistência por espalhamento

HR – humidade relativa

IS – índice de secagem

M_{vol} – massa volúmica aparente

P_{ab} – porosidade aberta

R_c – resistência à compressão

R_t – resistência à tracção por flexão em três pontos

V_v – volume de vazios

VA – valor assintótico da absorção de água por capilaridade

Wt – teor em água

SIGLAS DE ENTIDADES E DOCUMENTOS NORMATIVOS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEN – European Committee for Standardization

DEC/FCT–UNL – Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

EN – Norma Europeia

ESTBarreiro/IPS – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal

IPQ – Instituto Português da Qualidade

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1.ENQUADRAMENTO

Em virtude da necessidade de se proteger e com vista a melhorar a sua qualidade de vida, o Homem primitivo começou por construir os seus abrigos utilizando os recursos naturais existentes. Com o evoluir dos tempos e da humanidade, as construções tornaram-se cada vez mais robustas, indo de encontro às necessidades de conforto e bem-estar do ser humano.

Das descobertas arqueológicas efectuadas, sabe-se que as primeiras argamassas remontam de há, pelo menos, 10 000 anos. Desde a antiguidade que a cal é conhecida como um excelente ligante das argamassas e era utilizada para a consolidação de alvenarias ou na elaboração de rebocos.

A Civilização Romana foi das primeiras a registar a utilização de aditivos pozolânicos, juntamente com a cal, nas suas construções, fabricando assim argamassas (e betões) mais resistentes e com propriedades hidráulicas. Esta descoberta permitiu aos Romanos a construção de estruturas de maior porte, introduzir as abóbadas e os arcos na sua arquitectura, criar aquedutos e pontes, edifícios de grande dimensão, construir teatros e mercados. Quando o Império Romano entrou em decadência, também nas argamassas se reflectiram os problemas económicos que daí resultaram. O seu fabrico passou a ser de pior qualidade com uma incorporação mais reduzida de cal, uma vez que era o elemento mais caro dos constituintes das argamassas. No século VIII depois de Cristo quando ocorreu a invasão da Península Ibérica pelos Árabes, as argamassas tiveram novo desenvolvimento. Os Árabes eram um povo detentor de uma técnica construtiva avançada e utilizavam argamassas com base em cal e gesso, areia calcária e aditivos, na execução de juntas, estuques e rebocos. Desde esta época (e até ao século XIX), as paredes dos edifícios eram de grande espessura. As paredes absorviam água, mas também permitiam que esta evaporasse com elevada facilidade [Alvarez, et al., 2007].

A partir do século XVIII, com o aumento do comércio, acresce a necessidade de se construir em zonas marítimas e fluviais. Consequentemente foi necessário repensar as técnicas de construção. É nesta altura que desponta o interesse sobre o estudo de ligantes com propriedades que permitam o seu endurecimento debaixo de água. Em 1826 é construída a primeira fábrica de cal hidráulica, embora sem muito sucesso devido ao elevado custo de produção. Mais tarde os fornos de cozedura que deram origem à cal hidráulica foram melhorados, tornando o processo mais económico e rentável. Quando o cimento *Portland* é introduzido no mercado, as argamassas de cal caíram em desuso, uma vez que o cimento abrevia o tempo de presa, permite obter resistências mecânicas mais elevadas e as construções passam a poder ser executadas de uma forma mais rápida. [Alvarez et al., 2007].

Há algumas décadas, teve-se consciência que as argamassas constituídas só com base em cimento Portland se revelam prejudiciais para a reabilitação e conservação de edifícios históricos, tornando-se incompatíveis com os suportes, uma vez que durante o seu processo de endurecimento libertam sais solúveis, têm resistências mecânicas demasiado elevadas, dificultando a secagem da humidade e não são tão deformáveis [Botas, 2009], provocando o aparecimento de mais fendilhação nos revestimentos e de patologias nos próprios suportes.

Posto isto, quem trabalha na área da conservação e recuperação do património edificado tem cada vez mais a preocupação de compatibilizar as argamassas de reparação com o suporte existente e as condições a que estão sujeitas. Surgiu de novo um maior interesse pelas argamassas de cal aérea, com e sem aditivos pozolânicos. No entanto, a formulação e propriedades destas argamassas está dependente de diversos factores, entre os quais se destacam:

- O objectivo e tipo de aplicação a que as argamassas se destinam;
- O processo de cura a que vão estar sujeitas;
- O tipo e quantidade de ligante utilizado;
- O tipo e características das areias;
- As características dos componentes pozolânicos.

Assim, com o desenvolvimento desta dissertação, pretende-se contribuir para uma melhoria do conhecimento sobre os processos de cura e a influência dos ligantes e aditivos na formulação das argamassas com base em cal aérea.

1.2. OBJECTIVOS

A dissertação tem como principal objectivo avaliar a influência das condições de cura (em termos essencialmente de humidade relativa e teor de dióxido de carbono) nas características de argamassas de cal aérea, em pó e em pasta, com e sem substituição parcial da cal aérea por um aditivo pozolânico artificial, neste caso um metacaulino.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação está organizada em sete capítulos, sendo o capítulo um o presente capítulo introdutório.

No capítulo dois apresenta-se o estado do conhecimento actual, onde são abordados temas relevantes para o entendimento deste trabalho. Descrevem-se as matérias-primas que podem constituir uma argamassa e um conjunto de ensaios laboratoriais possíveis de realizar para ser feita a caracterização das argamassas.

No capítulo três são abordadas as características das matérias-primas utilizadas na fabricação das argamassas que são alvo de estudo da presente dissertação.

No capítulo quatro é feita a listagem do plano de ensaios efectuado na presente dissertação, bem como a descrição da campanha experimental adoptada na caracterização dos materiais, na fabricação das argamassas e na caracterização, quer no estado fresco, quer no estado endurecido, dos provetes de ensaio.

No capítulo cinco faz-se uma análise detalhada dos resultados dos ensaios obtidos através da campanha experimental realizada no capítulo anterior.

No capítulo seis faz-se a discussão cruzada dos resultados, que interligam características mecânicas, de estrutura interna e características físicas das argamassas.

Por fim no capítulo sete apresentam-se as conclusões e algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

As referências bibliográficas são apresentadas em capítulo autónomo final.

CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

2.1. ARGAMASSA

A argamassa é um material compósito constituído por agregado(s) de pequena dimensão e água, ligados entre si por um ou vários ligantes, podendo ou não ter aditivos e/ou adjuvantes. Estes materiais, quando misturados, formam uma espécie de “pasta” capaz de unir diversos materiais de construção. Os ligantes mais utilizados na constituição das argamassas são a cal aérea ou hidráulica, o gesso e o cimento, podendo-se ter grupos de argamassas distintos: argamassas com base em cal aérea ou em cal hidráulica, argamassas bastardas e argamassas com base em cimento. No que se refere aos agregados, o mais utilizado é a areia, podendo também utilizar-se o pó de pedra ou outros resíduos de tipo e granulometria adequada. Os aditivos e os adjuvantes servem para conferir às argamassas uma melhoria das suas propriedades e do seu desempenho. Estes últimos diferem dos aditivos por serem geralmente introduzidos em quantidades muito pequenas. [Veiga et al., 1990]

As argamassas com cal aérea como ligante único apresentam compatibilidade com as alvenarias antigas; no entanto, como endurecem exclusivamente por reacções de carbonatação, a sua aplicação em ambientes com fraca presença de dióxido de carbono ou com presença elevada de água pode estar condicionada. Para combater esta problemática é possível utilizar aditivos pozolânicos, que conferem às argamassas características hidráulicas, possibilitando a ocorrência da presa também por reacções de hidratação.

Os aditivos pozolânicos, ricos em sílica e alumina no estado amorfo, podem ser de origem natural ou artificial [Faria, 2004]. Os de origem natural derivam de rochas vulcânicas meteorizadas, ou de produtos minerais resultantes da fossilização das conchas siliciosas de organismos unicelulares. Os de origem artificial podem ser obtidos de materiais naturais sujeitos a tratamento térmico e de redução de granulometria (como é, por exemplo, o caso de algumas argilas como o caulino, de que resulta o metacaulino) [Velosa, 2007].

Hoje em dia, com o incentivo à sustentabilidade da construção, vários subprodutos industriais, como é o caso da sílica de fumo, das cinzas volantes de centrais termoelétricas, do pó de tijolo, entre outros, têm vindo a ser estudados e também são utilizados como aditivos pozolânicos. Já existem estudos relacionados também com a utilização de materiais de origem orgânica sujeitos a tratamento térmico, como por exemplo as cinzas de casca de arroz para incorporação nas argamassas como aditivos pozolânicos [Almeida, 2008].

Tem vindo também a ser estudada a influência do tipo de cal aérea utilizada (hidratada em pó, em pasta resultante de cal viva em pedra, em pasta resultante de cal viva micronizada) nas características das argamassas, bem como a influência da adição de aditivos pozolânicos, quer naturais quer artificiais, no seu comportamento. O tipo de suporte é também condicionante das características das argamassas. Contudo as condições de cura estão também directamente relacionadas com as características obtidas.

Em face do exposto, faz-se uma breve descrição das matérias-primas que constituem as argamassas de cal, bem como uma breve explicação da utilização de alguns ensaios laboratoriais na caracterização deste tipo de argamassas.

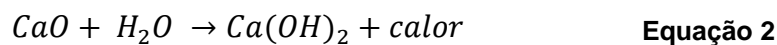
2.2. MATÉRIAS-PRIMAS

2.2.1. CAIS

Entre os tipos de ligantes mais utilizados na constituição das argamassas de revestimento, destacam-se as cais aérea, as cais hidráulicas e os ligantes de origem cimentícia. Estes últimos não irão ser abordados nesta dissertação.

Um dos ligantes mais antigos é a cal aérea cálcica que tem origem numa rocha calcária cuja natureza mineralógica é o carbonato de cálcio (CaCO_3), podendo conter percentagens de silicatos (argilas) inferiores a 5%. Se este carbonato de cálcio for sujeito a um processo de calcinação (Equação 1), ou seja, cozedura entre 800 e

900°C, liberta dióxido de carbono (CO_2), transformando-se assim em óxido de cálcio (CaO), o que também é conhecido como cal viva. Ao se sujeitar a cal viva a um processo de hidratação (Equação 2), podendo este ser por aspersão ou por imersão em água, o óxido de cálcio transforma-se em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), usualmente designado por cal apagada, cal extinta ou cal hidratada, com libertação de calor.



Anteriormente à norma NP EN 459-1 [IPQ, 2002] a cal aérea classificava-se em gorda e magra consoante o teor de impurezas que possuía. A cal aérea gorda seria uma cal branca em que a percentagem de carbonato não era inferior a 99%, ou seja, derivava de rochas quase puras. Este tipo de cal era bastante trabalhável e macia, logo tinha grandes propriedades plásticas. A cal magra seria uma cal acinzentada e derivava de rochas calcárias com teores de argila e de outras impurezas compreendidos entre 1 a 5%. Este tipo de cal não era tão trabalhável como a cal gorda [Coutinho, 2002]. De acordo com a NP EN 459-1 [IPQ, 2002]¹ as caís aéreas cálcicas classificam-se em CL 90, CL 80 ou CL 70, de acordo com o seu teor de $\text{CaO}+\text{MgO}$.

A cal aérea hidrata apresenta-se sobre a forma de pó seco ou mistura aquosa, a que se dá o nome de pasta de cal, ou cal em pasta. Durante o processo de hidratação da cal, se a quantidade de água utilizada for a mínima, temos um produto em pó; caso contrário, se a água no processo de hidratação for em excesso, forma-se uma pasta de cal. Quando em repouso, à superfície fica uma água pouco límpida a que se dá o nome de água de cal e o que sedimenta é designado por cal em pasta. Ao diluir-se a pasta em água obtém-se o leite de cal [Coutinho, 2002].

¹ Está em curso a revisão desta norma pelo CEN (pr EN 459-1:2008)

A cal pode ser ou não hidrofugada. Tradicionalmente quando se pretende essa característica, a cal viva é extinta juntamente com gordura (animal ou vegetal) e, por acção da temperatura desenvolvida, essa gordura mistura-se com a cal.

Quando a quantidade de argila presente na rocha calcária está compreendida entre 8 a 20% forma-se uma rocha designada por marga calcária. É este parâmetro que quimicamente distingue a matéria-prima de uma cal aérea de uma cal hidráulica, pois quanto maior for a quantidade de argila, mais hidraulicidade a cal terá.

Ao contrário da cal aérea, a cal hidráulica necessita de temperaturas mais elevadas durante o processo de calcinação, da ordem dos 1000 a 1100°C.

Este processo passa por três fases distintas: quando se atingem temperaturas entre 500 e 700°C dá-se o processo de desidratação da argila; por volta dos 850°C ocorre a decomposição do calcário; por fim, quando a temperatura atingida está entre 1000 e 1100°C dá-se a reacção da sílica e alumina da argila com o óxido de cálcio, originando silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$). É esta combinação dos silicatos e aluminatos que, hidratando-se, dão origem a produtos que endurecem tanto na água como na presença de ar.

O endurecimento da cal aérea hidratada faz-se em duas fases. Na fase inicial, que se designa por presa inicial, ocorre a evaporação da humidade em excesso, ao fim da qual a cal está firme ao tacto mas ainda é marcável com uma unha. Na segunda fase, a que se dá o nome de carbonatação, ocorre uma reacção química muito lenta, ao ar, em que o hidróxido se reconverte em carbonato de cálcio por recombinação com o dióxido de carbono. Esta fase pode demorar anos até terminar, pois está dependente da temperatura, da humidade e da estrutura porosa da argamassa. Já na cal hidráulica o processo de endurecimento compreende duas reacções. Na primeira reacção, como já referido anteriormente, dá-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio, quer na água, quer ao ar. Na segunda reacção, ocorre a carbonatação da cal apagada, só em contacto com o ar e na presença do dióxido de carbono [Coutinho, 2002]. Ao contrário da cal aérea, que só endurece na presença do CO_2 , a cal hidráulica tem a propriedade de poder endurecer debaixo de água.

2.2.2. POZOLANAS

As pozolanas, como referido anteriormente, podem ser de origem natural ou artificial. Contêm sílica e alumina no estado amorfo (não cristalino); quando usados em granulometrias muito finas e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Esta reacção denomina-se de pozolânica. Segundo Coutinho referido por Almeida [2008], a reactividade pozolânica de uma pozolana está ligada à sua estrutura interna e será tanto maior quanto mais afastado estiver o produto do seu estado cristalino. Para além da estrutura cristalina da pozolana, outro factor que está directamente relacionado com a reactividade é a sua superfície específica, uma vez que a reacção se realiza entre um sólido (pozolana) e um reagente dissolvido (hidróxido de cálcio)

Apesar da denominação deste tipo de materiais derivar do período do império Romano, estudos sobre argamassas de edifícios antigos comprovam que estas já eram utilizadas no tempo dos Gregos, com utilização de cinzas vulcânicas da ilha de *Santorini* em argamassas para rebocos [Almeida, 2008].

2.2.3. AREIAS

Os agregados mais correntes, utilizados na preparação das argamassas, são as areias, podendo estas ser de origens distintas e de granulometrias diversas. Em Portugal as areias mais utilizadas provêm de três origens: do rio, do areeiro ou resultantes da fragmentação directa de rochas. A origem das areias, a sua granulometria e constituição, têm influência, quer ao nível das resistências mecânicas das argamassas, quer ao nível da sua trabalhabilidade no estado fresco [Botas, 2009].

“A areia funciona como o esqueleto da argamassa que ganha coesão pela ligação dos seus grãos ao ligante, pelo que a qualidade do agregado é fundamental no comportamento global da pasta. A mistura de areia separa as partículas da cal, o que facilita a reacção química de carbonatação e, por outro lado, permite distribuir as retracções que eventualmente ocorram por toda a massa. Há vários factores, como a dureza, a forma dos grãos, a granulometria e a porosidade, que afectam as

características das argamassas. Naturalmente, também a sua origem e o estado de limpeza da areia são factores que podem alterar as características da argamassa.” [Margalha et al., 2010].

2.3. ENSAIOS

2.3.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A granulometria dos agregados utilizados na fabricação de argamassas é bastante importante, uma vez que influencia as características das argamassas. Se a granulometria for adequada, obtêm-se argamassas mais compactas e resistentes com menor dosagem de ligante [Rodrigues, 2010], reduzindo-se assim o risco da separação dos constituintes das argamassas, fenómeno denominado por segregação [Botas, 2009]. Desta forma, é de extrema importância fazer uma análise granulométrica por peneiração, tendo como objectivo a determinação das dimensões das partículas que constituem determinada amostra, fazendo-se posteriormente um tratamento estatístico dos dados recolhidos. Conforme estudos de vários autores [Botas, 2009], se a granulometria da areia utilizada na fabricação das argamassas for muito fina é em princípio necessária maior adição de água na fase da amassadura, implicando assim, na fase de endurecimento, o aparecimento de maior número de fissuras ocorridas por retracção. A graduação das areias numa argamassa poderá ter grande influência no comportamento aos ciclos gelo-degelo.

2.3.2. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS

O volume de vazios (V_v) das areias desempenha um papel muito importante na estrutura porosa das argamassas, quer ao nível da dimensão, da quantidade e da forma dos poros. Preferencialmente é aconselhável o emprego de areias bem graduadas, com um volume de vazios reduzido, uma vez que um volume de vazios elevado exige a utilização de maior quantidade de ligante [Rato, 2006], favorecendo a retracção das argamassas [Rodrigues, 2010], entre outros inconvenientes.

2.3.3. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE

Como se poderá constatar no subcapítulo 5.1.4., o objectivo da determinação da baridade (Ba) dos materiais passa por aferir a quantidade (em massa) das matérias-primas a utilizar em cada amassadura, consoante o traço volumétrico ligante:agregado que se pretenda.

O ensaio para a determinação da baridade só pode ser efectuado para materiais granulares, uma vez que contempla o volume de vazios que existem entre as partículas dos materiais. Por sua vez, esta determinação depende da forma como as partículas estão arrançadas dentro de um recipiente, a que se dá o nome de balde de baridade, ou seja, o valor da Ba está associado ao grau de compactação, à granulometria das partículas e à sua forma.

2.3.4. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

O ensaio de consistência por espalhamento *"(...) traduz a influência da quantidade de água na argamassa fresca"* [Almeida, 2008], permitindo de algum modo, avaliar a trabalhabilidade das argamassas e aferir a quantidade de água necessária para obtenção da trabalhabilidade adequada. No entanto, este ensaio tem um conjunto de factores associado que podem fazer com que os resultados possam ser meramente indicativos, uma vez que está condicionado pela influência humana. Estes factores estão associados à forma da mistura dos vários componentes, o modo de colocar e compactar a argamassa no molde tronco-cónico e o ritmo das pancadas na mesa de espalhamento [Botas, 2009]. Como se verá ao longo deste trabalho, existem argamassas mais plásticas que outras, que com baixo espalhamento apresentam elevada trabalhabilidade.

2.3.5. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Como já referido anteriormente, as argamassas de cal aérea endurecem por reacções de carbonatação, estando a profundidade de carbonatação directamente relacionada com a porosidade das argamassas, pois quanto mais porosas forem, maior facilidade o CO₂ terá em progredir ao longo da argamassa, conseqüentemente, a carbonatação realizar-se-á de uma forma mais rápida.

Das pesquisas bibliográficas efectuadas por Brito [2009], o processo de carbonatação das argamassas poderia ser acelerado pela temperatura, desde que esta não ultrapassasse os 60°C e a humidade relativa se situasse entre os 50 e 70%. No entanto, dos ensaios que Brito [2009] realizou, onde submeteu os provetes a um processo de cura dentro de uma câmara climática com a temperatura de 40°C e a humidade relativa (HR) a 65%, pode constar que não houve nenhuma evolução no estado de carbonatação dos provetes ensaiados, logo não foi possível provar a teoria de que a temperatura aumentava o estado de carbonatação das argamassas, pelo menos aquele nível de HR.

2.3.6. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico (E) está relacionado com a deformabilidade das argamassas; quanto mais elevado for o valor de E, menor deformabilidade as argamassas terão [Botas, 2009].

O módulo de elasticidade dinâmico é uma das características que, relacionada com a resistência à tracção e com a retracção, nos permitirá perceber a susceptibilidade das argamassas à fendilhação. *“O módulo de elasticidade deverá ser menor ou igual ao do suporte, decrescendo do interior para o exterior nas várias camadas que constituem o reboco”* [Faria, 2004], pois pretende-se que as argamassas possam acompanhar a deformabilidade dos suportes; caso contrário, pode-se estar a

suscitar o desenvolvimento de tensões, o aparecimento de fissuras e a perda de aderência dos revestimentos.

2.3.7. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão (R_c) das argamassas está directamente ligada à sua durabilidade e segurança; no entanto, as argamassas com base em cal apresentam resistências baixas, compatíveis quando o que se pretende não são argamassas de elevado desempenho estrutural, mas sim argamassas que acompanhem a deformabilidade dos suportes. Dependendo do processo de cura a que foram sujeitas e dos possíveis aditivos incorporados, as argamassas podem desenvolver maiores ou menores valores de resistência à compressão, mas nunca tão altos como os das argamassas cimentícias.

2.3.8. DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA POR ENSAIO DE ARRANCAMENTO

A garantia de uma boa aderência na ligação das argamassas de revestimento novas sobre as argamassas antigas é um aspecto relevante no êxito das reparações [OZ – diagnóstico, 2010] do património edificado. A aderência das argamassas pode ser estudada através do ensaio de arrancamento (Pull-off Test). Este ensaio permite verificar a resistência das argamassas, podendo servir para controlo de qualidade ou para o diagnóstico de patologias. No entanto, para se ter um controlo mais eficaz é necessário fazer um conjunto elevado de ensaios, uma vez que os resultados estão dependentes de alguns factores extrínsecos, como é, por exemplo, a colagem mal efectuada das pastilhas metálicas ao suporte, que posteriormente serão arrancadas com o equipamento de Pull-off, a degradação que a realização de entalhes pode provocar nos revestimentos de argamassas, a execução deficiente dos entalhes, o prolongamento dos entalhes até ao suporte ou não e a velocidade de aplicação de força pelo equipamento.

Segundo a norma EN 1015-12 [CEN, 2000] o ensaio de arrancamento de argamassas de alvenaria é efectuado através do arranque de uma pastilha circular que é colada sobre um entalhe, definido na superfície da argamassa, realizado por corte na argamassa endurecida e com as mesmas dimensões da pastilha. No entanto outra hipótese [Faria, 2004] para evitar degradar argamassas de baixas resistências, é efectuar esse entalhe com as dimensões da pastilha ainda com a argamassa fresca e ao longo da sua espessura de aplicação.

A aderência das argamassas está dependente de um conjunto de factores, tais como [Sousa, et al., 2009]:

- Granulometria e teor de finos das argamassas no estado fresco
- Quantidade de ligante
- Quantidade de água presente na argamassa
- Modo de aplicação da argamassa
- Textura e a capacidade de absorção da base onde as argamassas vão ser aplicadas
- Limpeza da base onde vão ser aplicadas as argamassas

2.3.9. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE E DA SECAGEM

O comportamento face à água das argamassas é de extrema importância, uma vez que a absorção excessiva de água e a sua permanência pode causar o aparecimento de diversas patologias nas argamassas, tais como o desenvolvimento de bactérias e fungos, bem como provocar perda de aderência das argamassas ou dos revestimentos.

A caracterização do processo de secagem das argamassas pode ser de extrema importância na avaliação do seu comportamento face à durabilidade. Muitas vezes as argamassas estão sujeitas a ciclos de gelo-degelo e a presença de água que não secou torna-se um mecanismo de degradação. A dificuldade de secagem da água, que por vezes transporta sais e a sua concentração em zonas localizadas, pode também

provocar a concentração destes em camadas interiores dos elementos construtivos, com degradação inerente.

De uma forma generalizada, poder-se-á entender o processo de secagem das argamassas como sendo o processo em que a água se movimenta de zonas de grande humidade para zonas de baixa humidade. Durante o processo de secagem ocorrem três estágios distintos, caracterizados pela variação na taxa de perda de humidade. No primeiro estágio, a taxa de secagem ocorre de uma forma constante, uma vez que a água que se encontra nos capilares é transportada até à superfície através das forças de capilaridade. A evaporação da água ocorre à superfície dos provetes onde as condições térmicas têm grande influência no processo de secagem (pela superfície dos provetes ocorre a deslocação de uma corrente de ar que propaga a evaporação da água) [Brito, 2009].

No momento em que a água líquida já não consegue alcançar a superfície dos provetes, designada como frente de secagem, esta desloca-se rumo ao centro dos provetes, iniciando-se assim o segundo estágio da taxa de secagem.

“Este recuo da frente de secagem corresponde à quebra da continuidade dos poros próximos da superfície” [Brito, 2009]. Passa assim a dar-se, por um processo de difusão através de meio poroso, o transporte da água desde a frente húmida até à superfície do material, fazendo com que a taxa de secagem das argamassas comece a diminuir progressivamente.

O terceiro estágio da taxa de secagem inicia-se quando já não existe mais água líquida no material, iniciando-se o domínio higroscópico, controlado apenas pela difusão do vapor, estando o processo de secagem terminado quando se alcança o teor de água de equilíbrio higroscópico. Caso se pretendesse atingir a secagem total dos provetes, esta só seria possível através de métodos artificiais [Brito, 2009].

2.3.10. POROSIDADE ABERTA

A porosidade de uma argamassa é definida por um conjunto de escolhas que são feitas antes da sua fabricação, nomeadamente: quais os materiais utilizados, o processo de amassadura adoptado, a quantidade de água utilizada (dependendo da trabalhabilidade que se pretende obter), qual o traço escolhido, e qual ou quais as condições de cura a que se vai submeter. Tudo isto influencia as características internas da argamassa, podendo-se obter uma argamassa mais ou menos porosa [Rato, 2006].

A porosidade das argamassas é um aspecto importante a estudar, já que incide no comportamento hídrico, nas resistências, no processo de carbonatação e na durabilidade das argamassas [Pereira, 2008].

Existem dois tipos de porosidade: a porosidade aberta, quando existe comunicação entre os poros da argamassa, formando uma rede contínua entre si, e a porosidade fechada, quando os poros não comunicam entre si.

CAPÍTULO 3. MATÉRIAS-PRIMAS

No presente capítulo, far-se-á uma breve descrição e caracterização das matérias-primas utilizadas no fabrico das argamassas que serão alvo de estudo nesta dissertação.

