



Nuno Miguel Nunes Felgueiras

Licenciatura em Ciências da Engenharia

**AVALIAÇÃO DA EVOLUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE ARGAMASSAS DE
CAL AÉREA COM DIFERENTES TEORES DE METACAULINO SUJEITAS A
AMBIENTES DE DIFERENTE HUMIDADE RELATIVA**

Dissertação para obtenção do grau Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora Doutora, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Maria do Rosário Veiga, Doutora, Investigadora Principal, Chefe do
NRI - LNEC

Júri:

Presidente: Professor Doutor Daniel Aelenei
Arguente: Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa
Vogais: Professora Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Professora Doutora Maria do Rosário Veiga

“Copyright” Nuno Miguel Nunes Felgueiras, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os, que ao longo do semestre, me deram uma importante ajuda na realização desta dissertação:

À minha Orientadora, Professora Doutora Paulina Faria, por todo o empenho, dedicação e ajuda prestados na realização de todo o trabalho experimental, pela partilha de conhecimentos bem como de toda a disponibilidade demonstrada ao prestar todo o apoio necessário durante a realização deste trabalho.

À minha Co-Orientadora, Professora Doutora Rosário Veiga por toda a ajuda e sugestões apresentadas.

Ao meu colega Rodrigo Massena e ao bolseiro Vítor Silva pelo apoio na realização dos trabalhos experimentais e por se mostrarem sempre disponíveis em ajudar.

Aos meus pais, António e Conceição Felgueiras pela motivação transmitida ao longo do meu percurso académico.

À minha namorada, Susana Bernardino, pelo apoio e incentivo transmitidos, pela paciência inesgotável e toda a ajuda prestada.

Por fim, e como prometido, aos meus colegas Pedro Sousa, João Laires, Carlos Rodrigues, João Brito e Ricardo Moniz pela ajuda prestada na execução de alguns ensaios experimentais.

RESUMO

O elevado estado de degradação da maioria dos edifícios existentes obrigará a um forte investimento na área da reabilitação.

Contudo, numa acção de recuperação de um edifício antigo - para além de se dever ter em conta vários factores tais como as características do suporte, o tipo de edifício ou as condições ambientais actuantes - é fundamental utilizar uma argamassa compatível com o suporte existente.

As argamassas de cal aérea apresentam uma boa compatibilidade com alvenarias antigas mas nem sempre adquirem as características necessárias que possibilitam a sua utilização. Essas características podem ser alteradas, e eventualmente melhoradas, com a adição de pozolanas – através da diminuição do período de tempo de endurecimento das argamassas, da obtenção de características hidráulicas, entre outras como sejam uma maior durabilidade.

O uso de pozolanas, neste caso o metacaulino, está associado à necessidade cada vez maior de adoptar práticas de construção sustentáveis, com incorporação de materiais obtidos com menor dispêndio de energia, utilização de materiais reciclados ou subprodutos industriais.

A produção do metacaulino, tal como a produção de cal aérea, apresenta também uma boa solução relativamente às questões ambientais, porque a sua produção significa uma libertação de dióxido de carbono para a atmosfera bastante inferior à resultante da produção de cimento Portland.

Realizada no âmbito do projecto FCT-METACAL, esta dissertação descreve o estudo efectuado sobre argamassas de cal aérea, com diferentes teores de metacaulino (pozolana usada no estudo), sujeitas a dois tipos de curas distintas - uma cura num ambiente com humidade relativa de 95% e temperatura a 23°C e outra cura num ambiente com humidade relativa de 65% e temperatura a 23°C.

As diferentes argamassas foram submetidas a ensaios mecânicos, físicos e químicos a diferentes idades de cura (28, 60 e 90 dias). Os resultados obtidos estão directamente relacionados com as condições de cura a que foram sujeitos em laboratório e mostram que as argamassas apenas de cal aérea apresentam melhores características físicas e mecânicas do que as argamassas com metacaulino. Entre as argamassas com metacaulino, verificou-se que as características mecânicas diminuem com o aumento de dosagem do mesmo e relativamente às características físicas, a variação de comportamento não é tão linear, pois em alguns ensaios, as argamassas com teor de metacaulino igual a 17 e 23% da dosagem de cal aérea apresentam resultados mais desfavoráveis do que as argamassas com teor de metacaulino igual a 9 e 33% de cal aérea.

PALAVRAS – CHAVE:

Reabilitação de edifícios, argamassa, ligante, cal aérea, pozolana, metacaulino, condição de cura, humidade relativa, ensaios.

ABSTRACT

The high degradation of most existing buildings will require a substantial investment in rehabilitation area.

However, a recuperation action of an old building – in addition to the duty to take into account several factors like the characteristics of the support, the type of building or the actuating environment conditions – is essential to use a mortar compatible with the existing support.

Air lime mortars have a good compatibility with old masonry but not always acquire the necessary features that allow its use. These characteristics may be obtained by the addition of pozzolan, which in addition to ensure new properties on mortars, decrease its time of hardening.

The use of pozzolan, in this case the metakaolin, is associated with the increasing need to adopt sustainable building practices, with less expenditure of energy, use of recycled materials and of industrial by-products.

The production of metakaolin also is a good solution for environmental issues, because their production means a release of carbon dioxide into the atmosphere quite less than that resulting from the production of Portland cement.

Held under the project FCT-METACAL, this dissertation describes the characterization of air lime mortars, with different levels of metakaolin (pozzolan used in the study), subject to two types of distinct cures at 23°C temperature: a cure in an environment with a relative humidity of 95% and another cure in an environment with a relative humidity of 65%.

The different mortars were subjected to mechanical and physical tests at different ages of cure (28, 60 and 90 days). The results obtained are directly related to the conditions of cure that have been subjected in the laboratory and show that mortars only with lime have better physical and mechanical characteristics than mortars with metakaolin. Between metakaolin mortars, it was found that the mechanical properties decrease with increasing dose, but for physical characteristics, the change of behavior is not so linear, because in some tests, the metakaolin mortars with amounts of metakaolin equal to 17 and 23% of lime have worse results than mortars with amounts of metakaolin equal to 9 and 33% of lime.

KEYWORD:

Building rehabilitation, mortar, binder, lime, pozzolan, metakaolin, curing condition, relative humidity, testing.

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	3
2.1. MATÉRIAS-PRIMAS	3
2.1.1. CAL AÉREA	3
2.1.2. POZOLANAS.....	3
2.1.2.1. METACAULINO	4
2.1.3. AREIAS.....	5
2.2. ARGAMASSAS	6
2.2.1. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA	7
2.2.2. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E POZOLANAS.....	7
2.3. NORMAS E ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIO.....	8
3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DAS CONDIÇÕES DE CURAS.....	9
3.1. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS.....	9
3.2. DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CURA	10
3.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES	11
4. PROCEDIMENTOS ADOPTADOS NOS TRABALHOS EXPERIMENTAIS	13
4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	14
4.1.1. ANÁLISE DA CURVA GRANULUMÉTRICA.....	14
4.1.2. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE	15
4.2. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO	17
4.2.1. PLANEAMENTO DAS AMASSADURAS	17
4.2.2. AMASSADURAS	18
4.2.3. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	19
4.2.4. EXECUÇÃO DOS PROVETES	20
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	22
4.3.1. PLANEAMENTO DOS ENSAIOS	22
4.3.2. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	23
4.3.3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM TRÊS PONTOS (Rt)	24
4.3.4. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (Rc)	25
4.3.5. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	27
4.3.6. DETERMINAÇÃO DA SECAGEM	29
4.3.7. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA (Pab)	31
4.3.8. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL	34

5. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	35
5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	35
5.1.1. ANÁLISE GRAULOMÉTRICA.....	35
5.1.2. ANÁLISE DAS BARIDADES	36
5.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO	36
5.2.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO.....	36
5.2.2. DESMOLDAGEM DOS PROVETES.....	38
5.3. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO	38
5.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS AO MÓDULO DE ELASTICIDADE	38
5.3.2. RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO.....	44
5.3.3. RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	51
5.3.4. RESULTADOS DO ENSAIO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	57
5.3.5. RESULTADOS DO ENSAIO DA SECAGEM.....	68
5.3.6. RESULTADOS DAS POROSIDADE ABERTA	78
5.3.7. SÍNTESE DE RESULTADOS.....	79
 6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	 81
6.1. CONCLUSÕES	81
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	83
 BIBLIOGRAFIA	 85
 ANEXO I	 89
 ANEXO II	 93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 - Cal aérea e areia.....	9
Figura 4.1 - Mistura dos materiais: pesagem e homogeneização	18
Figura 4.2 - Mistura dos materiais na cuba antes e depois da amassadura	19
Figura 4.3 - Determinação da consistência por espalhamento.....	20
Figura 4.4 - Molde e respectivo acréscimo, fixos ao compactador mecânico	22
Figura 4.5 - Argamassas nos moldes antes e depois destes serem colocados dentro de sacos de polietileno.....	22
Figura 4.6 - Zeus Resonance Meter.....	24
Figura 4.7 - Ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão em três pontos	25
Figura 4.8 - Ensaio de determinação da resistência à compressão	26
Figura 4.9 - Determinação da absorção de água por capilaridade	29
Figura 4.10 - Ensaio de secagem	31
Figura 4.11 - Bomba de vácuo e respectivos acessórios que assegurem o seu correcto funcionamento e controlo de pressão de vácuo.....	32
Figura 4.12 - Exsicador	32
Figura 4.13 - Ensaio de determinação da porosidade aberta	33
Figura 5.1 - Análise granulométrica das areias e respectiva mistura	35
Figura 5.2 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas	39
Figura 5.3 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.....	40
Figura 5.4 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.....	41
Figura 5.5 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C	41
Figura 5.6 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D	42
Figura 5.7 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E.....	43
Figura 5.8 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura H	43
Figura 5.9 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura R	44
Figura 5.10 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de idade das diversas argamassas	45
Figura 5.11 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa A.....	46
Figura 5.12 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa B.....	47
Figura 5.13 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa C	47
Figura 5.14 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa D	48
Figura 5.15 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa E.....	49
Figura 5.16 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura H	49
Figura 5.17 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura R	50
Figura 5.18 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas	52
Figura 5.19 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A.....	53
Figura 5.20 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B.....	53
Figura 5.21 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C.....	54

Figura 5.22 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.....	55
Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D.....	55
Figura 5.24 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura H	56
Figura 5.25 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura R	56
Figura 5.26 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias de todas as argamassas	57
Figura 5.27 - Fase inicial da absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias de todas as argamassas	58
Figura 5.28 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias de todas as argamassas	59
Figura 5.29 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas da cura H	60
Figura 5.30 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas da cura R	60
Figura 5.31 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de todas as argamassas	61
Figura 5.32 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias das argamassas da cura H	62
Figura 5.33 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias das argamassas da cura R	62
Figura 5.34 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa A	63
Figura 5.35 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa B	64
Figura 5.36 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa C	64
Figura 5.37 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa D	65
Figura 5.38 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa E	66
Figura 5.39 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias	67
Figura 5.40 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias de todas as argamassas	68
Figura 5.41 - Curvas de secagem aos 28 dias de todas as argamassas	69
Figura 5.42 - Curvas de secagem aos 28 dias das argamassas da cura H	70
Figura 5.43 - Curvas de secagem aos 28 dias das argamassas da cura R	70
Figura 5.44 - Curvas de secagem aos 90 dias de todas as argamassas	71
Figura 5.45 - Curvas de secagem aos 90 dias das argamassas da cura H	72
Figura 5.46 - Curvas de secagem aos 90 dias das argamassas da cura R	72
Figura 5.47 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa A	73
Figura 5.48 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa B	74
Figura 5.49 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa C	74
Figura 5.50 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa D	75
Figura 5.51 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa E	76
Figura 5.52 - Índice de secagem de todas as argamassas aos 28 e 90 dias	77
Figura 5.53 - Porosidade aberta das diversas argamassas as 28, 60 e 90 dias	78

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 - Constituintes das argamassas	10
Quadro 3.2 - Condições de cura	10
Quadro 3.3 - Numeração dos provetes utilizados em cada ensaio	12
Quadro 4.1 - Dosagens por amassadura realizada na UNL – quantidade para 9 provetes – respectivo traço ponderal	17
Quadro 5.1 - Módulo de finura e máxima e mínima dimensão das areias e da respectiva mistura	35
Quadro 5.2 - Baridade dos constituintes das argamassas	36
Quadro 5.3 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras realizadas na UNL	37
Quadro 5.4 - Módulo de elasticidade dinâmico e desvio padrão de todas as argamassas aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura	39
Quadro 5.5 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de todas as argamassas.....	45
Quadro 5.6 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de todas as argamassas	51
Quadro 5.7 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias	67
Quadro 5.8 - Índice de secagem de todas as argamassas aos 28 e 90 dias	76
Quadro 5.9 - Porosidade aberta aos 28, 60 e 90 dias de todas as argamassas.....	78
Quadro 5.10 - Características das argamassas e das condições de cura e resultados dos ensaios mecânicos.	79
Quadro 5.11 - Características das argamassas e das condições de cura e resultados dos ensaios físicos.	80

SIMBOLOGIA

SIMBOLOGIA DE MATERIAIS:

L – Cal aérea hidratada em pó, da Lusical H100

Mk – Metacaulino Argical M 1200 S

APAS 30 – Areia fina

APAS 20 – Areia intermédia

APAS 12 – Areia grossa

S – Mistura de areias AREIPOR ao traço volumétrico de 1 APAS 12 + 1,5 APAS 20 + 1,5 APAS 30

SIMBOLOGIA DE PROVETES DE ARGAMASSA:

A – Argamassa de referência, ao traço volumétrico 1:3, sem adição de metacaulino

B – Argamassa ao traço volumétrico 1:3, com substituição de 9% da massa de cal aérea por metacaulino

C – Argamassa ao traço volumétrico 1:3, com substituição de 17% da massa de cal aérea por metacaulino

D – Argamassa ao traço volumétrico 1:3, com substituição de 23% da massa de cal aérea por metacaulino

E – Argamassa ao traço volumétrico 1:3, com substituição de 33% da massa de cal aérea por metacaulino

SIMBOLOGIA DAS CONDIÇÕES DE CURA:

R – Cura de referência, a temperatura de 23°C e humidade relativa de 65%

H – Cura húmida, a temperatura de 23°C e humidade relativa de 95%

SIMBOLOGIA DE ENSAIOS E DETERMINAÇÕES:

ASTM – American Society for Testing and Materials

CC – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

DRX – Difraccção de Raio X

Edin – Módulo de elasticidade dinâmico

Esp – Consistência por espalhamento

HR – Humidade relativa

IS – Índice de secagem

MEV – Microscópio Electrónico de varrimento

Pab – Porosidade aberta

Rc – Resistência à compressão

Rt – Resistência à tracção por flexão em três pontos

VA – Valor assintótico de absorção de água por capilaridade

Vv – Volume de vazios

SIGLAS DE ENTIDADES E DOCUMENTOS NORMATIVOS:

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

IST/UTL – Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

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

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

CEN – European Committee for Standardization

IPQ – Instituto Português de Qualidade

ISO – International Organization of Standardization

EN – Norma Europeia

NP – Norma Portuguesa

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Segundo descobertas arqueológicas, o aparecimento das primeiras argamassas remontam há pelo menos 10 000 anos (MARTINS, 2010). Usando a cal como ligante, essas argamassas eram usadas essencialmente na consolidação de alvenarias e na execução de rebocos.

Posteriormente foram descobertas as propriedades das pozolanas (materiais ricos em silicatos e aluminatos na forma amorfa) e estas começaram a ser utilizadas como aditivos, visto que garantiam melhores características às argamassas, possibilitando assim a construção de estruturas de grande dimensão e mais resistentes (MARTINS, 2010).

Contudo, a cal deixou de ter tanta preponderância na construção civil com o aparecimento do cimento Portland, pois este proporcionava maiores resistências mecânicas e menor tempo de cura às argamassas (FONTES, 2011).

Nas últimas décadas, vários estudos permitiram concluir que as argamassas constituídas com elevado teor em cimento Portland, revelam-se prejudiciais quando usadas em edifícios antigos. A sua elevada rigidez impede uma adequada compatibilidade com os suportes e a elevada retracção e fendilhação origina novas patologias (BOTAS, 2009).

Por vezes são aplicadas argamassas bastardas com substituição parcial de cimento por cal; contudo, as argamassas apenas de cal aérea apresentam maior compatibilidade com o suporte, visto que têm maior deformabilidade, resistências mecânicas não superiores às do suporte e permeabilidade ao vapor de água comparável (AGOSTINHO, 2008).

Em ambientes de baixa humidade relativa deverão ser usadas argamassas de cal aérea, mas ainda assim, alguns autores defendem que a adição de pequenas quantidades de cimento Portland pode ser uma boa solução (TORRALBA, et al., 2011).

Com a adição de pozolanas, procura-se obter uma argamassa adaptada a paredes de alvenaria antigas, com características físicas, mecânicas e químicas desejáveis, bem como com uma maior durabilidade (FARIA, 2009).

Tendo em conta os problemas ambientais existentes actualmente, associados ao aquecimento global, o metacaulino (pozolana obtida por desidroxilação do caulino) surge como uma boa solução, visto que a sua produção reduz consideravelmente a libertação de CO₂ para a atmosfera quando comparado com a produção de ligantes; do mesmo modo a produção de cal aérea relativamente à de cimento Portland (COUTINHO, 2006).

Este estudo ganha maior relevância devido ao elevado estado de degradação dos edifícios em Portugal, que levará incontornavelmente a uma aposta na reabilitação.

A presente dissertação visou estudar a evolução das propriedades de argamassas com diferentes teores de metacaulino, sujeitas a duas condições de cura distintas:

- A cura H, correspondente a um ambiente húmido com humidade relativa de 95±5% e temperatura de 23±3°C
- A cura R, cura de referência, correspondente a um ambiente com humidade relativa de 65±5% e temperatura de 23±3°C

Inserir-se num estudo mais alargado, realizado no âmbito do projecto de investigação FCT-METACAL, em que se pretende avançar no estado de conhecimentos relativos a revestimentos com base em cal aérea e nomeadamente de argamassas de cal aérea com adição de metacaulinos.

1. Introdução

Nesse âmbito a parte experimental desta dissertação desenvolveu-se em paralelo com outras duas dissertações – uma delas já defendida (MASSENA, 2011) – que avaliaram o comportamento de argamassas com os mesmos teores de metacaulino mas sujeitas a condições de cura distintas.

1.2. OBJECTIVOS

Esta dissertação tem como objectivo avaliar a influência que a humidade relativa tem na cura de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino, tendo em vista a sua aplicação em edifícios antigos.

Nesse sentido, pretende-se alargar os conhecimentos relativamente ao comportamento dessas argamassas (só de cal aérea e de cal aérea com diferentes substituições de metacaulino) e de perceber a influência que as condições de cura têm em condições reais de aplicação deste tipo de argamassas, nomeadamente ao nível de duas gamas distintas de humidade relativa.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, sendo este capítulo introdutório o número um.

No segundo capítulo apresenta-se o estado do conhecimento, onde são feitas descrições dos conhecimentos existentes sobre os temas abordados neste trabalho, nos quais se incluem as matérias-primas, as argamassas e os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização das mesmas.

No terceiro capítulo faz-se uma descrição dos materiais utilizados e das condições de cura e ainda se explica como se procedeu à numeração dos provetes.

No quarto capítulo descreve-se pormenorizadamente todo o procedimento experimental adoptado, tanto na realização de ensaios, como na produção de argamassas, de forma a poderem ser reproduzidos.

No quinto capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos, fazendo ligação e comparações entre características físicas e mecânicas das argamassas.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

Por fim as referências bibliográficas e os anexos são apresentados em capítulos autónomos finais.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. MATÉRIAS-PRIMAS

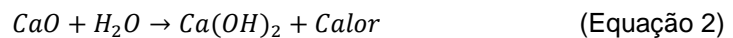
2.1.1. CAL AÉREA

A cal é um ligante obtido através da cozedura dos calcários, ricos em carbonato de cálcio (CaCO₃).

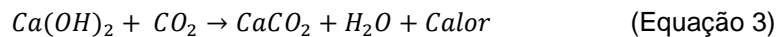
Submetendo os calcários puros (<5% impurezas) a uma cozedura entre os 800 e os 900°C, resulta o óxido de cálcio (CaO), que também é conhecido como cal viva (Equação 1) (VELOSA, et al., 2002):



Adicionando água à cal viva, dá-se uma reacção expansiva e exotérmica, originando o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), também conhecido como cal apagada ou cal hidratada (Equação 2):



Por fim, a cal apagada endurece, quando ocorre a reacção exotérmica do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono da atmosfera (carbonatação) que pode ser traduzida pela equação 3 (COUTINHO, 2006):



Comparativamente, a cal hidráulica é obtida através da cozedura de uma marga calcária (teor de argila e outras impurezas entre 8 e 17%) a uma temperatura entre 1000 e 1100°C. É o teor de argila que distingue a cal aérea da cal hidráulica; quanto maior a percentagem de argila maior vão ser as propriedades hidráulicas da cal e maior vai ser a capacidade de esta ganhar presa na presença de água (COUTINHO, 2006).

2.1.2. POZOLANAS

O aparecimento das pozolanas surgiu há mais de 2000 anos (MASSENA, 2011). A Civilização Romana foi das primeiras que registaram a sua utilização como aditivo da cal aérea, proporcionando propriedades hidráulicas às argamassas e tornando-as mais resistentes e duráveis.

Contudo, no início do século XIX, com o aparecimento do cimento Portland as pozolanas entraram praticamente em desuso. Só voltaram posteriormente a ser utilizadas após a descoberta das reacções alcali-agregado no betão. Estes componentes passaram a ser aplicados em cimentos pozolânicos e em betões de baixo calor de hidratação e de altas resistências mecânicas (FARIA, 2004).

As pozolanas são materiais ricos em sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) no estado amorfo e que, na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio da cal, proporcionando novas características às argamassas (FARIA, 2004).

A adição de pozolanas diminui a tendência que a argamassa tem de retrair e fendilhar, sendo fundamental para limitar a absorção de água e aumentar a durabilidade (VELOSA, et al., 2007).

“Se os produtos pozolânicos forem bem escolhidos e as argamassas bem doseadas, mediante estudos de investigação e experiências prévias, é possível obter argamassas com as principais vantagens das argamassas hidráulicas – endurecimento em presença de água, embora mais lento do que o do cimento; resistência à água; boa permeabilidade ao vapor de água – evitando as suas principais desvantagens – módulo de elasticidade elevado, sais solúveis”, (VELOSA, et al., 2001)

2. Estado do conhecimento

As pozolanas dividem-se em dois grupos: as naturais e as artificiais.

As pozolanas naturais derivam de um material de origem vulcânica meteorizada, isto é, são ricos em sílica resultante do rápido arrefecimento da lava após uma erupção, que dessa forma se mantém no seu estado amorfo. O processo de meteorização da lava permite que esta adquira ainda maior reactividade pozolânica (COUTINHO, 2006). Estes materiais não necessitam de nenhum tratamento térmico. Em geral o processamento das pozolanas naturais resume-se a britagem, moagem e peneiração.

As pozolanas artificiais podem ser materiais argilosos que inicialmente não têm qualquer reactividade pozolânica. Essa propriedade é obtida pela saída de iões OH^- da sua estrutura interna, resultante da acção da temperatura entre os 500 e os 900°C (NETTO, 2006).

A reactividade pozolânica é a capacidade que a pozolana tem de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água, à temperatura normal, e é tanto maior quanto maior for o grau de pozolanidade do material.

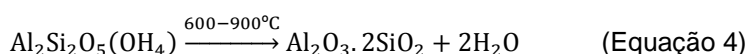
O grau de pozolanidade depende da proporção de silicatos na forma amorfa que a pozolana contém e das dimensões das partículas, dado que a reactividade aumenta com a superfície específica que, por sua vez, é maior quanto menor forem as partículas constituintes (MARQUES, 2010).

2.1.2.1. METACAULINO

O metacaulino é uma pozolana obtida pela calcinação da argila caulínica (caulino) a uma temperatura entre os 600 e 900°C (AMBROISE, et al., 1994); (FARIA, 2004) suficientemente altas para permitir a perda de hidróxilos, mas abaixo das temperaturas favoráveis à formação de uma fase cristalina (VELOSA, et al., 2007).

A bibliografia disponível não é muito precisa no que diz respeito ao tratamento térmico, embora muitos autores defendam que a temperatura ideal é de 750°C (PINTO, 2004). É provável que dependa da quantidade de material a ser calcinado, da estabilidade do forno, do tipo de caulino e da sua superfície específica durante a moagem. Para além da temperatura, o ciclo de aquecimento e arrefecimento deverá ser também importante.

O processo de calcinação do caulino é dado pela equação 4 (Nita, et al., 2004):



O tempo de exposição pode ir até às 24h, embora testes efectuados através de análise por difracção de raios X (DRX) permitam concluir que ao fim de 1h de cozedura, os difractogramas deixam de identificar fases cristalinas e passa a evidenciar um carácter amorfo (PINTO, 2004).

O tratamento térmico confere características pozolânicas ao metacaulino, que de seguida ou antes é moído, de maneira a aumentar a sua superfície específica, aumentando assim o seu grau de pozolanidade (AMBROISE, et. al., 1994).