3.1. CAIS

Relativamente às cais utilizadas no desenvolvimento experimental desta dissertação, que será abordado no capítulo 4, foram utilizadas a cal aérea hidratada em pó da marca *Lusical* e a cal aérea hidratada em pasta da marca *Fradical*. Inicialmente, quando se pensou na elaboração desta dissertação, o objectivo era comparar as diferenças no processo de cura entre cais em pó e em pasta não hidrófugas com e sem substituição parcial de cal por metacaulino, mas quando se passou à análise dos resultados, no ensaio de absorção de água por capilaridade, chegou-se à conclusão que a cal em pasta que tinha sido fornecida era hidrófuga. Tal erro deve-se ter dado por uma troca de lotes por parte do fornecedor. A cal em pasta fornecida possui características hidrófugas as quais advêm da mesma conter, na sua composição, um subproduto da produção do azeite. A análise da composição química efectuada pelos produtores das cais aérea hidratada, em pó e em pasta, é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Análise química das cais em pó e em pasta

Cal aérea hidratada em pó (<i>Lusical</i>) [<i>Lusical</i>, 2010]								
Ca(OH)₂	CaO_T	CO₂	H₂O	MgO	SO₃	SiO₂	Fe₂O₃	Al₂O₃
≥ 93%	≥ 70%	≤ 1,8%	≤ 1,0%	≤ 3,0%	≤ 1,3%	≤ 0,35%	≤ 0,20%	≤ 0,20%
Cal aérea hidratada em pasta hidrófuga (<i>Fradical</i>) [<i>Fradical</i>, 2006]								
Ca(OH)₂		CaCO₃		Mg(OH)₂		MgO		
> 92%		< 5,0%		< 5,0%		< 5,0%		

3.2. POZOLANAS

Para a execução das argamassas foi utilizada uma pozolana artificial, nomeadamente um metacaulino (MK) fornecido pela Universidade de Aveiro, no âmbito do projecto Metacal. O objectivo da introdução do metacaulino é melhorar o desempenho das argamassas, conferir-lhes alguma hidraulicidade e verificar a influência da sua actuação com diferentes processos e condições de cura.

No Quadro 2, apresenta-se uma análise química feita na Universidade de Aveiro ao metacaulino utilizado [Gomes, 2010].

Quadro 2 – Análise química do metacaulino [Gomes, 2010]

<i>Metacaulino (MK) [%]</i>										
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	LOI
52,17	44,5	0,45	nd	nd	0,01	nd	0,15	1,42	0,12	1,42

nd – não detectado

LOI – Loss of Ignition

3.3. AREIAS

Para a preparação das argamassas foi utilizada uma mistura de duas areias com granulometrias distintas. Uma areia mais fina, de fracção 0/2, proveniente da Herdade da Mesquita na zona de Sesimbra, e uma areia mais grossa, de fracção 0/4, proveniente do Pinhal Conde Cunha 4, na zona do Seixal. De acordo com a informação do fornecedor (Soarvamil), a primeira é constituída por quartzo, feldspato, quartzito (partículas subangulosas a subarredondadas) e a segunda, para além destes três componentes, também incorpora moscovite.

O objectivo da mistura das areias é criar uma mistura bem graduada, com menor volume de vazios, tentando-se assim minimizar a afectação da estrutura porosa das argamassas e não ter traços muito fortes em ligante, o que prejudicaria a retracção das argamassas.

CAPÍTULO 4. DESCRIÇÃO DO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. ENQUADRAMENTO GERAL

Para a elaboração desta dissertação procedeu-se ao desenvolvimento experimental em três fases distintas, nomeadamente:

1ª fase – Caracterização das matérias-primas

2ª fase – Preparação das argamassas e caracterização no estado fresco

3ª fase – Caracterização das argamassas no estado endurecido

Na primeira fase foi feita a caracterização das matérias-primas utilizadas posteriormente no fabrico das argamassas. Para esta caracterização realizaram-se os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica das areias
- Volume de vazios das areias
- Massa volúmica das areias
- Baridade de todos os constituintes, excepto a água
- Teor em água da cal em pasta

Na segunda fase foram preparadas diversas argamassas fazendo variar o tipo de cal e a adição de metacaulino. Ainda com as argamassas no estado fresco foi feita a sua caracterização através do ensaio de consistência por espalhamento (Esp). Em seguida, e de forma a dar desenvolvimento aos objectivos propostos, foram efectuados provetes que posteriormente foram colocados em diferentes condições de cura, fazendo variar a humidade relativa e a percentagem de dióxido de carbono.

Por fim, na terceira fase do desenvolvimento experimental, foi feita a caracterização das argamassas no estado endurecido, através do seguinte conjunto de ensaios:

- Retracção visual no molde
- Avaliação da profundidade de carbonatação com a idade de cura
- Caracterização mecânica das argamassas:
 - Módulo de elasticidade dinâmico
 - Resistência à tracção por flexão em três pontos
 - Resistência à compressão (a diferentes idades)
 - Aderência ao suporte e verificação da fendilhação da argamassa aplicada nos tijolos
- Caracterização do comportamento face à água das argamassas:
 - Absorção de água por capilaridade
 - Secagem
- Caracterização da estrutura interna das argamassas:
 - Porosidade aberta e massa volúmica aparente

4.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO MECÂNICA

No caso do presente trabalho, esta análise foi realizada para as areias com base na metodologia descrita na norma NP EN 933-1 [IPQ, 2000]. Os peneiros utilizados foram os descritos no Quadro 3 e em conformidade com a ISO 3310-1 [ISO, 2000].

Quadro 3 – Peneiros utilizados na análise granulométrica

<i>Abertura da Malha [mm]</i>
4,00
2,00
1,00
0,500
0,250
0,125
0,063

Em primeiro lugar as areias foram secas em estufa à temperatura de 110°C durante 24 horas, às quais se seguiram pesagens com intervalos de 1 hora para verificação de massa constante¹.

Em seguida foi retirada uma quantidade de amostra de areia e esquartelada com auxílio de um repartidor de agregados (Figura 1); metade dessa amostra, nunca com peso inferior a 500g, foi colocada no peneiro de maior abertura; os peneiros foram previamente dispostos de baixo para cima por ordem ascendente da dimensão da abertura da malha, ao que se seguiu uma peneiração mecânica a seco durante 10 minutos (Figura 2), tempo que se revelou suficiente para a completa peneiração.

Efectuou-se a pesagem do material retido em cada peneiro e obteve-se a massa do que passou por todos eles. Para cada tipo de areia foram ensaiadas três amostras distintas, a partir das quais foi feita uma média. Os resultados obtidos são expressos em forma de uma curva granulométrica, em função da abertura da malha do peneiro.

Este ensaio de peneiração foi feito para a areia arF, areia arG e para a mistura das duas areias no traço volumétrico 1:2 de areia arF e de areia arG, respectivamente.

¹ Entenda-se por massa constante quando, com intervalo de 1 hora a massa não varia mais de 1%.



Figura 1 – Esquartelamento das areias



Figura 2 – Peneiração mecânica

4.2.2. DETERMINAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS (V_v)

A determinação do volume de vazios para as areias arF, arG e para a mistura de ambas no traço volumétrico 1:2 respectivamente, foi feita com base na ficha de ensaio Fe30 do DEC/UNL [Henriques, 1999], uma vez que a norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2002], calcula o V_v em função da baridade e da massa volúmica real, ou seja, em função de dois ensaios distintos e não de um único procedimento experimental.

De acordo com a Fe30 do DEC/UNL, o volume de vazios é calculado através da Equação 3:

$$V_v = \frac{V_{mp} + V_{ag} - V_t}{V_{mp}} \times 100 \text{ [%]} \quad \text{Equação 3}$$

em que:

V_v – volume de vazios, em %

V_{mp} – volume conhecido da matéria-prima, em m^3

V_{ag} – volume conhecido de água, em m^3

V_t – volume total do conjunto (água + areia), em m^3

Começou-se por colocar um volume conhecido de areia ($0,00012 \text{ m}^3$) numa proveta, compactando-a devidamente. Em seguida colocou-se o mesmo volume em água, à temperatura de $20,5^\circ\text{C}$, e agitou-se. Deixou-se repousar durante uma hora e mediu-se o volume ocupado pelo conjunto, areia mais água, dentro da proveta.

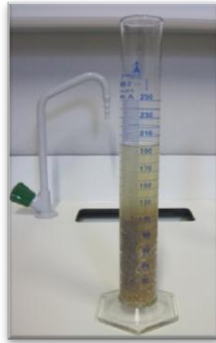


Figura 3 – Ensaio de volume de vazios

4.2.3. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA (M_{vol})

Uma vez que na determinação do volume de vazios foi necessário conhecer um determinado volume do conjunto da areia e água e o volume de água, aproveitou-se para pesar essa quantidade de areia e calcular a massa volúmica através da Equação 4:

$$M_{vol} = \frac{M_{mp}}{V_t - V_{ag}} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \text{Equação 4}$$

em que:

M_{vol} – massa volúmica, em kg/m^3

M_{mp} – massa conhecida da matéria-prima, em kg

V_{ag} – volume conhecido de água, em m^3

V_t – volume total do conjunto (água+areia), em m^3

4.2.4. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE (BA)

A determinação da baridade foi efectuada para os seguintes agregados, ligantes e adições: areia arF, areia arG, mistura das areias ao traço volumétrico 1:2, cal aérea hidratada em pó, cal aérea hidratada em pasta e metacaulino. Os ensaios foram feitos com base na norma NP EN 1097-3 [IPQ, 2002].

A Ba é obtida através do quociente entre a massa do agregado seco preenchendo, sem compactação, um determinado recipiente de volume conhecido (2910 cm³). A Equação 5 traduz o cálculo da baridade.

$$Ba = \frac{m_2 - m_1}{V} [g/cm^3] \quad \text{Equação 5}$$

em que:

Ba – baridade, em g/cm³

m₁ – massa do recipiente, em g

m₂ – massa do recipiente preenchido com a matéria-prima, em g

V – volume conhecido do recipiente, em cm³

O recipiente foi pesado e em seguida colocado sobre um dispositivo que permitia a introdução da matéria-prima no recipiente através de um funil que distava 80 mm do bordo do recipiente (Figura 4).



Figura 4 – Dispositivo para ensaio de baridade

A matéria-prima foi introduzida no recipiente até transbordar e em seguida, com o auxílio de uma régua metálica retirou-se o excesso, sempre com o cuidado de não compactar o material e evitar a sua segregação; por fim foi pesado o recipiente com a matéria-prima. Foram feitos três ensaios para cada material e com os três resultados foi obtido o valor médio da baridade para cada tipo material. É de salientar que as areias foram secas em estufa a 110°C até se atingir massa constante (variação da massa inferior a 1% num intervalo de 24 horas).

4.2.5. DETERMINAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA DA CAL EM PASTA

Para a determinação do teor em água da cal em pasta começou-se por pesar uma determinada amostra de cal em pasta e de seguida colocou-se na estufa, a 110°C até atingir massa constante. Ao fim deste tempo, verificou-se que a cal tinha massa constante (variação de massa inferior a 0,1% com intervalos de 1 hora). Registou-se a massa da amostra da cal seca. Em seguida, calculou-se o teor em água através da Equação 6:

$$W_{H_2O} = \frac{m_h - m_s}{m_h} \times 100 [\%] \quad \text{Equação 6}$$

em que:

m_h – massa da cal húmida, em g

m_s – massa da cal seca, em g

4.3. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS, CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO E COLOCAÇÃO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CURA.

4.3.1. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Na preparação das argamassas procurou-se seguir as indicações das normas NP EN 196-1 [IPQ, 2006] e EN 1015-2/A1 [IPQ, 1998/2006]; no entanto, e uma vez que estas normas estão direccionadas para a produção de argamassas de cimento, introduziram-se algumas alterações aos procedimentos recomendados, nomeadamente quanto ao prolongamento do período de tempo de amassadura (mecânica).

Foram executadas quatro argamassas distintas. Em todas elas se utilizou um traço volumétrico 1:3 (um volume de cal aérea em pó (caL) ou em pasta (caP), ou de cal aérea e metacaulino (MK) : um volume de areia arF + dois volumes de areia arG). Nas argamassas em que se utilizou metacaulino, este substituiu 20% da massa do volume da cal aérea. A quantidade de água utilizada foi a necessária para a obtenção de uma argamassa trabalhável e supostamente utilizável *in situ*, tendo-se registado a consistência por espalhamento.

- Argamassa A2 - ao traço volumétrico 1:3 (mistura ligante: areia, sendo um volume de cal aérea hidratada em pó (caL), para um volume de areia 0/2 (arF) e dois volumes de areia 0/4 (arG). Para a execução de vinte e quatro provetes de 40x40x160 mm e a aplicação no revestimento de dois tijolos, com uma camada única de argamassa com espessura média de 2

cm, foram feitas três amassaduras (devido ao limite de capacidade da cuba do misturador mecânico).

- Argamassa A3 – ao traço volumétrico 1:3, sendo idêntica à argamassa A2 mas substituindo 20% da massa de cal aérea por metacaulino. À semelhança da argamassa A2, foram executados o mesmo número de provetes e revestimento de tijolos, pelo que também se efectuaram três amassaduras.
- Argamassa A4*¹ – ao traço volumétrico 1:3, sendo um volume de cal aérea hidratada em pasta (caP), para um volume de arF e dois volumes de arG. Ao contrário das argamassas anteriores, nesta argamassa com cal em pasta não foi necessária a incorporação de água suplementar, uma vez que a água presente na pasta de cal, já era suficiente para se obter a trabalhabilidade desejada. Para este tipo de argamassa foram executadas duas amassaduras e feitos 24 provetes prismáticos.
- Argamassa A5 – ao traço volumétrico 1:3, idêntica à A4* mas substituindo 20% da massa de cal em pasta por metacaulino. Nesta argamassa com cal em pasta foi necessária a adição de uma pequena quantidade de água suplementar para obtenção de consistência por espalhamento e trabalhabilidade comparável. À semelhança da argamassa anterior, foram realizadas duas amassaduras para a execução de 24 provetes prismáticos.

Relativamente à escolha da quantidade de provetes a executar, esta teve por base o tipo e o número de ensaios que se planeou realizar para a caracterização das argamassas. No subcapítulo 4.1.3 será apresentado o esquema da utilização dos provetes.

Devido à dimensão da cuba, e para otimizar o volume de argamassa produzido, definiu-se que cada amassadura teria cerca de 3000 cm³.

¹ Esta argamassa tem o nome de A4* uma vez que foi executada uma argamassa experimental, semelhante, com a designação de A4, em que os resultados obtidos nos ensaios experimentais não são apresentados nesta dissertação.

Conhecida a baridade das matérias-primas multiplicou-se pelo volume necessário para obtenção do traço volumétrico pretendido e calculou-se assim a quantidade de material necessário para a preparação das argamassas.

Inicialmente começou-se por passar a areia grossa (arG) no peneiro 4mm, com o principal objectivo de minimizar o risco de danificar a pá do misturador mecânico na altura da amassadura. Posteriormente, pesaram-se os dois tipos de areias, a caL, ou a caP e o metacaulino, conforme o tipo de argamassa em que se estava a trabalhar no momento, numa balança de precisão 0,1g, em seguida colocou-se a matéria-prima num tabuleiro onde se procedeu à mistura a seco, para minorar que as partículas finas ficassem em suspensão no ar, evitando assim as poeiras e perda de ligante.



Figura 5 – Areia fina e areia grossa peneiradas



Figura 6 – Homogeneização da matéria-prima a seco

No caso das argamassas onde foi necessária a adição de água, a quantidade desta foi previamente determinada experimentalmente, com vista à obtenção de uma trabalhabilidade apropriada. A água foi colocada na cuba do misturador mecânico e em seguida adicionaram-se as restantes matérias-primas (constituindo esta umas das alterações ao procedimento descrito na norma NP EN 196-1 [IPQ, 2006], uma vez que para as argamassas cimentícias recomendam a mistura da água e do cimento e só após 30s de mistura na velocidade lenta é feita a adição da areia). Procedeu-se à amassadura no misturador mecânico na velocidade mais baixa durante um período de 30s, aos quais se seguiram mais 30s de paragem para se raspar o material acumulado na parte interna da cuba e na pá; por fim, voltou-se a ligar o misturador na velocidade mais rápida durante 180s de forma a completar a amassadura. Apesar de ter sido

seguido o procedimento das normas NP EN 196-1 [IPQ, 2006] e EN 1015-2/A1 [IPQ, 1998/2006], o período da mistura foi alargado, (os tempos de amassadura segundo a norma NP EN 196-1 [IPQ, 2006] seriam: 30s para misturar a água+cimento seguidos 30s para colocar areia na cuba, depois misturar a água+cimento+areia, durante mais 30s na velocidade rápida, parar o misturador durante 90s, dos quais os primeiros 30 são para raspar o material acumulado na pá e nas paredes da cuba, e em seguida proceder à amassadura na velocidade rápida durante mais 60s); segundo a norma EN 1015-2/A1 [IPQ, 1998/2006], seria colocada a água na cuba, depois introduzidos os componentes sólidos durante 15s e em seguida, na velocidade lenta, continuava-se a mistura por mais 120 a 180s) Para as argamassas de cal em pasta o procedimento de homogeneização foi semelhante; a única diferença foi que para a execução da argamassa A4* não se adicionou água, enquanto para a argamassa A5 adicionou-se uma pequena quantidade de água.



Figura 7 – Colocação dos constituintes secos sobre a água na cuba do misturador mecânico



Figura 8 – Paragem na amassadura, para raspar o material acumulado na parte interna da cuba

Concluída a amassadura das diferentes argamassas, seguiu-se a verificação da consistência por espalhamento, através do ensaio da mesa de espalhamento, seguindo a norma EN 1015-3/A1/A2 [CEN, 1999/2004/2006].

Para a realização deste ensaio, começou-se por humedecer ligeiramente a mesa de espalhamento, o molde tronco-cónico, o varão de compactação e a colher de pedreiro. Seguidamente o molde tronco-cónico foi colocado no centro da mesa de

espalhamento, preenchido por duas camadas de argamassa de espessuras aproximadamente idênticas e compactadas com, no mínimo, 10 pancadas cada uma (esta foi uma alteração feita às recomendações da norma, pois constatou-se que 10 pancadas não eram suficientes para se obter uma moldagem com poucos vazios). Após o preenchimento do molde, rasou-se o excesso de argamassa e limpou-se a mesa de espalhamento de forma a eliminar restos de argamassa que pudessem influenciar o ensaio. O molde tronco-cônico foi retirado e de seguida rodou-se a manivela da mesa de espalhamento com uma frequência de 1 rotação por segundo durante 15s. Com um paquímetro digital mediu-se o diâmetro da argamassa em duas direcções segundo dois eixos distintos marcados na mesa de espalhamento.



Figura 9 – Preenchimento do molde tronco-cônico



Figura 10 – Medição do espalhamento

Para a avaliação da consistência por espalhamento de cada amassadura foi feita a média do resultado das duas direcções medidas e o espalhamento obtido foi expresso em mm. Uma vez que foi feita mais de uma amassadura por tipo de argamassa, optou-se também por calcular a média dos espalhamentos de cada amassadura da mesma argamassa e respectivo desvio-padrão, para uma melhor avaliação dos resultados.

Considerando ser o ensaio que, de algum modo, traduz a influência da água na trabalhabilidade das argamassas, também se determinou a média dos espalhamentos obtidos em todas as argamassas executadas.

Seguidamente procedeu-se ao preenchimento dos moldes prismáticos (Figura 11) de 40x40x160mm, de acordo com a NP EN 196-1 [IPQ, 2006]. Começou-se por fixar o molde e a sua prolonga ao compactador mecânico e preencher o molde com uma espessura de argamassa que cobrisse o molde até um pouco mais de metade da sua altura, com auxílio de uma colher de pedreiro. Compactou-se a primeira camada de argamassa com 20 pancadas, às quais se seguiu o preenchimento da segunda camada de argamassa no molde, excedendo um pouco o seu nível, e voltou-se a compactar com mais 20 pancadas (alteração à norma, uma vez que a compactação para as argamassas cimentícias seria de 60 pancadas para a compactação da primeira camada, seguida de mais 60 pancadas para a compactação da segunda camada). Retirou-se o molde e a sua prolonga com cuidado do compactador e retirou-se o excesso de argamassa com uma das arestas da colher de pedreiro, fazendo movimentos de “serrote” (segunda a norma, este procedimento é feito com a ajuda de uma régua metálica).



Figura 11 – Preenchimento dos moldes

Com o objectivo de, de algum modo, simular o revestimento em paredes, foi criada uma moldura em madeira de forma a envolver um tijolo deitado, com altura 2 cm superior ao tijolo. O tijolo foi humedecido e a argamassa foi deixada cair sobre o tijolo de uma altura de mais ou menos 75 cm (Figura 12), tentando simular uma energia constante da sua aplicação em obra. Desta forma, conseguiu-se garantir a aplicação da argamassa em camada única, com uma espessura constante, para posteriormente ser

feita uma observação visual da superfície e poder vir a ser feito o ensaio de aderência por arrancamento.



Figura 12 – Simulação da energia de aplicação da argamassa em obra



Figura 13 – Aspecto do tijolo revestido

Como já referido anteriormente, os provetes prismáticos realizados e os tijolos revestidos foram sujeitos a diferentes condições de cura, sendo acondicionados em câmaras climáticas distintas. A temperatura, durante a permanência nas câmaras climáticas, manteve-se a 20°C. No Quadro 4 são apresentadas as diferentes condições de cura e os provetes prismáticos que daí resultaram.

Quadro 4 – Resumo das condições de cura e identificação dos provetes de cada argamassa

Argamassa:	A2	A3	A4*	A5
Cura (20°C)	Provete	Provete	Provete	Provete
Cura Padrão (65% HR)	A21	A31	A4*7	A51
	A22	A32	A4*8	A52
	A23	A33	A4*9	A53
	A24	A34	A4*10	A54
	A25	A35	A4*11	A55
	A26	A36	A4*12	A56
Cura Seca (50% HR)	A2S1	A3S1	A4*S7	A5S1
	A2S2	A3S2	A4*S8	A5S2
	A2S3	A3S3	A4*S9	A5S3
	A2S4	A3S4	A4*S10	A5S4
	A2S5	A3S5	A4*S11	A5S5
	A2S6	A3S6	A4*S12	A5S6
Cura Húmida (95% HR)	A2H1	A3H1	A4*H7	A5H1
	A2H2	A3H2	A4*H8	A5H2
	A2H3	A3H3	A4*H9	A5H3
	A2H4	A3H4	A4*H10	A5H4
	A2H5	A3H5	A4*H11	A5H5
	A2H6	A3H6	A4*H12	A5H6
Cura c/ CO ₂ (65% HR + 5% CO ₂)	A2C1	A3C1	A4*C7	A5C1
	A2C2	A3C2	A4*C8	A5C2
	A2C3	A3C3	A4*C9	A5C3
	A2C4	A3C4	A4*C10	A5C4
	A2C5	A3C5	A4*C11	A5C5
	A2C6	A3C6	A4*C12	A5C6

4.4. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Antes de se iniciarem os ensaios para a caracterização das argamassas no estado endurecido foi previamente definida qual a utilização a dar a cada um dos provetes. Apresenta-se, na Figura 14, o esquema de utilização de provetes nos diversos ensaios de caracterização.

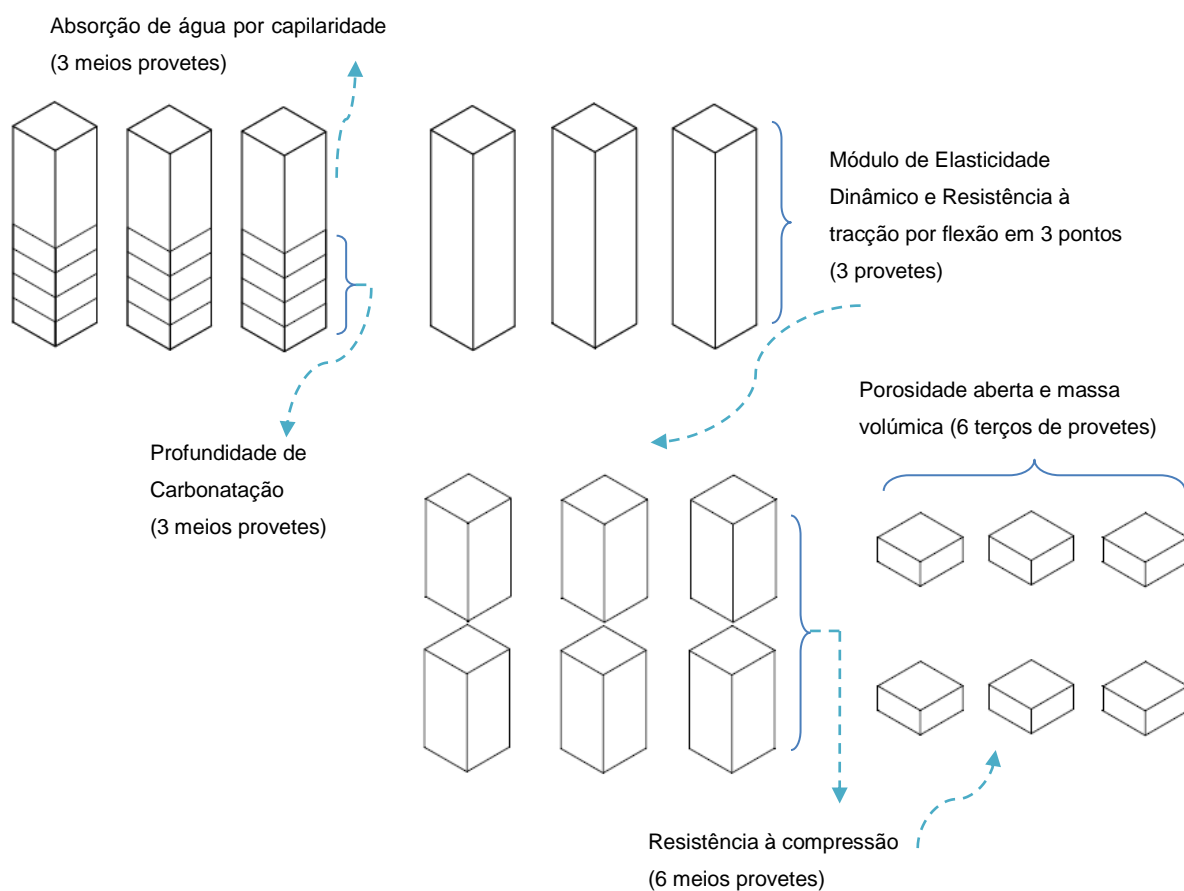


Figura 14 – Utilização dos provetes de argamassa

Embora se pretendesse desmoldar todos os provetes prismáticos aos 7 dias de idade, verificou-se que a condição de cura em que se encontravam os provetes por vezes impossibilitou a sua desmoldagem nessa idade. A maioria dos provetes foi efectivamente desmoldada aos 7 dias de idade; no entanto, os provetes de todas as

argamassas que se encontravam na cura com teor mais elevado de CO₂, a essa idade encontravam-se com um grau de endurecimento muito reduzido. Estes provetes só puderam ser desmoldados na terceira semana de cura.

4.4.1. VERIFICAÇÃO DA RETRACÇÃO NO MOLDE

A verificação da retracção longitudinal da argamassa no molde foi feita, apenas, através de uma inspecção visual na altura da desmoldagem dos provetes de argamassa. Utilizou-se uma lupa e uma régua para se proceder à inspecção da retracção.



Figura 15 – Inspeção visual da retracção longitudinal de um provete no molde

4.4.2. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

De forma a avaliar a profundidade de carbonatação das argamassas, foi utilizada uma solução de 0,5% fenolftaleína em etanol (96%). A fenolftaleína é um ácido fraco incolor que muda de cor quando os valores de PH estão compreendidos entre 8,3 e 10, ou seja, em meio alcalino. Como a carbonatação origina a redução do PH das argamassas, caso estas já estejam carbonatadas, não reagem com a fenolftaleína; caso contrário apresenta uma coloração cor-de-rosa forte [Brito, 2009]. No entanto, estudos recentes ainda não publicados, realizados no âmbito dos projectos LIMECONTECH e METACAL, financiados pela FCT/MCTES, revelam que o PH é alterado pela introdução de metacaulino em argamassas de cal aérea. Tal situação pode dificultar a obtenção de resultados fidedignos através deste ensaio.

O ensaio de carbonatação foi feito aos 30, 60, 90 e 120 dias na maioria das argamassas, com a exceção de algumas que se encontravam na cura com CO_2 , uma vez que se verificou que estas, aos 60 ou 90 dias já estavam totalmente carbonatadas; nesses casos optou-se por não fazer o ensaio dos 90 ou 120 dias. Outro motivo que contribuiu para, por vezes, não se realizarem alguns dos ensaios dos 90 ou 120 dias, foi o facto de se pretender ficar com meios provetes para ser possível fazer posteriormente os ensaios de absorção de água por capilaridade.

A metodologia utilizada para a realização do ensaio de carbonatação foi a seguinte:

- Serrou-se uma fatia de aproximadamente 2 cm de espessura dos provetes
- Retirou-se o excesso de partículas de argamassa que se encontravam soltas na fatia serrada
- Pulverizou-se com a solução de fenolftaleína a face da fatia que foi serrada
- Mediu-se com uma régua a área já carbonatada e a área não carbonatada



Figura 16 – Corte da fatia do provete



Figura 17 – Exemplo de uma fatia não carbonatada (esquerda) e uma fatia totalmente carbonatada (direita)

4.4.3. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (E)

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado segundo o procedimento experimental definido na norma EN 14146 [CEN, 2004], definida para provetes de pedra natural que se baseia na determinação da frequência de ressonância longitudinal através de um equipamento que emite vibrações.

Para a realização deste ensaio, foram utilizados três provetes de cada argamassa e condição de cura. O ensaio foi realizado aos 60 dias de idade. Segundo Faria [2004] a existência de teor de água nos provetes instabiliza o resultado do ensaio. Perante este facto, os provetes foram colocados em estufa ventilada a 60°C durante 24 horas, antes da data da realização do ensaio, período de tempo que demonstrou ser suficiente para atingir massa constante.

Todos os provetes a ensaiar foram previamente pesados e em seguida colocados no equipamento para medição do módulo de elasticidade dinâmico (“ZEUS Resonance Meter” (ZRM001)), que está associado a um programa de cálculo próprio e onde foi inserida a massa exacta e as dimensões aproximadas de cada provete. O programa de cálculo do equipamento determina automaticamente o E, em MPa, a partir da frequência de ressonância longitudinal em Hz, da massa volúmica do provete em N/m^3 e da aceleração da gravidade ($9,81m/s^2$) [Faria, 2004].



Figura 18 – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico [Faria, 2004]

Para cada provete efectuaram-se três medições do módulo de elasticidade e em seguida foi efectuada a média desses três resultados.

4.4.4. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO (R_T)

O ensaio de resistência à tracção por flexão em três pontos foi realizado de acordo com a norma, EN 1015-11/A1 [CEN, 1999/2006].

Para a realização deste ensaio foram utilizados os provetes que resultaram da determinação do módulo de elasticidade dinâmico. O ensaio foi realizado aos 60 dias de idade.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi uma prensa de flexão/compressão com uma célula de carga para a flexão de 15 kN.

Inicialmente começou-se por inserir no software do equipamento as medidas aproximadas do provete a ensaiar (40x40x160mm), a distância entre os apoios (100mm) onde seria posicionado o provete e por fim a velocidade de aplicação da força a meio vão do provete (0,024MPa/s). Posteriormente colocou-se o provete de forma que a carga pudesse ser aplicada a meio vão, como é visível na Figura 19, e deu-se início ao ensaio.

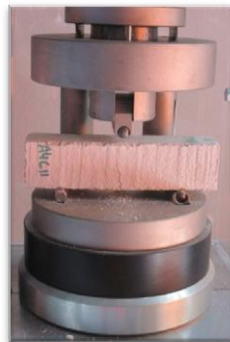


Figura 19 – Ensaio de resistência à tracção por flexão

O software do equipamento calcula automaticamente qual a resistência à flexão (R_f) de cada provete, em MPa.



Figura 20 – Visualização dos resultados do ensaio de resistência à tracção

4.4.5. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (R_c)

O ensaio de resistência à compressão, foi realizado de acordo com a norma EN1015-11/A1 [CEN, 1999/2006].

Para a realização deste ensaio foram utilizadas as metades dos provetes provenientes do ensaio de resistência à tracção. O ensaio decorreu aos 60 e 120 dias de idade dos provetes. Para a realização do ensaio aos 120 dias de idade, o meio provete resultante de cada provete ensaiado à flexão aos 60 dias foi condicionado numa sala sem condicionamento mas com condições de temperatura e humidade bastante estáveis, que variaram entre 27 e 30°C e entre 43 e 58% de HR. À data da realização do ensaio aos 120 dias, os meios provetes foram colocados na estufa a 60°C durante 24 horas, tempo que se revelou suficiente para atingirem massa constante (uma vez que, de seguida, partes dos provetes seriam ainda utilizados para determinação da porosidade aberta e massa volúmica aparente).

À semelhança do ensaio de resistência à flexão, o equipamento utilizado também foi a prensa de flexão/compressão, mas utilizando a parte do dispositivo para a compressão. A célula de carga tem uma capacidade de 250 kN e os ensaios foram realizados com uma velocidade de aplicação de carga de 0,031 MPa/s.

Começou-se por introduzir no software do equipamento as medidas correspondentes à área de contacto entre a metade do provete a ensaiar e a base do dispositivo para o ensaio de compressão (40x40mm), bem como a velocidade de aplicação da carga em seguida deu-se início ao ensaio.



Figura 21 – Dispositivo para ensaio de compressão



Figura 22 –Ensaio de compressão

O software do equipamento calcula automaticamente qual a resistência à compressão (R_c) de cada provete, em MPa.

4.4.6. DETERMINAÇÃO DA ADERÊNCIA AO SUPORTE E VISUALIZAÇÃO DA FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS

O ensaio de aderência ao suporte (ensaio Pull-off) foi efectuado com base na norma EN 1015-12 [CEN, 2000].

Este ensaio foi realizado nas argamassas A2 e A3 aplicadas sobre os tijolos, que se mantiveram na cura padrão até aos 205 e 203 dias de idade respectivamente.

Antes do início do ensaio Pull-off fez-se uma inspecção visual, a “olho nu” e através de uma lupa de fendas (Figura 23), à fissuração existente nos tijolos.

Com o objectivo de avaliar a melhor forma para a execução do ensaio de aderência, uma vez que não foram efectuados os entalhes na argamassa ainda no

estado fresco, e sabendo, de antemão, que a aderência directa da argamassa de cal aérea à superfície de tijolos correntes de barro vermelho é muito diferente¹ da que ocorreria sobre paredes antigas de alvenaria argamassada, foram feitos ensaios numa argamassa de teste. Optou-se por testar o ensaio de aderência numa pastilha quadrada, colada previamente na área resultante de um entalhe quadrangular² na argamassa, e numa pastilha directamente colada na argamassa, sem ter sido feito nenhum entalhe (Figura 24). Este último caso evitaria a degradação que o corte provoca na superfície da argamassa.



Figura 23 – Inspeção da fissuração nos tijolos através da lupa de fendas



Figura 24 – Tijolo com argamassa de teste, entalhes e colagem das pastilhas

Dos testes efectuados, chegou-se à conclusão que a melhor forma para a realização do ensaio passa por serem feitos os entalhes, uma vez que a pastilha colada directamente sobre a argamassa apresentava uma superfície de rotura muito irregular, que não permitia saber, de uma forma precisa, qual a área por onde era arrancada.

¹ Por facilidade utilizaram-se como suportes tijolos correntes de barro vermelho, embora estes não reproduzam os suportes que são revestidos com argamassa com base em cal aérea.

² Ao contrário do que a norma refere, optou-se por utilizar pastilhas quadradas de 50x50 mm em vez de circulares, uma vez que o processo de execução do entalhe degrada menos o provete se for executado com o auxílio de uma rebarbadora comparativamente a uma caroteadora.

Depois dos testes preliminares, realizaram-se então os entalhes nos tijolos das argamassas A2 e A3. A profundidade do corte foi efectuada de forma a atravessar toda a espessura da argamassa e não passar o substrato (Figura 25).

De seguida, procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas quadrangulares, com cola, de forma a ficarem alinhadas com os cortes feitos anteriormente (Figura 26).

Após o período de secagem da cola para garantia da correcta aderência das pastilhas metálicas ao substrato (a cola esteve a secar durante 24 horas), deu-se início ao ensaio. Colocou-se o aparelho de forma que o seu “braço” agarrasse uma peça metálica que previamente foi enroscada na pastilha metálica, colocou-se a escala do equipamento de Pull-off¹ no zero e fez-se rodar a manivela aplicando uma força de tracção transmitida axialmente através da pastilha metálica (Figura 27). O aumento gradual da força pode-se verificar no visor do equipamento e é dada em kN; assim que ocorre o arrancamento, o equipamento regista esse valor como sendo a força máxima. No entanto, os resultados do ensaio que vão ser apresentados no subcapítulo 5.3.6 serão em forma de tensão dada em MPa. Para tal, converteu-se o valor da força em tensão através da Equação 7:

$$T = \frac{F \times 1000}{A_{pastilha}} [MPa] \quad \text{Equação 7}$$

em que:

T – tensão, em MPa

F – força, em kN

$A_{pastilha}$ – área da pastilha metálica (50x50), em mm²

¹ Capacidade máxima do equipamento 6 kN.

Existem diversas formas de rotura possíveis:

- Pela zona de colagem (o que significa que a cola foi mal escolhida ou a colagem da pastilha metálica à argamassa foi mal efectuada);
- Pela argamassa (rotura coesiva);
- Pela zona de transição entre a argamassa e o substrato (arrancamento por aderência),
- Pelo substrato (rotura coesiva)
- Rotura mista



Figura 25 – Entalhes nos tijolos



Figura 26 – Colagem das “pastilhas metálicas”

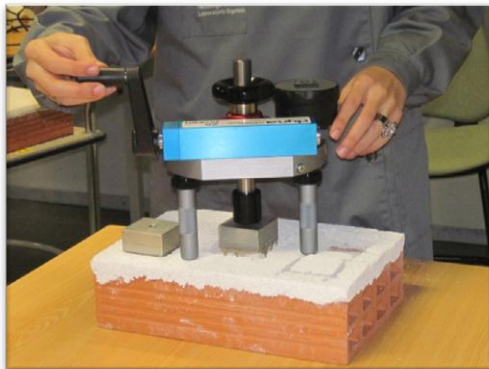


Figura 27 – Ensaio Pull-off

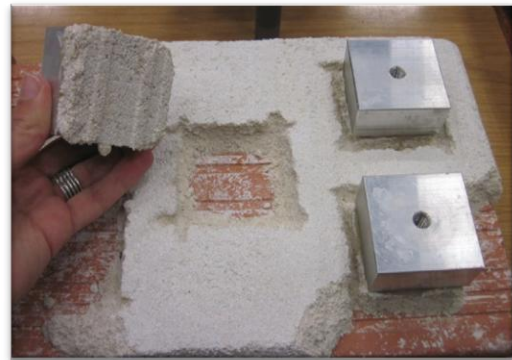


Figura 28 – Exemplo de uma zona de rotura (interface argamassa/tijolo)

4.4.7. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de determinação de absorção de água por capilaridade foi efectuado com base nas normas EN 1015-18 [CEN, 2002] e EN 15801 [CEN, 2009].

Os provetes utilizados para a realização deste ensaio foram os meios provetes resultantes do ensaio de carbonatação. Antes da realização deste ensaio, os meios provetes foram colocados em estufa ventilada a 60°C durante 24 horas, que se revelou suficiente para atingirem massa constante (variação da massa inferior a 0,1% entre pesagens efectuadas com um intervalo 24 horas). As faces laterais dos provetes não foram seladas, considerando minorar a evaporação bidireccional por executar o ensaio em ambiente saturado.

De forma a garantir um ambiente saturado na data da realização do ensaio, alguns dias antes preparou-se o sistema de ensaio. Colocaram-se dois tijolos no fundo de uma caixa plástica e em seguida colocou-se água até preencher metade da altura da caixa, a tampa da caixa foi vedada e manteve-se fechada registando-se uma HR perto dos $95 \pm 5\%$. Colocou-se um tabuleiro forrado com uma manta geotêxtil de forma a criar uma película absorvente e preencheu-se o fundo do tabuleiro com água até uma altura de 2 mm sobre o geotêxtil. Deu-se então início ao ensaio, começando-se por pesar as metades dos provetes provenientes da estufa, mas já arrefecidos, numa balança com precisão de 0,001g. Estas metades dos provetes, depois de pesadas, foram colocadas no tabuleiro com a face de menor dimensão em contacto com a manta geotêxtil e foram feitas pesagens aos 5, 10, 15 e 30 minutos, à 1, 2, 3 e 24 horas, às quais se seguiram pesagens com periodicidade de cerca de 24 horas. Durante o ensaio, teve-se sempre o cuidado de manter o nível da água constante dentro do tabuleiro, fazendo a adição de água sempre que necessário. Entre intervalos de pesagem a caixa foi mantida fechada de forma a manter a humidade relativa elevada e reduzir o volume de água evaporado dos provetes. A duração do ensaio de absorção de água por capilaridade dependeu do tipo de argamassa. O ensaio só se deu por terminado quando se verificou ter-se atingido o valor assintótico (VA) de absorção de água por capilaridade (a variação de massa em 24h era inferior a 1%) de cada provete.

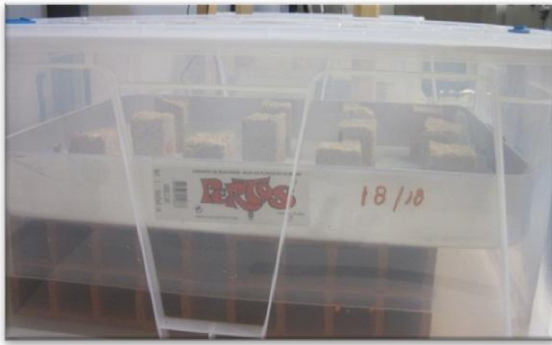


Figura 29 – Caixa para ensaio de absorção de água por capilaridade



Figura 30 – Reposição de água no ensaio de absorção de água por capilaridade

Para cada pesagem efectuada, calculou-se a quantidade de água absorvida por unidade de superfície, para cada provete, através da Equação 8:

$$m = \frac{m_i - m_0}{S} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad \text{Equação 8}$$

em que:

m – quantidade de água absorvida, por unidade de superfície, ao fim do tempo i , em kg/m^2

m_i – massa do meio provete ao fim de um determinado tempo t_i , em kg

m_0 – massa do meio provete seco, no início do ensaio, em kg

S – secção do provete em contacto com a água (40x40mm), em m^2

Com os dados obtidos para cada provete por tipo de cura, fez-se uma média da massa de água absorvida e, em seguida, traçou-se um gráfico com a curva de absorção capilar. Esta curva exprime, em massa, a quantidade de água absorvida por

unidade de área da base do provete, em função da raiz quadrada do tempo i , em minutos.

O coeficiente de capilaridade (CC) é dado pela inclinação do primeiro troço linear recto da curva de absorção capilar, expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ e traduz a velocidade de absorção de água nos instantes iniciais.

Por outro lado interessam baixos CC mas são também importantes baixos VA. O valor médio obtido dos diversos provetes de cada argamassa e condição de cura permite atenuar a ligeira diferença volumétrica entre meios provetes.

4.4.8. SECAGEM

O ensaio de secagem processou-se imediatamente a seguir ao ensaio de absorção de água por capilaridade, pois tomando como referência o estudo efectuado por Brito [2009], não existem vantagens na determinação da secagem em relação à imersão total dos provetes comparativamente com a imersão parcial, desde que os provetes estejam saturados. Inclusive considera-se mais representativa da situação das argamassas de revestimento a imersão parcial em que as paredes ficam húmidas. Sendo assim, os meios provetes utilizados no ensaio de secagem foram os provenientes do ensaio de absorção de água por capilaridade.

No ensaio de secagem optou-se por não selar os provetes nas suas faces laterais, tornando a secagem bidireccional, uma vez que nos ensaios de absorção de água por capilaridade estes também não tinham sido selados.

Durante o período de secagem, os meios provetes foram mantidos numa sala onde a temperatura e a humidade relativa se mantinha nos $20 \pm 3^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ respectivamente. Para avaliar a quantidade de água evaporada foram realizadas pesagens, em intervalos de tempo definidos, numa balança de precisão de 0,001g. O ensaio de secagem decorreu até se verificar que a massa dos meios provetes se

aproximava da massa seca, ou quando a determinada altura a massa começou a aumentar em vez de continuar a diminuir¹.

Os resultados do ensaio de secagem são dados pela curva de evaporação, que expressa a variação no tempo do teor em água, e pelo índice de secagem que fornece a informação sobre a rapidez de secagem das argamassas, sendo tanto maior, quanto menor for o índice.

O teor em água que é dado pela Equação 9:

$$Wt = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 [\%] \quad \text{Equação 9}$$

em que:

Wt – teor em água, em %

m_i – massa do meio provete no instante t, em g

m_0 – massa do meio provete seco em estufa, em g

O índice de secagem (IS) foi calculado através da Equação 10 [Brito, 2009]:

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left[(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right]}{Q_{max} \times t_f} \quad \text{Equação 10}$$

em que:

IS – índice de secagem

¹ Julga-se que este facto possa ter ocorrido porque os meios provetes começaram a absorver a humidade proveniente do ambiente da sala onde se encontravam no processo de secagem, ou devido à evolução do processo de carbonatação.

t_i – tempo de ensaio i , em horas

t_f – tempo final do ensaio, em horas

Q_i – quantidade de água no interior do provete no instante i , em % relativamente à massa seca

Q_{max} – quantidade de água inicial, em % relativamente à massa seca

4.4.9. POROSIDADE ABERTA (P_{ab}) E MASSA VOLÚMICA APARENTE (M_{vol})

Os ensaios para a determinação da porosidade aberta foram realizados com base na norma NP EN 1936 [IPQ, 2008] e na ficha de ensaio Fe 02 DEC/UNL [1996]. Uma vez que a presente norma está direccionada para a realização de ensaios em provetes de pedra natural, foram feitas algumas alterações no procedimento de ensaio adoptado para as argamassas de cal.

Para a realização destes ensaios, utilizaram-se os topos sobrantes dos meios provetes do ensaio de resistência à compressão aos 120 dias.

Como o ensaio de P_{ab} foi realizado imediatamente a seguir ao ensaio de resistência à compressão aos 120 dias, os provetes já estavam com massa constante.

Para a realização deste ensaio começou-se por limpar, com a ajuda de um pincel, o material que se encontrava solto nos provetes (Figura 31) e em seguida fez-se a pesagem dos provetes secos numa balança de precisão de 0,001g (Figura 32).



Figura 31 – Limpeza do material solto dos provetes



Figura 32 – Pesagem dos provetes secos

Na fase seguinte colocaram-se os provetes num exsicador vedado que estava interligado a um kitasato fazendo a transferência para uma bomba de vácuo. A bomba permitiu fazer uma diminuição gradual de pressão dentro do exsicador, ficando assim os provetes durante 24 horas num ambiente de vácuo (para a pedra natural apenas teriam de ficar $2\pm 0,2$ h, até eliminar o ar contido nos poros dos provetes). Findo este tempo, fez-se a introdução de água dentro do exsicador através de um reservatório que se encontrava ligado a uma tubagem que tinha ligação com a tampa do exsicador. A introdução da água deu-se de uma forma lenta, com uma duração nunca inferior a 15 minutos, até a imersão total dos provetes, note-se que foi necessário desligar a bomba de vácuo durante a introdução da água pois, caso contrário, poder-se-ia correr o risco de a danificar.

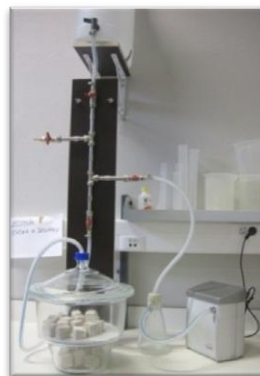


Figura 33 – Dispositivo para ensaio de porosidade aberta

Depois desta fase, voltou-se a ligar a bomba e os provetes mantiveram-se imersos em água e com vácuo durante mais 24 horas (procedimento diferente do descrito na norma, uma vez que esta fase não está contemplada), a seguir às quais se desligou o vácuo e se deixaram os provetes apenas imersos em água durante um período de mais 24 horas. Ao fim das 72 horas, retiraram-se os provetes de dentro do exsicador e efectuou-se a pesagem hidrostática através de um dispositivo associado à balança de precisão de 0,001g (Figura 34). Após a pesagem hidrostática, os provetes foram colocados num tabuleiro forrado com um pano absorvente (para se retirar a água superficial sem manusear muito os provetes) e em seguida, procedeu-se à pesagem dos provetes saturados.



Figura 34 – Pesagem hidrostática dos provetes

O cálculo da porosidade aberta e da massa volúmica aparente foram feitos através da Equação 11 e Equação 12:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 [\%] \quad \text{Equação 11}$$

$$M_{vol} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 [kg/m^3] \quad \text{Equação 12}$$

em que:

P_{ab} – porosidade aberta, em %

M_{vol} – massa volúmica aparente, em kg/m^3

m_1 – massa do provete seco, em g

m_2 – massa com provete em imersão, em g

m_3 – massa do provete saturado, em g

Para cada argamassa e cada condição de cura foi efectuada a média da porosidade aberta e da massa volúmica aparente dos provetes respectivos.

CAPÍTULO 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira parte são apresentados os resultados dos ensaios experimentais referentes à caracterização das matérias-primas, a segunda parte diz respeito aos resultados obtidos para as argamassas no estado fresco, e por fim, na terceira fase, são apresentados os resultados da caracterização das argamassas no estado endurecido.

5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAÇÃO MECÂNICA

Os resultados da análise granulométrica realizados de acordo com 4.2.1., correspondentes à média das três amostras para cada uma das areias e para a mistura no traço volumétrico 1:2 de areia arF e arG respectivamente, são apresentados no Quadro 5, Quadro 6 e Quadro 7 e sob a forma de curva granulométrica na Figura 35.

Quadro 5 – Análise granulométrica da areia arF

	<i>Massa amostra 1</i>		<i>Massa amostra 2</i>		<i>Massa amostra 3</i>		<i>Média Resíduo</i>		<i>Resíduo Ac.</i>	
	511,8 g		518,8 g		510,0 g					
<i>Peneiro Abertura Malha [mm]</i>	<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>				<i>Passado</i>	<i>Retido</i>
	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
4,00	0,2	0,04	0,0	0	0,0	0,	0,1	0,01	99,99	0,01
2,00	0,3	0,06	0,0	0	0,0	0	0,1	0,02	99,97	0,03
1,00	7,2	1,41	7,7	1,49	7,1	1,39	7,3	1,43	98,54	1,46
0,500	112,9	22,12	118,0	22,77	115,3	22,63	115,4	22,51	76,03	23,97
0,250	290,4	56,91	300,8	58,05	295,5	57,99	295,6	57,65	18,38	81,62
0,125	96,9	18,99	90,0	17,37	89,8	17,62	92,2	17,99	0,39	99,61
0,063	2,3	0,45	1,6	0,31	1,8	0,35	1,9	0,37	0,02	99,98
Refugo	0,1	0,02	0,1	0,02	0,1	0,02	0,1	0,02	0,00	100,00
Totais	510,3	100	518,2	100	509,6	100	512,7	100	-	-

Quadro 6 – Análise granulométrica da areia arG

	<i>Massa amostra 1</i>		<i>Massa amostra 2</i>		<i>Massa amostra 3</i>					
	606,7 g		647,0 g		630,1 g					
<i>Peneiro Abertura Malha</i>	<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>		<i>Média Resíduo</i>		<i>Resíduo Ac.</i>	
	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>
<i>[mm]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
4,00	17,7	2,92	10,1	1,56	10,1	1,6	12,6	2,03	97,97	2,03
2,00	58,4	9,64	49,6	7,67	52,9	8,4	53,6	8,57	89,4	10,60
1,00	186,9	30,84	185,9	28,73	190,5	30,26	187,8	29,94	59,46	40,54
0,500	247,3	40,8	283,3	43,79	268,9	42,71	266,5	42,43	17,03	82,97
0,250	88,8	14,65	107,8	16,66	99,2	15,76	98,6	15,69	1,34	98,66
0,125	5,7	0,94	8,9	1,38	7,1	1,13	7,2	1,15	0,19	99,81
0,063	1,1	0,18	1,1	0,17	0,7	0,11	1,0	0,15	0,04	99,96
Refugo	0,2	0,03	0,3	0,05	0,2	0,03	0,2	0,04	0,00	100,00
Totais	606,1	100	647,0	100	629,6	100	627,6	100	-	-

Quadro 7 – Análise granulométrica da mistura das areias arF e arG no traço volumétrico 1:2

	<i>Massa amostra 1</i>		<i>Massa amostra 2</i>		<i>Massa amostra 3</i>					
	500,0 g		518,3 g		505,6 g					
<i>Peneiro Abertura Malha</i>	<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>		<i>Resíduo</i>		<i>Média Resíduo</i>		<i>Resíduo Ac.</i>	
	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>	<i>Passado</i>	<i>Retido</i>
<i>[mm]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[g]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>	<i>[%]</i>
4,00	8,1	1,62	6,2	1,2	9,5	1,88	7,9	1,57	98,43	1,57
2,00	36,1	7,23	31,8	6,14	44,7	8,85	37,5	7,41	91,02	8,98
1,00	113,8	22,78	97,1	18,75	115,2	22,80	108,7	21,44	69,58	30,42
0,500	182,7	36,57	177,6	34,29	173,6	34,36	178,0	35,07	34,51	65,49
0,250	129,5	25,92	158,7	30,64	132,4	26,21	140,2	27,59	6,92	93,08
0,125	28,8	5,76	44,7	8,63	29,5	5,84	34,3	6,74	0,18	99,82
0,063	0,6	0,12	1,6	0,31	0,3	0,06	0,8	0,16	0,02	99,98
Refugo	0,0	0,00	0,3	0,06	0,0	0,00	0,1	0,02	0,00	100,00
Totais	499,6	100	518,0	100	505,2	100	507,6	100	-	-

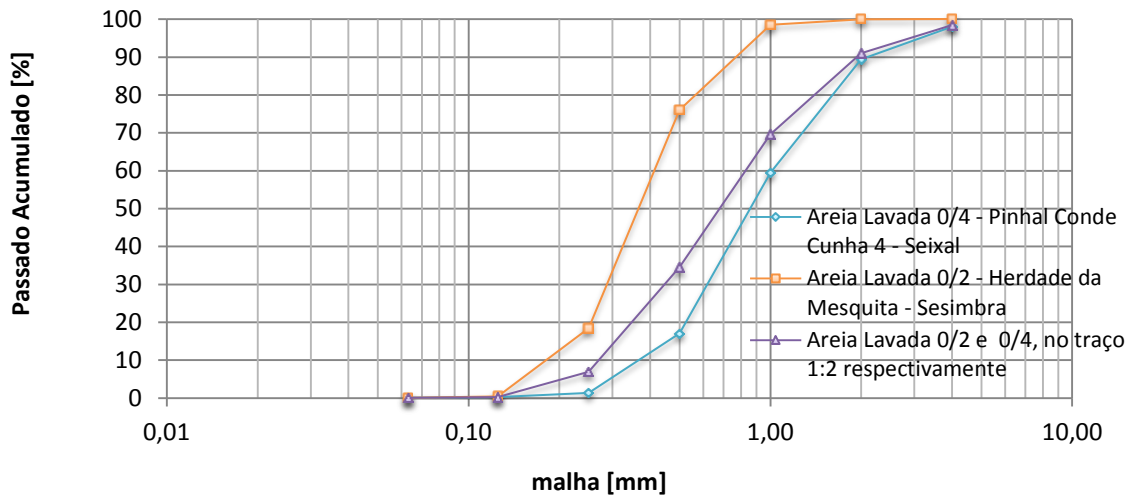


Figura 35 - Curva granulométrica das areias e da mistura de areias

Da análise efectuada às curvas granulométricas, verifica-se que a máxima dimensão do agregado, que corresponde à máxima dimensão da abertura da malha dos peneiros onde passa uma quantidade de material igual ou superior a 90%, é de 1 mm para a areia arF e de 4 mm para a areia arG. Relativamente à mínima dimensão do agregado, que corresponde à mínima dimensão da abertura da malha dos peneiros por onde passa uma quantidade de material igual ou inferior a 5%, é de 0,125 mm para a areia arF e de 0,250 mm para a areia arG. No caso da mistura das areias a máxima dimensão do agregado é de 2 mm, situando-se assim, entre os valores da areia arF e arG; no entanto, a mínima dimensão é de 0,125 mm, igual ao da areia arF.