As vantagens da utilização do metacaulino são as seguintes (SIDDIQUE, et al., 2008):

- Melhoria da resistência à compressão e à flexão;
- Redução da permeabilidade à água;
- Maior resistência aos ataques químicos;
- Maior durabilidade;

- Redução dos efeitos da reactividade álcali-silica;
- Aumento da compacidade do betão;
- Aumento da trabalhabilidade.

No contexto actual, em que é cada vez mais importante adoptar práticas de construção sustentável, com menos gastos de energias, o metacaulino surge como uma boa alternativa aos ligantes, visto que necessita de menos energia para a sua produção.

Para além das razões económicas, existem ainda preocupações ambientais, onde a indústria da construção tem um papel de destaque, uma vez que é responsável por 30% das emissões de carbono e consome mais matérias-primas do que qualquer outra actividade económica (MASSENA, 2011).

Mais uma vez o metacaulino apresenta-se como uma boa solução já que a sua produção significa a libertação de menos 80 a 90% de CO₂ para a atmosfera, comparativamente com a produção do cimento Portland (DAVIDOVITS, 1994).

Que se tenha conhecimento, existe actualmente em Portugal apenas uma fábrica que produz metacaulino e que ainda se encontra em fase de aperfeiçoamento.

2.1.3. AREIAS

As areias são os agregados mais usados na produção das argamassas, podendo ser de diferentes origens e granulometrias.

“As areias são materiais granulados finos que são aglomerados por uma pasta realizada com um ou mais ligantes, constituindo assim o esqueleto das argamassas” (MASSENA, 2011).

No processo de endurecimento das argamassas de cal aérea, à medida que a água evapora ou vai para o suporte, vão ocorrendo fenómenos de retracção; a existência das areias torna-se vantajosa visto que contribui para diminuir esses efeitos (COUTINHO, 2006).

Em Portugal são utilizados essencialmente três tipos de areias, em função da sua origem: areias de rio, areias de areeiro ou areias resultantes da fragmentação das rochas (MARTINS, 2010).

Quanto à granulometria, considera-se que uma areia é um agregado cuja dimensão das partículas se encontra compreendida entre 0,053 e 4mm (RATO, 2006).

Uma mistura de areias finas com areias mais grossas, diminui o volume de vazios, aumentando as resistências à flexão e à compressão da argamassa (MARGALHA, et al., 2007). Em argamassas de cal aérea normalmente procura-se que o volume de ligante preencha o volume de vazios resultante da mistura de areias (RATO, 2006).

A dimensão dos poros de uma mistura de areias pode ser determinante no comportamento da argamassa. Com poros maiores, a argamassa tem tendência a secar mais rapidamente; com poros mais finos acontece o oposto. Esta situação deve-se ao facto de os poros pequenos apresentarem pressões capilares maiores, dificultando a secagem (HENRIQUES, et al., 2008).

A forma das areias também tem um papel importante no comportamento das argamassas porque influencia a aderência da pasta, a trabalhabilidade e a compacidade. As areias podem ser classificadas relativamente à sua forma consoante a maior ou menor esfericidade através da seguinte expressão (RATO, 2006):

2. Estado do conhecimento

$$\text{esfericidade} = \frac{d}{a}$$

Sendo:

d – Diâmetro de uma esfera de volume igual ao da partícula;

a – Maior dimensão da partícula.

Deste modo quanto mais próximo de 1 for o valor da esfericidade, mais a forma da partícula se assemelha a uma esfera.

2.2. ARGAMASSAS

A argamassa é um produto resultante da mistura de agregados finos, com água e um ou mais ligantes, podendo ainda conter adições e/ou adjuvantes. Estes materiais são misturados formando uma pasta que vai adquirindo novas propriedades à medida que ocorrem reacções físicas e químicas ao nível dos constituintes.

Como referido anteriormente, os agregados mais usados para a produção das argamassas são as areias; os ligantes variam entre o cimento, a cal aérea/ hidráulica e o gesso (este último só utilizado em interiores).

No caso da reabilitação de edifícios antigos, a cal aérea surge como uma boa solução quando comparada com o cimento. Por vezes utilizam-se argamassas bastardas mas segundo Veiga (VEIGA, 2003), argamassas com teor de cimento idêntico ao de cal aérea ainda se apresentam demasiado rígidas, transmitindo ao suporte forças excessivas, e têm rotura frágil.

As argamassas de cal aérea aplicadas em alvenarias antigas deverão satisfazer determinados requisitos relacionados com: aderência, retracção, capilaridade, permeabilidade ao vapor de água, impermeabilização, resistência aos sais solúveis, resistência a fenómenos de gelo-degelo e aspecto visual (FARIA, 2004).

Actualmente procura-se que as paredes de alvenaria, em conjunto com os seus revestimentos, sejam construídas de forma a impedir ao máximo a absorção de água do exterior; mas pelo contrário, as paredes antigas, mais espessas e porosas, permitiam a entrada de alguma água para o seu interior. Pela espessura elevada das paredes e pela facilidade de secagem dessa água quando terminava um período de pluviosidade, evitava-se que a água atingisse o interior e a sua permanência prolongada na parede (HENRIQUES, 1994); (TAVARES, et al., 2002).

É importante conhecer o comportamento de uma parede quanto à sua permeabilidade, pois numa acção de reabilitação, devem-se assegurar os modelos funcionais originais dos suportes, a fim de evitar o aparecimento de nova patologia (VEIGA, 2005).

Nos revestimentos exteriores de edifícios antigos eram usadas argamassas de cal aérea constituídas por três camadas: emboço, reboco e esboço; com deformabilidade e porosidade crescentes do interior para o exterior (VEIGA, 2007).

Hoje em dia nem sempre é fácil obter a argamassa ideal, visto que cada caso exige determinadas soluções, consoante as suas condicionantes, tais como as características do suporte, o tipo de edifício ou condições ambientais actantes (MASSENA, 2011). A espessura das argamassas de revestimento pode variar entre 5 e 30mm (PEREIRA, 2010).

Antes de definir os materiais a serem utilizados na produção da argamassa, deverá ser feita uma análise dessas condicionantes, de forma a prevenir a ocorrência de problemas futuros.

2.2.1. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA

A argamassa de cal aérea é constituída por uma ou mais areias, água e cal aérea e endurece apenas na presença de dióxido de carbono (CO_2).

O facto de o hidróxido de cálcio presente na cal aérea ser solúvel, tanto em água doce como em água salgada, inviabiliza a aplicação destas argamassas em obras marítimas ou para obras hidráulicas (MASSENA, 2011).

Relativamente às argamassas de cimento, as de cal aérea apresentam menores resistências mecânicas, maior período de presa mas maior deformabilidade, e permeabilidade ao vapor de água, o que proporciona uma melhor adaptação aos suportes antigos.

Tal como foi referido anteriormente, uma argamassa de reparação deve garantir a mesma funcionalidade da alvenaria antiga (VEIGA, 2005), nomeadamente em termos de permeabilidade ao vapor de água.

As argamassas de cal aérea ao apresentarem fracas resistências mecânicas (consequentemente baixo módulo de elasticidade dinâmico e maior deformabilidade), comparativamente com as argamassas de cimento, apresentam-se como uma boa solução na reabilitação de edifícios antigos, porque tem uma maior capacidade de acompanhar os movimentos do suporte (FARIA, 2004).

Estudos realizados puderam comprovar que uma argamassa de cal aérea possui uma permeabilidade ao vapor de água apenas ligeiramente superior aquela apresentada pelo tijolo cerâmico (PAVLIKOVÁ, et al., 2008). Refira-se que o material cerâmico utilizado neste estudo tinha características muito semelhantes às de um material histórico.

Embora se apresente como uma melhor solução na área de reabilitação, relativamente às argamassas com cimento Portland, o seu elevado tempo de presa especialmente em ambientes muito húmidos e com fraco contacto com CO_2 , não encoraja sua utilização. Foram necessários 13 meses para a aplicação e endurecimento de três camadas de uma argamassa de cal aérea numa obra de recuperação de um edifício no norte de Portugal (DIAS, et al., 2011).

Desta forma, torna-se fundamental saber a que condições ambientais estarão sujeita as argamassas de reparação durante todo o período de endurecimento.

2.2.2. ARGAMASSAS DE CAL AÉREA E POZOLANAS

Com o maior interesse nas argamassas de cal aérea com vista à reabilitação de edifícios, tem vindo também a ressurgir o interesse na introdução das pozolanas com o objectivo de acelerar o processo de endurecimento das argamassas (DIAS, et al., 2011) e aumentar a sua durabilidade (VEIGA, 2003).

As pozolanas, quando misturadas com água, reagem à temperatura ambiente normal com o hidróxido de cálcio, proporcionando melhores resistências às argamassas (COUTINHO, 2006).

Para além das melhorias mecânicas e redução do tempo de endurecimento, com a adição de pozolanas, as argamassas de cal aérea adquirem propriedades hidráulicas, permitindo a sua aplicação também em ambientes marítimos, com elevado teor de humidade e/ou fraco contacto com o dióxido de carbono (MARTINS, 2010).

2. Estado do conhecimento

Apesar das vantagens que lhe são reconhecidas, o uso de maiores percentagens de pozolana, não implica necessariamente melhores características às argamassas. Deve existir uma formulação específica, para cada pozolana, que produz melhores resultados, para determinada aplicação (VELOSA, et al., 2007).

2.3. NORMAS E ESPECIFICAÇÕES DE ENSAIO

Actualmente existem normas que visam padronizar procedimentos a serem efectuados em laboratório. Contudo, por vezes essas normas não são específicas, o que tornam difícil a reprodução de ensaios laboratoriais. Desta forma muitas vezes os procedimentos de ensaio acabam por variar de autor para autor, tornando impossível a comparação de resultados entre eles (FARIA, 2004).

Enquanto os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, efectuados por uma determinada equipa, seguindo sempre as mesmas especificações, podem ser comparáveis, o mesmo não acontece no caso dos resultados serem obtidos por instituições diferentes (HENRIQUES, et al., 2008). Mesmo que sejam adoptados os mesmos procedimentos, o simples facto de decorrerem em laboratórios diferentes, pode condicionar os resultados finais (MASSENA, 2011) - devido a aspectos não especificados e que ficam dependentes do operador ou a diferença nos equipamentos, já para não falar nos materiais.

3. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS E DAS CONDIÇÕES DE CURAS

No presente capítulo far-se-á uma breve descrição e caracterização dos materiais usados na produção das argamassas em estudo.

3.1. DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

LIGANTE

O ligante usado para a produção dos provetes de argamassa, foi uma cal aérea hidratada em pó da marca **Lusical – CL90**.

METACAULINO

A pozolana usada nesta dissertação foi o metacaulino, mais especificamente, **Argical M 1200 S** de origem francesa.

AREIAS

Como agregados foram usadas areias AREIPOR, secas, de três tipos:

APAS 12 – Areia grossa;

APAS 20 – Areia intermédia;

APAS 30 – Areia fina.

As areias foram utilizadas em mistura, ao traço volumétrico 1;1,5;1,5 de APAS 12, APAS 20 e APAS 30 respectivamente.

As areias e a mistura de areias foram sujeitas a análise granulométrica e todos os constituintes secos a ensaios de determinação da baridade (Ba). Estes ensaios foram realizados no LNEC no âmbito de projectos de investigação em curso.

O traço volumétrico da mistura das areias foi definido no âmbito projecto FCT-METACAL, com o objectivo de obter uma argamassa com boa compactidade.

Houve o cuidado de manter os materiais devidamente fechados em sacos, de maneira a impedir o seu contacto com a humidade exterior, até ao momento da sua utilização.



Figura 3.1 - Cal aérea e areia

3. Descrição dos materiais e das condições cura

CONSTITUINTES DAS ARGAMASSAS

Foram feitas cinco argamassas, ao traço volumétrico 1:3 de ligante (ou ligante e metacaulino) e mistura de areias, com substituições crescentes de massa de cal aérea (L) por metacaulino (0, 9, 17, 23, 33%). Cada argamassa foi identificada com uma letra consoante o seu teor de metacaulino (Mk) como se pode constatar no Quadro 3.1. Todos os provetes estiveram dentro de sacos de plástico durante os primeiros 6 dias de cura para promover a reacção pozolânica e só depois foram desmoldados. Os provetes de argamassa A (sem metacaulino) estiveram mais 7 dias sujeitos a ambiente laboratorial, porque ao fim dos 6 dias ainda se apresentavam demasiado frescos para poderem ser desmoldados.

Quadro 3.1 - Constituintes das argamassas

	Argamassa	Traço Volumétrico	Constituintes
Cal aérea	A	1:3	[L] : [Areias]
Cal aérea com substituição de Metacaulino	B	1:3	[L + MK _(9% L)] : [Areias]
	C	1:3	[L + MK _(17% L)] : [Areias]
	D	1:3	[L + MK _(23% L)] : [Areias]
	E	1:3	[L + MK _(33% L)] : [Areias]

Contudo, para rigor laboratorial, as misturas foram feitas através de uma relação de massas; para tal, foi necessário converter o traço volumétrico para o traço ponderal, multiplicando a componente volumétrica de cada constituinte da argamassa pela respectiva baridade (Ba).

Considerou-se que o traço volumétrico 1:3 é eficiente para argamassas de revestimento de edifícios antigos desde que a areia tenha uma boa granulometria e um baixo volume de vazios (VEIGA, 2007), pois o baixo teor de ligante reduz a propensão para fenómenos de retracção (MARTINS, 2010).

3.2. DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CURA

Como referido anteriormente, nesta dissertação foram estudadas duas condições de cura distintas à temperatura de 23°C: a cura húmida (H) em que os provetes estavam sujeitos a uma HR de 95% e a cura de referência (R) em que os provetes foram mantidos num ambiente com HR de 65% e a, como se pode observar no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Condições de cura

Curas	Humidade relativa	Temperatura
Húmida (H)	95±5%	23±3°C
Referência (R)	65±5%	23±3°C

O objectivo era perceber que influência pode ter a HR na evolução das características físicas, mecânicas e químicas das argamassas, sabendo que um ambiente húmido é caracterizado por ter muito vapor de água, o que à partida iria potenciar a reacção do Mk com o hidróxido de cálcio da cal aérea, em detrimento da reacção da carbonatação da cal aérea com o dióxido de carbono (REVILLA, et. al., 2006).

No ANEXO I apresentam-se os dados relativos à humidade relativa e temperatura, recolhidos das salas das curas H e R.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES

Para melhor organização dos provetes e para garantir que estes seriam executados em número suficiente para a realização de todos os ensaios previamente definidos, e que ainda sobravam provetes para virem a ser ensaiados a idades mais avançadas (180 dias, 1 ano e idade mais avançada), optou-se por definir siglas de identificação de cada provete.

Assim, foram definidas letras de identificação dos provetes de cada argamassa e tipo de cura, sendo numerados consoante os ensaios a que seriam submetidos.

Como cada ensaio seria feito a três provetes de cada argamassa e de cada tipo de cura, realizaram-se três provetes para cada ensaio seguinte:

- Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico, Edin;
- Ensaio à absorção de água por capilaridade e ensaio da secagem;
- Ensaio às resistências mecânicas (Rt e Rc) e porosidade aberta, Pab, aos 28 dias;
- Ensaio às resistências mecânicas (Rt e Rc) e porosidade aberta, Pab, aos 90 dias;
- Ensaio às resistências mecânicas (Rt e Rc) e porosidade aberta, Pab, aos 180 dias;
- Ensaio às resistências mecânicas (Rt e Rc) e porosidade aberta, Pab, a 1 ano;
- Ensaio às resistências mecânicas (Rt e Rc) e porosidade aberta, Pab, a longa idade.

Note-se que relativamente aos ensaios às resistências mecânicas, sendo estes destrutivos, não se poderiam submeter os mesmos provetes, ao mesmo ensaio, para idades diferentes, enquanto se contava utilizar os mesmos provetes a todas as idades nos ensaios de Edin, capilaridade e secagem.

No entanto, embora fosse inicialmente previsto que os mesmos provetes seriam sucessivamente utilizados para a determinação da capilaridade e secagem a cada idade, por motivos dos provetes 4, 5 e 6 de cada argamassa sofrerem deterioração na manipulação, esses ensaios passaram a ser efectuados com metade de cada provete resultantes do ensaio de resistência à tracção.

Inicialmente apenas estava prevista a realização dos ensaios para os 28 e 90 dias, mas, com os três meios provetes resultantes da Rt não utilizados para a determinação de Rc aos 28d optou-se por, complementarmente, determinar Rc e Pab aos 60 dias.

O Quadro 3.3 explica de forma sucinta o número atribuído a cada provete consoante o ensaio a que for submetido.

Desta forma, cada provete foi identificado consoante o teor de Mk, o tipo de cura a que foi sujeito e o tipo de ensaio a que seria submetido, bem como a sua idade. Por exemplo: o provete "AH12" corresponde a um provete da argamassa A (sem Mk), sujeito à cura H (húmida - 95% de HR) e submetido ao ensaio definido para os provetes com o número "12" (Rt, Rc e Pab aos 28 dias).

Este modelo de identificação, permitia ensaiar sempre os mesmos provetes aos ensaios não destrutivos. Em último caso, tornava também possível, a troca de provetes a serem submetidos a diferentes ensaios, desde que estes tivessem a mesma idade de cura.

3. Descrição dos materiais e das condições cura

Quadro 3.3 - Numeração dos provetes utilizados em cada ensaio

Idade de Cura	Ensaio	Argamassas				
		A	B	C	D	E
		Provetes	Provetes	Provetes	Provetes	Provetes
28 dias	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capilaridade; Secagem	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6	4, 5, 6
	Rt ; Rc ; Pab	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12
60 dias	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Rc ; Pab	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12	10, 11, 12
90 dias	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capilaridade; Secagem	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9
	Rt ; Rc ; Pab	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9	7, 8, 9
180 dias	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capilaridade; Secagem	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15
	Rt ; Rc ; Pab	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15	13, 14,15
365 dias	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capilaridade; Secagem	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18
	Rt ; Rc ; Pab	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18	16, 17, 18
Longa Idade	Edin	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3
	Capilaridade; Secagem	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21
	Rt ; Rc ; Pab	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21	19, 20, 21

Nota – Quando ensaiados aos 28 dias por infortúnio algum dos provetes 1, 2 ou 3 se deteriorava na manipulação, era substituído no ensaio de determinação de Edin por provetes que à mesma idade iriam de seguida ser usados para a determinação das resistências mecânicas.

4. PROCEDIMENTOS ADOPTADOS NOS TRABALHOS EXPERIMENTAIS

PLANO DE TRABALHOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento experimental desta dissertação está dividido em três fases distintas:

1ª fase – Caracterização e preparação das matérias-primas e definição das misturas das argamassas;

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 dos materiais utilizados na produção das argamassas, através da realização dos seguintes ensaios:

- Análise granulométrica;
- Determinação da baridade (Ba).

Os materiais foram acondicionados garantindo o seu grau de secagem.

Foram ainda, no LNEC, definidas as quantidades de constituintes de cada amassadura (cal aérea, eventualmente metacaulino, areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30 e água para obtenção de uma consistência por espalhamento comparável e que conduzisse a argamassas aplicáveis), em função da capacidade da cuba misturadora mecânica a ser utilizada.

Na 2ª fase, foram feitas argamassas com diferentes teores de metacaulino (Mk) e quando estas ainda se encontravam no estado fresco procedeu-se à sua caracterização através do ensaio de determinação da sua consistência por espalhamento (Esp) e à realização e compactação dos provetes, bem como ao seu acondicionamento em cura.

Na 3ª e última fase, foi feita a caracterização das argamassas no estado endurecido através da realização dos ensaios que se indicam de seguida.

Ensaio mecânicos que englobam as seguintes determinações:

- Módulo de elasticidade dinâmico (Edin);
- Resistência à tracção por flexão em três pontos (Rt);
- Resistência à compressão (Rc).

Ensaio físicos onde foram feitas as seguintes determinações:

- Absorção de água por capilaridade;
- Secagem;
- Porosidade aberta (Pab).

Por fim os ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais que englobam:

- Análise por MEV;
- Análise por DRX;
- Análise por ATG.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

Estes últimos ensaios não foram acompanhados no âmbito desta dissertação, tendo apenas sido encaminhadas para o LNEC amostras das argamassas para permitir a sua caracterização.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

No presente capítulo será feita uma descrição detalhada dos procedimentos dos ensaios que foram realizados para a caracterização das matérias-primas.

Os ensaios realizados foram a análise granulométrica e a determinação da baridade.

Estes ensaios foram realizados no LNEC, no âmbito do projecto FCT-METACAL, pelo bolsheiro do projecto; dado que não fazia sentido repeti-los, os resultados foram usados neste trabalho. Optou-se por incluir uma descrição desses ensaios, por fazerem parte da campanha experimental necessária.

4.1.1. ANÁLISE DA CURVA GRANULUMÉTRICA

GENERALIDADES

Como foi referido anteriormente, a granulometria dos materiais tem influência nas características finais das argamassas. Por isso é bastante importante realizar uma análise granulométrica aos agregados, de maneira a encontrar uma mistura que garanta um baixo volume de vazios.

Determinando previamente a granulometria dos materiais, é possível saber se é necessária maior ou menor adição de água, visto que, mantendo-se os restantes constituintes, quanto mais fina for a areia mais água terá de se adicionar à argamassa (BOTAS, 2009).

A análise granulométrica permite ainda determinar a máxima dimensão do agregado, a mínima dimensão do agregado e o módulo de finura:

Máxima dimensão do agregado - Corresponde à menor abertura de malha de uma série de peneiros através da qual passa uma quantidade de material (em gramas) maior ou igual a 90%. A máxima dimensão do agregado é utilizada em métodos de estudos aplicados ao betão tais como o método de Faury ou determinação do efeito parede.

Mínima dimensão do agregado - Corresponde à abertura da malha do maior peneiro por onde passou uma quantidade de material (em gramas) menor ou igual a 5%

Módulo de finura - Representa a dimensão média ponderada do peneiro do grupo no qual o material é retido e calcula-se somando as percentagens de cada material retido em cada peneiro da série principal, dividido por 100.

Como referido anteriormente, este ensaio foi realizado no LNEC, no âmbito do projecto FCT-METACAL, pelo bolsheiro do projecto, de acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000), a fim de determinar as características granulométricas das areias utilizadas na produção das argamassas.

Foi feita uma análise granulométrica às areias APAS 12, APAS 20, APAS 30 e da mistura ao traço volumétrico 1:1,5:1,5 das respectivas areias.

A análise granulométrica consiste em fazer passar uma amostra de uma areia por vários peneiros, com diferentes aberturas de malhas, com o objectivo de separar as partículas constituintes da areia, consoante as suas dimensões.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

De seguida, pesa-se o material retido em cada peneiro, determina-se a quantidade que passou por cada um e obtém-se o traçado da curva granulométrica.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Agitador de peneiros;
- Conjunto de peneiros em conformidade com as exigências da ISO 3310-1 (ISO, 2000);
- Tabuleiro;
- Balança de precisão de 0,01g.

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Colocaram-se inicialmente três amostras de cada areia na estufa à temperatura de 110°C durante 24h, a fim de se obter massa constante.

Depois de se pesar uma amostra, esta foi colocada no peneiro de maior abertura de malha da série previamente escolhida e efectuou-se uma peneiração mecânica durante 1 minuto.

De seguida pesou-se o material retido em cada peneiro, determinou-se a percentagem de material que passou em cada peneiro e procedeu-se ao traçado da curva granulométrica.

O processo repetiu-se para as restantes amostras e a curva granulométrica de cada areia foi obtida através de uma média feita com as três amostras.

4.1.2. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE

GENERALIDADES

Em obra a mistura dos materiais na produção de argamassas é feita ao traço volumétrico, mas em laboratório, com vista a obter dosagens mais exactas, transformam-se os traços volumétricos em valores ponderais e as misturas são feitas com massas exactas (MASSENA, 2011).

A determinação da baridade só pode ser feita para materiais granulares e os resultados obtidos dependem do grau de compactação da amostra, da granulometria das partículas e da sua forma (MARTINS, 2010).

Como referido anteriormente, este ensaio foi realizado no LNEC, no âmbito do projecto FCT-METACAL, pelo bolseiro do projecto, de acordo com a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2002).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Recipiente;
- Placa acrílica;
- Balança com precisão de 0,01g;
- Espátula;
- Funil de sólidos;
- Pá de pedreiro.

4. Procedimentos adotados nos trabalhos experimentais

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

- **Determinação da capacidade, V, do recipiente:**

Inicialmente pesou-se o recipiente e a placa acrílica separadamente.

Encheu-se o recipiente com água, tapou-se o topo com a placa acrílica (de maneira a que não houvesse ar nenhum dentro do recipiente) e pesou-se o conjunto RECIPIENTE+PLACA+ÁGUA. Subtraindo a massa do recipiente e a massa da placa ao peso do conjunto, determinou-se o peso da água.

Sabendo a massa volúmica da água determinou-se a capacidade (V) do recipiente através da seguinte expressão:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Sendo:

V – Capacidade do recipiente [cm³]

m – Massa da água [g]

ρ – Massa volúmica da água [g/cm³]

- **Determinação das baridades (Ba):**

Inicialmente secou-se a cal aérea na estufa durante 24h à temperatura de 40°C até atingir massa constante.