5.1.2. VOLUME DE VAZIOS (V_v) DAS AREIAS

O resultado obtido para o volume de vazios da areia arF foi de 40% e para a areia arG de 35%, determinado de acordo com 4.2.2..

Como era expectável [Rato, 2006], a areia com partículas de menor dimensão tem um volume de vazios superior ao da areia com partículas de maior dimensão, uma vez que, para o mesmo volume de areia, a quantidade de partículas para a areia arF é superior à da areia arG. Tendo um maior número de partículas, tem-se, respectivamente, um maior número de vazios entre elas. Contudo as duas areias em separado apresentam um volume de vazios elevado, pois segundo Margalha, et al. [2007], o volume de vazios ideal para o traço 1:3 (ligante : areia) seria na ordem dos 30%. Uma vez que se deve procurar que todos os vazios da areia sejam preenchidos pelo ligante, tal seria possível com um traço volumétrico ligante : agregado de 1:3. Também foi avaliado o volume de vazios da mistura das areias no traço volumétrico 1:2, registando-se uma melhoria em relação ao V_v das areias em separado. O V_v da mistura é de 32%, conseguindo-se desta forma ter uma areia melhor graduada para aplicação em argamassas com o traço volumétrico referido.

5.1.3. MASSA VOLÚMICA (M_{vol}) DAS AREIAS

Os valores da massa volúmica das areias arF e arG, determinados de acordo com 4.2.3. foram $2570,83 \text{ kg/m}^3$ e $2461,54 \text{ kg/m}^3$ respectivamente. Para a mistura de ambas as areias o valor da M_{vol} foi de $2814,29 \text{ Kg/m}^3$. Constata-se, assim e como se pretendia, que a mistura das areias é a que possui uma maior massa volúmica, comparativamente às areias isoladas.

5.1.4. BARIDADE (Ba) DAS AREIAS, CAIS E METACAUPLINO

Os valores médios da baridade e o desvio-padrão, determinados como descrito em 4.2.4., obtidos para três amostras do mesmo lote para cada matéria-prima são os constantes no Quadro 8.

Quadro 8 – Baridade das areias, cais e metacaulino

<i>Matéria-Prima</i>	<i>Baridade [kg/m³]</i>
Areia arF	1495,83 ± 5,50
Areia arG	1554,05 ± 2,86
Areia arF + Areia arG	1585,97 ± 9,8
Cal aérea hidratada em pó (Lusical)	381,38 ± 3,12
Cal aérea hidratada em pasta (Fradical)	1261,30 ± 3,82
Metacaulino	707,12 ± 17,17

Através da análise do Quadro 8., verifica-se que a mistura das areias tem o maior valor de baridade, seguindo-se a areia 0/4. Comparando os dois tipos de cais, como era espectável, a cal em pasta apresenta um valor de baridade muito superior ao da cal em pó, aproximando-se do valor da baridade das areias, isto porque inclui elevado teor de água. Verifica-se, também, que o metacaulino apresenta um valor superior de baridade em relação à cal em pó, sendo esta, de entre todas as matérias-primas utilizadas, a que apresenta o menor valor de baridade.

5.1.5. TEOR EM ÁGUA DA CAL EM PASTA

O resultado obtido para o teor em água da cal em pasta, determinado de acordo com 4.2.5., foi de 59,4%. Constata-se então que a cal em pasta é constituída com uma grande percentagem de água. Esta é uma justificação para não ter sido necessária a adição de água no processo de amassadura da argamassa A4*; outra poderá ser mesmo a menor superfície específica em que as partículas de cal em pasta vão ficar ao longo da sua maturação na pasta, que confere às argamassas executadas características melhores nomeadamente ao nível da trabalhabilidade [Faria, 2004].

5.1.6. MASSA DOS CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS E TRAÇOS PONDERAIS

Apesar de em obra se definir a quantidade de material a utilizar nas amassaduras de argamassas em traços volumétricos, em trabalhos laboratoriais

geralmente parte-se de traços volumétricos mas a quantidade de matéria-prima a utilizar é definida em massa, de forma que se possam obter valores com maior rigor e permitir a repetibilidade entre amassaduras.

No caso dos trabalhos experimentais desenvolvidos nesta dissertação foi definido previamente qual o traço que se pretendia ter nas amassaduras (1:3 – 1 ligante: 2 arG + 1 arF). Em função deste traço, e sabendo que cada provete de argamassa terá 256 cm^3 , multiplicando este valor por 9 provetes, que corresponde a fazer o preenchimento de 3 moldes, necessita-se de $2304,00 \text{ cm}^3$. Uma vez que, se definiu que, em função da capacidade da cuba do misturador, a quantidade máxima de areia grossa que se consegue colocar na cuba do misturador são 2000 cm^3 , e de forma a obter o traço pretendido em massa (que consta no Quadro 9), multiplicou-se o valor da baridade da arG por 2000 cm^3 e o valor da arF e das cais por 1000 cm^3 , pois considera-se que as restantes matérias-primas e a água adicionada nas amassaduras preencherão essencialmente os vazios existentes na arG. O metacaulino, quando adicionado e como referido anteriormente, substitui 20% da massa de cal aérea.

Considerando as massas dos constituintes utilizadas em cada argamassa, e traduzindo os traços ponderais, obtém-se para as argamassas A2 e A3 o traço $1: (3,95 : 8,16) \sim 1 : (4 : 8) = 1 : 12$ e para as argamassa A4* e A5 o traço $1 : (1,19 : 2,46) \sim 1 : (1 : 2,5) = 1 : 3,5$.

Quadro 9 – Quantidades das matérias-primas utilizadas nas amassaduras

Argamassa	Qt. Matéria-Prima [kg]	
A2	Areia grossa	3,100
	Areia fina	1,500
	Cal aérea Pó (Lusical)	0,380
A3	Areia grossa	3,100
	Areia fina	1,500
	Cal aérea Pó (Lusical)	0,304
	Metacaulino	0,076
A4*	Areia grossa	3,100
	Areia fina	1,500
	Cal aérea Pasta (Fradical)	1,260
A5	Areia grossa	3,100
	Areia fina	1,500
	Metacaulino	0,252
	Cal aérea Pasta (Fradical)	1,008

Como o teor em água da cal em pasta determinado em 4.2.5. é de 59,4%, uma unidade mássica da cal em pasta corresponde a 40,6% de ligante cal. Utilizando-se 1,26 kg de cal em pasta no caso da argamassa A4* e 1,008 no caso da argamassa A5, a massa de cal correspondente é, respectivamente 0,51kg e 0,41 kg. No entanto, estes valores são mesmo assim superiores aos 0,380 kg e 0,304 kg de cal em pó utilizada nas argamassas A2 e A3. Desta forma demonstra-se que as argamassas de cal em pasta executadas são mais fortes em cal que as argamassas correspondentes de cal em pó.

5.2. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

5.2.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

A definição da quantidade de água utilizada nas diferentes amassaduras teve em consideração a obtenção de uma trabalhabilidade comparável entre argamassas, que permitisse a sua eventual aplicação real. Registou-se a consistência por espalhamento, procurando-se resultados semelhantes em todas as argamassas idênticas de acordo com o descrito em 4.3.1. Utilizou-se uma relação de ligante/água na ordem dos 0,4 para todas as argamassas de cal em pó.

Como já referido anteriormente, no caso da cal em pasta, para a argamassa A4* não foi necessária a adição de água para a obtenção da trabalhabilidade desejada, pois a quantidade de água presente neste ligante, depois de escorrido, revelou-se suficiente para a obtenção de uma trabalhabilidade adequada. Já na argamassa A5, em que 20% da cal foi substituída por metacaulino, foi necessário adicionar em pequena quantidade água para se obter a trabalhabilidade pretendida.

No Quadro 10 registam-se as quantidades de água utilizadas em cada argamassa, o espalhamento obtido em cada amassadura e o espalhamento médio obtido no conjunto das amassaduras da mesma argamassa. Constata-se que os valores de consistência de espalhamento obtidos apresentam uma reduzida dispersão, demonstrando influência comparável da água nas argamassas realizadas.

Quadro 10 – Quantidades das matérias-primas utilizadas e espalhamento médio obtido nas amassaduras

<i>Arg.</i>	<i>Amass.</i>	<i>Qt. Água [ml]</i>	<i>Esp. med. Amass. [mm]</i>	<i>Esp. med. Arg. [mm]</i>
A2	1	920	156,7	155 ± 3
	2	920	151,9	
	3	920	156,8	
A3	1	920	153,2	154 ± 3
	2	920	151,0	
	3	920	156,9	
A4*	1	0	147,2	151 ± 5
	2	0	154,9	
A5	1	240	153,3	152 ± 1
	2	240	151,4	

Arg.: tipo de argamassa**Qt.:** quantidade**Amass.:** amassadura**Esp. med.:** consistência por espalhamento média

Sendo todas as argamassas do mesmo tipo, com base em cal aérea, a consistência por espalhamento médio entre todas elas não apresentou variação elevada, ficando-se em $153,3 \pm 3,1$ mm.

5.3. RESULTADOS REFERENTES À CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Como referido no capítulo 4, a caracterização das argamassas no estado endurecido foi realizada através do seguinte conjunto de ensaios: visualização da retracção no molde, avaliação da profundidade de carbonatação, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão em três pontos, resistência à compressão, porosidade aberta e massa volúmica aparente, absorção de água por capilaridade, secagem, análise visual de superfície revestida e aderência ao suporte.

5.3.1. VISUALIZAÇÃO DA RETRACÇÃO NO MOLDE

Tal como descrito em 4.4.1., a avaliação da retracção no molde foi feita imediatamente antes de se proceder à desmoldagem dos provetes, aos 7 dias de idade (excepto para as argamassas que se encontravam na câmara de carbonatação em que decorreu a idade mais avançada em que a desmoldagem foi possível).

As argamassas sujeitas à cura com CO₂ a 5% (cura C), e como referido anteriormente, apresentaram grande dificuldade de endurecimento durante o tempo em que os provetes estiveram dentro dos moldes. Ao fim dos 7 dias de idade, as argamassas encontravam-se muito pouco endurecidas, não sendo possível proceder à desmoldagem dos provetes; aos 14 dias de idade este problema persistia, sendo apenas possível proceder à desmoldagem cerca dos 21 dias, mas com particular cuidado, uma vez que a consistência dos provetes ainda era diminuta. Contudo, em nenhuma idade apresentaram retracção no molde. A possível justificação, para o problema das argamassas que se encontravam na cura C demorarem bastante tempo até se encontrarem nas condições mínimas para se proceder à desmoldagem, poderá estar associada ao facto da única face dos provetes nos moldes em contacto com o exterior (ambiente da câmara) ficar com a película à superfície saturada de iões carbonato, formando uma solução rica em hidrogeno carbonato, proveniente da reacção do CO₂ com a água e, dessa forma, diminuir ou mesmo impedir a velocidade de carbonatação através da face superior dos provetes de argamassa. Este facto mostra que na fase inicial da cura, a colocação dos provetes num ambiente confinado rico em CO₂ não se revela eficaz para o endurecimento das argamassas.

A avaliação da retracção no molde foi feita apenas em termos qualitativos, comparando, entre os diferentes tipos de cura e tipos de argamassas, a retracção de umas argamassas em relação às outras, como se apresenta no Quadro 11.

Quadro 11 – Avaliação qualitativa da retracção no molde das diversas argamassas consoante o tipo argamassa e de cura

Tipo de cura	A2S	A3S	A4*S	A5S
Retracção no molde	++	+	+++	++
Tipo de cura	A2	A3	A4*	A5
Retracção no molde	+	+	++	++
Tipo de cura	A2C	A3C	A4*C	A5C
Retracção no molde				
Tipo de cura	A2H	A3H	A4*H	A5H
Retracção no molde	++	++	++	+

Nota: os símbolos de “+” indicam maior retracção

Da análise do quadro anterior verifica-se que, na argamassa padrão, designada como A2 (caL : areia), os provetes sujeitos a cura seca (HR=50% e T=20°C – cura S) e a cura húmida (HR=95% e T=20°C – cura H) apresentaram um valor de retracção semelhante e superior à cura padrão (HR=65% e T=20°C).

Comparado as diferentes curas da argamassa A3 (caL+ MK : areia), verifica-se que os provetes da cura H apresentaram uma retracção mais elevada. Tal facto não era espectável, uma vez que, num ambiente saturado, a água demora mais tempo a sair de dentro dos poros da argamassa e, quando tal acontece, a argamassa já poderá encontra-se suficientemente endurecida para não retrair [Faria, 2004].

Na argamassa A4* (capF : areia), constata-se que os provetes da cura S apresentam uma maior retracção em relação às restantes curas. Neste caso era espectável a obtenção deste valor pois, ao contrário da cura H, a água sai do interior dos poros da argamassa com maior rapidez, logo a argamassa terá tendência a ter uma maior retracção.

Para a argamassa A5 (capF + MK : areia), os provetes sujeitos a cura seca e a cura padrão apresentam um valor de retracção superior às restantes curas.

Analisando agora a diferença entre argamassas sujeitas ao mesmo tipo de cura, verifica-se que as argamassas na cura S revelam, de um modo geral, maior retracção

no molde comparativamente com as restantes. As argamassas sujeitas à cura padrão revelaram-se muito coerentes entre espécies de cal utilizada, sendo as constituídas por cal em pasta as que apresentaram tendência para maior nível de retracção. Todos os provetes sujeitos a cura com maior teor de CO₂ não apresentam retracção visível no molde. No processo de cura H, todas as argamassas se mostraram bastante idênticas entre si, com a excepção da argamassa A5, em que o nível de retracção foi inferior.

Dos resultados obtidos parece ressaltar que os provetes de argamassas com cal em pó apresentam menor retracção no molde que os de cal em pasta. Mais evidente parece ser que a substituição parcial da cal aérea, de qualquer dos tipos utilizados, por metacaulino contribui, para uma redução da retracção no molde.

5.3.2. AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Como referido em 4.4.2, a profundidade de carbonatação foi avaliada com recurso ao método da pulverização com uma solução de fenolftaleína numa superfície de corte. Os ensaios foram na generalidade efectuados aos 30, 60, 90 e 120 dias de idade dos provetes.

Aos 30 dias de idade nenhum a dos provetes das argamassas se encontravam carbonatados, excepto os provetes que se encontravam na cura C, que já apresentavam sinais do processo de carbonatação se ter iniciado e já estar num estado bastante avançado (embora tivessem sido desmoldados bastante mais tarde que os restantes e só a partir dessa altura todas as suas superfícies passassem a ter contacto com o ambiente da câmara). Na argamassa A5C, após aspersão com a solução de fenolftaleína, todas as fatias dos provetes se apresentaram como carbonatadas (não alteraram a sua coloração), com excepção de um pequeno veio na face superior das fatias. Este fenómeno também aconteceu na argamassa A4*C, mas com a diferença que o veio acompanhava toda a periferia da fatia, em vez de ser só na face superior. Tal facto poderá ter acontecido devido à elevada rapidez de difusão do CO₂ na periferia dos provetes, não tendo estes tempo para carbonatar devidamente [Houst, 1993]. Nas argamassas A2C e A3C, na altura da aspersão com a fenolftaleína, dava a entender

que as fatias dos provetes já estavam totalmente carbonatadas (sem alteração da cor), mas passados 10 minutos apresentavam um tom cor-de-rosa claro. Optou-se, assim, por considerar a profundidade de carbonatação, não no instante após a aspersão com a solução de fenolftaleína, mas sim, passados 10 minutos.



Figura 36 – Carbonatação aos 30 dias da argamassa A4*C



Figura 37 – Carbonatação aos 30 dias da argamassa A2C

Constatou-se que, as argamassas de cal em pó tiveram comportamentos iguais nos ensaios de carbonatação aos 30 dias e as de cal em pasta tiveram comportamentos semelhantes entre elas.

Dos 30 para os 60 dias da cura C, não existiu uma grande evolução na carbonatação das argamassas; apenas a A5C já tinha terminado o processo de carbonatação, enquanto as restantes mantiveram-se inalteradas. Tal facto pode dever-se a não ter ocorrido uma evolução significativa na formação de cristais de carbonato de cálcio resultantes da carbonatação no caso das argamassas A2 e A4*. No caso da A3, em que para além dos cristais de carbonato de cálcio, também deve ter havido uma evolução da formação de silicatos de cálcio hidratados, resultantes da reacção pozolânica, podem ter ocorrido alterações do PH e dessa forma o ensaio não ser efectivo para avaliar a carbonatação. Para as curas padrão, seca e húmida a evolução da carbonatação nas argamassas A2, A3, A4* e A5 mantém-se inalterada em relação aos 30 dias de cura.

Aos 90 dias de idade, as argamassas A2C, A3C e A4*C já tinham terminado o seu processo de carbonatação. As argamassas de cal em pó da cura padrão apresentaram um ligeiro incremento no seu estado de carbonatação, verificando-se

que em volta das fatias existia 1mm carbonatado. Pelo contrário, as argamassas de cal em pasta, mantiveram-se inalteradas em relação ao ensaio dos 60 dias. Para as argamassas A2S e A3S a evolução na carbonatação foi ligeiramente superior à cura padrão, sendo a medida, em volta das fatias, já carbonatada de 2 mm. Nas argamassas A4*S, A5S, A2H, A3H, A4*H e A5H, mais uma vez não houve evolução no estado da carbonatação.

Aos 120 dias de idade já não foi efectuado o ensaio de carbonatação às argamassas que se encontravam na cura C, uma vez que o seu processo já estava concluído aos 90 dias de cura. Para as argamassas A2 e A3 na cura padrão, o incremento do estado de carbonatação foi de mais 1 mm em relação ao ensaio anterior. As argamassas A4* e A5, não sofreram nenhuma evolução dos 90 para os 120 dias de cura. Na cura seca, as argamassas A2S, A3S, A4*S e A5S, mantiveram-se inalterada em relação ao estado de carbonatação aos 90 dias de idade. O mesmo se verificou para a cura húmida.

Os resultados obtidos com os provetes nas curas padrão, seca e húmida ficam de algum modo surpreendentes, revelando uma velocidade de carbonatação muito lenta, comparativamente a resultados obtidos por outros autores [Faria, 2004]

5.3.3. AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Os ensaios do módulo de elasticidade dinâmico foram efectuados, tal como descrito em 4.4.3., aos 60 dias de idade para cada argamassa e condição de cura. Previamente, os provetes foram colocados numa estufa ventilada a 60°C durante 24 horas, tempo que se revelou suficiente para atingir massa constante.

No Quadro 12 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico (E), de cada argamassa/condição de cura respectivo desvio padrão e o número de provetes ensaiados¹.

O módulo de elasticidade dinâmico dá uma indicação relativamente à deformabilidade das argamassas e às suas resistências mecânicas. Não interessam valores muito elevados, reveladores de argamassas muito rígidas.

A Figura 38 mostra, graficamente, de uma forma global, o módulo de elasticidade dinâmico das diferentes argamassas e condições de cura.

Quadro 12 – Módulo de elasticidade dinâmico E aos 60 dias, desvio-padrão e provetes

<i>Argamassas</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>N.º provetes ensaiados</i>	<i>E (60d) [MPa]</i>
A2	A2S	2	2671 ± 10
	A2	3	2627 ± 42
	A2C	2	5028 ± 227
	A2H	3	2412 ± 98
A3	A3S	3	3023 ± 123
	A3	3	2822 ± 71
	A3C	3	3691 ± 504
	A3H	3	3194 ± 76
A4*	A4*S	3	1529 ± 29
	A4*	2	1455 ± 4
	A4*C	3	4587 ± 179
	A4*H	3	1232 ± 43
A5	A5S	3	2153 ± 52
	A5	3	2132 ± 61
	A5C	3	4518 ± 147
	A5H	3	2167 ± 86

¹ O facto de, por vezes, não terem sido ensaiados 3 provetes deve-se a danos ocorridos num dos provetes.

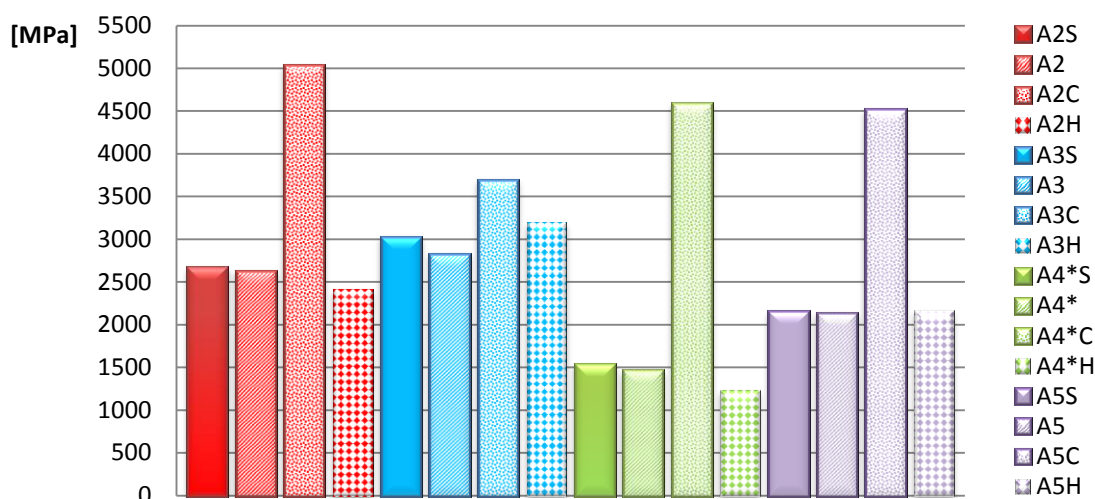


Figura 38 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias de idade das argamassas

Passando-se a fazer uma análise mais refinada de cada argamassa e condição de cura, apresentam-se de seguida os respectivos gráficos.

Na Figura 39 e Figura 40 apresentam-se os valores de E das argamassas respectivamente A2 e A3.

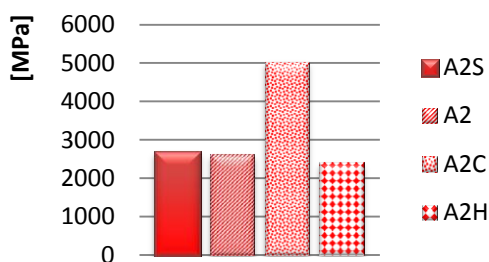


Figura 39 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A2

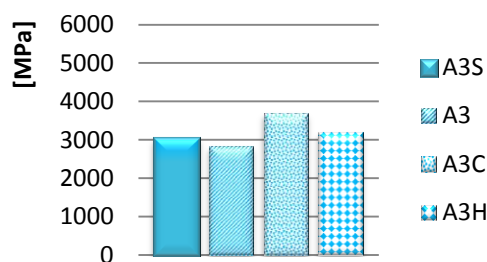


Figura 40 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A3

A visualização gráfica dos resultados permite verificar que os provetes sujeitos a cura com maiores níveis de dióxido de carbono, no caso da argamassa A2 têm um notável destaque do E relativamente às restantes condições de cura, não revelando

estas grandes diferenças entre si. Os valores de E de A2C, embora à primeira vista pudessem ser considerados demasiado elevados¹ para argamassas de revestimentos com 60 dias de idade, para idades mais avançadas poderão ser adequados. Uma vez que os ensaios foram realizados aos 60 dias de idade é expectável que especialmente os valores das argamassas com curas diferentes da C ainda venham a aumentar com o passar do tempo².

Relativamente à argamassa A3, verifica-se que novamente os provetes sujeitos à cura na câmara de carbonatação tiveram o valor mais elevado do módulo de elasticidade; no entanto, a diferença para as restantes condições de cura não é tão evidente como no caso da argamassa anterior. Uma vez que a argamassa A3 tem na sua constituição metacaulino, já era espectável que os valores do E fossem superiores aos da argamassa A2 de cal em pó sem metacaulino, o que se verifica para todas as condições de cura, excepto para a cura com teor mais elevado de CO₂. Tal facto pode ter explicação pela presença de maior teor de CO₂ acelerar a carbonatação, que confere endurecimento as argamassas puras de cal, mas em argamassas de cal com metacaulino conduzir à carbonatação rápida do hidróxido de cálcio, que deixa de estar apto a reagir com a pozolana. Sendo o metacaulino uma adição que confere propriedades hidráulicas às argamassas, através de uma reacção pozolânica que necessita da presença da água, poderá ser esta a explicação para o segundo valor mais elevado do módulo de elasticidade ser o da condição de cura em que a humidade relativa se encontrava nos 95%. Sendo a reacção pozolânica lenta, os ensaios de determinação do E aos 60 dias de idade podem não traduzir um eventual acréscimo do E com a idade da argamassa com metacaulino. No entanto, os valores de E de todas as argamassas A3 revelam-se adequados para argamassas para revestimentos.

¹ Com o aumento do teor em CO₂ procurou-se simular, através da aceleração da carbonatação, argamassas com idades avançadas (6 meses, 1 ano, 2 anos,...).

² Segundo Veiga, et al. [2010] para argamassas de revestimento com 90 dias de idade os valores recomendados para o E estarão entre os 2000 e 5000 MPa.

Apresentam-se de seguida a Figura 41 e Figura 42 para uma melhor interpretação dos valores de E das argamassas A4* e A5.

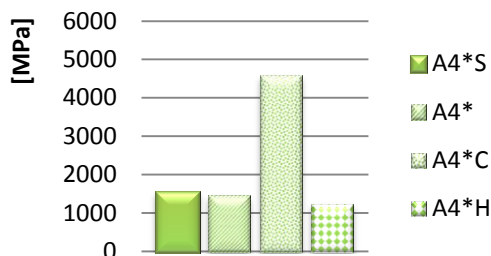


Figura 41 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A4*

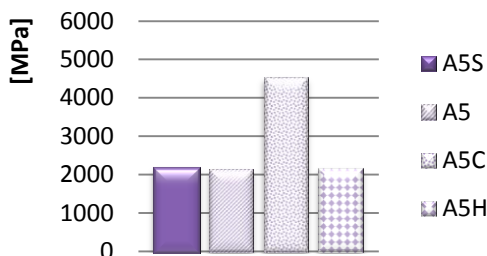


Figura 42 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias da argamassa A5

Para estas argamassas de cal em pasta, verifica-se que o E da cura seca e da cura padrão são muito próximos, sendo o da cura húmida, no caso da argamassa A4* o que apresenta um valor de módulo de elasticidade menor. No entanto todos estes módulos de elasticidade mostram-se muito baixos em relação ao da cura com 5% de CO₂, que mais uma vez se destaca pelo seu elevado valor.

Analogamente às argamassas com cal em pó verifica-se que nas argamassas com cais em pasta a adição do metacaulino tem influência positiva nos valores do módulo de elasticidade dinâmico, sendo os valores sempre superiores comparativamente às argamassas sem metacaulino.

Aprofundando o estudo dos valores do módulo de elasticidade, analisa-se e compara-se de seguida a influência das diferentes condições de cura entre as argamassas.

Na Figura 43 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmicos de todas as argamassas submetidas a cura seca.

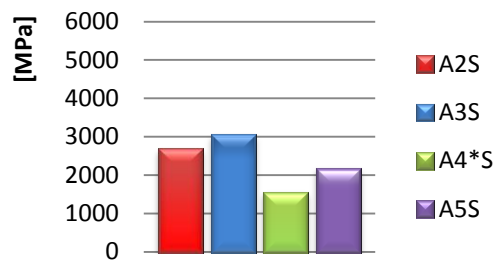


Figura 43 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura seca

Verifica-se que os provetes que têm como base o ligante em pasta apresentam menores valores de E, sendo o decréscimo mais evidente na argamassa sem adição de metacaulino. Já nas argamassas de cal em pó, embora a diferença do E não seja tão relevante, a adição de metacaulino também revela um valor de E mais elevado. Todos os valores registados se revelam adequados para argamassas para revestimentos segundo os ensaios realizados por Veiga et al. [2010], considerando a existência de 30 dias de diferença entre ensaios.

Na Figura 44 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmicos de todas as argamassas submetidas a cura padrão.

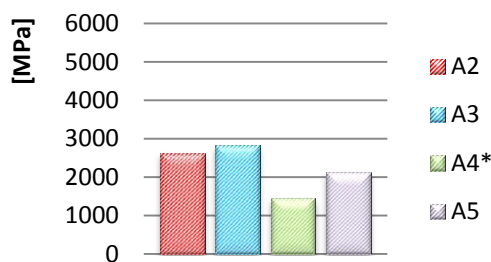


Figura 44 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura padrão

À semelhança da cura seca, as argamassas da cura padrão tiveram o mesmo comportamento. No entanto, os provetes na cura padrão revelam valores ligeiramente inferiores aos da cura seca, mas adequados para aplicação em revestimentos.

Na Figura 45 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmicos de todas as argamassas submetidas a cura com teor superior de CO₂.

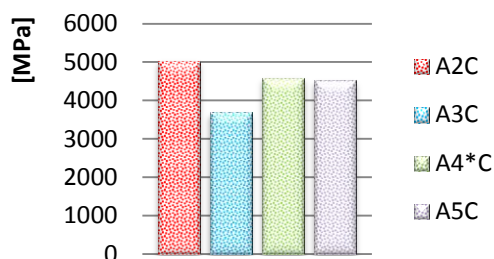


Figura 45 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura com CO₂

Ao contrário das curas anteriores, a argamassa A3C é a que revela um menor valor de E para esta condição de cura, revelando-se a argamassa A2C a que apresenta um módulo de elasticidade dinâmico mais elevado. Nas argamassas de cal em pasta, os valores de E foram muito semelhantes. Todas as argamassas submetidas a cura com teor elevado de CO₂ registam valores potencialmente elevados de E para aplicação em revestimentos, mas interessa reter o facto destas argamassas, nesta condição de cura, simularem idades mais avançadas de carbonatação.

Na Figura 46 apresentam-se os módulos de elasticidade dinâmicos de todas as argamassas submetidas a cura húmida.

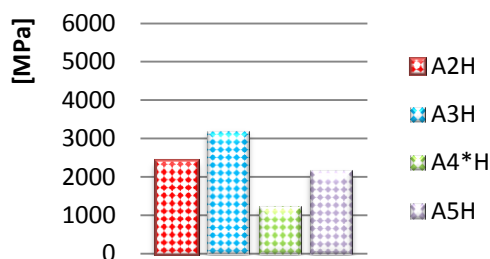


Figura 46 – Módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias das argamassas sujeitas à cura húmida

Para a cura húmida, mais uma vez o padrão, registado na cura seca e padrão, se repete e a argamassa A4*H é a que apresenta um menor valor de E, seguindo-se da A5 em que o valor não é muito inferior ao da A2H, destacando-se a argamassa A3H com o valor mais elevado do E. No entanto, todas registam valores tendencialmente adequados para aplicações em revestimentos, considerando a idade dos provetes.

Considerando os valores de E também indicativos das resistências mecânicas das argamassas constata-se a contribuição da adição de metacaulino para o incremento dessas resistências aos 60 dias (excepto no caso da cura C, por razões referidas anteriormente), o que se revela muito positivo neste tipo de argamassas com base em cal aérea.

5.3.4. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

As resistências mecânicas são, de todos os factores que influenciam a durabilidade das argamassas uns dos mais importantes. Por isso, em muitos estudos experimentais a resistência à tracção por flexão em três pontos e a resistência à compressão são geralmente estudadas. São também um dos factores que podem por em causa a capacidade das argamassas para efectivamente protegerem os suportes (se demasiado elevadas).

Os ensaios para a determinação da resistência à tracção por flexão, R_t , decorreram aos 60 dias de idade da cura tal como descrito 4.4.4.. O Quadro 13 apresenta os valores médios do ensaio para cada argamassa/condição de cura, o respectivo desvio padrão e o número de provetes em que foram realizados.

A Figura 47 traduz os valores de resistência à tracção por flexão em três pontos, de uma forma gráfica, das diferentes argamassas e condições de cura.

Quadro 13 – Resistência à tracção por flexão, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados

Argamassas	Tipo de cura	N.º provetes ensaiados	R_t (60d) [MPa]
A2	A2S	3	$0,2 \pm 0,1$
	A2	3	$0,2 \pm 0,0$
	A2C	3	$0,8 \pm 0,1$
	A2H	3	$0,2 \pm 0,0$
A3	A3S	3	$0,3 \pm 0,0$
	A3	3	$0,3 \pm 0,1$
	A3C	3	$0,7 \pm 0,1$
	A3H	3	$0,3 \pm 0,0$
A4*	A4*S	3	$0,2 \pm 0,0$
	A4*	2	$0,2 \pm 0,0$
	A4*C	3	$0,7 \pm 0,1$
	A4*H	3	$0,2 \pm 0,0$
A5	A5S	3	$0,3 \pm 0,1$
	A5	3	$0,2 \pm 0,0$
	A5C	3	$0,8 \pm 0,0$
	A5H	3	$0,4 \pm 0,01$

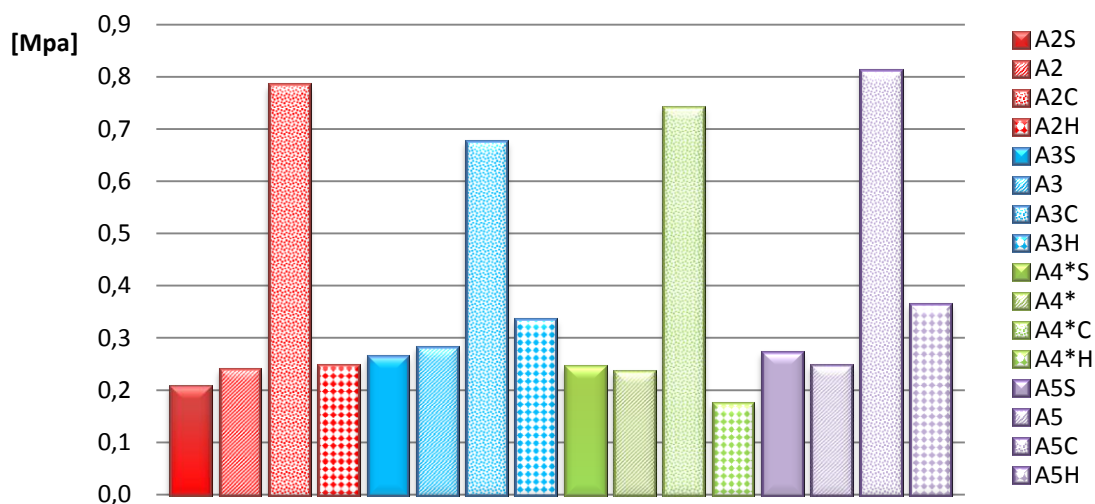


Figura 47 – Resistência à tracção aos 60 dias de idade das argamassas diversificadas

Fazendo uma análise particular de cada argamassa e condição de cura, apresenta-se de seguida as respectivas figuras.

Nas Figura 48 e Figura 49 analisam-se as argamassas A2 e A3.

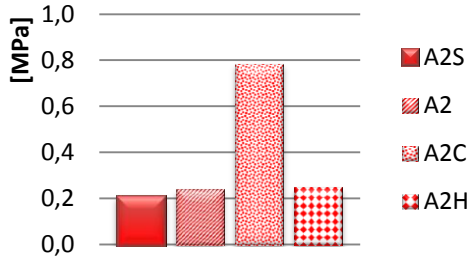


Figura 48 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A2

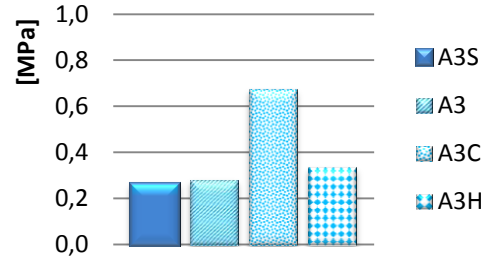


Figura 49 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A3

Os valores de R_t das argamassas A2 e A3 não registam grande diferença entre os diversos processos de cura; apenas a cura C se destaca relativamente às restantes. No entanto, verificasse que a substituição parcial de cal em pó por metacaulino contribui para o aumento da resistência à tracção. Comparando os valores obtidos para o ensaio de R_t aos 60 dias, com os valores recomendados por Veiga et al. [2010] para os 90 dias de idade¹, considera-se que estas argamassas são adequadas para aplicação em revestimento (uma vez que o incremento dos 60 para os 90 dias não deverá ser tão elevado de forma a passar os 0,7 MPa).

Passando para a análise das argamassas de cal em pasta, apresentam-se de seguida na Figura 50 e Figura 51 os resultados obtidos.

¹ Segundo Veiga, et al. [2010], para argamassas de revestimento, aos 90 dias de idade, os valores de resistência à tracção por flexão em três pontos, devem-se situar entre os 0,2 e os 0,7 MPa.

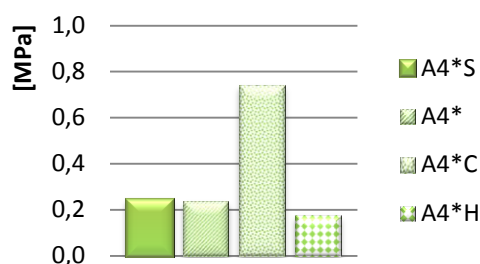


Figura 50 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A4*

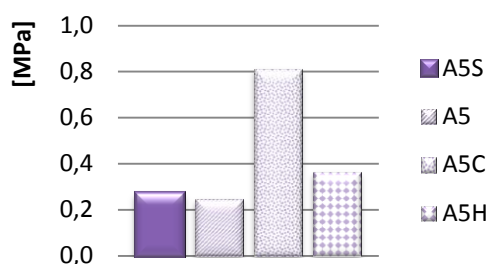


Figura 51 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias, argamassa A5

Os valores da resistência à tracção das argamassas com cal em pasta são muito semelhantes aos das argamassas com cal em pó. Há uma tendência para o aumento da resistência à tracção com a introdução do metacaulino, particularmente sensível para a cura húmida.

Os resultados da Figura 52 à Figura 55 permitem analisar e comparar as diferentes argamassas, por tipo de cura a que foram sujeitas.

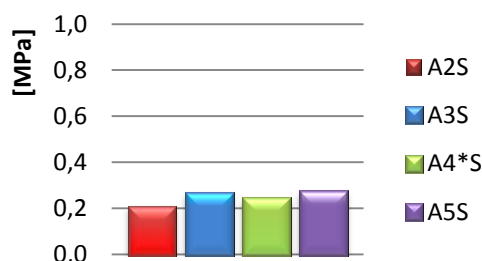


Figura 52 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura seca

Da análise da Figura 52, constata-se que as argamassas com incorporação de metacaulino têm um ligeiro acréscimo no valor da resistência à tracção quando em cura seca, apresentando a argamassa A2, o menor valor de R_t . No entanto todas elas se revelam com potencial para aplicação em revestimentos.

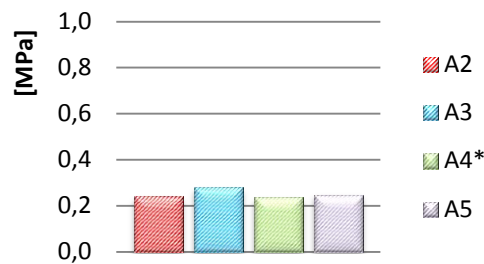


Figura 53 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura padrão

Do processo de cura seca para a cura padrão (Figura 53), não se registaram alterações sensíveis, tendo apenas a argamassa A5 diminuído ligeiramente a sua resistência. Mais uma vez esta condição de cura se revela adequada para argamassas de aplicação em revestimentos.

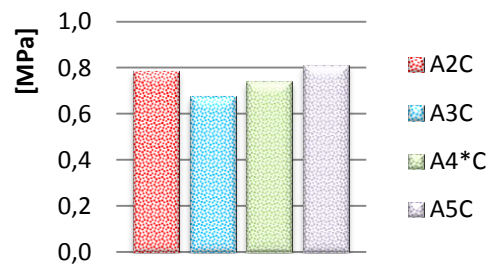


Figura 54 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura CO₂

É notável o elevado acréscimo nos valores da R_t que as argamassas sofreram quando sujeitas à cura com elevado teor de dióxido de carbono (Figura 54), comparativamente com os processos de cura anteriores. Verifica-se que não existe uma coerência nas argamassas com incorporação de metacaulino, pois nas argamassas com cal em pó a argamassa A3C é a que apresenta o menor valor de R_t , ao contrário da com cal em pasta, que de entre todas as argamassas é a que tem o valor mais elevado da resistência à tracção.

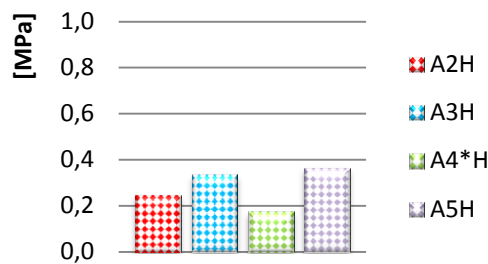


Figura 55 – Resistência à tracção por flexão aos 60 dias – cura húmida

Para o processo de cura húmida (Figura 55) novamente se repete aproximadamente o padrão obtido para a cura S e padrão. A argamassa que apresenta um menor valor de R_t , é a de cal em pasta sem adição de metacaulino, contrariamente à sua parceira A5H, que apresenta o maior valor de resistência de entre as restantes argamassas. No entanto este processo de cura tem uma apreciação positiva para aplicação em argamassas de revestimento

Constata-se a contribuição da adição de metacaulino para o incremento da resistência à tracção aos 60 dias (excepto no caso da cura C em argamassa com cal em pó). Este aumento deve ficar a dever-se à ocorrência da reacção pozolânica, em paralelo com a reacção de carbonatação. O acréscimo da resistência à tracção revela-se muito positivo com vista a um melhor comportamento das argamassas e nomeadamente da sua resistência à fendilhação.

5.3.5. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Tal como descrito em 4.4.5., a caracterização da resistência à compressão das diversas argamassas foi realizada aos 60 e aos 120 dias de idade. As metades dos provetes utilizadas foram as provenientes do ensaio de resistência à tracção, tendo-se aos 60 dias utilizado uma metade de cada provete e aos 120 dias utilizado a metade restante. No intervalo de tempo entre os 60 e 120 dias de idade, uma vez que o processo de cura dentro das câmaras já tinha sido interrompido, as metades dos

provetes foram acondicionadas numa sala em que a humidade relativa se apresentava nos $50 \pm 5\%$ e a temperatura nos $30 \pm 3^\circ\text{C}$. Estas condições não são particularmente benéficas para o desenvolvimento do processo de cura, devido à falta de humidade para o transporte do dióxido de carbono e para a reactividade pozolânica; no entanto, na generalidade existiu um acréscimo médio de 50% nos valores da R_c dos 60 para os 120 dias nas cais em pó e de 35% nas cais em pasta.

No Quadro 14, encontram-se os valores médios da resistência à compressão aos 60 e aos 120 dias das diferentes argamassa/condição de cura e respectivos desvios-padrão, bem como o número de provetes ensaiados.

Quadro 14 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, desvio padrão e n.º de provetes ensaiados

<i>Argamassas</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>N.º provetes ensaiados aos 60 e 120</i>	<i>R_{c60d} [MPa]</i>	<i>R_{c120d} [MPa]</i>
A2	A2S	3/3	$0,4 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,0$
	A2	3/3	$0,5 \pm 0,0$	$0,9 \pm 0,0$
	A2C	3/3	$1,4 \pm 1,0$	$1,2 \pm 0,2$
	A2H	3/3	$0,4 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$
A3	A3S	3/3	$0,5 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,1$
	A3	3/3	$0,4 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,0$
	A3C	3/3	$1,2 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,2$
	A3H	3/3	$0,7 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,0$
A4*	A4*S	3/3	$0,3 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,0$
	A4*	3/3	$0,3 \pm 0,0$	$0,6 \pm 0,0$
	A4*C	3/3	$1,3 \pm 0,4$	$1,7 \pm 0,2$
	A4*H	0/3	-	$0,5 \pm 0,0$
A5	A5S	3/3	$0,5 \pm 0,0$	$0,9 \pm 0,0$
	A5	3/3	$0,5 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,1$
	A5C	3/3	$1,6 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,2$
	A5H	3/3	$0,7 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,0$

Nota – Não foi possível registar R_{c60} da argamassa A4*H devido a falta de sensibilidade do aparelho.

Fazendo uma análise global, e comparando os resultados com os recomendados por Veiga et al. [2010]¹ todas as argamassas se revelam adequadas para aplicação em revestimentos.

Na Figura 56 são apresentados os valores de resistência à compressão das diferentes argamassas, desta forma consegue-se ter uma melhor percepção do incremento dos resultados dos 60 e 120 dias de idade.

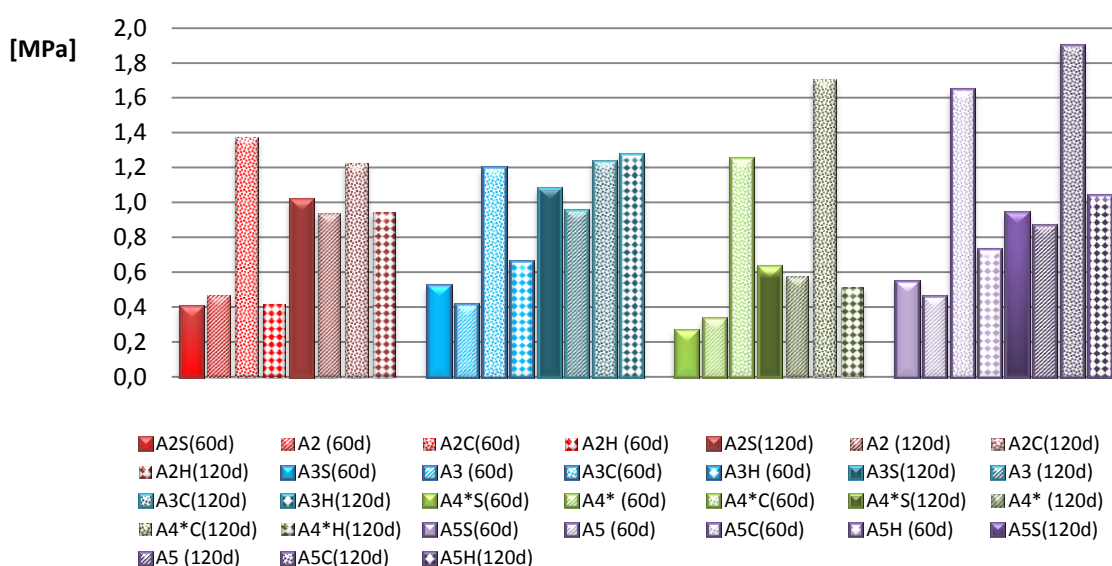


Figura 56 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias de idade das argamassas diversificadas

A Figura 57 e Figura 58 facilitam a análise dos resultados da R_c aos 60 dias e aos 120 dias de idade das argamassas.

¹ Segundo Veiga, et, al. [2010], os valores de resistência à compressão para argamassas de revestimento, aos 90 dias de idade, devem-se situar entre os 0,4 e 2,5 MPa.

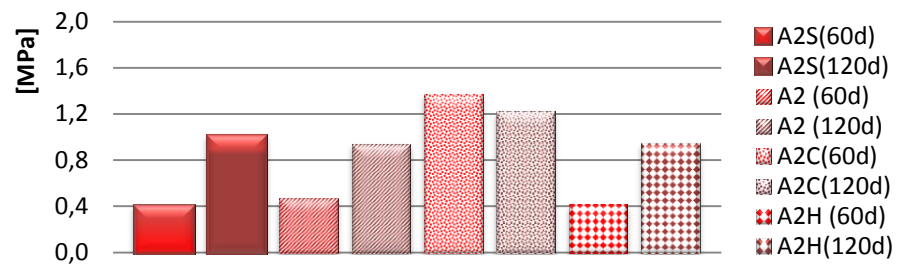


Figura 57 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A2

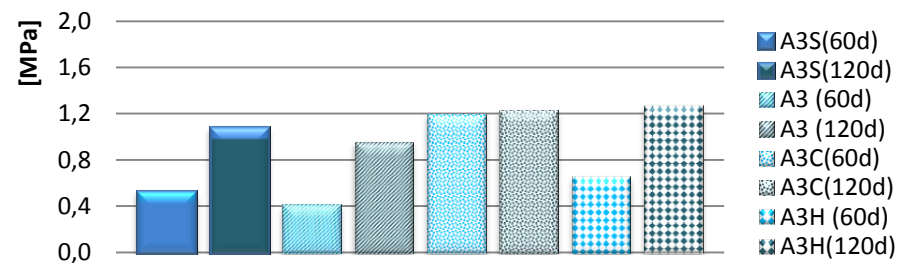


Figura 58 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A3

Por análise dos valores obtidos para as argamassas A2 e A3 com cal em pó, verifica-se que, quer para a argamassa A2 (Figura 57), quer para a argamassa A3 (Figura 58), na maioria das curas existiu um acréscimo do valor da resistência à compressão dos 60 para os 120 (com exceção da cura C na argamassa de cal em pó sem adição de metacaulino, em que o valor de R_c diminuiu na ordem dos 15%).

Em termos de evolução com a idade da argamassa com cal em pó: relativamente à cura S, a argamassa A2 apresentou um acréscimo de 60% de R_c dos 60 para os 120, enquanto a argamassa A3 de 55%, para a cura padrão, a argamassa A3 com adição de metacaulino, demonstrou ter uma subida do valor da resistência de 54%, contra 47% da argamassa A2, por fim, para a cura húmida dos 60 para os 120 dias de cura a argamassa A3 subiu 62% no valor da R_c e a argamassa A2, 53%.

Os valores mais elevados das argamassas de cal em pó aos 60 dias são registados para as argamassas na cura C; no entanto, aos 120 dias as argamassa nas restantes curas têm tendência a registar valores de algum modo semelhantes. Especialmente a idade mais avançada, regista-se um acréscimo de R_c com a adição de metacaulino.

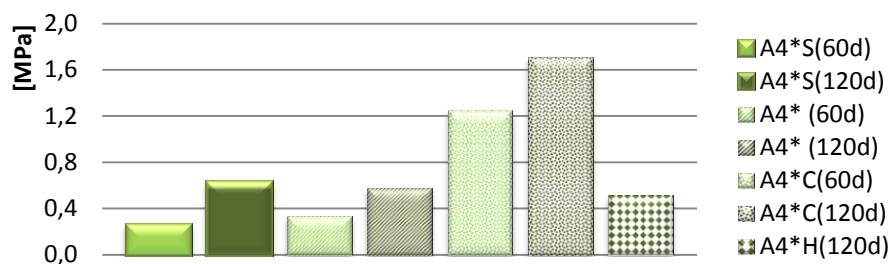


Figura 59 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A4*

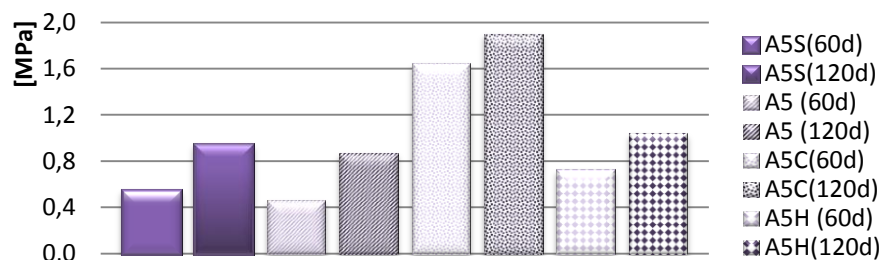


Figura 60 – Resistência à compressão aos 60 e 120 dias, argamassa A5

Nas argamassas com cais em pasta sem e com metacaulino (Figura 59 e Figura 60), verifica-se um acréscimo da R_c com a idade dos provetes. Comparativamente com as cais em pó, o acréscimo nos valores da R_c dos 60 para os 120 dias foi menor, variando entre os 24% e os 46% dependendo da condição de cura.