De seguida verteu-se a cal, a velocidade constante para dentro do recipiente, através de um funil de sólidos. O bordo inferior do funil e a superfície do recipiente encontravam-se espaçados de 73mm.

Com o recipiente cheio procedeu-se ao alisamento da superfície com uma espátula, com cuidado, para não compactar a amostra, e pesou-se o conjunto RECIPIENTE+CAL AÉREA.

Por fim, determinou-se a baridade (Ba) através da seguinte expressão:

$$B_a = \frac{m_3 - m_0}{V} \times 1000$$

Sendo:

B_a – Baridade [g/cm³]

m₃ – Massa do recipiente + cal aérea [g]

m₀ – Massa do recipiente [g]

V – Capacidade do recipiente [cm³]

O mesmo processo foi repetido mais duas vezes, e a baridade da cal aérea determinou-se fazendo uma média dos valores obtidos para as três amostras.

O mesmo procedimento foi adoptado para a determinação da baridade do metacaulino.

Para a determinação da baridade das areias o processo foi idêntico com a diferença do espaçamento entre o funil e o recipiente ser de 50mm e a temperatura da estufa ser de 110°C.

4.2. PREPARAÇÃO DAS ARGAMASSAS E CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

4.2.1. PLANEAMENTO DAS AMASSADURAS

Antes de mais foi necessário definir um plano para produção de argamassas, que garantisse que seriam feitos e ensaiados todos os provetes no espaço de tempo previamente definido (FARIA, 2011).

Foi necessário fazer 105 provetes para cada condição de cura. Como este trabalho experimental foi feito em conjunto com os colegas Rodrigo Massena e Sónia Robalo, que tinham de realizar na UNL os mesmos provetes para uma e duas condições de cura respectivamente, no total tinham de ser produzidos 525 provetes.

Com 525 provetes para fazer, com um número limitado de moldes disponíveis e sabendo que os provetes precisavam de pelo menos uma semana para serem desmoldados, houve a necessidade de definir quais os primeiros a serem produzidos.

Assim, optou-se por dividir a execução de provetes em duas fases:

Numa primeira fase foram feitos os provetes do 1 ao 9, na qual estão incluídos os provetes que seriam submetidos a ensaios não destrutivos e a ensaios mecânicos a idade de cura mais avançada, 90 dias - visto que os ensaios aos 180 dias, 1 ano e a longa idade, por limitação de tempo, não foram tidos em conta no âmbito desta dissertação.

Numa segunda fase procedeu-se à execução dos restantes provetes do 10 ao 21. Foi assim possível que os provetes 10, 11 e 12 (ensaio aos 28 dias) fossem produzidos e ensaiados enquanto os provetes 7, 8 e 9 (ensaios aos 90 dias) ganhavam idade de cura.

DOSAGENS POR AMASSADURA DAS ARGAMASSAS

Foram previamente definidas no LNEC, no âmbito do projecto, as dosagens de cal aérea, metacaulino, areias e água a serem usadas nas amassaduras.

Relativamente às dosagens de cal aérea, metacaulino, areias e água para cada amassadura, foram previamente definidas no LNEC, no âmbito do projecto, as quantidades que permitiam a realização de seis provetes.

Para aproveitar ao máximo a capacidade da cuba existente na UNL – que era maior do que a cuba do LNEC - e assim diminuir o número de amassaduras a realizar, para a produção de todos os provetes, decidiu-se aumentar em 1,5 vezes a quantidade dos materiais nas amassaduras realizadas na UNL, como se pode observar no Quadro 4.1, permitindo a realização de nove provetes por amassadura.

Quadro 4.1 -Dosagens por amassadura realizada na UNL – quantidade para 9 provetes – respectivo traço ponderal

Argamassa	% Mk	L (g)	Mk (g)	APAS 12 (g)	APAS 20 (g)	APAS 30 (g)	Total de areias (g)	Água (ml)	A/L*	Traço ponderal (L:Mk:S)
A	0	360	-	1100	1641	1621	4362	930	2,6	1:0:12
B	10	307,5	30,8	1055	1575	1557	4187	945	2,8	1:0,1:15
C	20	255	51	971	1450	1432	3853	975	3,2	1:0,2:18
D	30	210	63	852	1273	1257	3382	960	3,5	1:0,3:21,5
E	50	150	75	741	1106	1092	2939	960	4,3	1:0,5:29

* Na relação água-ligante (A/L), a quantidade de ligante é constituída pela porção de cal mais a porção de metacaulino

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais



Figura 4.1 - Mistura dos materiais: pesagem e homogeneização

4.2.2. AMASSADURAS

As amassaduras foram feitas com base nas indicações das normas EN 1015-2/A1 (CEN, 1998/2006) e NP EN 196-1 (IPQ, 2006), mas introduzindo algumas alterações relativas ao tempo de amassadura, pelo facto das definidas nas normas serem mais adequadas para a produção de argamassas de cimento. Procedeu-se de acordo com o procedimento de amassadura definido previamente no âmbito do projecto FCT-METACAL (FARIA, 2011).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Luvas;
- Máscara para o pó;
- Tabuleiros;
- Proveta graduada;
- Balança com precisão de 0,1g;
- Misturadora mecânica de argamassas;
- Pá de pedreiro;
- Rapa;
- Espátula.

PROCEDIMENTO

Pesou-se numa balança de 0,1g, as areias, a cal e o metacaulino, de acordo com as quantidades indicadas no Quadro 4.1 correspondentes à argamassa a ser produzida.

Com as quantidades certas no tabuleiro, procedeu-se à homogeneização dos materiais secos e de seguida passou-se a mistura seca do tabuleiro para a cuba.

Consultando novamente o Quadro 4.1 encheu-se uma proveta graduada com a quantidade de água correspondente à argamassa em questão.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

Procedeu-se então à produção da argamassa ligando a misturadora mecânica durante 2,5 minutos, adicionando a água à mistura nos primeiros 15 segundos.

Ao fim dos 2,5 minutos parou-se a misturadora e raspou-se o material retido nas paredes e no fundo da cuba.

Por fim, ligou-se a misturadora mais 30 segundos.



Figura 4.2 - Mistura dos materiais na cuba antes e depois da amassadura

4.2.3. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

Este ensaio permite perceber a influência que determinada quantidade de água tem numa argamassa fresca, permitindo, de algum modo, avaliar a sua trabalhabilidade. Os resultados obtidos através deste ensaio estão de certa forma condicionados pela influência humana, visto que o equipamento, o modo de colocar a argamassa no molde, a compactação manual e o ritmo de pancadas na mesa de espalhamento por vezes variam ligeiramente com o operador (MARTINS, 2010).

A trabalhabilidade de uma argamassa é a capacidade que esta tem de se moldar e está directamente relacionada com a quantidade de água que contém. À partida, quanto mais água tiver, mais trabalhável é a argamassa e mais fácil é a sua aplicação em obra. Contudo, o excesso de água na argamassa vai provocar fenómenos de retracção que originam o aparecimento de fendas (VALLE, 2008).

Este ensaio foi realizado na UNL com base na norma EN 1015-3/A1/A2 (CEN, 1999/2004/2006), para todas as amassaduras, imediatamente após a execução das mesmas, com o intuito de verificar se estas apresentavam os valores previstos no projecto FCT-METACAL (correspondentes a aproximadamente 150mm se utilizada uma mesa de espalhamento de acordo com o último aditamento da norma referida - CEN, 2006).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Mesa de espalhamento;
- Cone;
- Pilão;
- Régua;
- Craveira.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Inicialmente procede-se ao humedecimento da mesa de espalhamento, do cone e do pilão.

De seguida, coloca-se o cone no centro da mesa de espalhamento e procede-se ao seu enchimento em duas camadas de argamassa, executando em cada uma, 10 inserções do pilão para eliminação dos vazios.

Alisa-se a superfície, retira-se o cone e efectuam-se 15 quedas na mesa em outros tantos segundos.

Por fim, com o auxílio de uma craveira e de uma régua, mede-se o diâmetro em duas direcções perpendiculares e regista-se a média em mm.

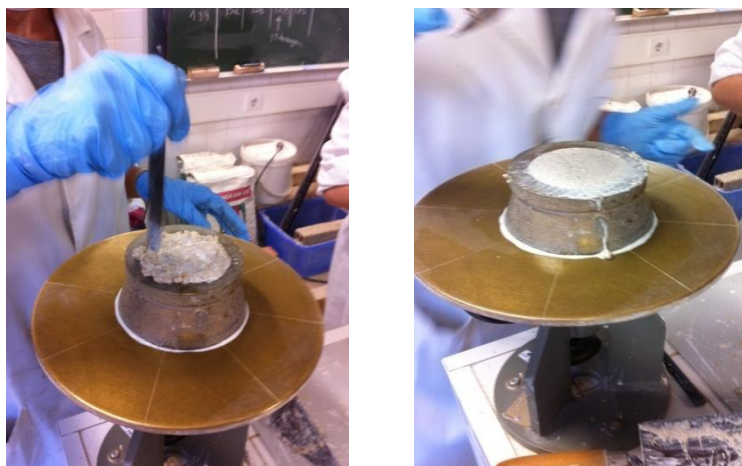


Figura 4.3 - Determinação da consistência por espalhamento

4.2.4. EXECUÇÃO DOS PROVETES

Foram executados provetes prismáticos em moldes metálicos (40x40x160mm), preenchidos em duas camadas compactadas, com base na norma NP EN 196-1 (IPQ, 2006). No entanto, e uma vez que em trabalho paralelo (MASSENA, 2011) se pretendia encontrar um equilíbrio entre a compactação mecânica utilizada na UNL e compactação manual utilizada no LNEC, alterou-se o número de pancadas em cada camada na tentativa de equilibrar procedimentos. Também em relação à cura ocorreram algumas alterações. A execução dos provetes e a sua cura seguiram os procedimentos previamente definidos no âmbito do projecto FCT-METACAL (FARIA, 2011).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Compactador mecânico;
- Moldes triplos prismáticos metálicos (40x40x160mm);
- Óleo descofrante (50% massa consistente e 50% óleo de automóvel);
- Acréscimo de molde;
- Pá de pedreiro;
- Sacos de polietileno.

PROCEDIMENTOS

Começou-se por fixar o molde e o seu acréscimo ao compactador mecânico.

Depois de fixado, encheu-se com argamassa, até um pouco acima de metade da sua altura e procedeu-se à sua compactação mecânica com 20 pancadas. De seguida, encheu-se novamente com argamassa, excedendo um pouco a altura do molde e efectuou-se nova compactação com 20 pancadas.

Retirou-se o molde e o seu acréscimo do compactador e rasou-se a face livre dos provetes.

Fechou-se o molde dentro de um saco de polietileno, e assim se manteve durante 6 dias até à desmoldagem dos provetes. Este procedimento foi seguido em todas as argamassas com Mk, mas não pode ser seguido no caso dos provetes de argamassa A que ao fim de seis dias em saco fechado se encontravam ainda muito pouco endurecidos, tendo sido deixados outros 7 dias fora do saco e só foram desmoldados ao fim de 13 dias.

Embora ainda frescos, os provetes foram desmoldados, colocados 24h na sala de cura H, então marcados com a respectiva identificação, tendo os provetes R passado para a sala da cura respectiva.

CUIDADOS PRÉVIOS A TER NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta fase do procedimento experimental, houve a necessidade de ter alguns cuidados prévios:

- Aprovisionar as quantidades necessárias das matérias-primas e dos materiais necessários.
- Os sacos das areias, da cal aérea e o metacaulino devem-se manter fechados o máximo tempo possível.
- A homogeneização manual dos materiais deve ser feita com muito cuidado a fim de não se perder material para fora do tabuleiro.
- A passagem da mistura do tabuleiro para a cuba deve ser feita de forma gradual, para minorar a libertação de pó e perda de material.
- Deve-se verificar se os moldes estão bem apertados e a existência de óleo descofrante (remoção quando em excesso).
- Antes de se proceder à compactação deve-se verificar se o molde e o acréscimo estão bem fixos ao compactador mecânico.
- Como no mesmo dia eram feitas argamassas diferentes e para evitar enganos, à medida que as amassaduras eram colocadas nos moldes, estes eram identificados com a letra correspondente à argamassa. Assim, quando se procedia à descofragem dos provetes (depois de endurecidos), estes eram identificados de acordo com a letra marcada no respectivo molde.
- No momento da desmoldagem há que evitar mexer demasiado nos provetes, porque estes ainda se apresentam muito frágeis. Muito cuidado na desmoldagem.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais



Figura 4.4 - Molde e respectivo acréscimo, fixos ao compactador mecânico



Figura 4.5 - Argamassas nos moldes antes e depois destes serem colocados dentro de sacos de polietileno

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1. PLANEAMENTO DOS ENSAIOS

Como foi referido anteriormente, os provetes foram sujeitos a vários ensaios no estado endurecido, tendo sido genericamente utilizados três provetes para cada ensaio, cada condição de cura e cada idade.

Os resultados finais determinaram-se fazendo uma média dos valores obtidos nos ensaios realizados aos três provetes.

Como referido em 3.3, os provetes 1, 2 e 3 destinavam-se aos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), em todas as idades; os provetes 4, 5 e 6 destinavam-se aos ensaios de absorção de água por capilaridade e de secagem, em todas as idades; os provetes 7, 8 e 9 destinavam-se aos restantes ensaios aos 90 dias tal como os provetes 10, 11 e 12 para os 28 dias;

Para que cada um destes últimos provetes pudesse garantir a execução dos restantes ensaios, estipulou-se a seguinte ordem de ensaios:

- O primeiro ensaio a ser executado foi o da determinação da resistência à tracção por flexão em três pontos (R_t).
- Uma das metades de cada provete resultante do ensaio R_t foi utilizada no ensaio de determinação da resistência à compressão (R_c) e a outra metade foi para a respectiva cura, ou aos 90 dias, foi para a estufa para execução dos ensaios de capilaridade e secagem.

Do ensaio Rc resultaram três amostras do meio provete, utilizando-se o topo do mesmo no ensaio de determinação da porosidade aberta (Pa) e a restante amostra foi acondicionada em saco plástico fechado, destinada aos ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais a realizar no LNEC.

4.3.2. DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

O valor do módulo de elasticidade dinâmico de uma argamassa é inversamente proporcional à sua deformabilidade (BOTAS, 2009) e é directamente proporcional à resistência à tracção.

O módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento deverá diminuir à medida que vão sendo aplicadas camadas de argamassa do interior para o exterior (FARIA, 2004).

Este ensaio foi realizado na UNL com base na norma NP EN 14146 (IPQ, 2006), e consiste na determinação da frequência de ressonância longitudinal, em provetes prismáticos, através da emissão de vibrações.

O ensaio de determinação do módulo de elasticidade (E_{din}), foi feito aos 28, 60 e 90 dias, aos três provetes de cada argamassa e de cada condição de cura. O resultado final é uma média dos valores obtidos com os três provetes.

Todos os provetes H a serem ensaiados foram colocados na sala cura R, 24h antes do ensaio, para garantir que seriam ensaiados em condições mais aproximadas relativamente ao teor em água, uma vez que este tem influência directa nos resultados obtidos (FARIA, 2004).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Balança com precisão de 0,01g;
- Equipamento “Zeus Resonance Meter”.

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Procedeu-se à pesagem de cada provete numa balança com precisão de 0,01g

De seguida colocou-se o provete no equipamento “Zeus Resonance Meter” que está associado a um programa de cálculo onde foram inseridos os valores da massa e das dimensões do provete. Mudando a posição do provete no equipamento (por rotação e por inversão dos topos), obtinham-se mais valores para o mesmo provete.

Por fim o programa de cálculo determinou o valor do módulo de elasticidade do provetes através da seguinte expressão (FARIA, 2004):

$$E_{din} = \frac{2 \times L \times f_0 \times \rho}{g \times 10^{-4}}$$

Sendo:

E_{din} – Módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

L – Comprimento do provete [m];

f_0 – Frequência da ressonância longitudinal [Hz];

ρ – Massa volúmica do provete [N/m^3];

g – Aceleração da gravidade [$9,8 \text{ m/s}^2$].

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais



Figura 4.6 - Zeus Resonance Meter

4.3.3. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO EM TRÊS PONTOS (Rt)

A resistência à tracção é determinada no estado endurecido das argamassas, submetendo os provetes a um ensaio de flexão em três pontos. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga pontual a meio do comprimento (L) de um provete que se encontra apoiado em dois pontos espaçados de 100mm. Ao serem submetidos a este ensaio, a rotura dá-se na face oposta à aplicação da força, que corresponde à face traccionada.

As argamassas de cal aérea apresentam resistências à tracção significativamente mais baixas que as argamassas de cimento. Pretende-se que a adição de pozolanas proporciona uma melhoria da resistência à tracção das argamassas de cal aérea.

Os resultados podem apresentar alguma variação de laboratório para laboratório, pois estão dependentes da calibração dos aparelhos de ensaio, bem como da respectiva célula de carga utilizada.

Por avaria do equipamento da UNL, este ensaio foi realizado no IST/UTL, de acordo com a norma EN 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 1999/2006), aos 28 e 90 dias de idade. Apenas as argamassas D e E aos 28 dias foram ensaiados no LNEC.

No IST determinação da resistência à tracção por flexão em três pontos foi efectuada utilizando o equipamento “DigMess M-10”, com uma célula de carga para a flexão de 10 kN, que lê o valor da última carga aplicada ao provete imediatamente antes de este atingir a rotura. No LNEC utilizou-se uma célula de carga de 2 kN.

Realizou-se o ensaio geralmente a três provetes de cada argamassa/condição de cura e o valor obtido resulta da sua média.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Equipamento “DigiMess M-10”.

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Colocou-se o provete horizontalmente na prensa de flexão, de forma a que o ponto de aplicação da carga fosse a meio do comprimento deste e de maneira a que a face livre do provete, aquando da moldagem, não estivesse em contacto com o aparelho (MASSENA, 2011).

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

Aplicou-se uma força gradualmente crescente, até o provete atingir a rotura.

Registou-se a força de rotura e procedeu-se à determinação da resistência à tracção por flexão através da seguinte expressão:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b \times d^2} \times 10^3$$

Sendo:

R_t – Resistência à tracção por flexão [MPa]

F_f – Carga de rotura à tracção por flexão [kN]

l – Distância entre apoios que suportam o provete [mm]

b – Espessura do provete [mm]

d – Profundidade do provete [mm]



Figura 4.7 - Ensaio de determinação da resistência à tracção por flexão em três pontos

4.3.4. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (R_c)

À semelhança da resistência à tracção, a adição de pozolanas visa aumentar as características mecânicas à compressão das argamassas de cal aérea, dependendo das condições de cura a que foram sujeitas. Contudo, mesmo com adição de pozolanas, as argamassas de cal nunca apresentarão resistências à compressão tão altas como as verificadas em argamassas de cimento (MARTINS, 2010). Nem tal era favorável em argamassas para aplicação em edifícios antigos.

À semelhança do módulo de elasticidade dinâmico e da resistência à tracção, a resistência à compressão de uma argamassa de substituição deve ser idêntica à da argamassa original e inferior à do suporte (VEIGA, 2005).

Os ensaios para a determinação da resistência à compressão foram realizados no IST/UTL, de acordo com a norma 1015-11:1999/A1:2006 (CEN, 1999/2006), aos 28, 60 e 90 dias de idade das argamassas. Apenas as argamassas D e E aos 28 dias foram ensaiadas no LNEC.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

Como referido anteriormente, foram realizados provetes para serem ensaiados aos 28 e 90 dias, tendo-se definido posteriormente a determinação também aos 60 dias. Assim, para a determinação da resistência à compressão aos 60 dias, foram utilizados os meios provetes não ensaiados à compressão, resultantes do ensaio da R_t aos 28 dias que entretanto estiveram nas respectivas curas.

O equipamento utilizado neste ensaio foi o mesmo do ensaio da R_t , o “DigiMess M-10” com a célula de carga de compressão de 10 kN.

Realizou-se o ensaio geralmente a três provetes de cada argamassa/condição de cura e o valor obtido resulta da sua média.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Equipamento “DigiMess M-10”

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Colocou-se o provete horizontalmente na prensa de compressão, de maneira a que a face livre do provete, aquando da moldagem, não estivesse em contacto com o aparelho (MASSENA, 2011).

Aplicou-se uma força gradualmente crescente, até o provete atingir a rotura.

Registou-se a força de rotura e procedeu-se à determinação da resistência à compressão através da seguinte expressão:

$$R_c = \frac{F_c}{Secção}$$

Sendo:

R_c – Resistência à compressão [N/mm^2];

F_c – Carga de rotura à compressão [kN];

Secção – Área da secção da aplicação da carga [mm^2].



Figura 4.8 - Ensaio de determinação da resistência à compressão

4.3.5. DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

É importante perceber o comportamento das argamassas relativamente à absorção capilar, porque a absorção excessiva de água pode levar ao aparecimento de diversa patologia, devido não só a presença de água no interior do revestimento mas também às substâncias transportadas pela mesma, tais como poluentes atmosféricos e sais solúveis e higroscópicos (SOUSA, et al., 2005).

Através do gráfico da capilaridade é possível determinar a velocidade de absorção de água inicial, dada pelo coeficiente de capilaridade, e a quantidade de água total absorvida durante o ensaio, dada pelo valor assintótico (FARIA, 2004).

Especialmente quando as faces laterais dos provetes não são impermeabilizadas, este ensaio deve decorrer num ambiente saturado para se poder quantificar a massa de água absorvida, sem que ocorra evaporação da mesma.

Este ensaio foi realizado na cura R, no DEC/FCT-UNL, com base nas normas EN 1015-18 (CEN, 2002) e EN 15801 (CEN, 2009), aos 28 e 90 dias de idade das argamassas.

O ensaio decorreu dentro de um tabuleiro devidamente nivelado, com uma rede plástica colocada na base, de modo a permitir o contacto da base dos provetes com a água e uma altura de lâmina de água constante de 5mm.

O tabuleiro encontrava-se dentro de uma caixa plástica fechada e apoiado sobre dois tijolos submersos em água, de maneira a garantir um ambiente saturado.

Deste ensaio obteve-se um gráfico, que resulta de uma relação entre a quantidade de água absorvida por unidade de área da base do provete (Kg/m^2) e a raiz quadrada do tempo decorrido ($\text{s}^{0,5}$). Determinou-se o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (Va):

- O coeficiente de capilaridade corresponde à inclinação do segmento de recta obtida no troço inicial;
- O valor assintótico corresponde à quantidade máxima de água absorvida por unidade de área da base do provete.

Realizou-se o ensaio geralmente a três provetes de cada argamassa/condição de cura e o valor obtido resulta da sua média.

“É provável que a alteração da microestrutura interna das argamassas resultante do desenvolvimento da carbonatação de argamassas com base em cal aérea possa conduzir a diferenças significativas em termos das características face à capilaridade” (MASSENA, 2011).

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Caixa estanque;
- Dois tijolos;
- Tabuleiro rígido;
- Rede plástica;
- Nível de bolha-de-ar para nivelamento do tabuleiro;
- Balança de precisão de 0,001g;
- Esguichador para reposição da altura de água.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Antes da realização do ensaio, foi necessário garantir que os provetes estavam totalmente secos; para tal, foram colocados numa estufa durante 48 horas à temperatura de 60°C, a fim de atingirem massa constante (variação de massa inferior a 0,1% no espaço de 24 horas).

De seguida pesou-se cada um dos provetes, registou-se o seu valor e colocou-se o provete dentro do tabuleiro.

Ao fim de 5 minutos procedeu-se a nova pesagem pela mesma ordem: retirou-se o provete, deixou-se pingar o excesso de água com um movimento sempre idêntico, pesou-se e colocou-se de novo na caixa.

O mesmo processo repetiu-se aos 10min, 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 5h, 7h e depois de 24 em 24h até que a diferença de massas entre duas pesagens sucessivas fosse inferior a 1%.

Para os provetes inteiros do ensaio aos 28 dias foi necessário efectuar pesagens até à sétima hora do primeiro dia, para se obter a curva que sucede a recta que determina o valor de CC. As restantes pesagens de 24 em 24 horas determinam o andamento da recta de menor inclinação que determina o valor assintótico.

Relativamente aos meios provetes utilizados no ensaio aos 90 dias, adoptou-se a mesma sequência das pesagens referida atrás, mas neste caso ao fim da quinta hora de pesagens obteve-se o gráfico completo da capilaridade. Porém, por uma questão de segurança, foram feitas pesagens de 24 em 24 horas para se certificar que o provete não apresentava uma diferença de massas superior a 1% entre duas pesagens sucessivas.

CUIDADOS A TER NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Relativamente a este procedimento experimental devem ter-se os seguintes cuidados:

- Antes de iniciar o ensaio, deve-se verificar se o tabuleiro está devidamente nivelado e se a lâmina de água se encontra ao nível desejado.
- Deve-se pegar nos provetes o mais em baixo possível e com muito cuidado no seu manuseamento dado que estes, especialmente aos 28 dias e quando utilizados inteiros, se apresentam muito frágeis. À medida que o ensaio foi decorrendo, mais saturados e mais frágeis ficavam.
- Deve-se controlar regularmente a altura da lâmina de água com a ajuda de uma régua e repor água quando em falta. Na reposição de água há que ter cuidado para não molhar os provetes.
- Manter a caixa fechada sempre que possível.
- Quando este ensaio é feito a muitos provetes em simultâneo, é aconselhável que o ensaio seja assegurado por duas pessoas (uma para efectuar as pesagens e outra para apontar os resultados)
- Como na fase inicial do ensaio é necessário fazer pesagens de 5 em 5min, tem de se garantir que se consiga pesar todos os provetes nesse espaço de tempo.