Os valores mais elevados das argamassas de cal em pasta são registados pelas argamassas na cura C. O acréscimo da R_c com a adição de metacaulino nas

argamassas com cal em pasta é mais significativo que o registado com as argamassas de cal em pó.

5.3.6. AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA AO SUPORTE E VISUALIZAÇÃO DA FISSURAÇÃO NOS TIJOLOS

A avaliação da aderência ao suporte e a visualização da fissuração nos tijolos revestidos com as argamassas A2 e A3 foi efectuada aos 205 e 203 dias de idade respectivamente, após cura padrão, de acordo com o descrito em 4.4.6.

Da inspecção visual efectuada, verifica-se que, a olho nu, não são perceptíveis fissuras quer na argamassa A2, quer na argamassa A3. Já na inspecção efectuada com a lupa de fendas, são perceptíveis microfissuras com dimensões de 0,02mm em ambas as argamassas. No entanto trata-se de painéis com apenas 20x30 cm da área.

Para o ensaio de aderência, apresentam-se no Quadro 15 os valores da tensão em MPa e respectivo desvio padrão para as argamassas A2 e A3.

Verifica-se que a tensão de aderência apresenta valores baixos, sendo o valor para a argamassa com adição de metacaulino ligeiramente superior. No entanto, e tratando-se de argamassas fundamentalmente de reparação para edifícios antigos, o substrato onde estas foram aplicadas não é o mais indicado, uma vez que é bastante regular e pouco poroso, não reflectindo as mesmas condições de aderência que se teria caso as argamassas fossem aplicadas sobre suportes ou argamassas antigas, (uma vez que seriam, em princípio, substratos mais rugosos e porosos).

Verifica-se que na maioria dos ensaios a zona de rotura ocorreu na interface argamassa/tijolo, sendo poucos os casos em que a rotura ocorreu também parcialmente pela zona da argamassa.

Quadro 15 – Tensão de aderência das argamassas com cal aérea em pó, desvio-padrão e n.º de ensaios

<i>Tipo de argamassa</i>	<i>Tijolo</i>	<i>N.º ensaio</i>	<i>Tensão (MPa)</i>	<i>Tensão Média (MPa)</i>
A2	1	1	0,016	0,015±0,007
		2	0,008	
		3	0,02	
		4	0,008	
	2	1	0,028	
		2	0,016	
		3	0,016	
		4	0,008	
		5	0,016	
	A3	1	1	
2			0,016	
3			0,016	
4			0,032	
5			0,02	
2		1	0,008	
		2	0,024	
		3	0,02	
		4	0,028	
		5	0,02	

5.3.7. AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Como referido em 4.4.7. a avaliação da absorção de água por capilaridade foi efectuada aos 120 dias de idade, para 3 meios provetes de cada argamassa e condição de cura. Os meios provetes utilizados resultaram do último ensaio de profundidade de carbonatação. Antes do início do ensaio, os meios provetes foram colocados em estufa a 60°C durante 24 horas, tempo que se revelou suficiente para obtenção de massa constante. Ao contrário dos meios provetes utilizados para o ensaio de resistência à compressão a esta idade, estes mantiveram-se no processo de cura, dentro das respectivas câmaras climáticas, até aos 120 dias de idade.

Este ensaio permite traçar as curvas de absorção de água por capilaridade, através das quais se pode calcular o valor assintótico e o coeficiente de capilaridade. Este ensaio é de extrema importância quando se pretende avaliar o comportamento das argamassas face à água e, por exemplo, em relação à resistência ao gelo-degelo.

Na Figura 61 à Figura 64 apresenta-se a evolução da absorção capilar ao longo do tempo de ensaio. Os valores do coeficiente de capilaridade e do valor assintótico são os apresentados no Quadro 16.

De forma a dar uma perspectiva global dos valores assintóticos e dos coeficientes de capilaridade, apresentam-se na Figura 65, em forma de gráfico, os valores obtidos.

A análise dos resultados, será efectuada através da verificação do andamento das curvas de absorção capilar, após as quais se fará uma análise mais detalha em termos de valor assintótico e de coeficiente de capilaridade.

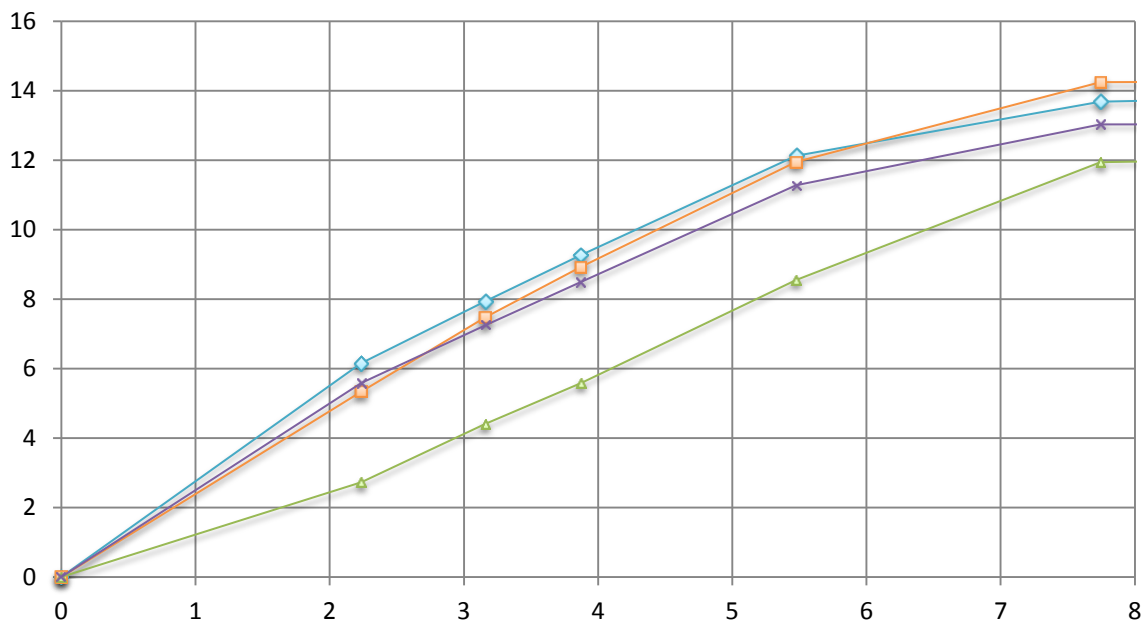
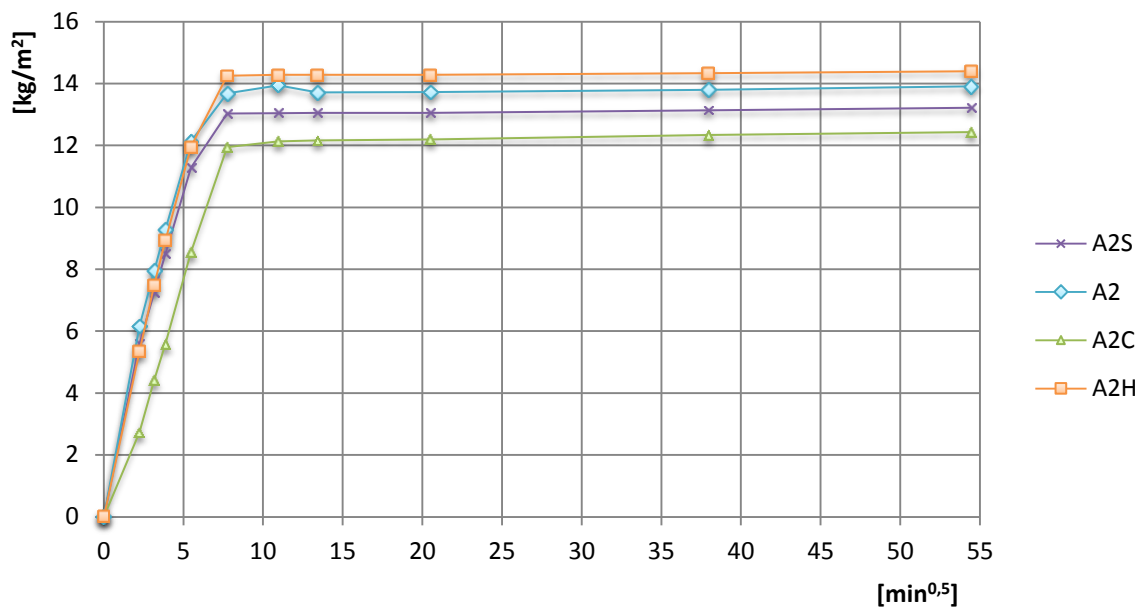


Figura 61 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A2

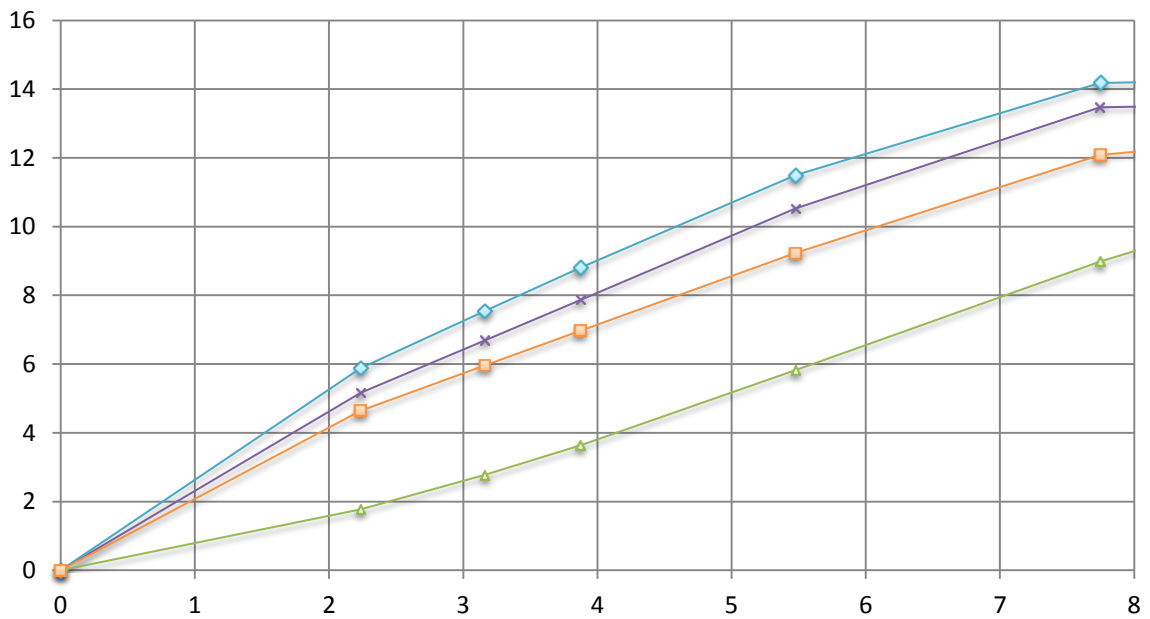
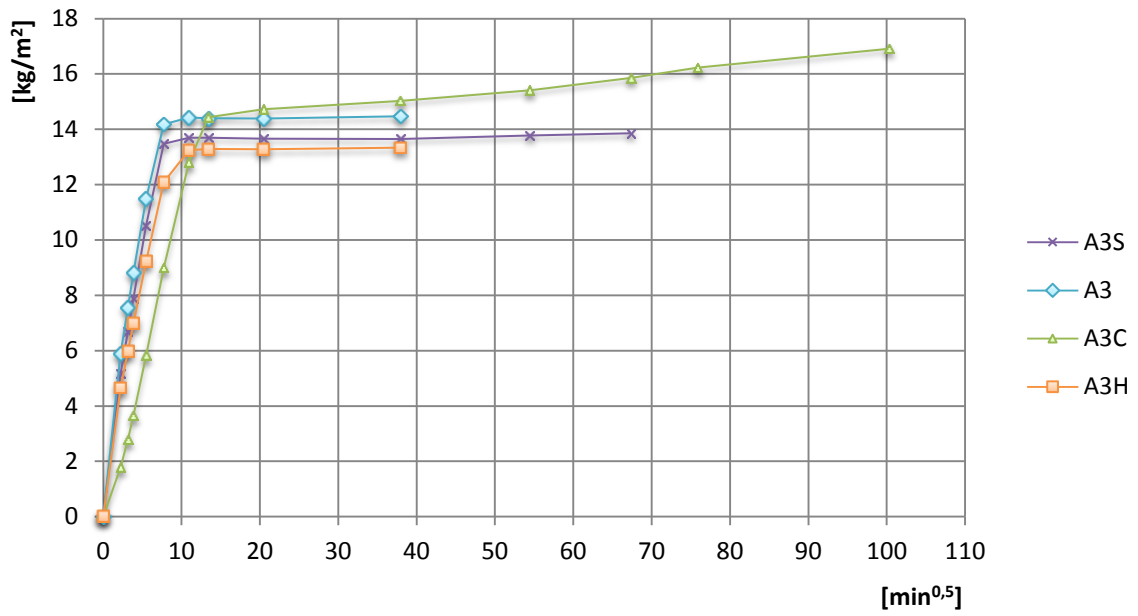


Figura 62 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A3

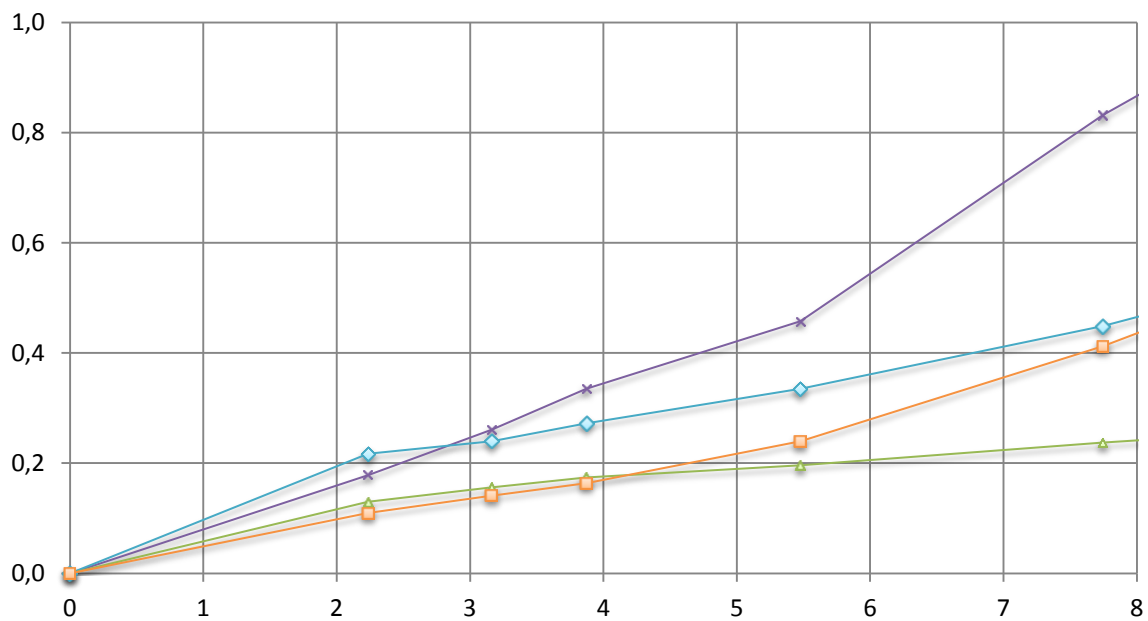
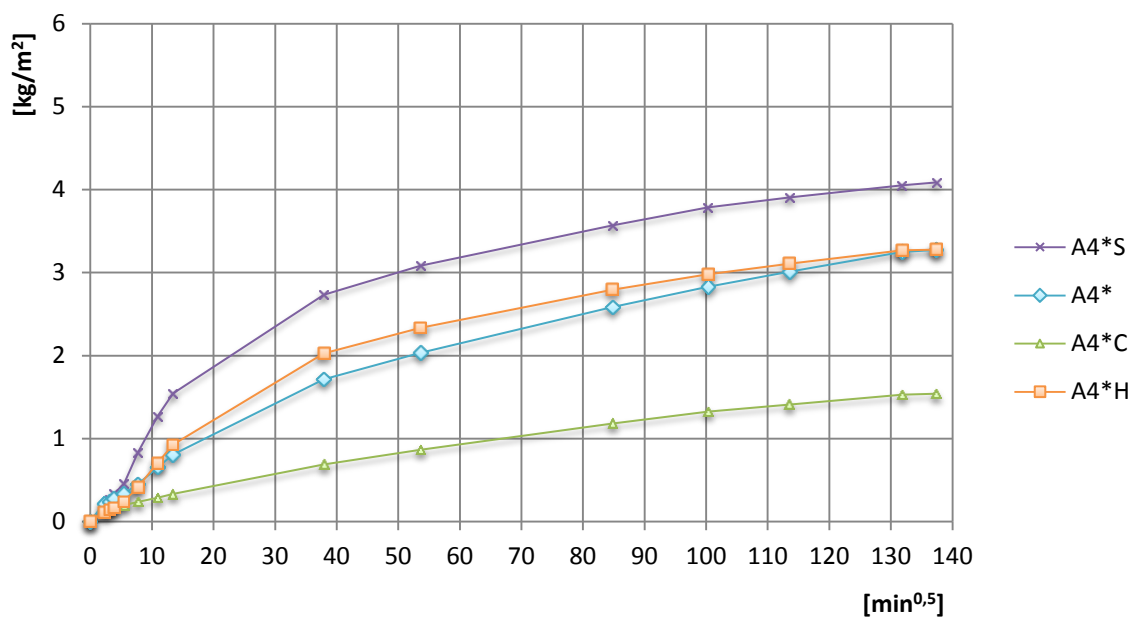


Figura 63 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A4*

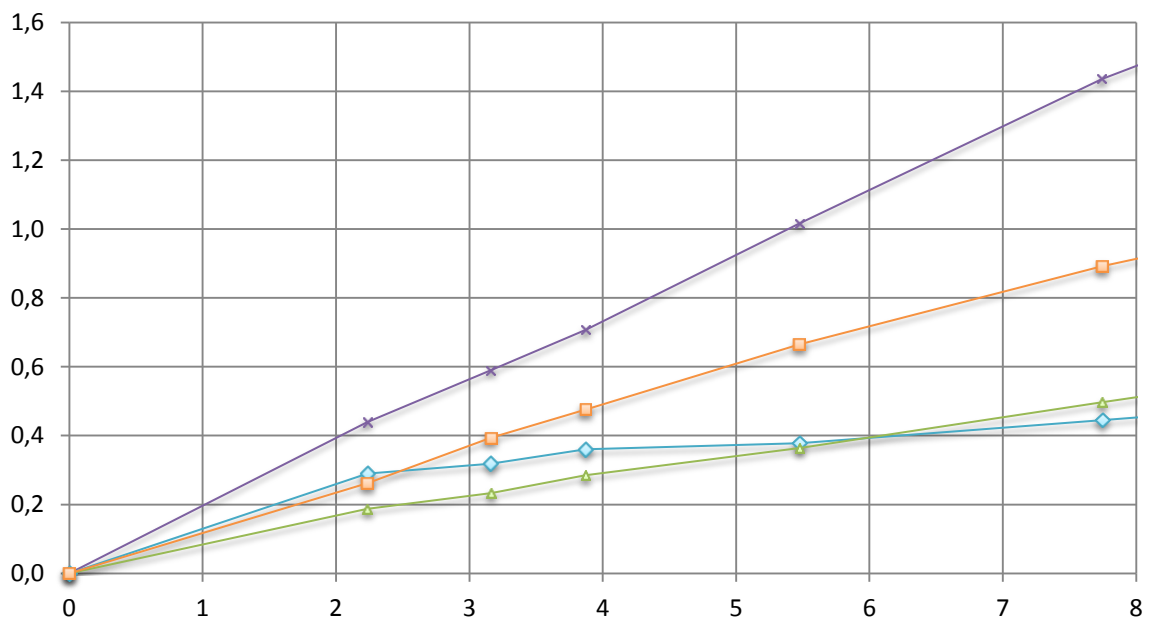
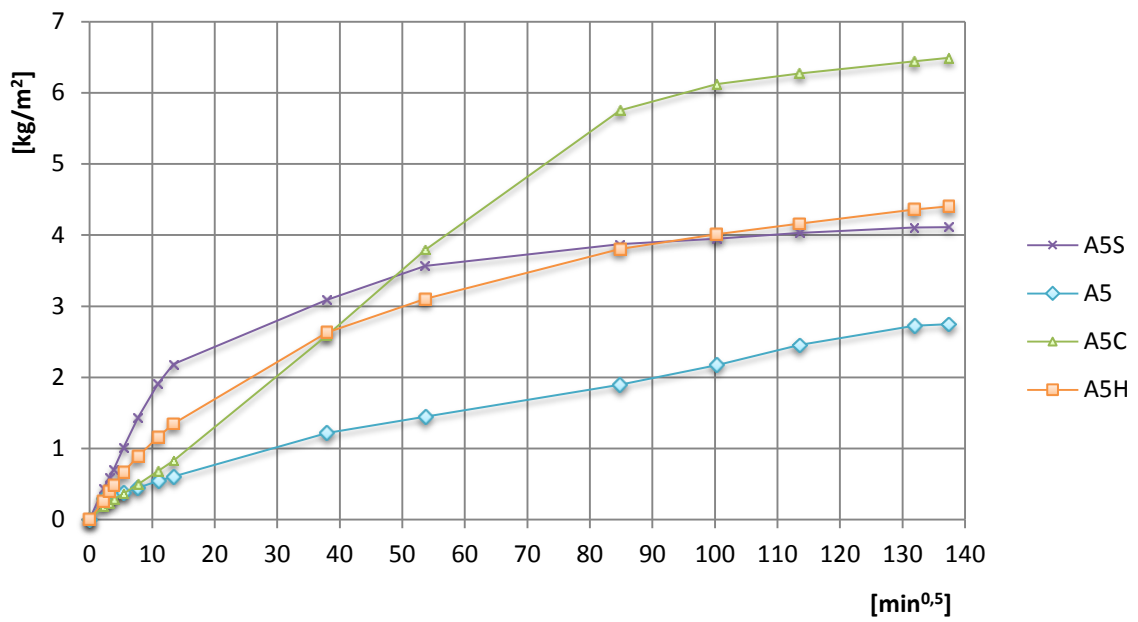


Figura 64 – Curvas de absorção de água por capilaridade aos 120 dias e pormenor da 1ª hora de ensaio da argamassa A5

Quadro 16 – Valor assintótico e coeficiente de capilaridade aos 120 dias de idade das argamassas

Argamassas	Tipo de cura	VA [kg/m²]	CC [kg/m².min^{1/2}]
A2	A2S	13,21	1,14
	A2	13,90	1,20
	A2C	12,42	1,17
	A2H	14,40	1,32
A3	A3S	13,85	1,07
	A3	14,47	1,12
	A3C	16,91	0,96
	A3H	13,33	0,92
A4*	A4*S	4,08	0,09
	A4*	3,27	0,03
	A4*C	1,54	0,01
	A4*H	3,28	0,05
A5	A5S	4,11	0,13
	A5	2,74	0,13
	A5C	6,49	0,03
	A5H	4,40	0,07

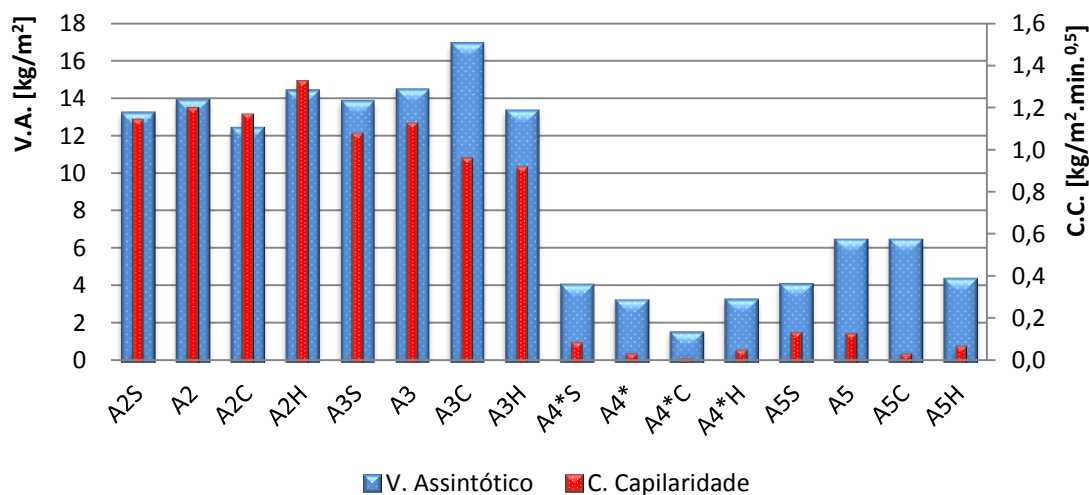


Figura 65 – Absorção de água por capilaridade das argamassas aos 120 dias de idade

Analisando os dados do CC para os 120 dias de idade das argamassas ensaiadas, e comprando com os valores para os 90 dias de idade de Veiga et al. [2010]¹, considera-se que as argamassas de cal em pó satisfazem os requisitos para aplicação em revestimentos e que as argamassas de cal em pasta devido à constituição hidrófuga da pasta de cal, apresentam valores muito interessantes deste ponto de vista.

Da análise efectuada à Figura 61 e Figura 62 (argamassas de cal em pó), verifica-se que a absorção capilar é muito rápida inicialmente, registando-se de seguida um ritmo notavelmente mais lento até à fase de estabilização. Esta explicação reside no facto da água penetrar primeiro nos poros de maior dimensão e em seguida nos poros de menor dimensão e nos poros cujo acesso depende destes mais pequenos [Rato, 2006]. Para as argamassas de cal em pasta (Figura 63 e Figura 64), esta absorção inicial não foi tão elevada, uma vez que estamos perante argamassas com pasta de cal hidrófuga. Como referido anteriormente, foi a realização deste ensaio que permitiu chegar à conclusão que se estava perante cal hidrófuga, a partir do momento em que se verificou que a absorção capilar no período inicial estava a ser muito mais lenta, comparativamente com os provetes da cal em pó.