Figura 4.9 - Determinação da absorção de água por capilaridade

4.3.6. DETERMINAÇÃO DA SECAGEM

Da mesma forma que é importante conhecer o comportamento das argamassas relativamente à absorção capilar, é importante caracterizar o processo de secagem das mesmas. Quanto mais tempo a água se mantiver dentro da argamassa, maiores são os riscos de ocorrência de patologia.

A humidade em excesso nos revestimentos leva ao aparecimento de manchas e à formação de gotas à superfície e a sua presença nos poros da argamassa pode levar à sua destruição, especialmente se estiver submetido a ciclos gelo-degelo ou se existirem sais solúveis transportados (SOUSA, et al., 2005).

“Em termos gerais a secagem pode ser definida como sendo o processo pelo qual a água abandona o material poroso. Este processo envolve o transporte de líquido até à frente húmida, a evaporação do líquido, a eventual migração do vapor através do material (se a frente húmida não se localizar na superfície) e, finalmente, a propagação do vapor no ambiente” (BRITO, 2009)

Este ensaio foi realizado aos 28 e 90 dias de idade de cura das argamassas, no DEC/FCT-UNL, na mesma sala (de cura R) em que decorreu o ensaio da determinação de absorção de água por capilaridade.

O início do ensaio de secagem coincidiu com o final do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.

Este ensaio consistiu em retirar os provetes saturados do tabuleiro do ensaio da capilaridade, colocá-los sobre uma rede plástica seca (para os provetes não ficarem directamente apoiados e haver acesso de ar à base) e efectuar pesagens durante o processo de secagem.

As pesagens foram feitas – tanto para os provetes do ensaio aos 28 dias como para os meios provetes do ensaio aos 90 dias - numa balança de precisão de 0,001g, de hora em hora até completar 7h e depois de 24 em 24h até que a massa dos provetes aumentasse ou até os provetes atingirem a mesma massa que tinham antes do início do ensaio da capilaridade.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

O gráfico exprime o teor em água dos provetes (%), em função da raiz quadrada do tempo de ensaio decorrido ($s^{0,5}$).

Realizou-se o ensaio geralmente a três provetes de cada argamassa/condição de cura e o valor obtido resulta da sua média.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Rede plástica;
- Balança de precisão de 0,001g;
- Sala de cura condicionada.

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio consiste em efectuar pesagens nos instantes de tempo atrás referidos

Depois da realização das pesagens procedeu-se à determinação do teor em água dos provetes através da seguinte expressão: m_0

$$W_t = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

Sendo:

W_t – Teor em água [%]

m_1 – Massa do provete ao fim do tempo t_1 [Kg]

m_0 – Massa do provete seco, no instante t_0 [Kg]

Calculou-se também o índice de secagem (IS) através da seguinte expressão (BRITO, 2009):

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(t_i - t_{i-1}) \times \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2}]}{Q_{\text{máx}} \times t_f} \times 100$$

Sendo:

IS – Índice de secagem

t_i – Tempo de ensaio no instante i [h]

t_f – Tempo final do ensaio [h]

Q_i – Teor em água do provete no instante i [%]

$Q_{\text{máx}}$ – Teor em água no provete no início do ensaio [%]



Figura 4.10 - Ensaio de secagem

4.3.7. DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE ABERTA (Pab)

A porosidade aberta é influenciada pelos materiais utilizados, pelos processos de amassadura adoptados, pelo traço da argamassa, pela quantidade de água utilizada e pelas condições de cura (RATO, 2006).

Existem dois tipos de porosidade: porosidade aberta quando existe ligação entre os poros da argamassa e o exterior; porosidade fechada, quando não existe comunicação entre os poros e o exterior da argamassa (MARTINS, 2010).

Este ensaio decorreu no DEC/FCT-UNL, com base na norma EN 1936 (CEN, 1999) com algumas alterações, porque esta norma é específica para provetes de pedra natural.

Foi determinada a porosidade aberta aos topos de todos os meios provetes submetidos ao ensaio de determinação das resistências à compressão, aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura.

Os topos dos provetes estavam totalmente secos no início deste ensaio, porque estiveram vários dias em estufa à temperatura de 60°C, garantindo-se estarem em massa constante.

MATERIAIS NECESSÁRIOS

- Exsicador;
- Bomba de vácuo e respectivos acessórios que assegurem o seu correcto funcionamento e controlo de pressão de vácuo;
- Balança de precisão de 0,001g com dispositivo que permita efectuar pesagens hidrostáticas;
- Recipiente para pesagem hidrostática;
- Tabuleiro;
- Pano encharcado.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais



Figura 4.11 - Bomba de vácuo e respectivos acessórios que assegurem o seu correcto funcionamento e controlo de pressão de vácuo



Figura 4.12 - Exsicador

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O ensaio iniciou-se com a remoção do material solto nos topos dos provetes e de seguida procedeu-se à pesagem dos mesmos.

À medida que os topos eram pesados, eram colocados no exsicador a fim de aproveitar, ao máximo, o espaço disponível.

Depois de todos os topos terem sido pesados e colocados no exsicador, procedeu-se ao seu isolamento, tapando todas as aberturas em contacto com o exterior.

Ligou-se, de seguida, a bomba de vácuo, que foi retirando ar do interior do exsicador até este atingir uma pressão de 20Torr.

Ao fim de 24 horas, introduziu-se água dentro do exsicador, mantendo a mesma pressão, até os provetes ficarem totalmente submersos. Este processo é feito de forma gradual e com uma duração nunca inferior a 15 minutos.

Passadas 24 horas desligou-se a bomba de vácuo e destaparam-se todas as aberturas em contacto com o exterior, permitindo a entrada de ar para o interior do exsicador. Assim se manteve novamente durante 24 horas.

4. Procedimentos adoptados nos trabalhos experimentais

Procedeu-se, por fim, à pesagem hidrostática e dos provetes saturados na respectiva ordem. Realizaram-se primeiro as pesagens hidrostáticas de dois provetes, seguidas da pesagem saturada do primeiro provete pesado, executando-se sucessivamente pesagens intercaladas. Este processo permitiu que os provetes fossem colocados alguns instantes num tabuleiro sobre um pano molhado entre cada pesagem, de modo a eliminar apenas a água superficial.

A balança utilizada no ensaio realizado aos 28 dias tinha precisão de 0,01g.

Concluído o ensaio determinou-se a porosidade aberta através da seguinte expressão:

$$P_{ab} = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100$$

Sendo:

P_{ab} – Porosidade aberta [%]

m_1 – Massa do provete seco [g]

m_2 – Massa hidrostática do provete [g]

m_3 – Massa do provete saturado [g]

CUIDADOS A TER NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

- Nesta fase do procedimento experimental foram necessários os seguintes cuidados particulares:
- Os provetes não podem ficar encostados às paredes do exsicador nem entre si.
- Antes de ligar a bomba de vácuo tem de se assegurar que o exsicador se encontra devidamente fechado
- Tem de se assegurar que a entrada de água no exsicador não é feita directamente sobre nenhum provete.
- O nível da água deverá ficar a cerca de 3cm acima do último provete, visto que no decorrer do ensaio o nível irá baixar (água ocupa volume de ar extraído da porosidade aberta) e os provetes terão de se manter totalmente submersos. Contudo o nível da água deverá ficar sempre abaixo da abertura de ligação à bomba.



Figura 4.13 - Ensaio de determinação da porosidade aberta

4.3.8. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MINERALÓGICA E MICROESTRUTURAL

Estes ensaios foram realizados no LNEC, por um bolsheiro do projecto FCT-METACAL, aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura das argamassas. Os resultados destes ensaios foram usados para a interpretação dos valores obtidos nos ensaios físicos e mecânicos realizados neste trabalho, pelo que se optou por apresentar aqui uma breve descrição dos métodos usados.

Para a realização destes ensaios foram utilizadas amostras resultantes dos ensaios às resistências à compressão.

Nesta caracterização serão feitas análises por Microscópio, Electrónico de varrimento (MEV), por difracção de Raio X (DRX) e por Análise Térmica Gravimétrica (ATG)

PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Começou-se por colocar a amostra na estufa a 40°C durante 24h e de seguida no exsiccador até à realização do ensaio, para não ganhar humidade.

Retirou-se um fragmento da amostra e pôs-se num saco estanque para posteriormente ser feita a análise MEV.

Relativamente à análise por DRX, esta foi feita através de fracção fina e da amostra global. A fracção fina foi obtida através da desagregação de uma porção da amostra com o auxílio de um martelo de borracha mas de maneira a não alterar os agregados. A amostra global foi obtida através da moagem de fragmento de amostra até que este atravessasse um peneiro com abertura de malha de 106µm (MASSENA, 2011).

A amostra global foi posteriormente colocada num saco estanque e foi utilizada também na análise por ATG.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira parte serão apresentados os resultados obtidos na caracterização das matérias-primas; na segunda os resultados obtidos na caracterização das argamassas no estado fresco e por fim os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido.

5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

5.1.1. ANÁLISE GRAULOMÉTRICA

A Figura 5.1 apresenta o resultado da análise granulométrica realizada no LNEC às areias APAS12, APAS 20, APAS 30 e à respectiva mistura ao traço volumétrico 1:1,5:1,5

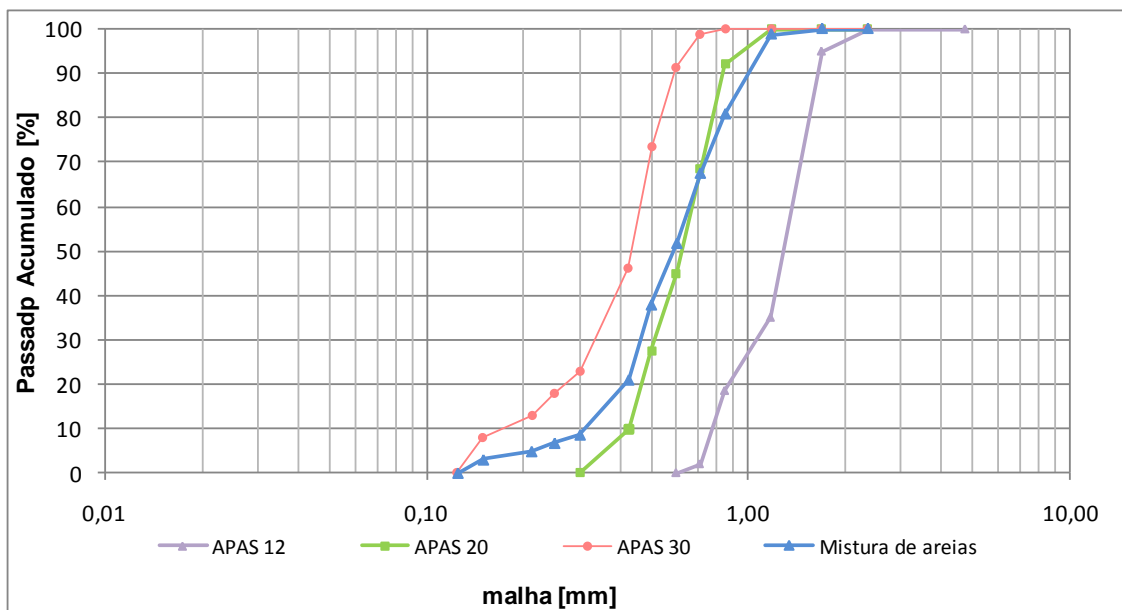


Figura 5.1 - Análise granulométrica das areias e respectiva mistura

Observando a Figura 5.1, verifica-se que a curva granulométrica da mistura de areias apresenta uma areia melhor graduada que cada uma das areias individualmente.

O Quadro 5.1 apresenta os valores da máxima e mínima dimensão e do módulo de finura de cada agregado e da mistura das areias.

Quadro 5.1 - Módulo de finura e máxima e mínima dimensão das areias e da respectiva mistura

		Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]	Módulo de finura [mm]
Areias	APAS12	1,180	0,710	3,03
	APAS20	1,180	0,425	2,55
	APAS30	0,710	0,212	1,78
Mistura das areias		1,180	0,425	5,00

5. Análise dos resultados

Observando o Quadro 5.1 constata-se que a mistura das areias apresenta um módulo de finura superior ao das restantes areias individualmente e a máxima e mínima dimensão igual à da areia intermédia (APAS 20). Como seria expectável a areia mais fina (APAS 30) é aquela que apresenta a mínima dimensão do agregado mais baixa e as areias APAS 12 e APAS 20 são aquelas que apresentam uma máxima dimensão do agregado maior.

5.1.2. ANÁLISE DAS BARIDADES

As baridades das areias APAS12, APAS 20, APAS 30, da mistura de areias, da cal aérea e do metacaulino apresentam-se no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 - Baridade dos constituintes das argamassas

	Areias			Mistura das areias	Cal aérea	Metacaulino
	APAS12	APAS20	APAS30			
Baridade [g/cm ²]	1,412	1,405	1,388	1,463	0,362	0,294

Como seria de esperar a mistura das areias apresenta maior baridade visto que é constituída por materiais de diferentes granulometrias; seguem-se as areias APAS 12, APAS 20 e APAS 30 na respectiva ordem e por fim a cal aérea e o metacaulino, por se tratarem de materiais finos.

O facto de a mistura de areias apresentar uma baridade superior a qualquer uma das areias permite obter uma argamassa mais compacta.

Sabendo as baridades foi possível determinar uma relação de massas através dos traços volumétricos das areias e das argamassas, permitindo assim calcular as quantidades a serem usadas nas amassaduras e que foram apresentadas no Quadro 4.1.

5.2. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

A caracterização das argamassas no estado fresco foi feita através do ensaio de determinação da consistência por espalhamento

5.2.1. DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

No âmbito do projecto FCT-METACAL, estipulou-se uma gama de valores de espalhamento na ordem dos 150±10mm utilizado, como foi referido anteriormente, a mesa de espalhamento de acordo com o último aditamento da norma EN 1015-3/A1/A2 (CEN, 2006). As argamassas em estudo na presente dissertação foram submetidas ao ensaio no DEC/FCT-UNL, apresentando os seguintes resultados (Quadro 5.3):

Quadro 5.3 - Espalhamento médio obtido nas amassaduras realizadas na UNL

Amass.	Espalhamento (mm)	Espalhamento Médio (mm)	Desvio Padrão	Relação A/L
1	141	132,2	4	2,6
2	133			
3	134,5			
4	130			
5	133			
6	132,5			
7	126,5			
8	126			
9	138			
10	130,5			
11	130			
12	131,5			
1	128,5	127,1	2	2,8
2	129,5			
3	127			
4	122,5			
5	128			
6	128			
7	130,5			
8	126			
9	124,5			
10	126			
1	138,5	130,1	5	3,2
2	132,5			
3	131,5			
4	135,5			
5	135,5			
6	126			
7	128,5			
8	127,5			
9	123			
10	122,5			
1	141,5	133,4	6	3,5
2	138,5			
3	136			
4	140,5			
5	128			
6	130			
7	126,5			
8	127			
9	133			
1	134	133,1	1	4,3
2	130,5			
3	131			
4	132,5			
5	134,5			
6	133,5			
7	133,5			
8	133,5			
9	134			
10	133,5			

5. Análise dos resultados

Como se pode constatar no Quadro 5.3 as argamassas realizadas na FCT\UNL apresentam menor valor de espalhamento do que o previsto, com um valor médio de espalhamento entre argamassas de 131,2mm e um desvio padrão de 3,9mm.

As argamassas correspondentes realizadas no LNEC, em estudo paralelo (MASSENA, 2011), apresentam valores de consistência de acordo com o previsto, tendo um valor médio de espalhamento de 153,8mm e um desvio padrão de 3,8mm.

Na UNL a mesa de espalhamento utilizada está de acordo com a versão inicial da norma e, em estudos realizados no LNEC em que foram comparados resultados de uma mesma argamassa mas utilizando os dois tipos de mesa, constatou-se que os resultados usando o equipamento mais antigo são cerca de 10% inferiores aos correspondentes à utilização do equipamento mais recente (informação verbal disponibilizada pela Doutora Rosário Veiga), o que justifica os valores de espalhamento obtidos.

5.2.2. DESMOLDAGEM DOS PROVETES

Como referido anteriormente, após moldagem, todos os provetes e respectivos moldes foram colocados em sacos de polietileno fechados, para evitar evaporação rápida de humidade. Ao fim de 7 dias todos os provetes de todas as argamassas foram desmoldados cuidadosamente, excepto os provetes de argamassa A, cuja argamassa se encontrava muito fresca.

Tal possibilitou constatar as diferentes características das argamassas quanto à sua capacidade de endurecimento em ambiente húmido e com fraca renovação de CO₂, com vantagens evidentes para argamassas com substituição parcial de massa de cal aérea por Mk.

5.3. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A caracterização das argamassas no estado endurecido permitiu estudar a evolução das suas propriedades ao longo do tempo de cura.

Esta caracterização foi feita através dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade, resistência à tracção por flexão em três pontos, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, secagem, porosidade aberta e ensaios químicos, mineralógicos e microestruturais.

5.3.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS AO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram feitos aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura das argamassas.

O módulo de elasticidade dinâmico está directamente relacionado com a deformabilidade de uma argamassa; quanto maior o valor de E_{din} , maior a sua rigidez, logo, menor a deformabilidade.

Segundo Veiga (2005) uma boa argamassa a ser aplicada em paredes antigas deverá apresentar, aos 90 dias de idade, valores de módulo de elasticidade dinâmico entre os 2000 e os 5000 MPa.

Antes do ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico, todos os provetes foram sujeitos durante 24h ao ambiente correspondente à cura R, a fim de serem ensaiados nas mesmas condições.

O Quadro 5.4 apresenta a média dos valores obtidos nos ensaios ao módulo de elasticidade dinâmico, bem como o respectivo desvio padrão.

Quadro 5.4 - Módulo de elasticidade dinâmico e desvio padrão de todas as argamassas aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura

Arg.	Cura	Elasticidade [MPa]					
		28 dias		60 dias		90 dias	
		Média	D.Padrão	Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
A	H	2645	223	3716	107	3988	100
	R	2567	55	3265	48	3380	54
B	H	1284	97	1105	129	4157	165
	R	861	27	967	48	3803	80
C	H	898	95	1959	349	3157	335
	R	583	87	2339	274	2329	260
D	H	1335	62	2035	511	1891	502
	R	468	17	1913	59	1892	52
E	H	1394	100	1045	269	1808	290
	R	885	81	1386	271	1386	271

Para melhor comparação dos valores de E_{din} das argamassas, a Figura 5.2 apresenta o gráfico com os valores do módulo de elasticidade dinâmico de todas as argamassas, para ambas as curas aos 28, 60 e 90 dias.

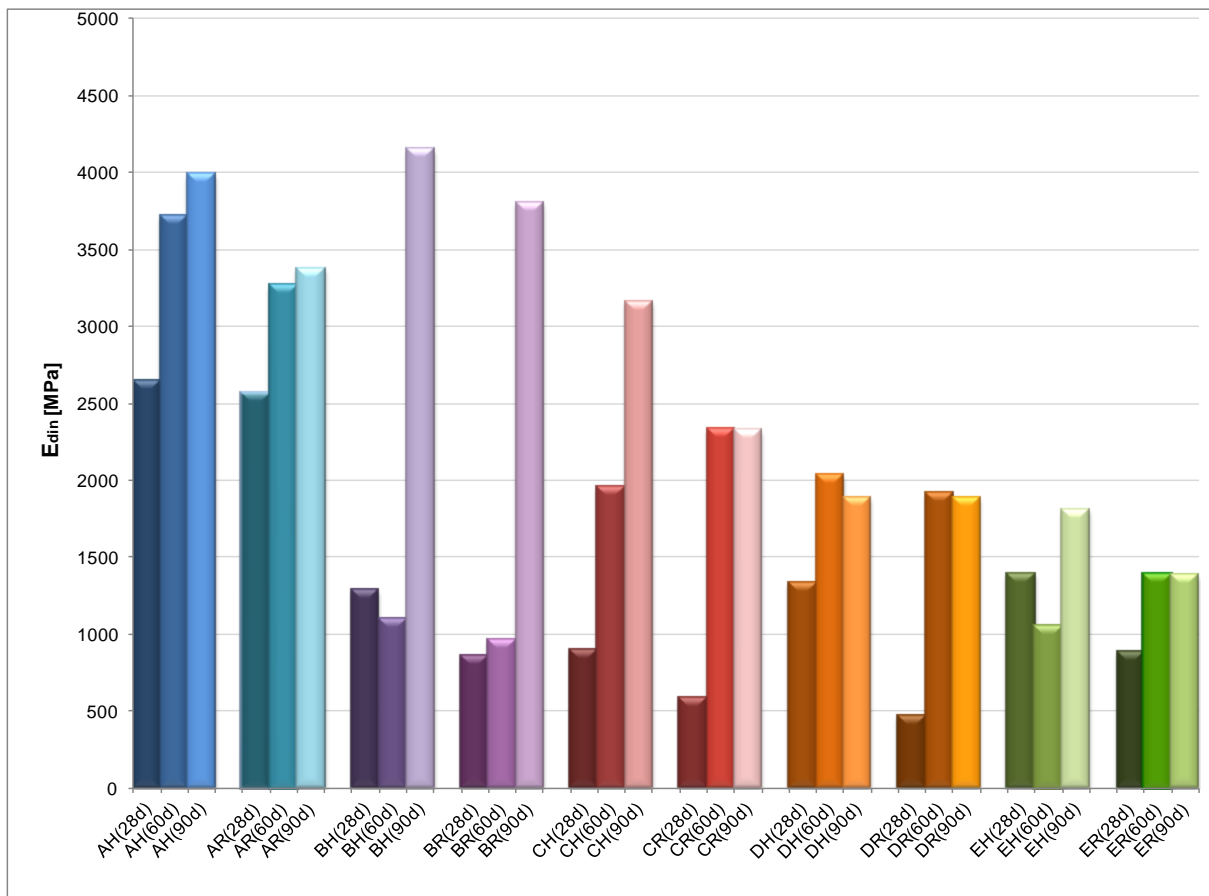


Figura 5.2 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas

5. Análise dos resultados

A análise do gráfico da Figura 5.2, permite concluir que a argamassa B é aquela que apresenta valores mais altos de módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias de idade de cura. Contudo estes valores apresentam alguns erros de ensaio, por isso não deverão ser considerados.

A argamassa A é a única que apresenta bons resultados em todas as idades de cura em estudo, com valores acima dos 2500 MPa aos 28 dias e atingindo valores perto dos 4000 e 3500 MPa, aos 90 dias de idade, para as curas H e R respectivamente.

Tanto os provetes DH como os EH estavam muito húmidos aquando da determinação do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias. Esse factor pode justificar os seus elevados valores quando comparados com os provetes B e C porque, como foi referido anteriormente, a presença de água nos provetes pode ter influência directa nos resultados finais (FARIA, 2004).

Regra geral, os provetes sujeitos à cura húmida (H) apresentam valores mais altos do que os sujeitos à cura de referência (R).

Da Figura 5.3 até à 5.7 apresentam-se os gráficos com os valores do módulo de elasticidade dinâmico obtidos para cada uma das argamassas A, B, C, D e E respectivamente, aos 28, 60 e 90 dias.

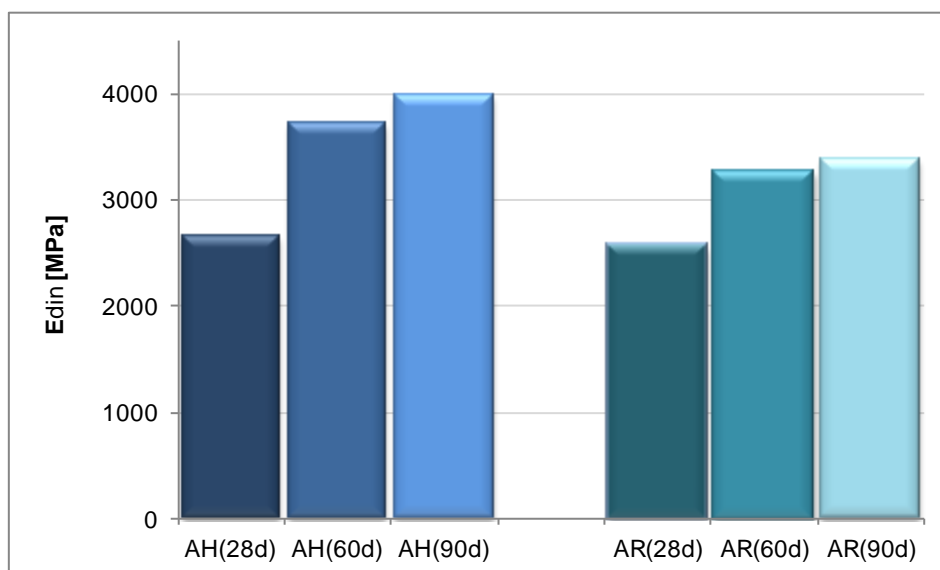


Figura 5.3 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A

As argamassas apenas de cal aérea (A), segundo Veiga (2005), apresentam valores de módulo de elasticidade dinâmico que garantem uma boa compatibilidade com paredes de alvenaria antigas.