O troço das curvas de absorção capilar em que o processo se faz de uma maneira mais rápida vai permitir calcular o coeficiente de capilaridade. Para a maioria das argamassas este período decorre na primeira hora de ensaio daí se terem apresentado anteriormente, de uma forma mais pormenorizada, os gráficos neste período de tempo. No entanto, é de salientar que para as argamassas A2 e A3 este troço inicial é definido pelos primeiros 30 minutos para os diferentes tipos de cura, com excepção da argamassa A3 sujeita à cura C, em que este primeiro troço é definido pelas primeiras 3 horas de ensaio. Para a argamassa A4* verifica-se que a absorção capilar ocorre mais rapidamente nas primeiras 2 horas de ensaio, enquanto na A5,

¹ Segundo Veiga et al. [2010], para argamassas de revestimento os valores do coeficiente de capilaridade aos 90 dias de idade, situam-se entre 1,0 e 1,5 kg/m².min^{0,5}.

consoante o processo de cura a que foram sujeitos os provetes, os tempos de rapidez de absorção capilar são distintos. Registam-se, para os provetes sujeitos à cura padrão, os primeiros 5 minutos de ensaio; para os provetes sujeitos à cura húmida e à cura com CO₂, os primeiros 15 minutos; e por fim, para os provetes na cura seca, os primeiros 60 minutos de ensaio.

O troço das curvas de absorção capilar em que se verifica a estabilização dos valores é o que permite calcular o valor assintótico, ou seja, quando a velocidade de absorção de água pelos provetes começa a ser muito reduzida e eles estão prestes a atingir a saturação. Para a argamassa A2 verifica-se que, independentemente da condição de cura, este processo se estabelece decorridas 48 horas de ensaio, enquanto na argamassa A3 o processo de cura já tem influência na altura do início da estabilização regista-se, para a cura padrão e para cura húmida, ao fim de 24 horas, enquanto na cura seca se regista ao fim de 72 horas e na cura CO₂, decorridas 168 horas. Para as argamassas de cal em pasta, como era espectável, os tempos de estabilização são muito superiores aos das argamassas com cal em pó, registando-se para as argamassas A4* e A5, independentemente das condições de cura, aproximadamente 314 e 137 horas respectivamente.

Segundo Almeida [2008], também existe um troço de transição entre o período em que a absorção capilar se faz de uma forma muito rápida e o período em que se está a atingir a estabilização dessa absorção. Verifica-se que este troço é bastante linear entre os quatro processos de cura nas argamassas A2, A4* e A5, mas já apresenta alguma disparidade na argamassa A3.

Da Figura 66 à Figura 69 permite uma análise mais detalhada dos CC (barras estreitas) e VA (barras largas) das argamassas/condição de cura.

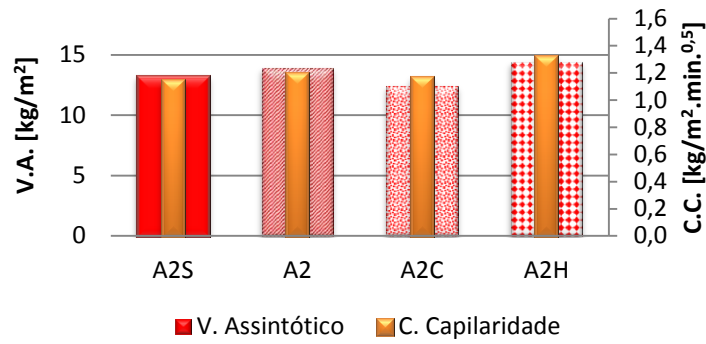


Figura 66 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A2

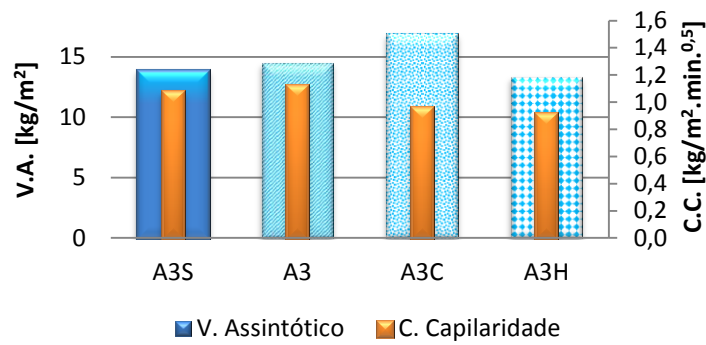


Figura 67 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A3

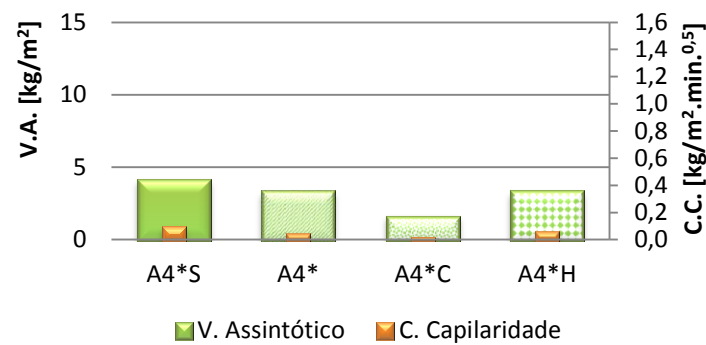


Figura 68 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A4*

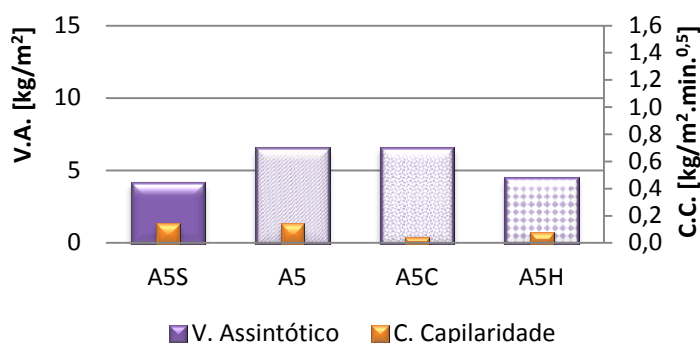


Figura 69 – Coeficiente de Capilaridade e Valor Assintótico da Argamassa A5

Através da análise dos resultados, verifica-se que para a argamassa A2 os provetes submetidos ao processo de cura húmica apresentam um maior valor de CC, seguindo a mesma tendência para o VA.

Para a argamassa A3 sujeita à cura com mais CO₂, o CC e o VA já não se relacionam da mesma forma, comparativamente com a argamassa anterior na cura húmida, uma vez que o menor valor de coeficiente de capilaridade corresponde ao maior valor assintótico. Verifica-se também que na argamassa A3C e A3H, embora a velocidade com que ocorre a absorção inicial (CC) seja semelhante, os valores assintóticos (quantidade de água absorvida por área de contacto) são muito distintos.

É de salientar a tendência positiva de mais lenta absorção de água das argamassas de cal em pó com metacaulino.

Relativamente às argamassas de cal em pasta, verifica-se que os coeficientes de capilaridade são bastantes reduzidos, o que faz com que na argamassa A4*C, através do gráfico não se consiga distinguir o seu valor. Tanto na argamassa A4* como na argamassa A5, verifica-se que os provetes sujeitos à cura seca apresentam um valor mais elevado para o CC. Regista-se uma tendência para o acréscimo do CC com a adição de metacaulino nas argamassas com cal em pasta. Relativamente aos valores assintóticos, a argamassa de cal em pasta com incorporação de metacaulino apresenta valores superiores em relação à argamassa só de cal em pasta, sobretudo na cura

padrão e na cura com CO₂. Contudo, como se irá verificar no subcapítulo 5.3.9. as diferenças na estrutura porosa das argamassas não serão muito diferentes.

5.3.8. AVALIAÇÃO DA SECAGEM

Como referido no subcapítulo 4.1.3.8. os ensaios de secagem realizaram-se a seguir aos ensaios de absorção de água por capilaridade, pelo que as metades dos provetes utilizadas foram as mesmas. Durante este processo, os provetes foram acondicionados numa sala em que a temperatura estava na ordem dos $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ HR.

Na Figura 70, Figura 71, Figura 72 e Figura 73, apresentam-se os valores médios das curvas de secagem dos provetes das diferentes argamassas, consoante o processo de cura a que foram sujeitas, bem como, os valores referentes ao índice de secagem.

Da análise da Figura 70 da argamassa A2 de cal em pó sem metacaulino verifica-se que, independentemente da condição de cura, todos os provetes apresentaram um comportamento muito semelhante.

Para a argamassa A3 de cal em pó com adição de metacaulino (Figura 71), verifica-se que os provetes sujeitos ao processo de cura com teor mais elevado de CO₂ e cura seca tiveram um decréscimo mais acentuado do teor em água, comparativamente aos com cura húmida ou cura padrão, em que a secagem ocorreu de uma forma mais lenta.

Na argamassa A4* de cal em pasta sem adição de metacaulino (Figura 72), à semelhança da argamassa A2 (Figura 70), também apresenta uma relativamente grande coesão nos resultados, com excepção da argamassa sujeita à cura padrão, em que o tempo de secagem se prolongou por um período de tempo relativamente maior.

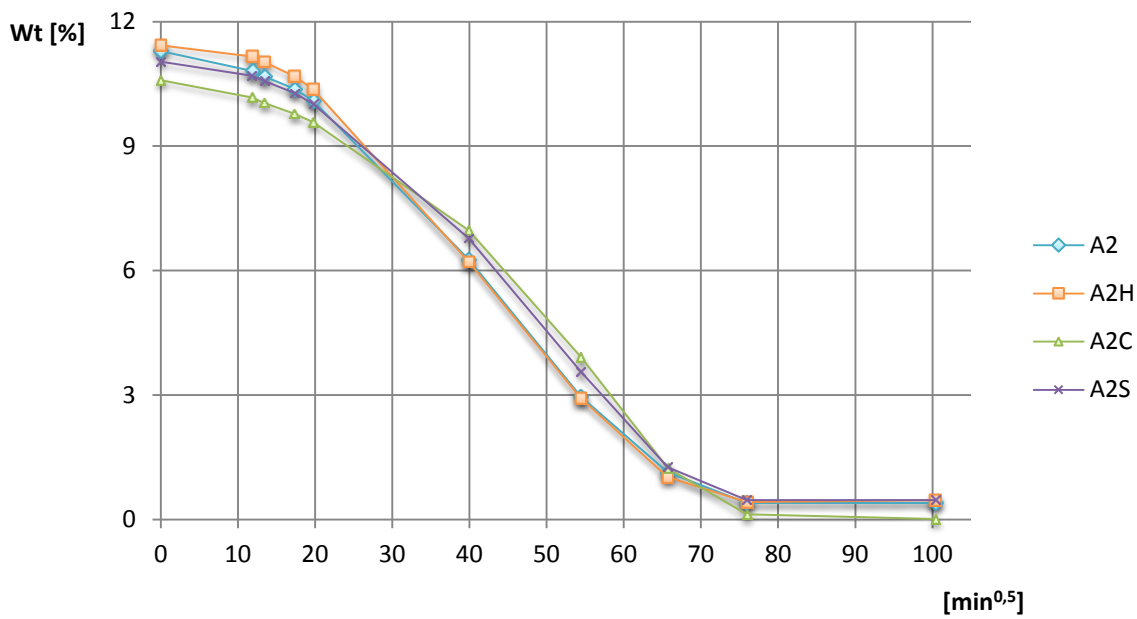


Figura 70 – Curvas de secagem da Argamassa A2

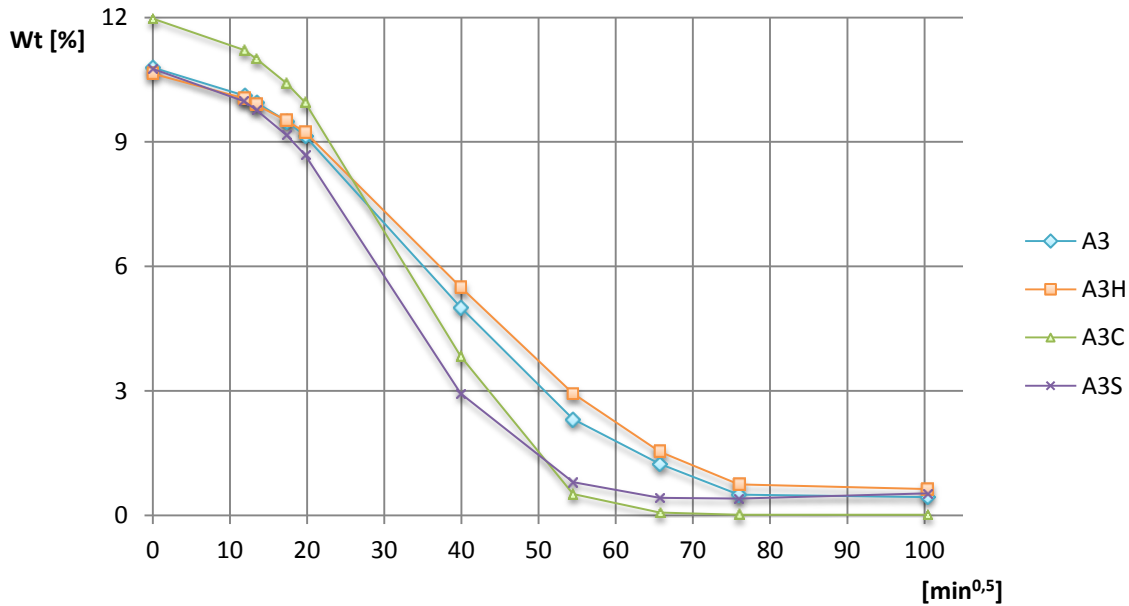


Figura 71 – Curvas de secagem da Argamassa A3

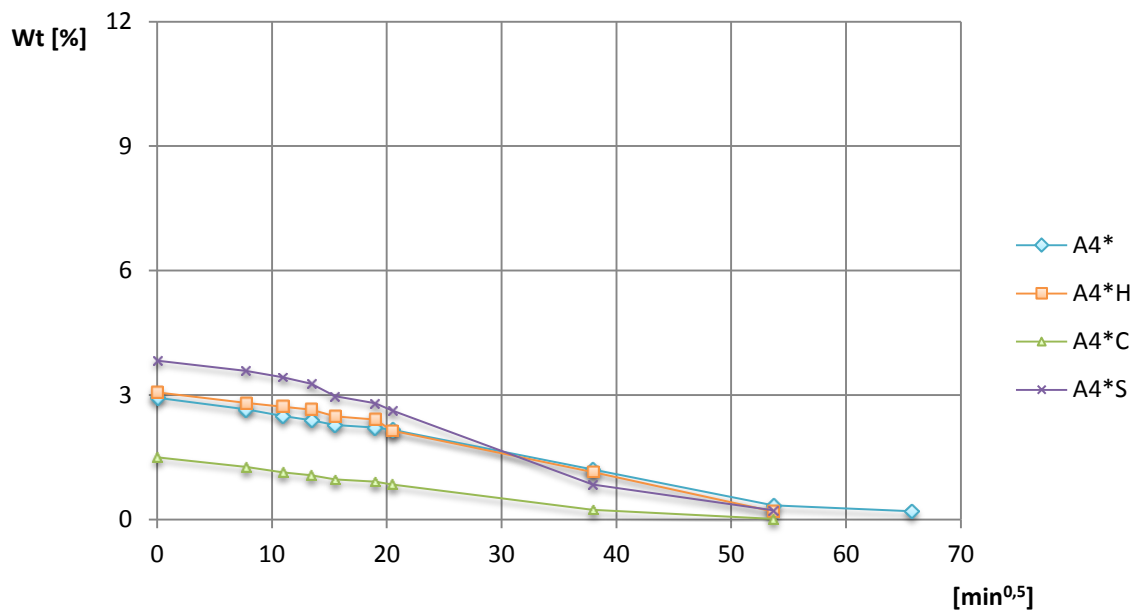


Figura 72 – Curvas de secagem da Argamassa A4*

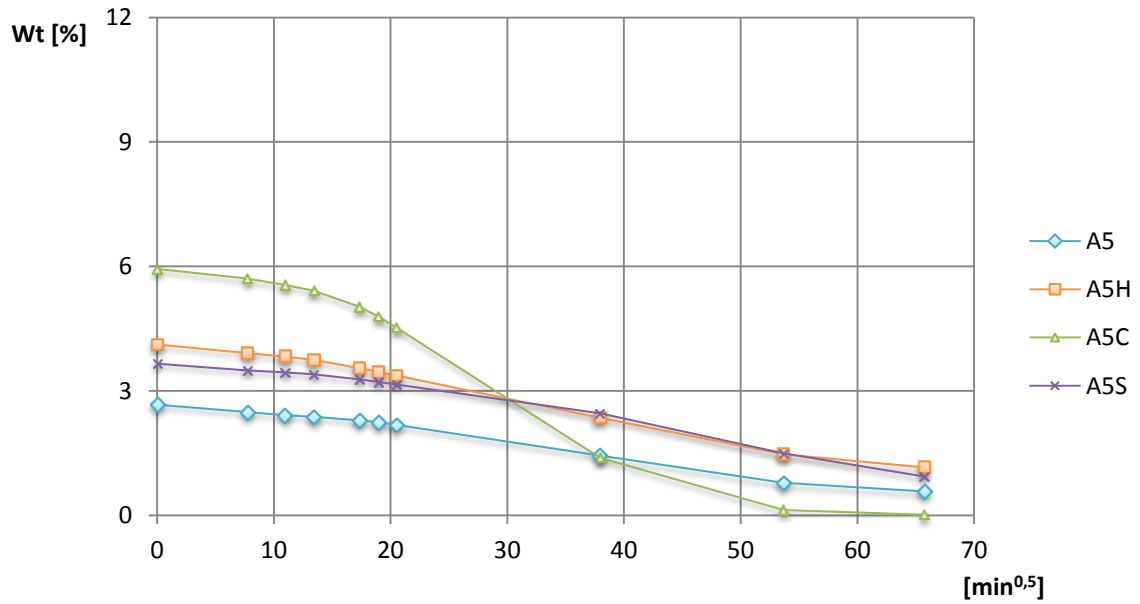


Figura 73 – Curvas de secagem da Argamassa A5

Para a argamassa A5 de cal em pasta com metacaulino (Figura 73), a cura com elevado teor de dióxido de carbono apresentou um maior decréscimo de teor em água, comparativamente com os restantes processo de cura, em que a secagem ocorreu de uma forma mais lenta e uniforme.

No Quadro 17, apresentam-se os valores do índice de secagem das diferentes argamassas. De registar que a secagem é tanto mais rápida e fácil quanto menor o índice de secagem.

Quadro 17 – Valor do índice de secagem e respectivo desvio padrão das argamassas

<i>Argamassas</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>I. Secagem</i>
A2	A2S	0,25 ± 0,04
	A2	0,23 ± 0,02
	A2C	0,24 ± 0,05
	A2H	0,23 ± 0,02
A3	A3S	0,15 ± 0,00
	A3	0,21 ± 0,01
	A3C	0,13 ± 0,00
	A3H	0,24 ± 0,03
A4*	A4*S	0,35 ± 0,04
	A4*	0,33 ± 0,02
	A4*C	0,27 ± 0,01
	A4*H	0,42 ± 0,06
A5	A5S	0,56 ± 0,04
	A5	0,47 ± 0,01
	A5C	0,25 ± 0,01
	A5H	0,51 ± 0,01

Da análise efectuada ao Quadro 17, verifica-se que as argamassas de cal em pasta secam mais lentamente do que as argamassas de cal em pó, não existindo a mesma relação entre os diferentes processos de cura para as argamassas com e sem metacaulino. Nas argamassas A2 e A5 os provetes sujeitos à cura seca apresentam os

maiores IS relativos; já nas argamassas A3 e A4* é a cura húmida que se destaca relativamente às restantes.

Embora as argamassas com cal em pasta tivessem tido um comportamento muito positivo face à absorção de água por capilaridade, face à secagem registam uma maior dificuldade comparativamente às argamassas de cal em pó, o que traduz que a água absorvida pela argamassa de cal em pasta ou que migra até ela terá mais dificuldade em ser libertada.

Nas argamassas de cal em pó regista-se uma maior facilidade de secagem com a introdução de metacaulino, o que é contrario ao registado com as argamassas de cal em pasta (a introdução de metacaulino dificulta ainda mais a secagem).

5.3.9. AVALIAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA E DA MASSA VOLÚMICA APARENTE

A caracterização da estrutura porosa das argamassas foi realizada através da determinação da porosidade aberta, de acordo com o procedimento descrito em 4.4.9., que permitiu avaliar o volume de poros presentes no interior das argamassas e que têm ligação com outros poros e ao exterior dos provetes, bem como, a sua massa volúmica aparente.

Apresentam-se, no Quadro 18 e na Figura 74, os valores médios e respectivos desvio-padrão da P_{ab} e da M_{vol} das diversas argamassas e condições de cura, salientando-se que este ensaio foi sempre feito sobre 3 amostras de provete para cada condição de cura.

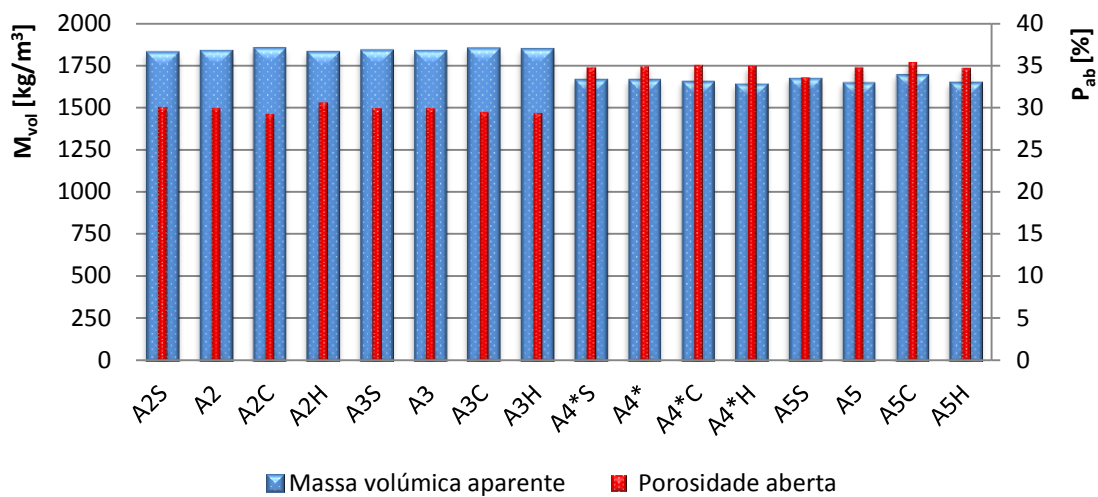


Figura 74 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente das argamassas diversificadas aos 120 dias de idade

Quadro 18 – Porosidade aberta/massa volúmica aparente aos 120 dias de idade

Argamassas	Tipo de cura	Porosidade aberta [%]	Mvol [kg/m ³]
A2	A2S	30 ± 0,2	1825 ± 8
	A2	30 ± 0,3	1833 ± 8
	A2C	29 ± 0,4	1848 ± 11
	A2H	31 ± 0,3	1825 ± 21
A3	A3S	30 ± 0,1	1835 ± 2
	A3	30 ± 0,2	1833 ± 6
	A3C	29 ± 0,3	1847 ± 8
	A3H	29 ± 0,2	1844 ± 7
A4*	A4*S	35 ± 0,4	1661 ± 3
	A4*	35 ± 0,1	1660 ± 3
	A4*C	35 ± 0,3	1649 ± 3
	A4*H	35 ± 1,0	1633 ± 19
A5	A5S	34 ± 0,1	1669 ± 2
	A5	35 ± 0,1	1642 ± 4
	A5C	35 ± 0,4	1689 ± 10
	A5H	35 ± 0,1	1644 ± 1

Relativamente à porosidade aberta e à massa volúmica aparente constatou-se que as argamassas de cal em pó são mais compactas que as de cal em pasta, uma vez que apresentam valores mais elevados de massa volúmica aparente e menor valor de porosidade aberta. Independentemente das condições de cura a que os provetes foram sujeitos, dentro do mesmo tipo de argamassa, os valores de P_{ab} foram bastante semelhantes entre si. Os valores da P_{ab} e da M_{vol} , são inversamente proporcionais entre si.

No entanto, este ensaio, com este tipo de argamassas, é muito sensível ao manuseamento dos provetes.

Uma vez que a cal em pasta utilizada é hidrófugada, ficam por estudar os comportamentos de argamassas de cal aérea em pasta não hidrófugada, comparativamente com os resultados da cal aérea em pó, como era o objectivo inicial desde trabalho, mas que infelizmente não pode ser cumprido por um erro no fornecimento da cal.

CAPÍTULO 6. DISCUSSÃO CRUZADA DOS RESULTADOS

Este capítulo tem por objectivo discutir os resultados, procurando interpretá-los por interligação entre os vários ensaios de caracterização das argamassas realizados no decorrer da presente dissertação. Procuram-se estabelecer analogias entre propriedades e características das argamassas, consoante o tipo de ligante aéreo adoptado e o tipo de cura a que foram submetidas.

Na Figura 75 apresentam-se, em forma de gráfico, os valores correspondentes do módulo de elasticidade dinâmico e da resistência à tracção aos 60 dias de idade.

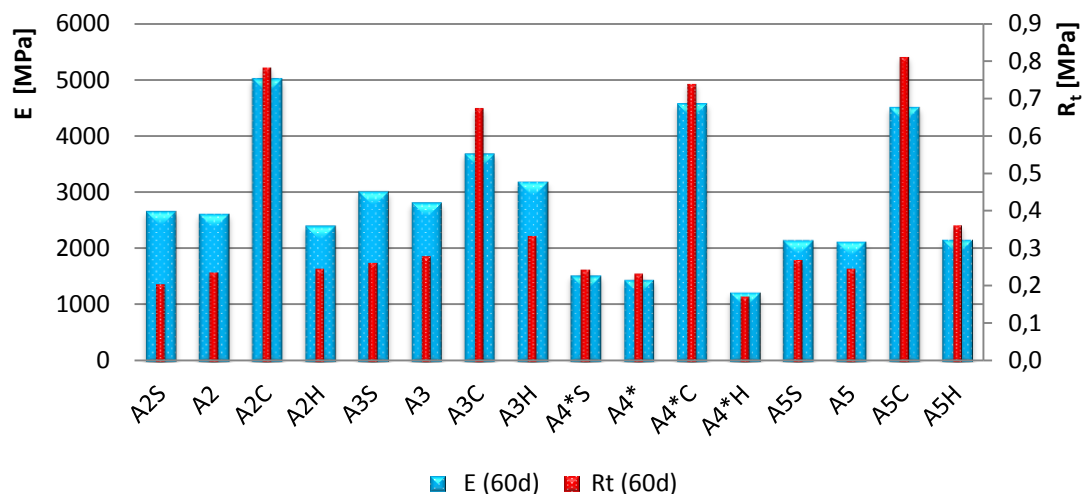


Figura 75 - Módulo de elasticidade dinâmico/resistência à tracção aos 60 dias de idade das argamassas

Estas duas características são importantes para as argamassas apresentarem um bom comportamento face à fendilhação. Por um lado interessam E não muito elevados mas, por outro lado, idealmente boas R_t .