A evolução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas é semelhante em ambas as curas. Contudo não seria expectável que os valores de E_{din} das argamassas A (sem Mk) sujeitas à cura H fossem maiores do que as da cura R, dado que segundo Simas (SIMAS, 2007), a HR que conduz a maiores velocidades de carbonatação ocorre para valores entre 50 e 70%.

Em argamassas com metacaulino seria expectável que a reacção pozolânica concorresse com a carbonatação e, em principio quanto maior a humidade relativa, maior a reacção pozolânica e maiores valores de E_{din} .

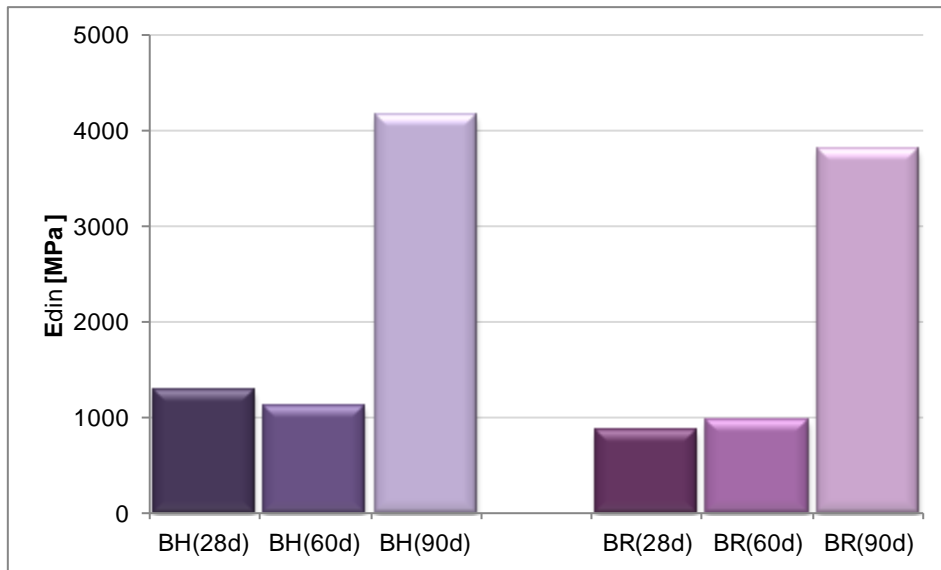


Figura 5.4 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B

Relativamente às argamassas B, as curas H e R apresentam valores baixos tanto aos 28 como aos 60 dias, com um aumento bastante significativo aos 90 dias de idade de cura.

Os provetes da cura H sofreram uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade dinâmico dos 28 para os 60 dias, enquanto que os provetes da cura R tiveram um comportamento inverso.

Contudo ao fim dos 90 dias de idade de cura ambos apresentam valores bastante aceitáveis de módulo de elasticidade dinâmico segundo Veiga (2005).

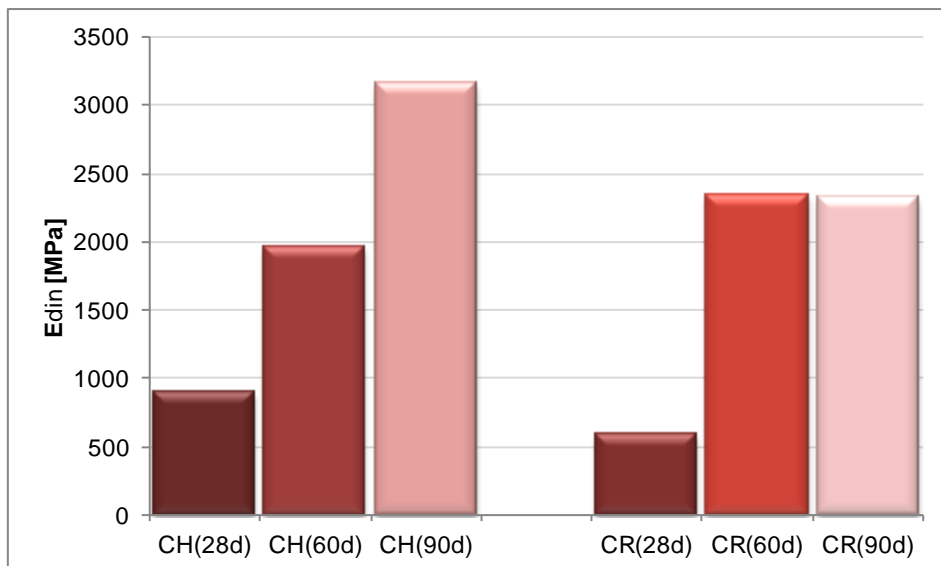


Figura 5.5 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C

5. Análise dos resultados

Os provetes CH apresentam um crescimento gradual de valores de módulo de elasticidade dinâmico, atingindo ao fim de 90 dias um valor próximo de 3500 MPa.

Os provetes C sujeitos à cura R apresentam um crescimento significativo do módulo de elasticidade dinâmico dos 28 aos 60 dias. Contudo dos 60 aos 90 dias não é perceptível qualquer evolução.

Ainda assim, ao fim dos 90 dias, as argamassas do tipo C apresentam valores de módulo de elasticidade dinâmico aceitável segundo o intervalo de valores estipulado por Veiga (2005).

Dois dos três provetes CH ensaiados aos 90 dias tiveram de ser substituídos por outros do mesmo tipo, cura e idade, devido ao facto de se terem partido no manuseamento. Porém considera-se que esta troca não terá tido influência significativa nos resultados finais.

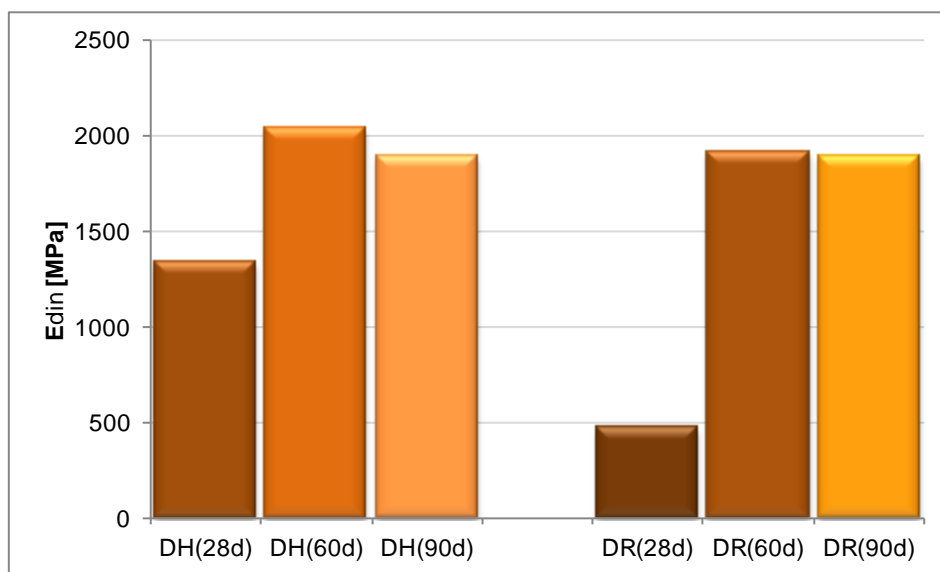


Figura 5.6 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D

Os provetes do tipo D (com 23% de Mk) começam a dar mostras do seu fraco desenvolvimento, possivelmente devido à falta de ligante.

Os provetes sujeitos à cura H apresentam um valor de módulo de elasticidade dinâmico pouco abaixo dos 2000 MPa ao fim de 90 dias de idade de cura. O valor de E_{din} obtido aos 28 dias, que é superior ao dos provetes B e C na mesma idade, poderá estar inflacionado devido ao facto dos provetes D estarem bastante húmidos aquando da execução do ensaio, como foi referido anteriormente.

Os provetes sujeitos à cura R apresentam um valor de módulo de elasticidade inferior a 2000 MPa aos 60 dias, não se verificando nenhum crescimento posteriormente.

Analisando os resultados obtidos da argamassa E (Figura 5.7), conclui-se que esta não se apresenta como uma boa solução.

Relativamente à cura H, aos 28 dias até apresenta melhores resultados do que as argamassas B e C, contudo não se verificou qualquer melhoria nas restantes idades, antes pelo contrário, verifica-se uma diminuição dos 28 para os 60 dias de idade. À semelhança dos provetes DH, o elevado valor do módulo de elasticidade dinâmico dos EH poderá dever-se à humidade elevada existente nos provetes.

A argamassa E sujeita à cura R apresenta um valor muito baixo aos 28 dias, com um aumento assinalável aos 60 dias mas ainda abaixo do intervalo de valores estipulado por Veiga (2007). Dos 60 para os 90 dias não se verifica qualquer alteração significativa.

Os baixos valores do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas E poderão dever-se à falta de ligante. Como no traço volumétrico, o metacaulino conta como ligante, as quantidades das areias poderão ser demasiado altas comparativamente com a quantidade de cal aérea.

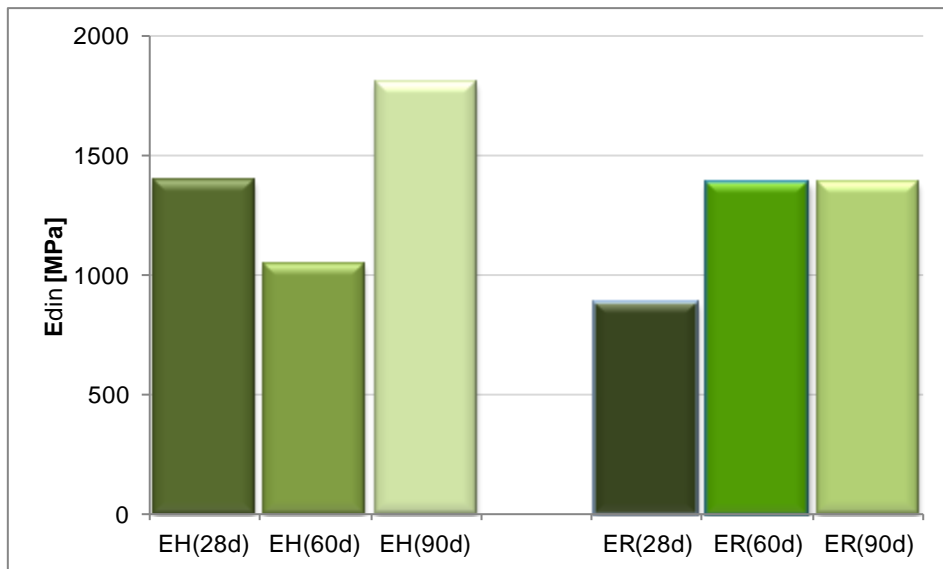


Figura 5.7 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, argamassa E

As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os valores do módulo de elasticidade dinâmico, de todas as argamassas e idades, das curas H e R respectivamente.

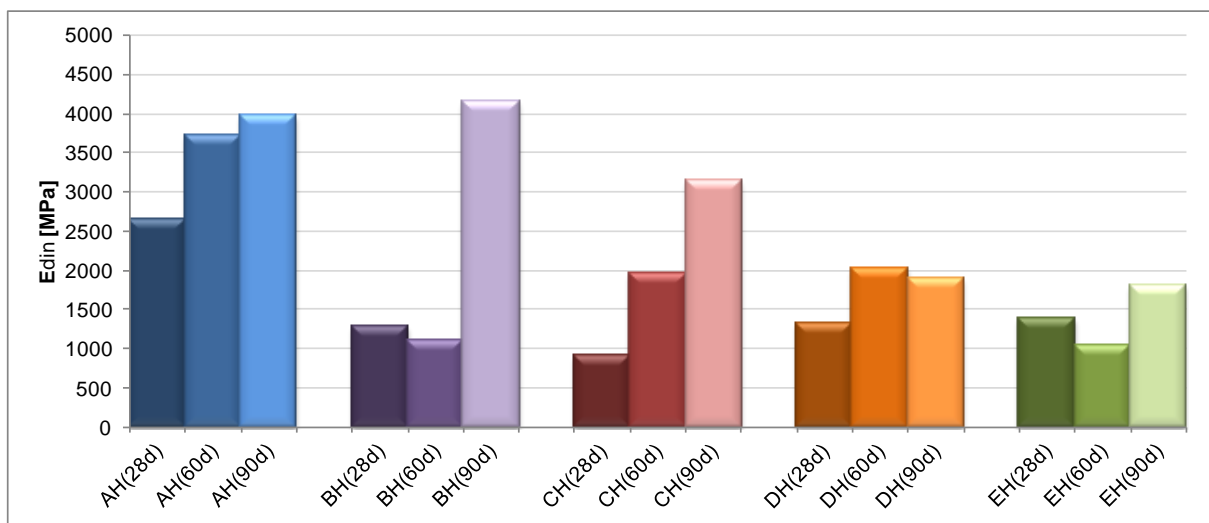


Figura 5.8 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura H

5. Análise dos resultados

Analisando o gráfico com os resultados obtidos apenas para a cura H, constata-se que os resultados obtidos não foram os esperados. Apesar de se tratar de um ambiente com elevado teor em água, os valores do módulo de elasticidade dinâmico diminuem com o aumento das quantidades de metacaulino. Estes resultados poderão dever-se a três factores: a substituição parcial de cal por metacaulino origina a falta de ligante, pois trata-se de argamassas com um traço volumétrico baixo (1:3); pelo facto de as argamassas terem endurecido numa fase inicial apenas por carbonatação faltando depois hidróxido de cálcio para reagir com o metacaulino; devido ao facto de a água não ter conseguido, penetrar até ao interior do provete a fim de promover a reacção pozolânica.

Ainda assim a argamassa B ao fim de 90 dias de idade de cura apresenta um bom resultado ao módulo de elasticidade – maior do que o valor obtido pela argamassa A – e tal como a argamassa C apresenta valores dentro do intervalo referido por Veiga (2005).

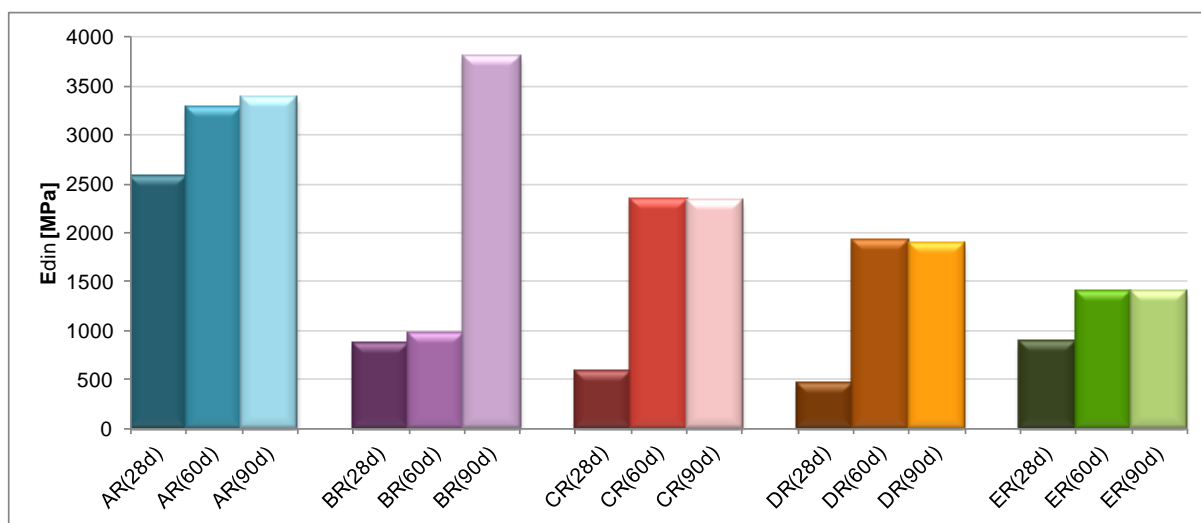


Figura 5.9 - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28, 60 e 90 dias, cura R

Os resultados obtidos pelas argamassas da cura R confirmam as expectativas, com o módulo de elasticidade dinâmico a ser maior quanto maior for a quantidade de cal aérea da argamassa, pois o endurecimento dá-se principalmente por carbonatação.

Ainda assim, face às tendências observadas na generalidade das argamassas e idades estudadas, não seria expectável que a argamassa BR apresentasse um valor de módulo de elasticidade dinâmico superior ao da argamassa AR, aos 90 dias de idade de cura.

Não é perceptível qualquer aumento do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas C, D e E sujeitas à cura R entre os 60 e os 90 dias de idade de cura.

5.3.2. RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À TRACÇÃO

Foram realizados ensaios para determinação da resistência à tracção a todas as argamassas aos 28 e 90 dias de idade de cura.

Segundo Veiga (2005) uma argamassa de substituição de uma parede antiga deverá apresentar valores de resistência à tracção aos 90 dias entre 0,2 e 0,7 MPa, para aplicação tanto para rebocos interiores como exteriores.

Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 5.5 bem como o respectivo desvio padrão:

Quadro 5.5 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de todas as argamassas

Arg.	Cura	Resistência à tracção [MPa]			
		28 dias		90 dias	
		Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
A	H	0,22	0,01	0,34	0,09
	R	0,20	0,05	0,38	0,03
B	H	0,04	0,00	0,07	0,01
	R	0,09	0,00	0,09	0,01
C	H	0,08	0,02	0,04	0,00
	R	0,05	0,00	0,05	0,01
D	H	0,12	0,01	0,04	0,02
	R	0,04	0,01	0,04	0,01
E	H	0,15	0,02	0,03	0,01
	R	0,03	0,00	0,02	0,00

Para uma melhor análise, a Figura 5.10 apresenta em forma de gráfico os resultados obtidos para todas as argamassas e respectivas curas aos 28 e 90 dias de idade.

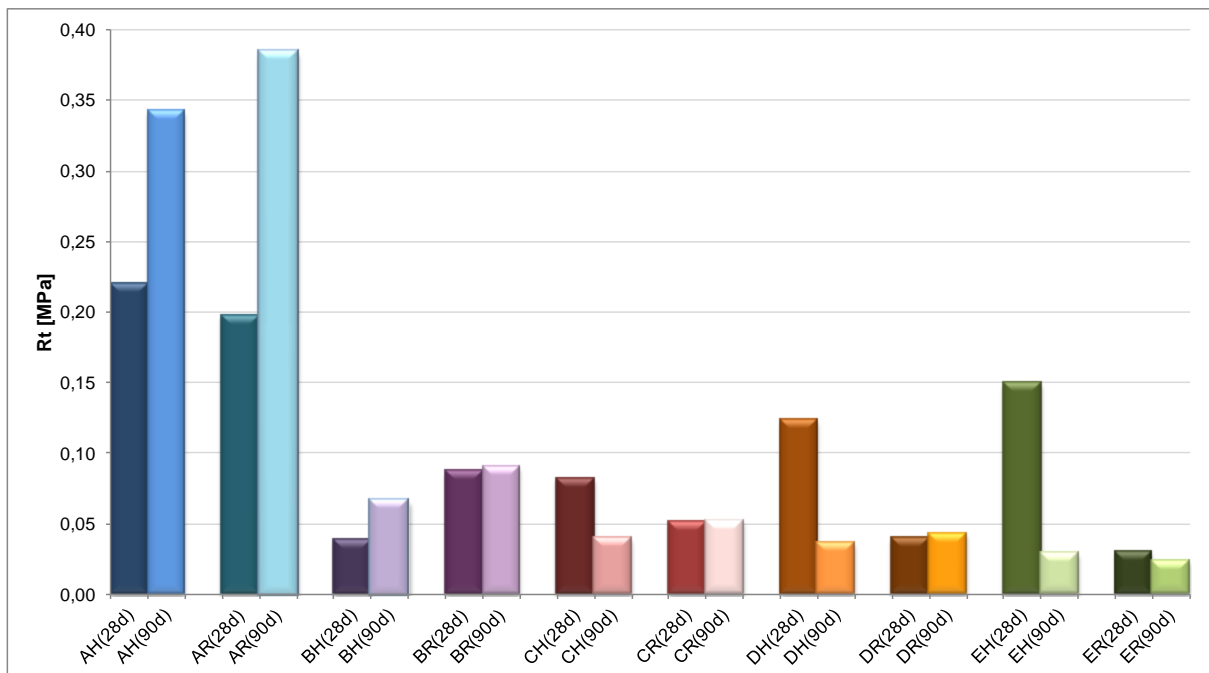


Figura 5.10 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias de idade das diversas argamassas

5. Análise dos resultados

Observando o gráfico da Figura 5.10 constata-se que a argamassa A é aquela que apresenta resultados mais favoráveis no que diz respeito a uma acção de reabilitação de um edifício antigo, sendo a única que apresenta valores aceitáveis no que diz respeito à resistência à tracção, segundo o intervalo de valores indicados por Veiga (2005).

Depois da análise ao módulo de elasticidade dinâmico, esperava-se que a argamassa B tivesse valores de resistência à tracção bastante superiores do que aqueles que se registaram, com um valor máximo obtido inferior a 0,1 MPa.

Nenhuma argamassa com metacaulino apresenta um valor de resistência à tracção aceitável aos 90 dias de idade de cura, o que leva a crer que não se tenha dado qualquer reacção pozolânica.

É importante referir que os provetes D e E foram ensaiados no LNEC aos 28 dias de idade de cura, com uma célula de carga de 2 kN. Esse dado associado ao facto de os provetes EH e DH poderem ter estado mais húmidos do que os restantes no momento em que foram submetidos ao ensaio, pode, de certa forma, explicar alguma da diferença significativa dos resultados obtidos entre os 28 e os 90 dias de idade de cura.

Para uma análise mais detalhada, da Figura 5.11 até à 5.15 apresentam-se os resultados de resistência à tracção obtidos para cada uma das argamassas A, B, C, D e E respectivamente.

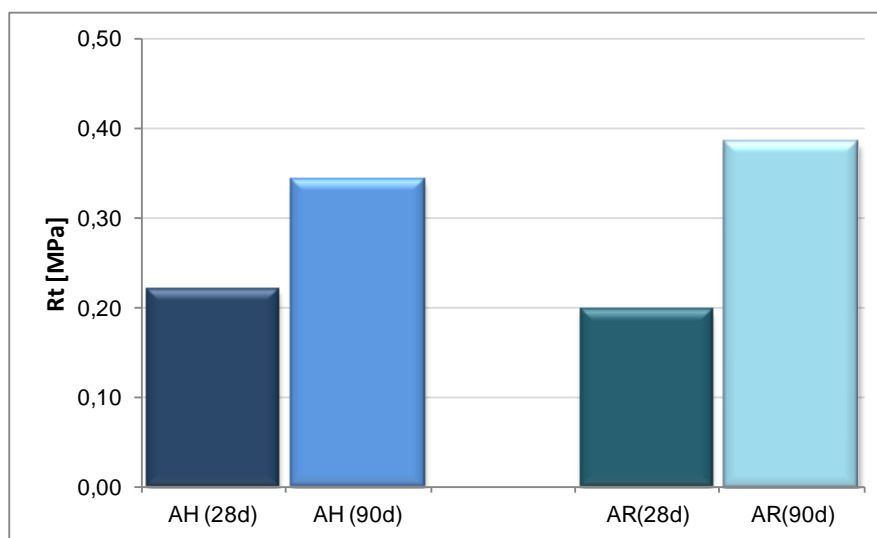


Figura 5.11 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa A

A argamassa A apresenta valores de resistência à tracção próximos dos 0,2 MPa ao fim de 28 dias, atingindo valores entre os 0,3 e os 0,4 MPa aos 90 dias de idade de cura.

Os resultados mostram que a cura R é a mais favorável ao aumento da resistência à tracção em argamassas de cal aérea sem metacaulino, como seria expectável.

A argamassa A sujeita à cura H apresenta uma resistência à tracção ligeiramente superior que a argamassa A sujeita à cura R, contudo aos 90 dias são os provetes sujeitos à cura R que têm maior resistência.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos no ensaio ao módulo de elasticidade dinâmico da argamassa A e encontram-se no intervalo indicado por Veiga (2005).

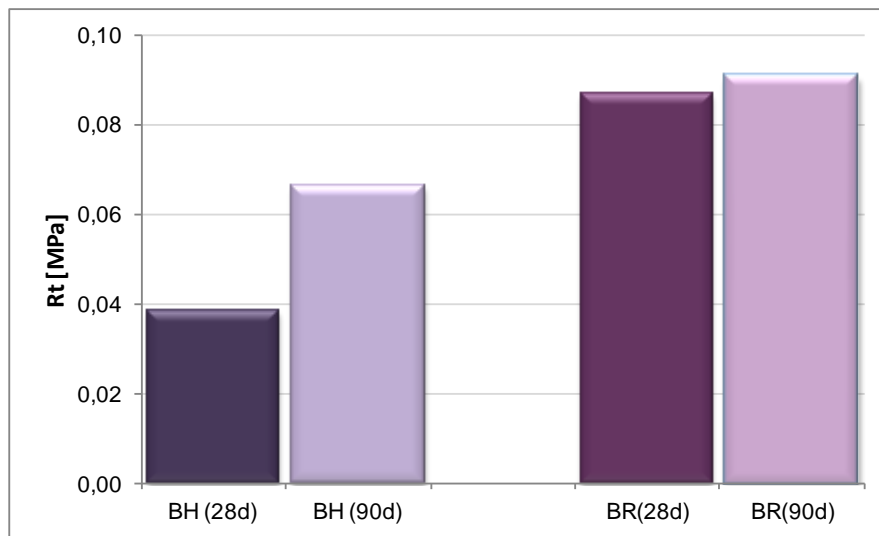


Figura 5.12 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa B

Relativamente à argamassa B, depois de uma análise ao módulo de elasticidade dinâmico, esperavam-se valores de resistências à tracção bastante superiores do que os obtidos.

Os provetes sujeitos à cura R apresentam uma resistência à tracção para ambas as idades bastante superior à dos provetes sujeitos à cura H. Esse facto que leva a crer que o endurecimento se tenha dado principalmente por carbonatação e que a reacção pozolânica tenha sido bastante baixa.

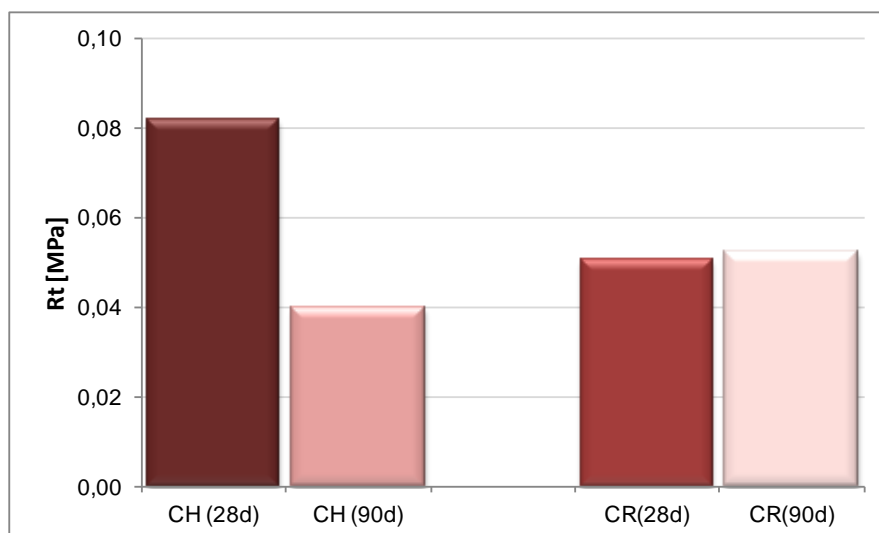


Figura 5.13 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa C

5. Análise dos resultados

A argamassa C, um pouco à semelhança da argamassa B, tem uma resistência à tracção muito baixa quando comparada com os resultados obtidos no ensaio ao módulo de elasticidade dinâmico.

Há a registar uma quebra de resistência mecânica da argamassa C sujeita à cura H (cerca de 50%), que leva a pensar-se que apesar das faces dos provetes aparentemente estarem resistentes, o interior não se apresentar muito resistente, possivelmente devido ao seu difícil acesso por parte da água e do CO₂ para ocorrência das respectivas reacções.

A argamassa C sujeita à cura R apresenta sensivelmente a mesma resistência à tracção aos 28 e aos 90 dias (pouco acima dos 0,05 MPa), muito abaixo do mínimo estipulado por Veiga (2005) para argamassas de revestimento de paredes antigas aos 90 dias de idade.

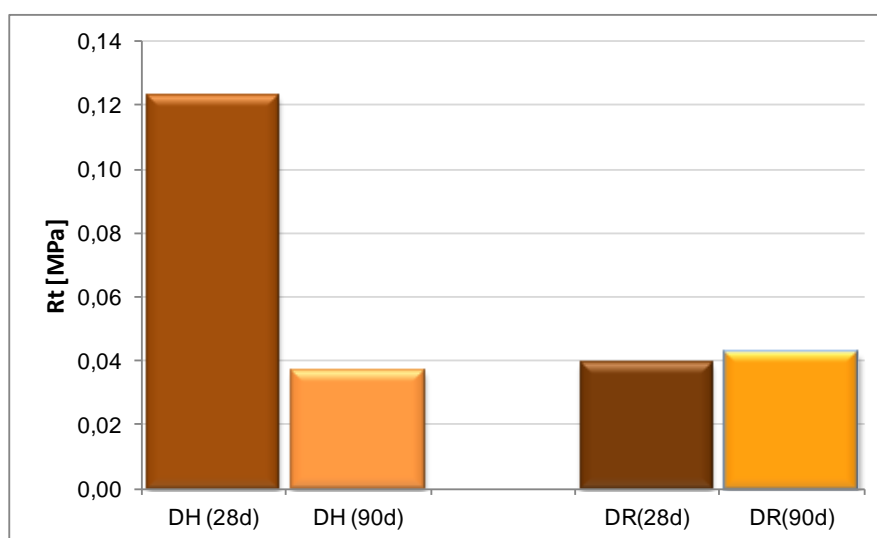


Figura 5.14 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa D

A argamassa D mantém a tendência da diminuição da resistência à tracção, embora ligeira, com diminuição das quantidades de cal aérea e o aumento do teor de metacaulino nas argamassas.

A perda bastante significativa de resistência à tracção dos provetes da argamassa D sujeitos à cura H dos 28 para os 90 dias (mais de 70%) pode em parte dever-se à diferença da célula de carga dos equipamentos usados para a realização dos ensaios, como foi referido anteriormente. Mas pode também encontrar alguma explicação na análise química. O resultado obtido aos 90 dias de idade de cura (inferior a 0,04 MPa) mostra a elevada fragilidade desta argamassa.

Relativamente à cura R, os resultados obtidos aos 90 dias de idade de cura são só ligeiramente superiores do que na cura H, contudo estão muito longe dos valores indicados por Veiga (2005).

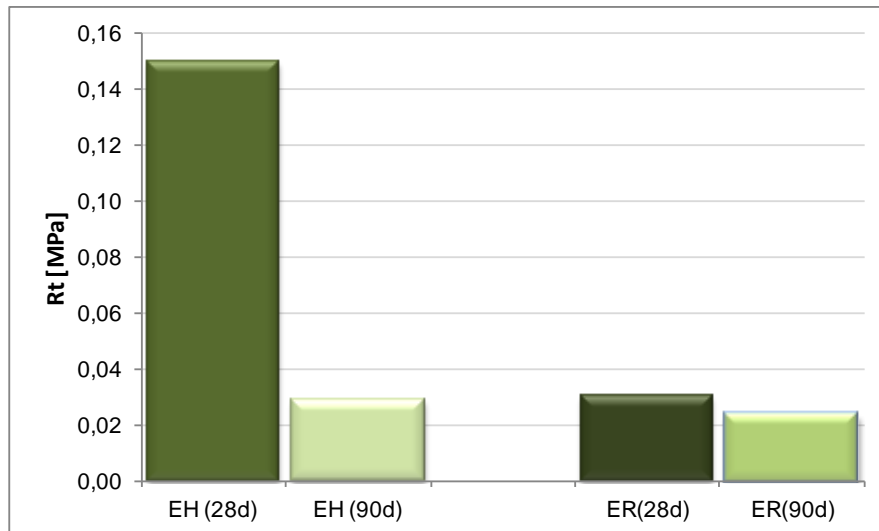


Figura 5.15 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, argamassa E

A argamassa E é a mais fraca de todas no que diz respeito à resistência à tracção.

A diferença de resultados dos 28 aos 90 dias de idade de cura dos provetes EH (à semelhança dos provetes DH) pode em parte dever-se à diferença nos equipamentos usados nos ensaios que foi referida anteriormente ou encontrar explicação na análise química. A baixa resistência à tracção verificada aos 90 dias de idade de cura mostram a fraca ocorrência de reacção pozolânica, possivelmente devido à rápida carbonatação e conseqüente baixo teor de hidróxido de cálcio livre.

Os provetes da argamassa E sujeitos à cura R apresentam valores de resistência à tracção bastante baixos que revelam, mais uma vez, a fraca ocorrência de reacções, possivelmente devido à escassez de cal aérea livre.

As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os valores de resistência à tracção, de todas as argamassas e idades, das curas H e R respectivamente.

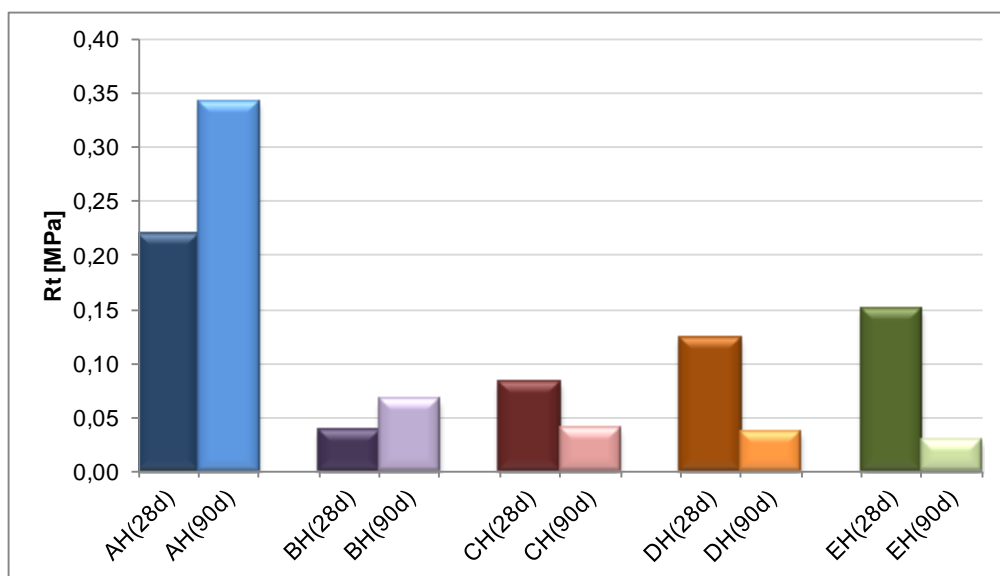


Figura 5.16 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura H

5. Análise dos resultados

Analisando o gráfico da Figura 5.16 que apresenta os valores de R_t de todas as argamassas com cura H, constata-se que a resistência à tracção aos 28 dias diminui bastante com a introdução de Mk mas entre argamassas com Mk aumenta com o aumento do teor de Mk; aos 90 dias dos provetes sujeitos à cura H também diminui bastante com a introdução de Mk e continua a diminuir ligeiramente com o aumento do teor de metacaulino, o que pode indicar instabilidade de alguns dos compostos formados na reacção pozolânica.

A argamassa A, que endurece apenas por carbonatação, apresenta valores de resistências à tracção bastante superiores às restantes argamassas.

Observando os resultados obtidos pelas argamassas B, C, D e E conclui-se que as substituições crescentes de cal aérea por metacaulino são prejudiciais relativamente à resistência à tracção para argamassas ao traço 1:3.

É importante referir que os resultados obtidos para as argamassas DH e EH são mais exactos do que os obtidos para as restantes argamassas, pois para a sua determinação foi utilizada uma célula de carga (de 2 kN) inferior à utilizada nas restantes determinações (de 10 kN). Esse facto leva a crer que os verdadeiros valores de resistência à tracção poderão ser superiores aos apresentados anteriormente.

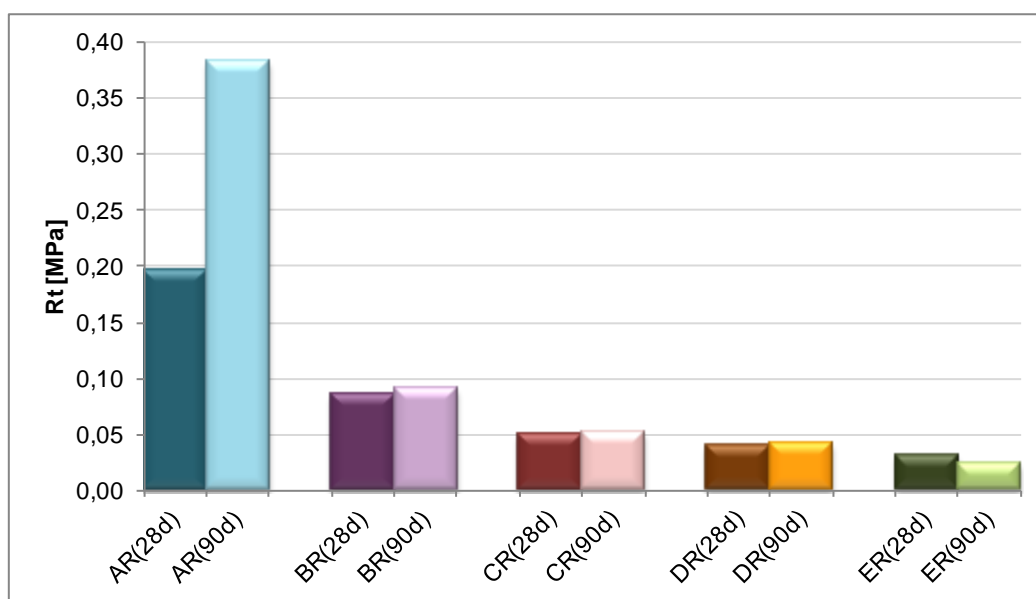


Figura 5.17 - Resistência à tracção aos 28 e 90 dias, cura R

Os resultados de R_t de todas as argamassas da cura R, apresentados na Figura 5.17 mostram que a argamassa A é a única que apresenta valores aceitáveis de resistência à tracção tanto aos 28 como aos 90 dias de idade de cura. Apesar de ser a argamassa com maior teor de cal aérea, não seria expectável que a diferença de valores apresentados pela argamassa A e as restantes fosse tão significativa. Esse facto pode significar que a aplicação de uma argamassa com relação volumétrica de cal aérea com areia inferior a 1:3 pode ser inadequada em ambiente não muito húmidos, pois a substituição de cal aérea por metacaulino nestas condições não é vantajosa devido ao não desenvolvimento da reacção pozolânica por escassez de água.

O gráfico mostra um decréscimo de resistências à tracção com o aumento do teor de metacaulino (e consequente diminuição da quantidade de cal aérea), que seria expectável, levando a pensar-se que

o metacaulino para efeitos práticos se tenha comportado quase como um material fino, praticamente inerte e sem qualquer reactividade pozolânica.

Comparando as Figuras 5.16 e 5.17 é de assinalar a diferença de resistência à tracção dos provetes D e E entre a cura R e a cura H. Essa diferença de valores parece indicar que os provetes sujeitos à cura H, aos 28 dias, eram mais resistentes do que os da cura R, devido à formação de produtos da reacção pozolânica que no entanto se degradaram antes dos 90 dias, por serem instáveis; no entanto, convém manter alguma reserva em relação aos resultados destas argamassas, lembrando que as argamassas D e E aos 28 dias foram ensaiados no LNEC, com uma célula de carga inferior e de maior sensibilidade. A compreensão exacta das causas destas diferenças só poderá ser obtida através da análise química de amostras dos provetes e dos produtos de reacção formados (o que está a ser feito no LNEC no âmbito do projecto FCT-METACAL)

5.3.3. RESULTADOS DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O Quadro 5.6 apresenta a média dos resultados obtidos dos ensaios aos 3 provetes de cada argamassa e o seu respectivo desvio padrão.

Na Figura 5.18 são apresentados os resultados dos ensaios à resistência à compressão, de todas as argamassas, aos 28, 60 e 90 dias de idade de cura.

À semelhança dos ensaios de determinação da resistência à tracção, os provetes D e E foram ensaiados à compressão aos 28 dias de idade de cura com uma célula de carga de 2 kN e os restantes ensaios foram realizados com uma célula de carga de 10 kN.

Segundo Veiga (2005) uma boa argamassa de substituição deverá apresentar valores de resistência à compressão aos 90 dias entre os 0,4 e 2,5 MPa.

Quadro 5.6 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de todas as argamassas

Arg.	Cura	Resistência à compressão [MPa]					
		28 dias		60 dias		90 dias	
		Média	D.Padrão	Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
A	H	0,41	0,03	0,74	0,01	0,65	0,05
	R	0,49	0,01	0,74	0,04	0,92	0,04
B	H	0,10	0,02	0,12	0,00	0,17	0,01
	R	0,18	0,00	0,26	0,06	0,30	0,01
C	H	0,23	0,04	0,14	0,05	0,11	0,01
	R	0,17	0,02	0,22	0,04	0,26	0,01
D	H	0,31	0,02	0,14	0,02	0,11	0,08
	R	0,20	0,02	0,19	0,06	0,27	0,01
E	H	0,43	0,02	0,10	0,02	0,14	0,01
	R	0,13	0,03	0,12	0,01	0,14	0,01

5. Análise dos resultados

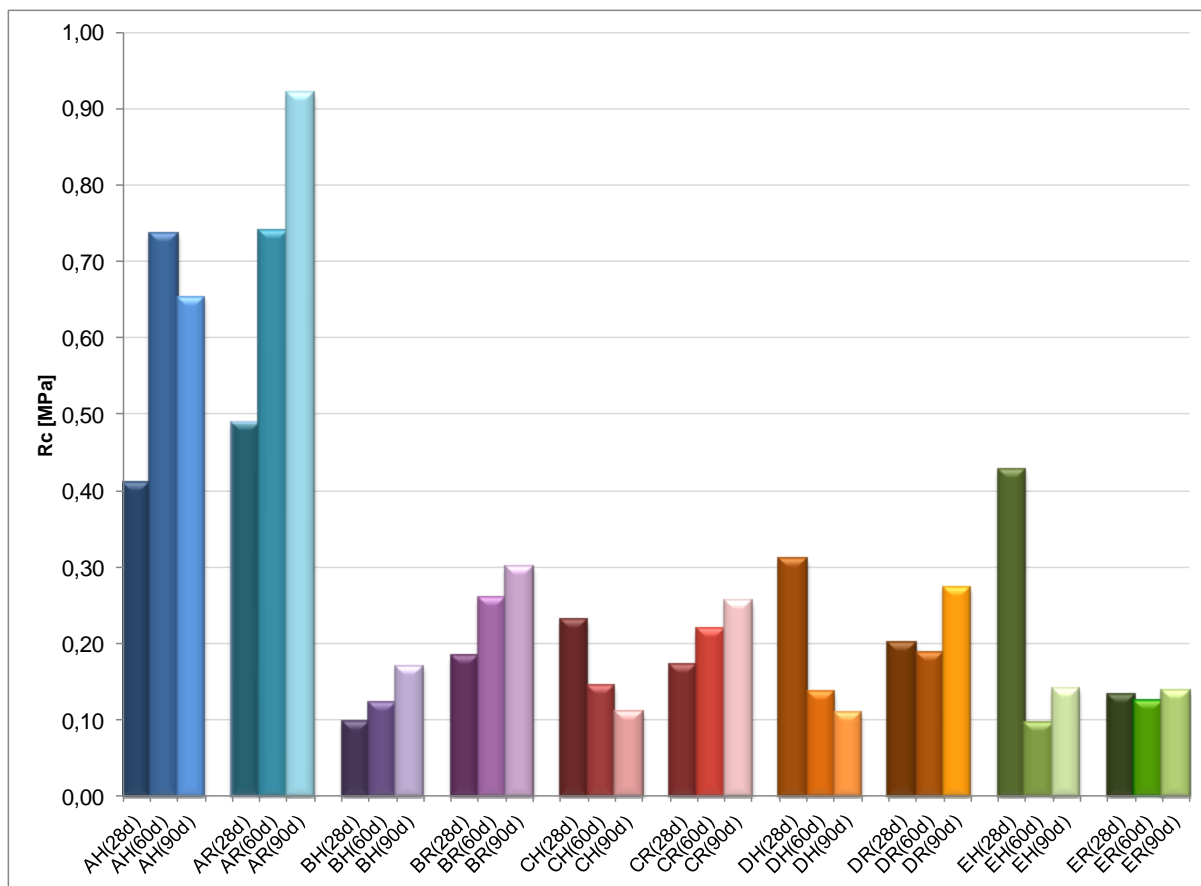


Figura 5.18 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias de idade das diversas argamassas

Relativamente à resistência à compressão, mais uma vez, a argamassa de cal aérea sem adição de metacaulino é a única que apresenta valores considerados aceitáveis, sujeita tanto à cura H como à cura R.

As resistências à compressão das restantes argamassas ficaram aquém das expectativas, exceção feita aos provetes DH e EH aos 28 dias, pelas mesmas razões referidas para tracção. A argamassa A apresenta maiores resistências à tracção aos 28 dias do que qualquer outra ao fim de 90 dias de idade de cura.

A diminuição das resistências à compressão não é tão linear com o aumento do teor de metacaulino como o verificado nas resistências à tracção; com as argamassas C e D a apresentarem valores muito semelhantes. Contudo a argamassa E, mais uma vez, é aquela que apresenta menor resistência à compressão (excepto no caso de EH aos 28 dias, já salientado).

À excepção da argamassa DH e EH aos 28 dias, os provetes sujeitos à cura R apresentam valores de resistência à compressão superiores do que os sujeitos à cura H, o que poderá ser um indicativo de que não se deu a reacção pozolânica esperada e que a cura R (com HR de 65%) é mais propícia à ocorrência de carbonatação da cal aérea (SIMAS, 2007).

Da Figura 5.19 até à 5.23 apresentam-se os resultados de resistência à compressão obtidos para cada uma das argamassas A, B, C, D e E respectivamente.

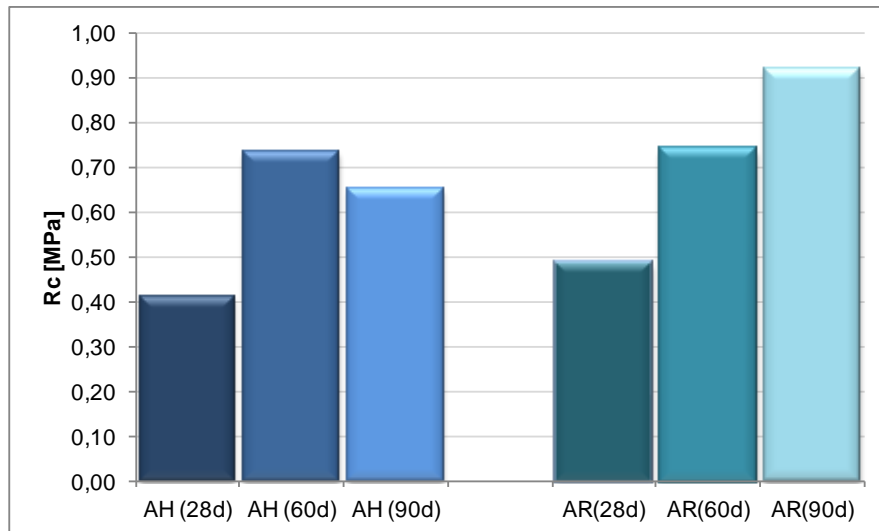


Figura 5.19 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa A

Analisando apenas os resultados das argamassas A, apresentados na Figura 5.19 constata-se que, como seria esperado, a argamassa sem metacaulino adquire maiores resistências à compressão quando sujeita à cura R.

Registrou-se um aumento significativo de resistência à compressão, da argamassa A sujeita à cura H, dos 28 para os 60 dias, no entanto verificou-se uma ligeira quebra dos 60 para os 90 dias de idade de cura.

A argamassa A sujeita à cura R apresenta um crescimento gradual de resistência à compressão ao longo das três idades, atingindo um valor acima dos 0,9 MPa ao fim dos 90 dias de idade de cura.

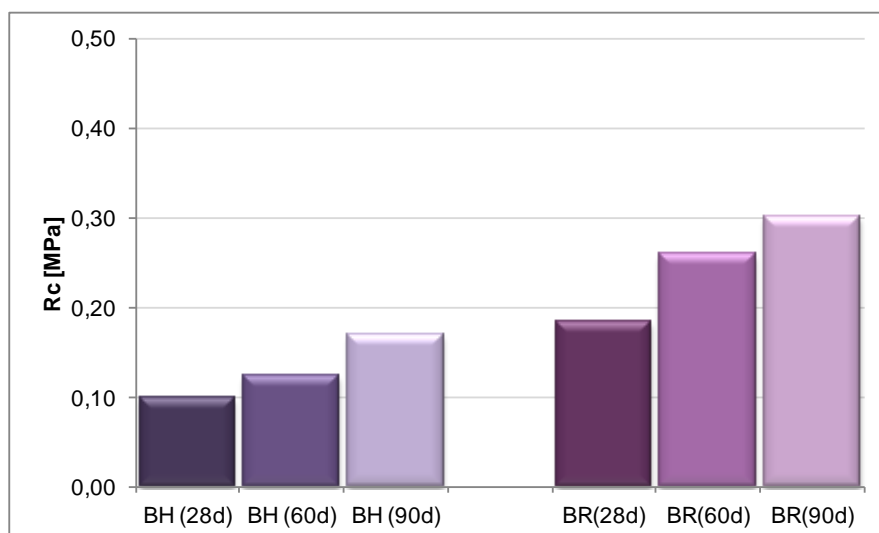


Figura 5.20 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa B

A argamassa B apresenta um crescimento gradual das resistências à compressão ao longo das três idades, para ambas as condições de cura.