Da análise efectuada à Figura 75, verifica-se que, embora as argamassas de cal em pasta apresentem geralmente mais baixos E que os das argamassas de cal em pó, registam valores de R_t já bastante aproximados, o que se revela positivo.

Quer no módulo de elasticidade dinâmico, quer na resistência à tracção por flexão em três pontos, verifica-se que a adição de metacaulino traduz-se num acréscimo positivo das resistências à tracção das argamassas.

Na Figura 76 apresentam-se os valores das resistências à tracção e à compressão das diversas argamassa aos 60 dias de idade.

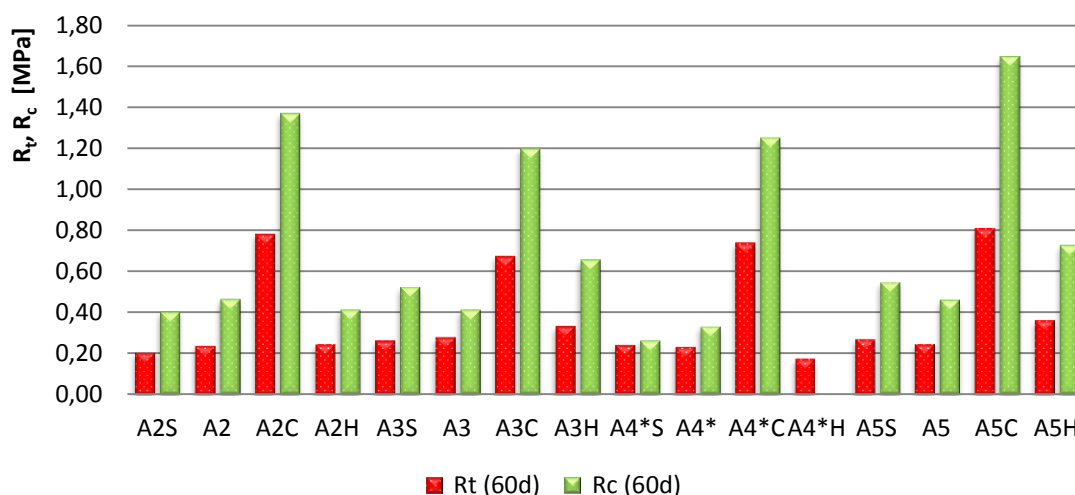


Figura 76 – Resistência à tracção/resistência à compressão das argamassas.

Da análise da Figura 76 verifica-se que, como era expectável, maiores resistências à tracção implicam maiores resistências à compressão aos 60 dias de idade, para todas as argamassas e todas as condições de cura.

No quadro 19, apresentam-se os valores dos quocientes entre a resistência à tracção e a resistência à compressão aos 60 dias de idade.

Quadro 19 – Quociente entre R_t e R_c aos 60 dias de idade

	Quociente entre R_t/R_c			
	A2	A3	A4*	A5
Cura S	0,51	0,50	0,93	0,50
Cura Padrão	0,51	0,68	0,70	0,54
Cura C	0,57	0,56	0,59	0,49
Cura H	0,60	0,51	-	0,50

Um quociente mais elevado entre a resistência à tracção e a resistência à compressão traduz supostamente uma maior deformabilidade das argamassas [Faria, 2004]. Para as argamassas de cal área com metacaulino este quociente é mais elevado na cura padrão. Já nas argamassas de cal aérea sem metacaulino só é possível avaliar a argamassa A2 (uma vez que na argamassa A4* não foi possível obter valores de R_c aos 60 dias para a cura H) apresentando a cura húmida o maior acréscimo no valor da relação entre R_t e R_c aos 60 dias. Argamassas com maior deformabilidade são melhores para aplicação em revestimentos uma vez que permitem otimizar as resistências às tensões de tracção sem transmitir esforços muito elevados aos suportes [Faria, 2004].

Na Figura 77 apresentam-se, em forma de gráfico, os resultados da porosidade aberta e da resistência à compressão das diferentes argamassas.

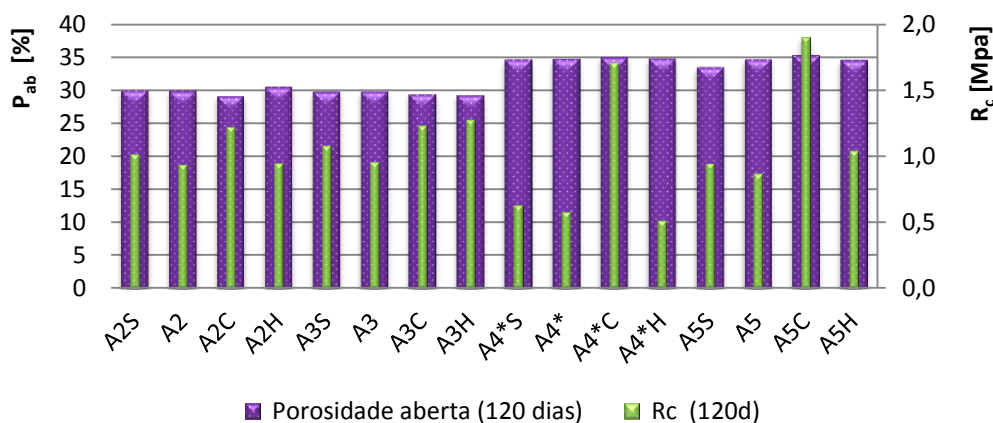


Figura 77 – Porosidade aberta/resistência à compressão das argamassas (120 dias)

Da análise efectuada à Figura 77, fazendo uma analogia entre as argamassas de cal em pasta e as de cal em pó, verifica-se que as argamassas de cal em pasta têm valores de P_{ab} mais elevados que os da cal em pó, o que pode justificar os mais baixos valores de R_c apresentados, (com excepção da cura C). O facto da P_{ab} ser inversamente proporcional à R_c justifica-se por argamassas menos porosas terem geralmente maior compactidade, logo, terem maior potencial para desenvolver resistências mecânicas mais elevadas. No entanto, revela-se a situação das elevadas resistências mecânicas das argamassas de cal em pasta com cura C, mesmo apresentando menor compactidade.

Na Figura 78 apresentam-se, em forma de gráfico, os resultados do índice de secagem e do coeficiente de capilaridade das diferentes argamassas.

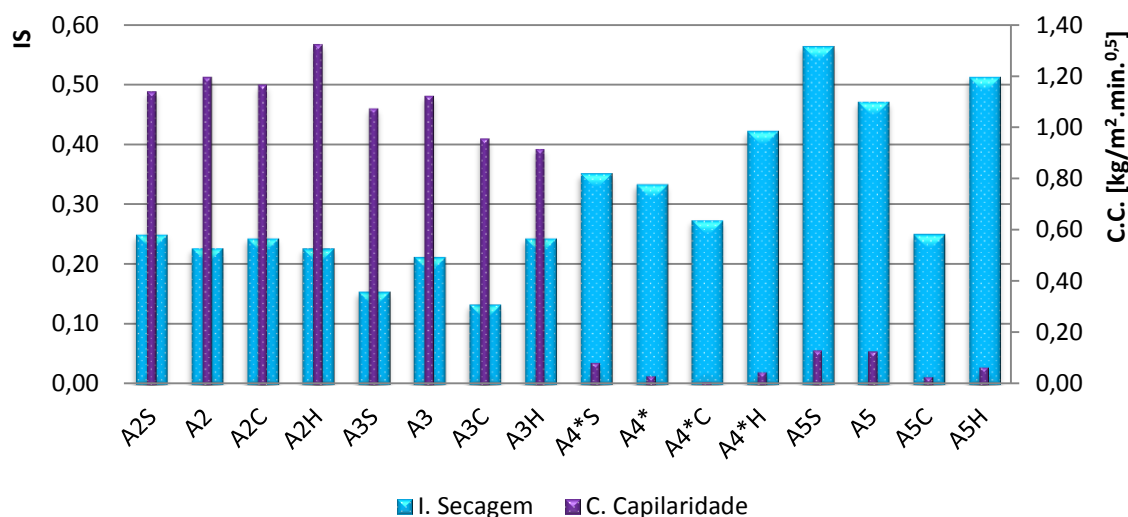


Figura 78 – Índice de secagem/coeficiente de capilaridade

Idealmente pretendem-se argamassa com baixo CC e baixo IS para ser mais lenta a absorção de água e mais rápida a secagem.

Da análise efectuada à Figura 78, verifica-se no caso das argamassas de cal em pasta (com e sem metacaulino) proporcionalidade directa entre CC e IS (menor CC ocorre nas argamassas com maior facilidade de secagem). Nas argamassas de

cal em pó sem metacaulino, verifica-se a proporcionalidade inversa entre CC e IS (argamassas com menor CC correspondem a argamassas com menor facilidade de secagem). Já nas argamassas de cal em pó com metacaulino, para curas que não a húmida, há proporcionalidade directa entre CC e IS (menor CC ocorre nas argamassas com maior facilidade de secagem); no caso da argamassa com cal em pó e metacaulino sujeitas a cura H, regista-se o menor CC de entre as argamassas com cal em pó, mas é uma das argamassas com cal em pó com maior dificuldade de secagem.

CAPÍTULO 7. CONCLUSÃO E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A campanha experimental elaborada no decorrer desta dissertação, destacou vários aspectos importantes relativamente às argamassas de cal aérea em pó e em pasta, com e sem adição de metacaulino, sujeitas a quatro tipos de cura distintos, permitindo adquirir novos conhecimentos nestas matérias. Sendo assim, julga-se importante realçar os seguintes aspectos:

- a boa trabalhabilidade das argamassas com base em cal aérea, mesmo com valores no ensaio da consistência por espalhamento não muito elevados.
- a dificuldade em avaliar a retração no molde na idade da desmoldagem dos provetes
- a inadequação da avaliação da profundidade de carbonatação com recurso à solução de fenolftaleína, uma vez que foi difícil, em certas argamassas e condições de cura, registar alterações de PH
- a boa deformabilidade das argamassas ensaiadas, expressa em termos do módulo de elasticidade dinâmico

Relativamente ao tipo de cal utilizada, realçam-se os seguintes aspectos:

- a porosidade mais elevada das argamassas de cal em pasta quando comparadas com as argamassas de cal em pó
- a baixa absorção de água por capilaridade das argamassas de cal em pasta hidrófugada mas a maior dificuldade de secagem destas argamassas, expressa por um mais elevado índice de secagem

Relativamente à influência das condições de cura, os aspectos mais importantes realçar são:

- a grande dificuldade de endurecimento inicial dentro do molde das argamassas sujeitas à cura com elevado teor de dióxido de carbono

- o elevado aumento na velocidade de carbonatação das argamassas sujeitas à cura C, uma vez desmoldados os provetes, quando comparadas com os restantes processos de cura
- o aumento das resistências mecânicas nas argamassas sujeitas à cura C, principalmente até aos 60 dias de idade.
- embora a condição de cura com elevado teor de CO₂ seja quase impossível de reproduzir em situações correntes de obras, este tipo de cura pode ser muito útil em trabalhos de investigação laboratorial para, após o processo de endurecimento inicial e desmoldagem, e através de um curto período de tempo em câmara de carbonatação, se poder acelerar a cura de provetes de argamassas de cal aérea; desta forma poder-se-á eventualmente fazer a caracterização das argamassas no estado endurecido ou preparar suportes para aplicação e caracterização de sistemas complementares por exemplo pinturas, com prazos mais curtos (que podem ser úteis no âmbito, por exemplo do projecto LimeContech), comparativamente aos processos de cura tradicionais, a partir do momento em que se conheça a correspondência entre a cura C acelerada e a idade da argamassa noutras condições de cura, e se tenha a certeza da cura C não conduzir a alterações da estrutura porosa comparativamente a argamassas com idades avançadas

No que se refere à incorporação de metacaulino nas argamassas, observa-se que:

- o aumento das resistências mecânicas quando a cal foi substituída parcialmente por metacaulino, apesar deste poder não ser muito reactivo (como apontam estudos ainda não publicados no âmbito do projecto Metacal), ou a proporção cal : metacaulino poder não ser a ideal

- embora se tenha verificado uma melhoria substancial nas resistências mecânicas, pensa-se que a utilização de um metacaulino mais reactivo possa ainda melhorar as características das argamassas, uma vez que a quantidade de hidróxido de cálcio presente na cal aérea deve ser capaz de, por um lado, reagir com os silicatos e aluminatos do metacaulino e, por outro lado, ter capacidade de carbonatar; no entanto, é importante estar ciente das reacções pozolânicas e do processo de carbonatação, se o objectivo for potencializar melhores condições durante o processo de fabrico e de cura das argamassas.
- apesar de ser quase impossível a reprodutibilidade em obra, na generalidade a cura com elevado teor de dióxido de carbono potenciou as características mecânicas das argamassas com adição de metacaulino; no entanto, é possível que, por aceleração da carbonatação, parte do metacaulino não tenha tido hidróxido de cálcio com que reagir; em termos de condições de cura que possam de algum modo ser reproduzidas em obra, as condições de cura húmida potenciaram as características das argamassas com metacaulino.
- Maior reactividade das argamassas de cal em pasta com metacaulino comparativamente às de cal em pó

Como trabalhos futuros que podem prosseguir a investigação desenvolvida no âmbito desta dissertação, considera-se importante a realização entre outros, os seguintes estudos:

- caracterização das argamassas a idade mais avançada, especialmente para além dos 60 dias
- avaliação da resistência destas argamassas face à acção de sais solúveis e do gelo-degelo

- caracterização de argamassas com cal aérea hidratada em pasta não hidrófugada para comparação com os resultados presentes nesta dissertação
- sujeitar as argamassas a processos de cura combinados, com a finalidade de avaliar as características obtidas¹ e tentar criar condições de cura que sejam possíveis de reproduzir em obra
- execução de argamassas com diferentes tipos e percentagens de metacaulino, tentando otimizar a cinética da reacção pozolânica e de carbonatação
- caracterização da microestrutura interna das argamassas de cal em pó e em pasta que foram utilizadas nesta dissertação através de porosimetria de mercúrio e da microscopia electrónica de varrimento (SEM)
- caracterização das argamassas face à permeabilidade ao vapor de água e sua comparação com os resultados obtidos na secagem
- comparação das características com as argamassas executadas com outro tipo de areia e outro tipo de misturas de areias
- caracterização da profundidade de carbonatação das argamassas através da utilização de outro processo de ensaio
- caracterização da retracção das argamassas no molde e ao longo da sua cura através de outro processo de ensaio
- relacionar a cura com elevado teor de dióxido de carbono com a idade das argamassas, procurando estabelecer correspondência entre idades com e sem CO₂ e verificar se a estrutura porosa das argamassas se altera

¹ Neste âmbito estão já a decorrer alguns estudos, combinando períodos iniciais a HR distintas, (dentro e fora de câmaras climáticas, envoltos em polietileno, com eventuais aspersões de água, etc.) seguidas de períodos de cura a outras HR (e com eventuais pequenos períodos em câmara de carbonatação)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, C. (2008) – Estudo da evolução no tempo de argamassas de cal aérea. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa, IST/UTL.

ALMEIDA, N.; FARIA, P.; PINTO, A. (2008) – Lime mortars with rice husk ash for ancient masonry. HMC 2008 - Historical Mortars Conference. Characterization, diagnosis, conservation, repair and compatibility. Lisboa, LNEC.

ALMEIDA, N.; FARIA, P.; PINTO, A. (2007). – Argamassas com base em cal aérea e cinzas de casca de arroz para conservação do património construído. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa. APFAC.

ALMEIDA, N. (2008) – Argamassas de cal aérea e cinzas de casca de arroz para alvenarias antigas. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Recuperação e Conservação do Património Construído. Lisboa, UTL/IST.

ALVAREZ, J.; SEQUEIRA, C.; COSTA, M. (2007) – Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. 2º Congresso Nacional de Argamassas Construção. Lisboa, APFAC.

VAN BALEN, K. (2005) – Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature. Cement and Concrete Research, 35, ScienceDirect, Elsevier, pp. 647-657.

BOTAS, S. (2009) – Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Caparica,. FCT/UNL.

BRITO, V. (2009) – Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Caparica, FCT/UNL.

CEN (2008) – pr EN 459-1:2008. Building lime – Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria. Brussels.

CEN (1998/2006) – EN 1015-2:1998/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels.

CEN (1999/2004/2006) – EN 1015-3:1999/A1:2004/A2:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.

CEN (1999/2006) – EN 1015-11:1999/A1:2006. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. Brussels

CEN (2000) – EN 1015-12:2000. Methods of test mortar for masonry – Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates. Brussels.

CEN (2002) – EN 1015-18:2002 Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels.

CEN (2004) – EN 14146:2004. Natural Stone test methods. Determination of the dynamic modulus of elasticity (by measuring the fundamental resonance frequency). Brussels.

CEN (2009) – EN 15801:2009. Conservation of cultural property. Test ,methods. Determination of water absorption by capillarity. Brussels.

CHEN, M.; WANG, N.; YU, J.; YAMAGUCHI, A. (2007) – Effect of porosity on carbonation and hydration resistance of CaO materials. J. European Ceramic Society, 27 (4), ScienceDirect, Elsevier, pp. 1953-1959.

CINCOTTO, M.; REPETTE, W.; QUARCIONI, V.; JOHN, V. (2010) – O efeito da carbonatação na porosidade de argamassas de cimento, cal e cimento: cal. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Lisboa, APFAC (CD-rom).

COELHO, A.; JALALI, S.; TORRAL, F. (2010) – Desempenho comparado entre argamassa comerciais para a reabilitação e argamassas de cal aérea e metacaulino. 3º Congresso Português de Argamassas de Construção, Lisboa, APFAC (CD-rom).

COUTINHO, (2002) – Materiais de Construção 2 – parte 1 – Ligantes e caldas. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia (FEUP).

DHEILLY, R.; TUDO, J.; BI, Y.; QUÉNEUDEC, M. (2002) – Influence of storage on the carbonation of powdered $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Construction and Building Materials, 16 (3), Sciencedirect, Elsevier, pp. 155-161.

EL-TURKI, A.; BALL, R.; HOLMES, S.; ALLEN, W.; ALLEN, G. (2010) – Environmental cycling and laboratory testing to evaluate the significance of moisture control for lime mortars. Construction and Building Materials, 24 (8), Sciencedirect, Elsevier, pp. 1392-1397.

FARIA, P. (2003) – Estudo comparativo de diferentes argamassas tradicionais de cal aérea e areia. PATORREB 2003 – 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios. Porto, FEUP, pp. 207-216.

FARIA, P. (2003) – Argamassas de cal com comportamento hidráulico. 3º Encore – Encontro sobre a Conservação e Reabilitação de Edifício. Lisboa, LNEC, pp. 493-501.

FARIA, P.; HENRIQUES, F. (2003) – Avaliação comparativa de cals aéreas correntes. 3º Encore – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifício. Lisboa, LNEC, pp. 501-509.

FARIA, M. P. (2004) – Argamassas de revestimento para alvenarias antigas contributo para o estudo da influência dos ligantes. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Caparica, FCT/UNL.

FARIA, P. (2004) – Argamassas de cal aérea e componentes pozolânicos. Construção 2004. Porto, FEUP, pp. 779-784.

FARIA, P. (2005) – Resistência aos cloretos e aos sulfatos de argamassas de cal aérea e diferentes pozolanas. Seminário internacional COMPASS – Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos. Lisboa. LNEC. Pp. 9.1-9.14.

FARIA, P.; HENRIQUES, F. (2006) – Subprodutos industriais como componentes pozolânicos em argamassas de cal aérea. Porto, FEUP, pp. 295-305.

FARIA, P. (2007) – Argamassas para a reabilitação. Funções, constituintes e características. Pedra e cal. Revista da conservação do património arquitectónico e da reabilitação do edificado. Volume n.º 35. pp 4-7.

FARIA, P. (2007a) – Ligantes e adições pozolânicas para argamassas de edifícios antigos. FCT/UNL, Departamento de Engenharia Civil.

FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. (2007). – Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e agregados. 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, APFAC.

FARIA, P.; HENRIQUES, F.; RATO, V. (2008) – Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation. Journal of Cultural Heritage, 9, pp 338-346.

FREEDLAND, J.; GERNS, E. (2005) – Lime mortars: two recent case studies. International Building Lime Symposium 2005. Orlando, Florida.

GASPAR, A.; SÁ, S. (2002) – Argamassa de cal aérea hidratada com incorporação de gordura e sua incorporação em rebocos. Construlink, n.º 7.

GOMES, A. (2010) – Revestimentos com fibras para reabilitação. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

GRAHAM, O. (s.d.) – Argamassas e rebocos de cal: as vantagens relativas de se adicionar cimento. Tradução por António de Borja Araújo, Eng.º Civil IST. www.buildingconsrvation.com.

HANSEN, E.; TAGLE, A.; ERDER, E.; BARON, S.; CONNELL, S.; RODRÍGUEZ-
NAVARRO, C., VAN BALEN, K. (1999) - Effects of ageing on lime putty, RILEM Proc.
PRO 012: Historic Mortars. Characteristics and Tests, Paisley, Scotland.

HENRIQUES, F. (1996) – Fe02 DEC/UNL - Determinação da porosidade aberta.

HENRIQUES, F. (1999) - Fe30 DEC/UNL - Determinação do volume de vazios.

HENRIQUES, F.; RODRIGUES, F. (2006) – Argamassas de substituição na
conservação do património. Construção Magazine, Volume n.º 16, pp 38-45.

HENRIQUES, F.; CHAROLA, A.; RATO, V.; RODRIGUES, P. – Morteros de reposición
Su rol en la conservación – Parte I . Sección de referato. Habitat. Volume n.º 53, pp 38-
48.

HENRIQUES, F.; CHAROLA, A.; RODRIGUES, P. (2008) – Morteros de reposición Su
rol en la conservación – Parte II. Patrimonio en peligro. Habitat. Volume n.º 54, pp 38-
40.

HENRIQUES, F.; FARIA, P. (2008) – O papel da investigação no estudo das
argamassas de substituição na conservação do património. Engenharia Civil UMinho.
Volume n.º 31, pp 29-37.

HOUST, Y. F. (1993) – Diffusion de Gaz, Carbonatation et Retrait de la Pate de Ciment
Durcie. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur es sciences. Ecole Polytechnique
fédérale de Lausanne. Lausanne.

IPQ (2006) – NP EN 196-1:2006. Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1:
Determinação das resistências mecânicas. Monte de Caparica.

IPQ (2002) – NP EN 459-1:2002. Cal de construção – Parte 1: Definições,
especificações e critérios de conformidade. Monte de Caparica.

IPQ (2000) – NP EN 933-1:2000. Ensaio das propriedades geométricas dos
agregados – Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Monte de
Caparica.

IPQ (2002) – NP EN 1097-3:2002. Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 3:Determinação da baridade e volume de vazios. Monte de Caparica.

IPQ (2008) – NP EN 1936:2008. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta. Monte de Caparica.

ISO (2000) – ISO 3310-1:2000. Test Sieves – Technical requirements na testing – Part 1: Test Sieves of metal wire cloth. Switzerland.

KANAN, M. (2008) – Manual de conservação e intervenção em argamassas e revestimentos à base de cal. Cadernos técnicos n.º 8. Caroline Soudant. Programa Monumenta.

LANAS, J. (2003) – Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. Cement and Concrete Research. 33, ScienceDirect, Elsevier, pp. 1867-1876.

LAWRENCE, R.; MAYS, T.; WALKER, P.; AYALA, D. (2006) – Determination of carbonation profiles in non-hydraulic lime mortars using thermogravimetric analysis. Thermochemica Acta, 444 (2), ScienceDirect, Elsevier, pp. 179-189.

LAWRENCE, R.; MAYS, T.; RIGBY, S.; WALKER, P.; AYALA, D. (2007) – Effects of carbonation on the pore structures of non-hydraulic lime mortars. Cement and Concrete Research, 37 (7), ScienceDirect, Elsevier, pp. 1059-1069.

Lusical (s.d.) – Companhia Lusitana de Cal, S.A. – A cal na construção Civil.

MATIAS, G.; FARIA, P.; TORRES, I. (2008) – Lime mortars with brick dust and grounded particles for ancient masonry: development and evaluation. HMC 2008 - Historical Mortars Conference. Characterization, diagnosis, conservation, repair and compatibility. Lisboa, LNEC.

MARGALHA, M.; VEIGA, M.; BRITO, J. (2006) – Algumas vantagens do uso da cal em pasta em revestimento. PATORREB 2006, Porto, FEUP, pp. 283-293.

MARGALHA, M.; VEIGA, M.; BRITO, J. (2007) – Influência das areias na qualidade das argamassas de cal aérea. Lisboa, APFAC (cd-rom).

PAULO, R. (2006) – Caracterização das argamassas industriais. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Materiais e Valorização de Resíduos. UA/DECV.

PEREIRA, T. (2008) – Optimização das características de humedecimento e secagem de argamassas. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Caparica, FCT/UNL.

RATO, N. (2006) – Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Lisboa. Caparica, FCT/UNL.

RODRIGUES, D. (2010) – A influência dos métodos de ensaio nas características de argamassas de cal aérea e hidráulica. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Caparica, FCT/UNL.

SOUSA, V.; PEREIRA, C.; PISSARRA, N. (2009) – Materiais de Construção I – Argamassas. Licenciatura em Engenharia Civil, ano lectivo 2009/2010, 1º semestre. ESTBarreiro/IPS.

TAVARES, M.; FRAGATA, A.; VEIGA, M.^a R. (2007) – A consolidação da falta de aderência de rebocos antigos – um estudo com diferentes argamassas para *grouting*. Congresso Nacional de Argamassas, Lisboa, APFAC (CD-rom).

VEIGA, M.; FARIA, P. (1990) – Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética. Curso sobre revestimentos de paredes Capítulo II. Lisboa, LNEC.

VEIGA, M.; VELOSA, A.; TAVARES, M. (2008) – A cor das argamassas. Construção Magazine, 25.

VEIGA, M.; FRAGATA, A.; VELOSA, A.; MAGALHÃES, A.; MARAGALHA, G. (2010) - Lime Based Mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings. International Journal of Architectural Heritage, 4, Taylor & Francis, pp. 177-195.

VELOSA, A. (2007) – Argamassa com pozolanas para aplicação na conservação de edifício. Oficina: Técnicas tradicionais de revestimento. CMBeja, CENFIC.

Graymont.(2010) - http://www.graymont.com/applications_history_lime_mortar.shtml, 16/11/2010.

Oz-diagnostico (2010) – <http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/1F%20024.pdf>, 25/11/2010.

Wikipedia (2010) - http://pt.wikipedia.org/wiki/Pozolana#Caracter.C3.ADsticas_das_pozolanas, 01/07/2010.