5. Análise dos resultados

Os provetes de argamassa B sujeitos à cura R apresentam resistências à compressão superiores aos sujeitos à cura H; a argamassa BR ensaiada aos 28 dias apresenta resistências à compressão superiores à da argamassa BH ensaiada ao fim de 90 dias.

Ainda assim os valores obtidos nos ensaios aos provetes de argamassa B sujeitos à cura R são inferiores aos recomendados por Veiga (2005).

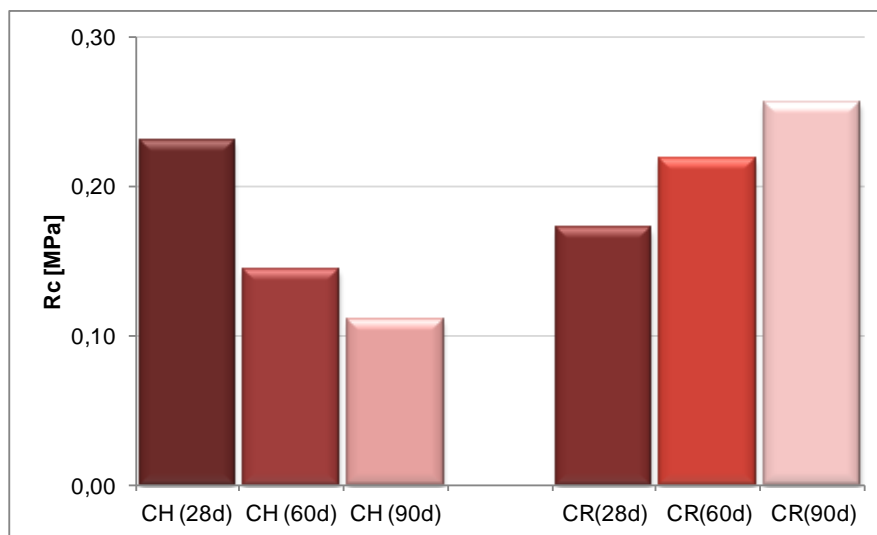


Figura 5.21 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa C

Os provetes de argamassa C sujeitos às condições de cura R apresentam um aumento gradual de resistência à compressão ao longo dos 90 dias de idade de cura.

Por sua vez os provetes sujeitos à cura H apresentam um decréscimo de resistências mecânicas nas três idades de cura. A diminuição de resistências mecânicas ao longo da idade de cura já se tinha verificado em ensaios experimentais a provetes, também com metacaulino, realizados por Velosa, Veiga e Rocha (VELOSA, et al., 2009) e poderá dever-se ao facto de o interior dos provetes não ter endurecido, ou estar relacionado com a formação de produtos de reacção instáveis que se degradam antes dos 90 dias.

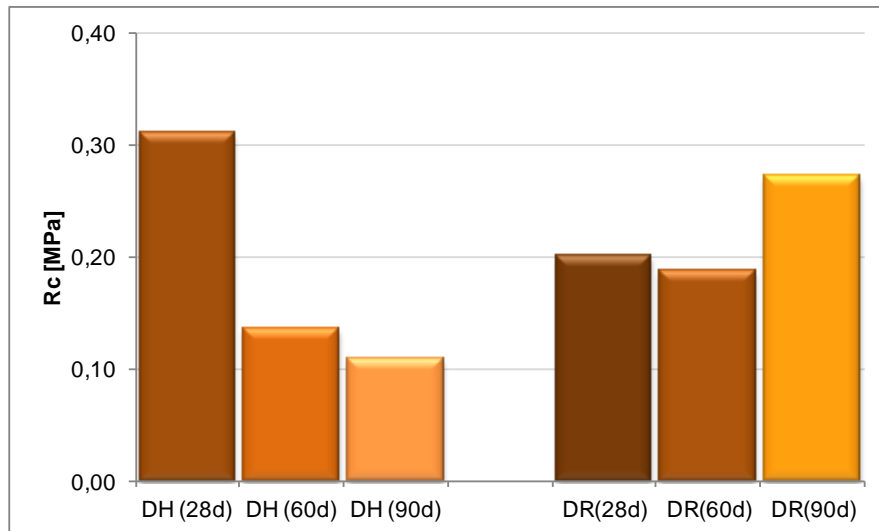


Figura 5.22 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D

A argamassa D apresenta valores de resistência à compressão semelhantes aos da argamassa C. Os provetes sujeitos à cura H registaram uma diminuição de resistências com o avanço da idade de cura. Os provetes de argamassa sujeitos à cura R apresentam uma ligeira diminuição de resistência à compressão dos 28 para os 60 dias e um aumento superior a 40% aos 90 dias.

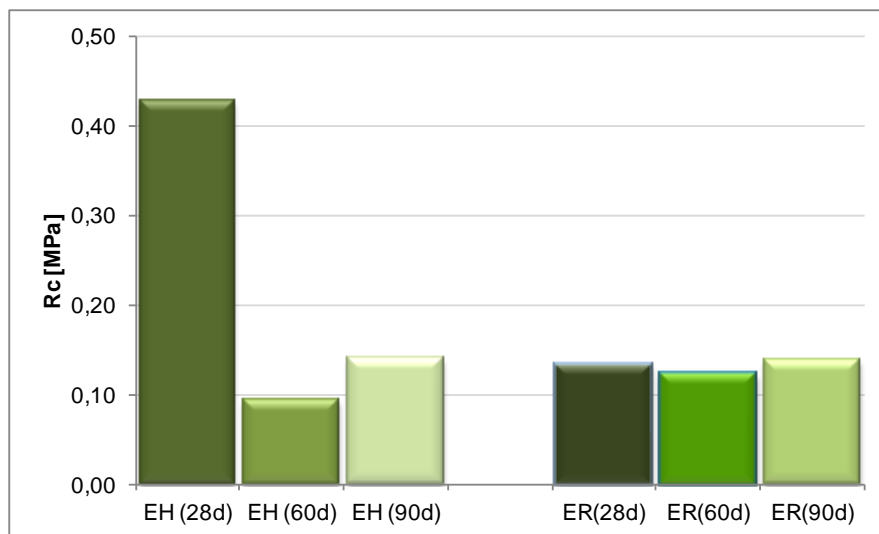


Figura 5.23 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, argamassa D

Mais uma vez a argamassa E é aquela que se apresenta mais frágil apresentando uma resistência à compressão ao fim de 90 dias de idade de cura inferior a 0,15 MPa, muito abaixo do intervalo indicado por Veiga (2005).

5. Análise dos resultados

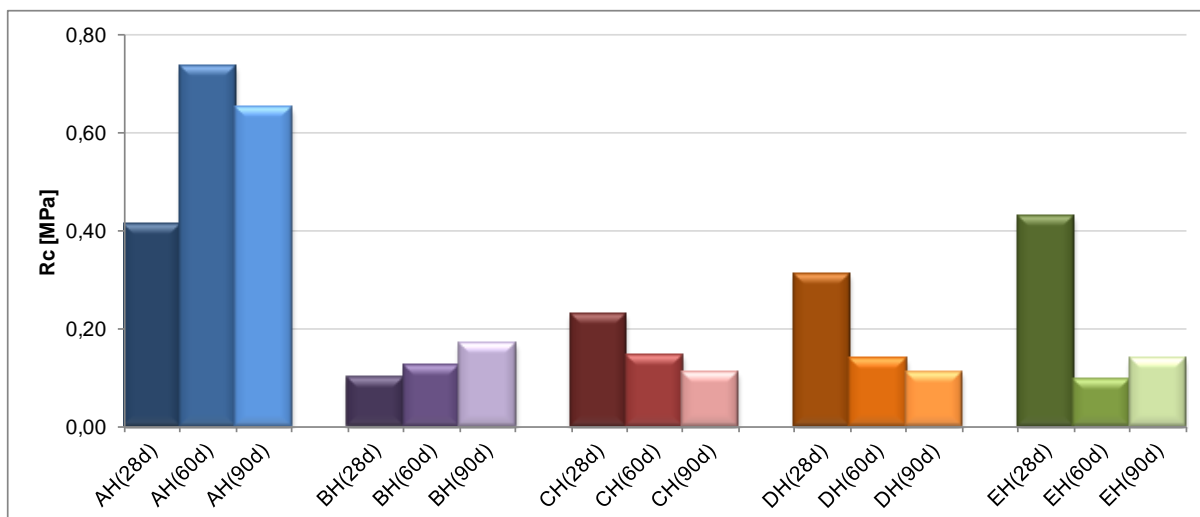


Figura 5.24 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura H

Observando a Figura 5.24, que apresenta a R_c de todas as argamassas com cura H, conclui-se que a diferença de resistências à compressão entre provetes com metacaulino ao fim de 90 dias de idade de cura é muito pequena.

As argamassas C, D e E apresentam uma diminuição de resistência à compressão dos 28 para os 60 dias de idade de cura.

A argamassa A, embora não tenha metacaulino na sua constituição, é a única que apresenta uma resistência à compressão aceitável que pode significar que não se deu a reacção pozolânica esperada.

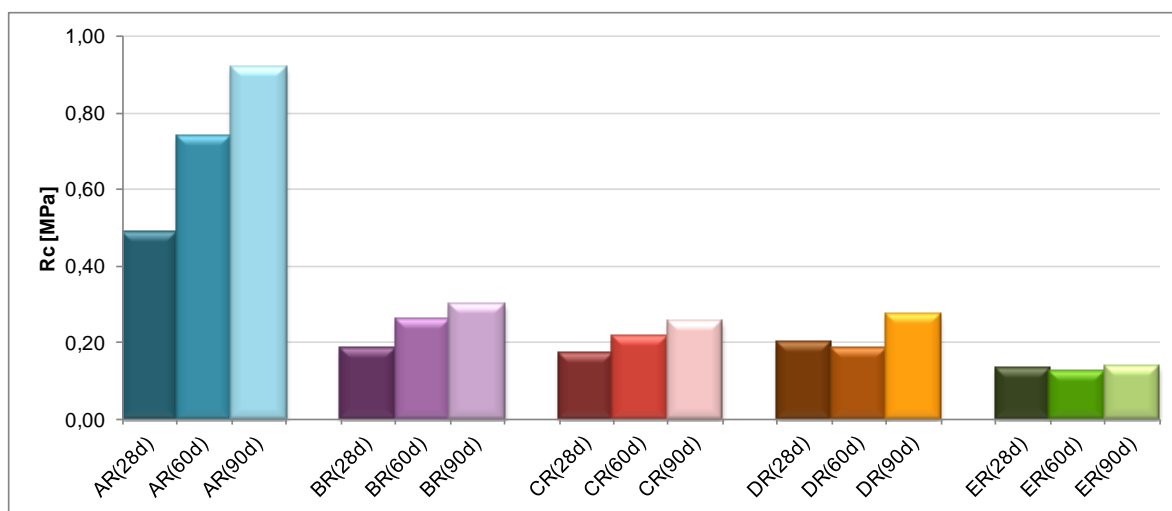


Figura 5.25 - Resistência à compressão aos 28, 60 e 90 dias, cura R

Relativamente à cura R, tal como seria expectável, a argamassa A é aquela que apresenta maiores resistências à compressão; contudo a diferença para as restantes argamassas é bastante acentuada.

Admitindo que as resistências à compressão de todas as argamassas foram obtidas por carbonatação da cal, sem reacção significativa do metacaulino com o hidróxido de cálcio, pode-se

concluir que a diferença de valores obtidos entre a argamassa A e as restantes, deve-se essencialmente à diminuição das dosagens de cal aérea.

Em todas as argamassas sujeitas a cura R regista-se uma tendência para o aumento da R_c com a idade de cura.

5.3.4. RESULTADOS DO ENSAIO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Foram feitos ensaios de determinação da capilaridade a todas as argamassas aos 28 dias (com provetes inteiros) e aos 90 dias (com meios provetes) de idade de cura dos provetes.

Principalmente no caso dos 28 dias nem todos os resultados obtidos do ensaio correspondem à média dos três provetes, pois devido à sua elevada fragilidade, alguns partiram-se e outros tiveram de ser desprezados porque perderam bastante massa no decorrer do ensaio.

Principalmente os provetes C, D e E apresentaram-se bastante frágeis e à medida a que iam ficando cada vez mais saturados mais difícil se tornava o seu manuseamento de maneira a que não perdesse massa.

A Figura 5.26 apresenta todos os gráficos do ensaio de capilaridade de todas as argamassas aos 28 e 90 dias de idade de cura.

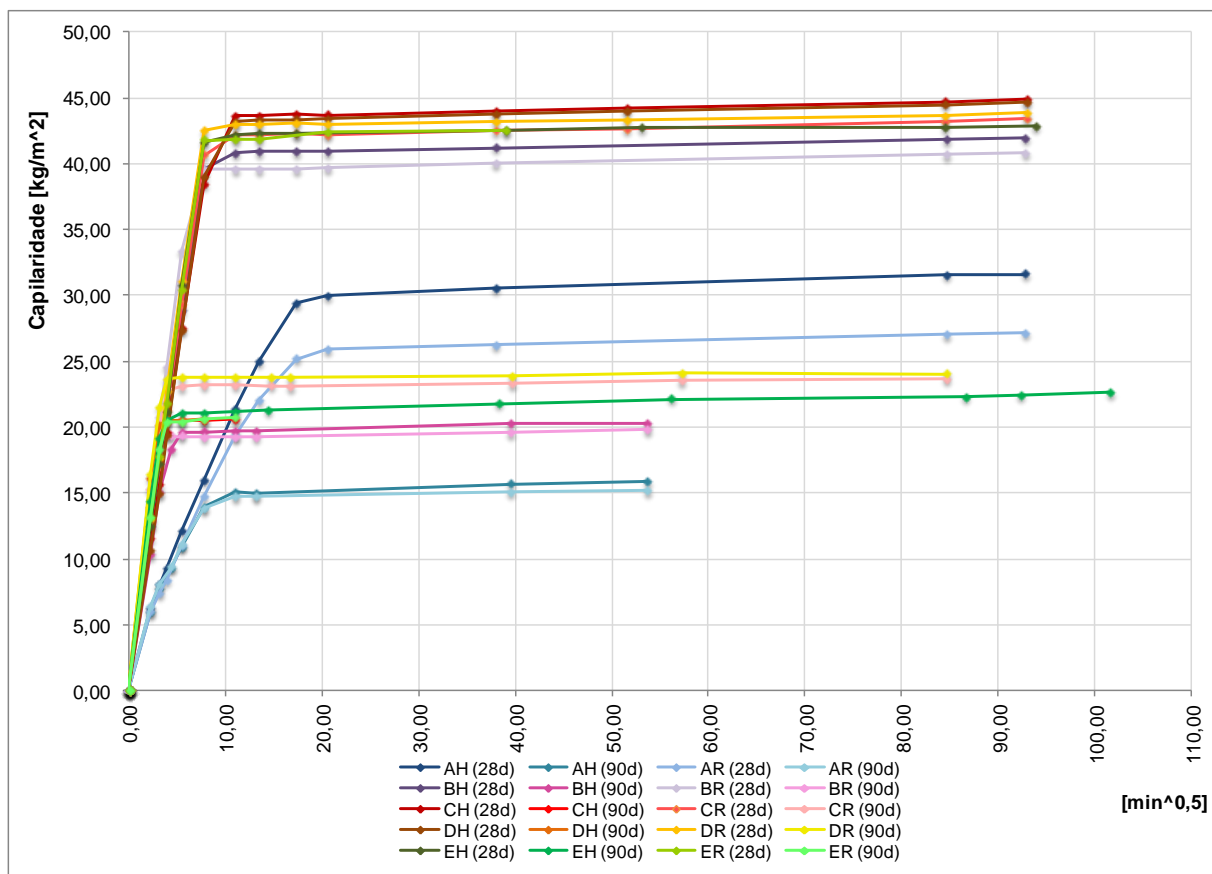


Figura 5.26 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias de todas as argamassas

Como aos 28 dias foram ensaiados provetes inteiros e aos 90 dias foram ensaiados meios provetes, não é possível estabelecer uma comparação exacta entre resultados de valor assintótico de ensaios

5. Análise dos resultados

feitos a idades diferentes; mas visualmente verifica-se que o C_c é comparável, sendo o VA dos provetes inteiros sensivelmente o dobro dos meios provetes correspondentes.

As curvas que apresentam um valor assintótico maior correspondem, como seria expectável, às argamassas ensaiadas aos 28 dias, pois os provetes inteiros absorvem mais água que os meios provetes, uma vez que apresentam em termos médios o dobro do volume.

Observando a Figura 5.26 facilmente se conclui que as argamassas A são aquelas que apresentam um menor coeficiente de capilaridade (C_c) e um valor assintótico mais baixo para ambas as condições de cura, aos 28 e 90 dias de idade. O valor assintótico dos provetes inteiros da argamassa A aproxima-se mais do valor assintótico dos meios provetes das restantes argamassas do que dos provetes inteiros das mesmas.

A Figura 5.27 apresenta a fase inicial do ensaio de absorção de água por capilaridade de todas as argamassas aos 28 e 90 dias de idade de cura.

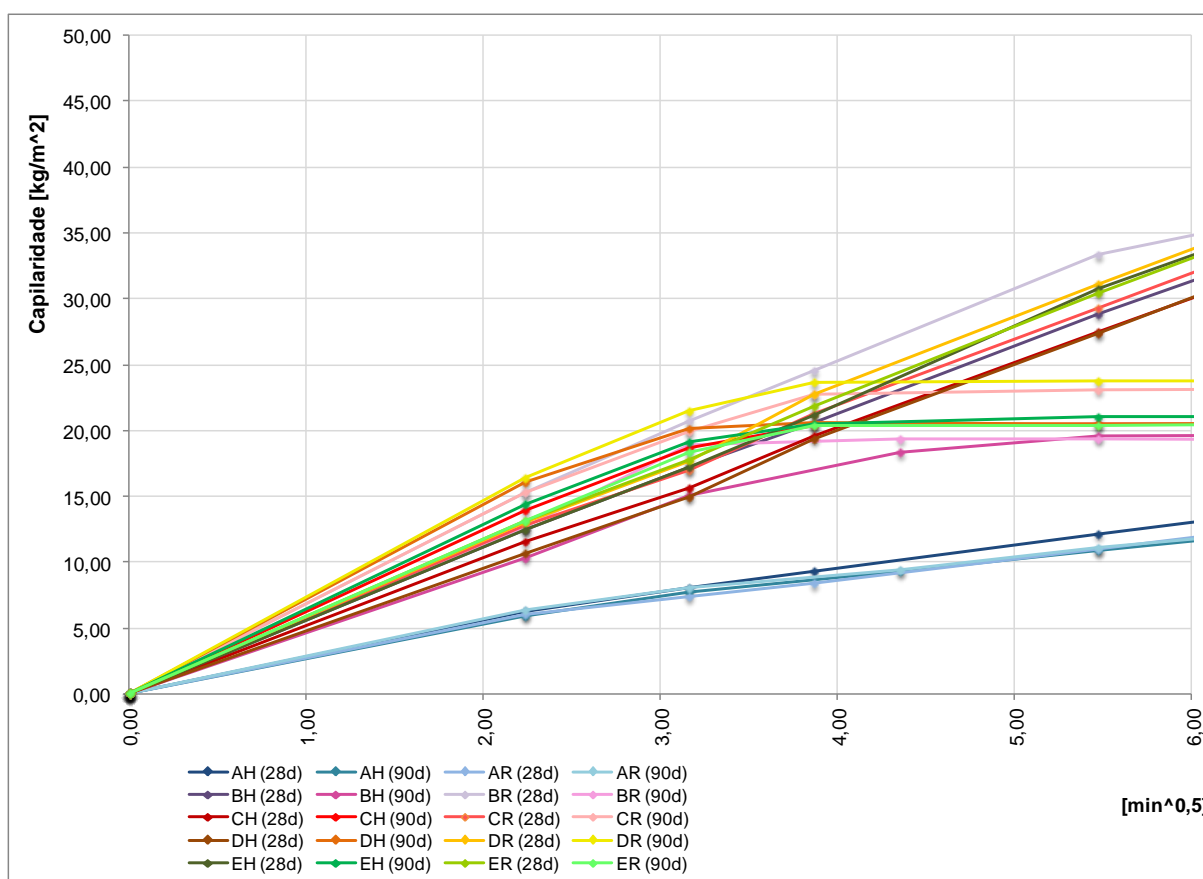


Figura 5.27 - Fase inicial da absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias de todas as argamassas

A Figura 5.28 apresenta o gráfico das curvas de absorção de água por capilaridade de todas as argamassas aos 28 dias.

Analisando as curvas de capilaridade das argamassas ensaiadas aos 28 dias, constata-se que a argamassa A é aquela que absorve água mais lentamente e apresenta um valor assintótico bastante inferior às restantes argamassas.

As argamassas B, C, D e E apresentam uma velocidade de absorção capilar inicial muito semelhante, contudo é possível fazer uma distinção relativamente ao valor assintótico.

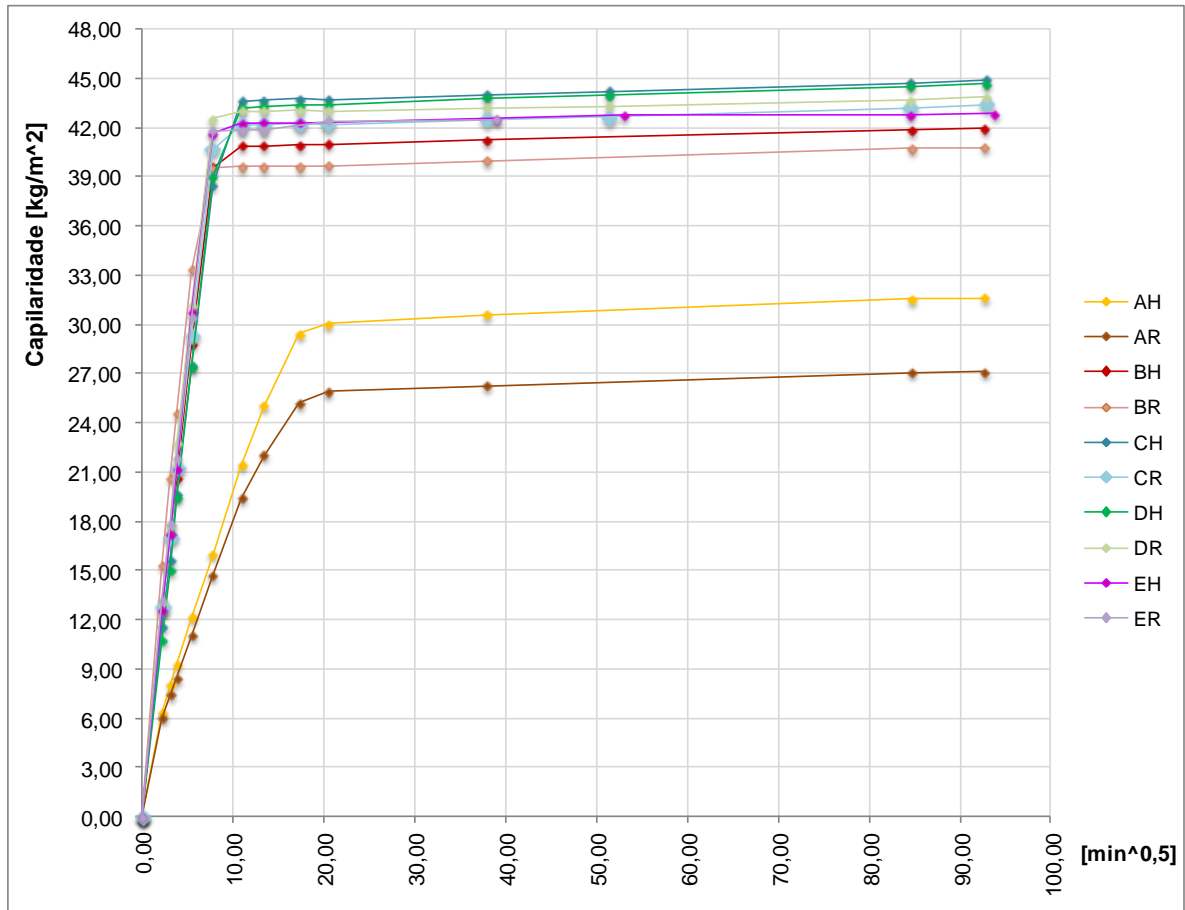


Figura 5.28 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias de todas as argamassas

Os gráficos das Figuras 5.29 e 5.30 permitem fazer uma análise mais detalhada das curvas de capilaridade, das argamassas sujeitas à cura H e R respectivamente, aos 28 dias de idade.

Analisando gráfico da Figura 5.29 correspondente à cura H, relativamente ao C_c é possível agrupar as argamassas em três grupos: o primeiro grupo constituído apenas pela argamassa A que apresenta um C_c bastante inferior ao das restantes argamassas; o segundo grupo constituído pelas argamassas B e C; por fim o terceiro grupo onde se encontram as argamassas D e E que são aquelas que têm o C_c maior.

Relativamente à capilaridade, aos 28 dias de idade de cura, há uma determinada dosagem de metacaulino a partir da qual o valor assintótico deixa de aumentar e passa a diminuir. Exemplo disso é o facto de as argamassas C e D apresentarem um valor assintótico superior às argamassas B e E para ambas as curas. Também relativamente ao valor assintótico verificou-se que a argamassa A é aquela que apresenta melhores valores, absorvendo muito menos água do que as restantes argamassas.

5. Análise dos resultados

Deverá existir uma dosagem de metacaulino que corresponde a um valor assintótico máximo e esse valor deverá situar-se entre 20 e 23% da quantidade de cal aérea para argamassas ao traço volumétrico 1:3.

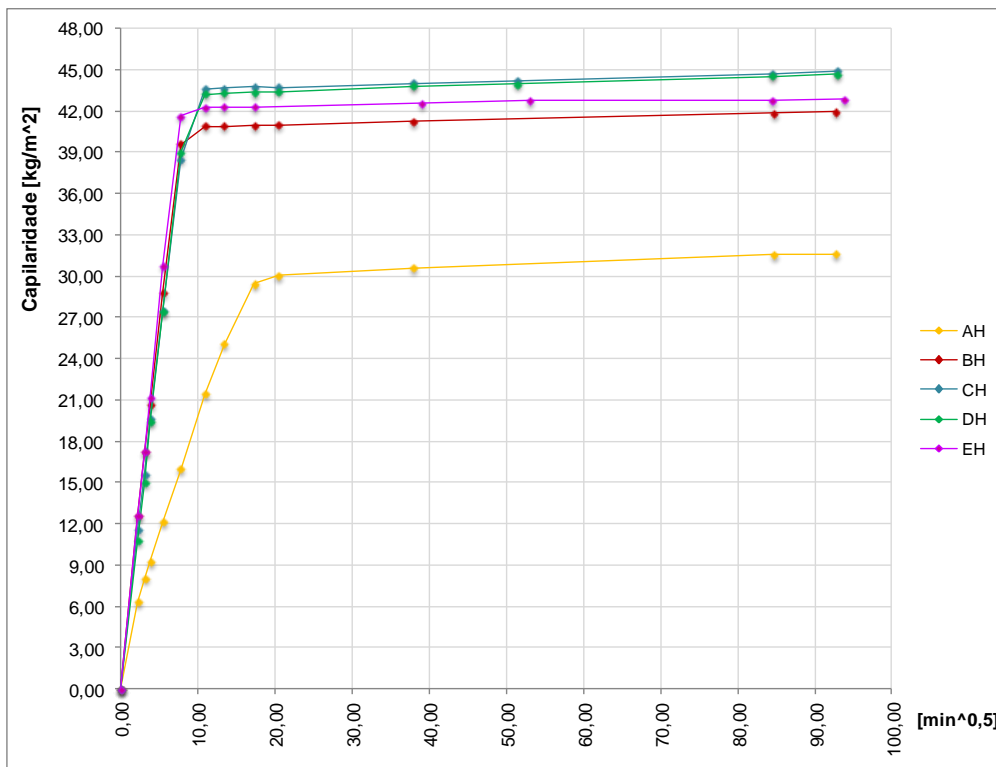


Figura 5.29 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas da cura H

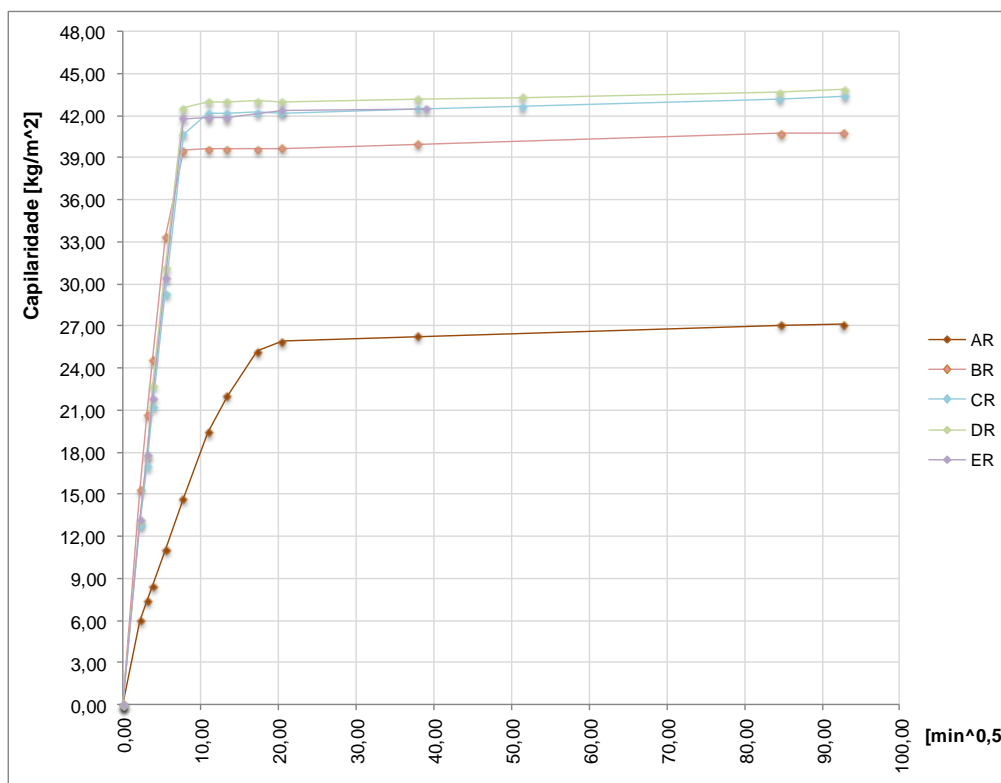


Figura 5.30 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 dias das argamassas da cura R

Comparativamente com a cura H, aos 28 dias de idade na cura R, a argamassa A continua a ser, claramente, a que tem menor valor assintótico e menor coeficiente de capilaridade.

A argamassa B, a seguir à argamassa A, é aquela que absorve menos água e as argamassas C, D e E são aquelas que apresentam um valor assintótico mais alto.

A Figura 5.31 apresenta os gráficos obtidos do ensaio da capilaridade a todas argamassas (em meios provetes) aos 90 dias de idade de cura.

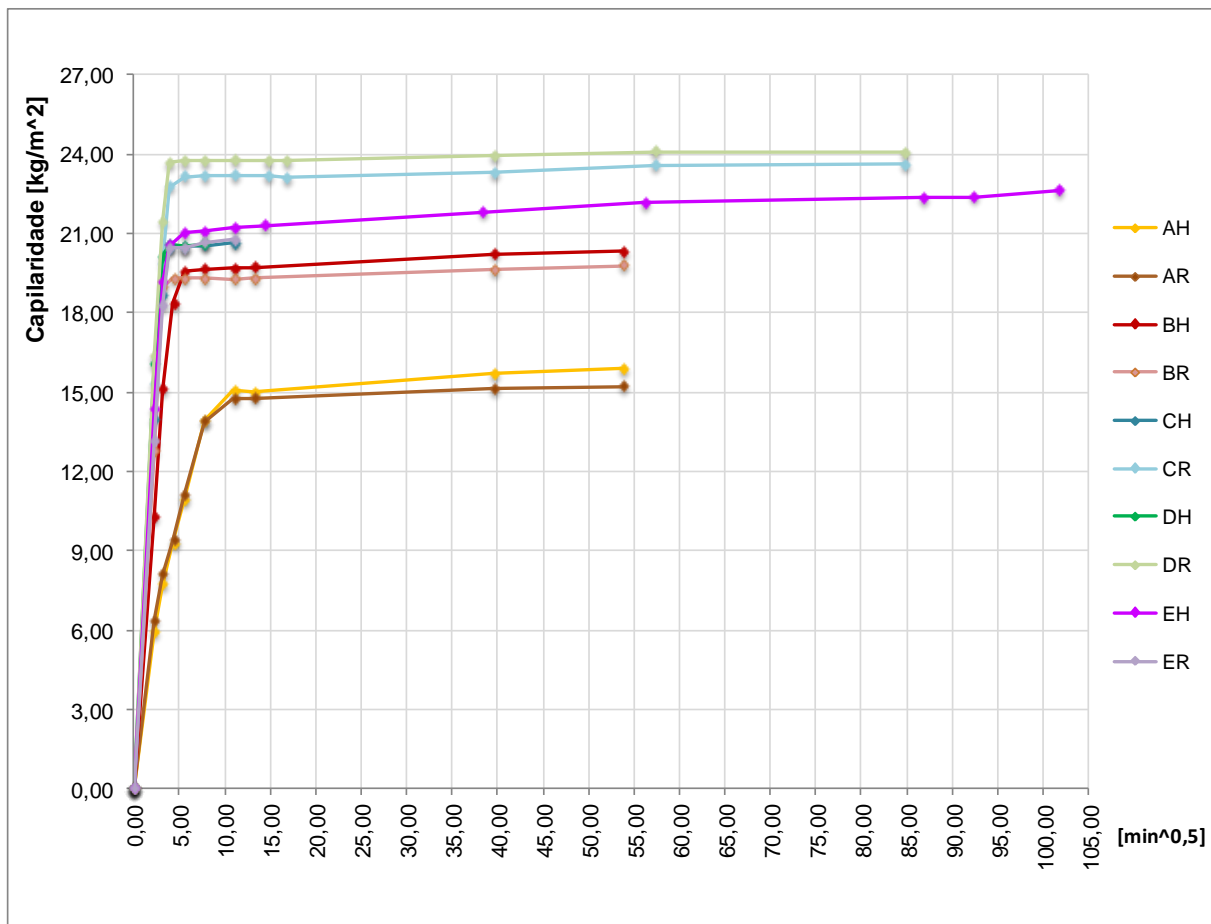


Figura 5.31 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de todas as argamassas

Relativamente aos 90 dias de idade de cura, a argamassa A continua a ser aquela que absorve água mais lentamente numa fase inicial e a que apresenta um valor assintótico mais baixo de todas.

A argamassa B é aquela que apresenta o menor valor assintótico (relativamente a argamassas com metacaulino).

As Figuras 5.32 e 5.33 apresentam as curvas de absorção de água de todas as argamassas sujeitas à cura H e R respectivamente, aos 90 dias de idade.

5. Análise dos resultados

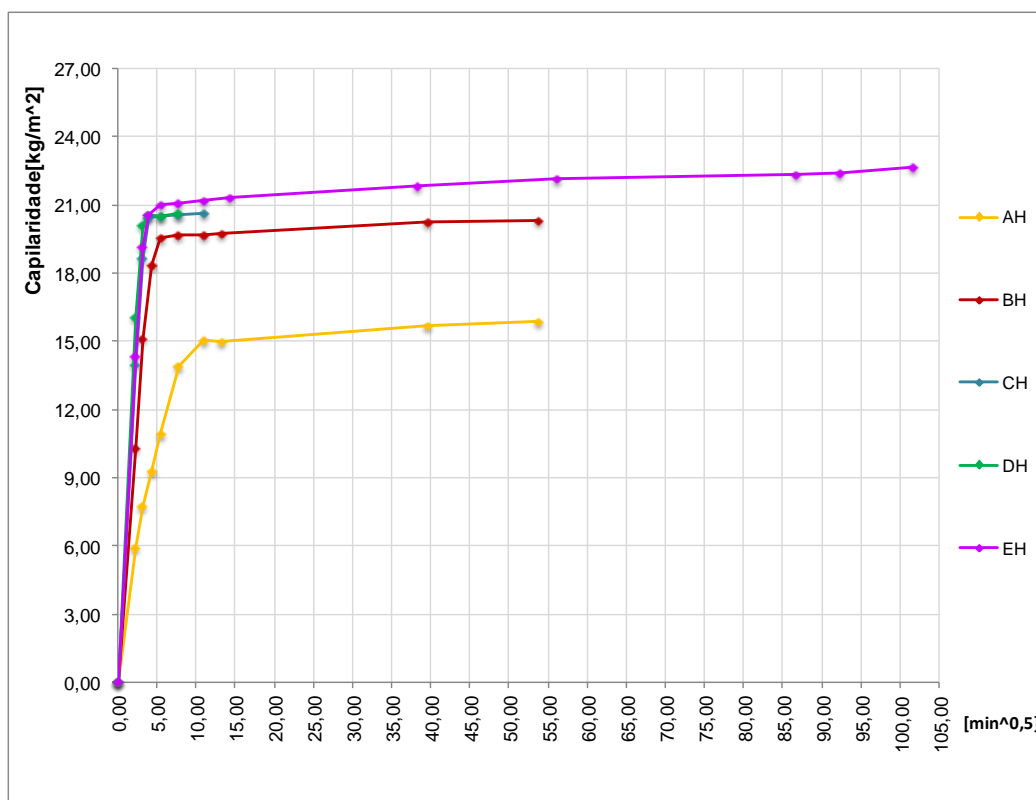


Figura 5.32 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias das argamassas da cura H

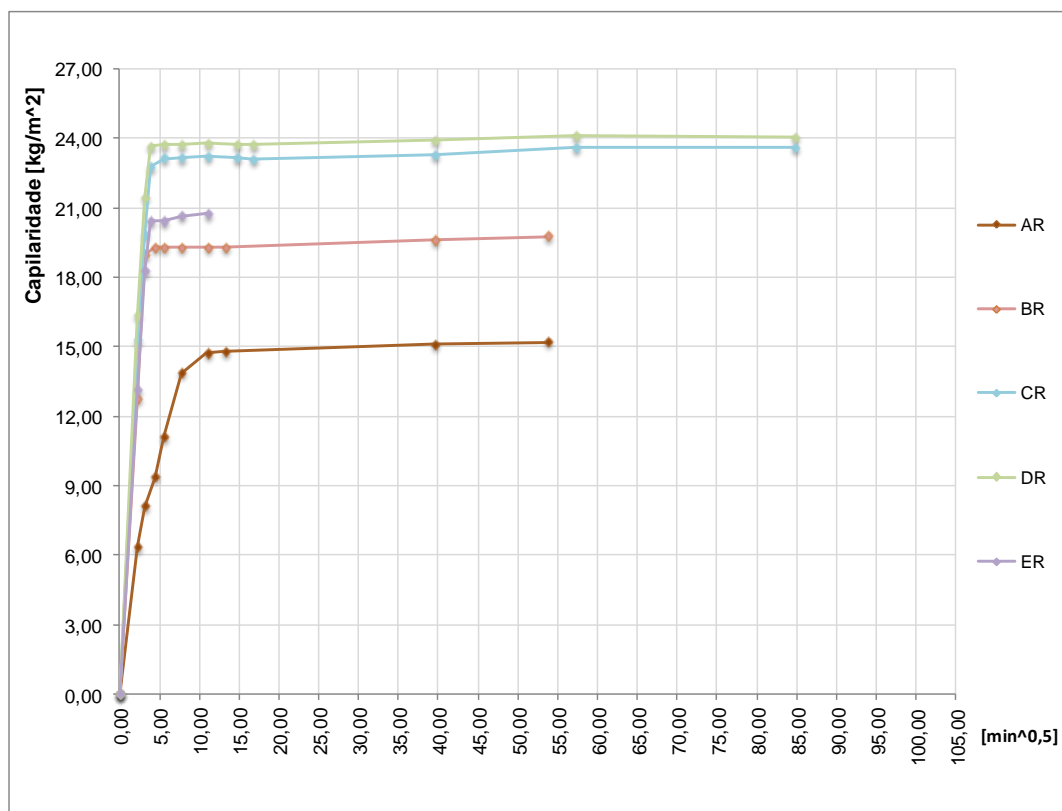


Figura 5.33 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 90 dias das argamassas da cura R

Os meios provetes CH e DH estavam de tal maneira degradados que ao fim da segunda hora do ensaio, os resultados obtidos das pesagens tiveram de ser desprezados devido à excessiva perda de massa ocorrida por degradação dos provetes.

A análise ao gráfico da Figura 5.32 permite concluir que quanto maior for a dosagem de metacaulino, maior é o valor assintótico da argamassa; com excepção dos CH e DH que apresentam valores muito próximos.

Mais uma vez observa-se que a argamassa A é aquela que absorve menos água e mais lentamente.

As argamassas sujeitas à cura R e ensaiadas aos 90 dias de idade apresentam um comportamento semelhante ao das argamassas H ensaiadas aos 28 dias, com a argamassa A a absorver menos água e mais lentamente, e as argamassas C e D a apresentarem maiores valores assintóticos.

O facto dos provetes de argamassa E perderem massa levou a que os resultados obtidos depois da segunda hora de ensaio fossem desprezados, à semelhança do que aconteceu aos provetes CH e DH da mesma idade.

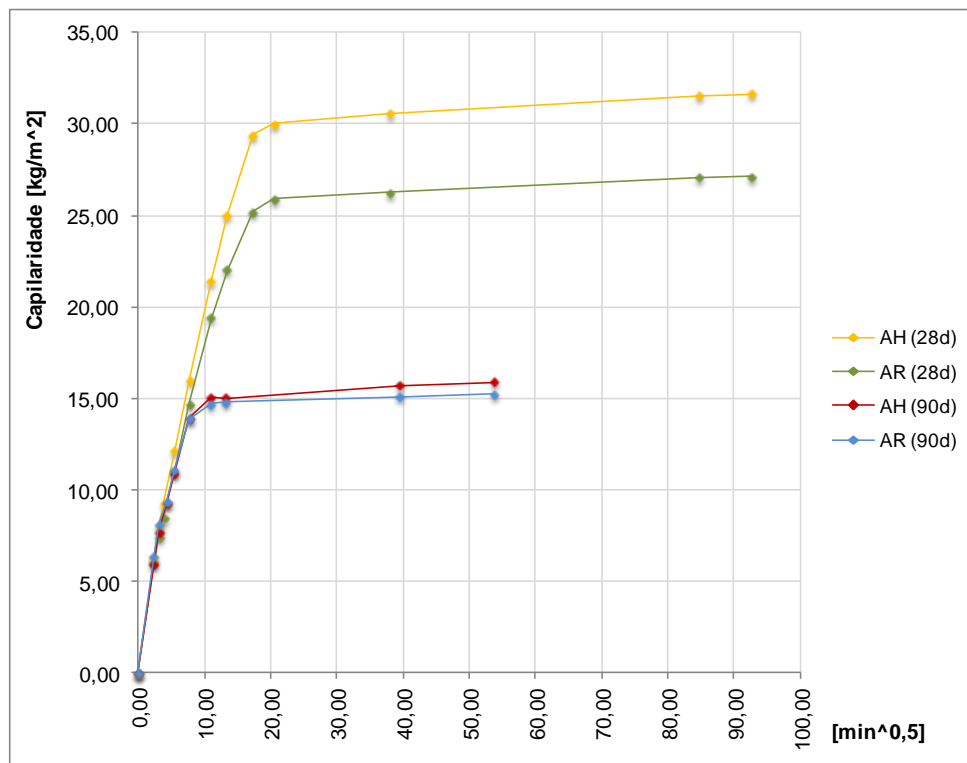


Figura 5.34 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa A

Observando o gráfico da Figura 5.34 constata-se que a argamassa A sujeita à cura húmida apresenta um valor assintótico superior à da cura R em ambas as idades, contudo a diferença é mais significativa aos 28 dias.

O mesmo se verifica relativamente ao coeficiente de capilaridade aos 90 dias de idade, com a argamassa A sujeita à cura H a apresentar uma velocidade de absorção capilar inicial superior à argamassa sujeita à cura R. Aos 28 dias as argamassas apresentam valores de C_c mais próximos; ainda assim a argamassa sujeita à cura H apresenta um valor ligeiramente superior.

5. Análise dos resultados

O facto de a diferença dos valores assintóticos registados para ambas as curas encurtar dos 28 para os 90 dias poderá dever-se ao facto de se tratarem de análises efectuadas com provetes inteiros e meios provetes, respectivamente.

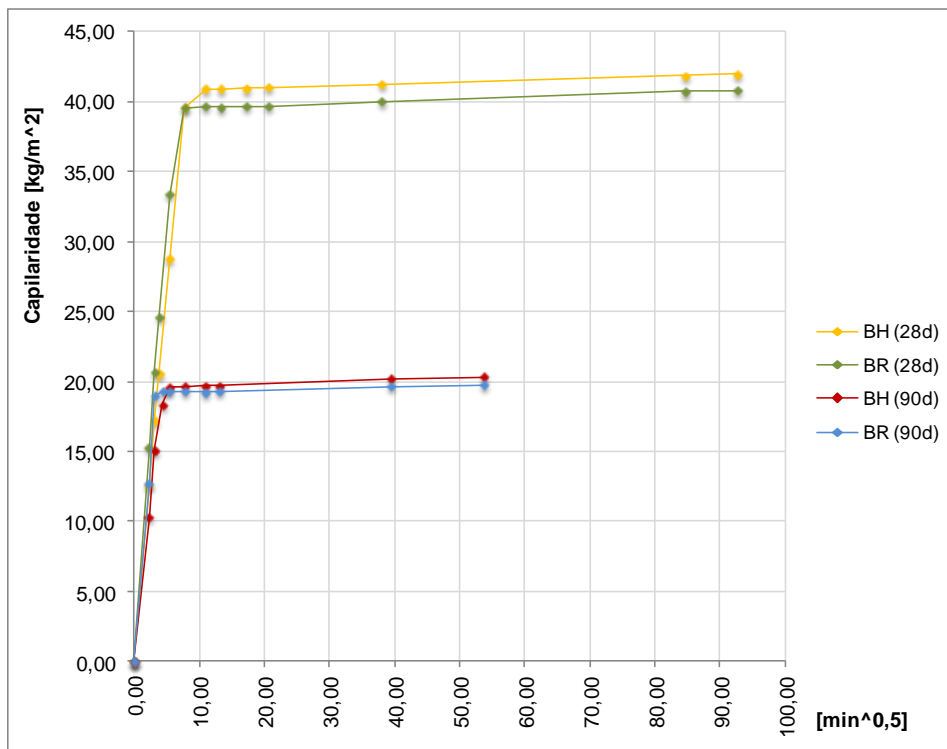


Figura 5.35 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa B

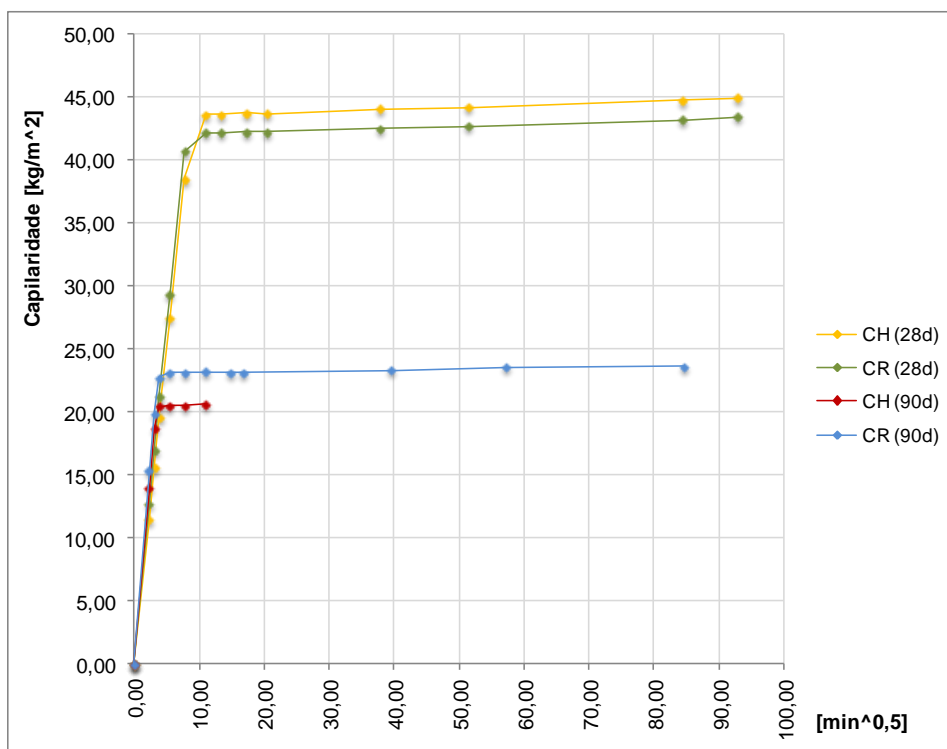


Figura 5.36 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa C

A argamassa B tem um comportamento semelhante à argamassa A no que diz respeito à absorção de água por capilaridade, com os provetes sujeitos à cura húmida a apresentarem maiores valores de coeficiente de capilaridade e de valor assintótico, sendo que essa diferença é mais reduzida ao fim de 90 dias do que aos 28 dias de idade de cura.

Porém, tanto aos 28 como aos 90 dias de idade de cura os provetes de argamassa B absorvem muito mais água e mais rapidamente do que os provetes de argamassa A.

Relativamente à argamassa C, o gráfico apresentado na Figura 5.36 permite identificar uma alteração de comportamento dos 28 para os 90 dias de idade de cura.

Aos 28 dias a argamassa sujeita à cura húmida apresentava um valor assintótico e um coeficiente de capilaridade superiores aos da argamassa sujeita à cura R; contudo, ao fim de 90 dias de idade é a argamassa sujeita à cura R que apresenta valores de V_a e de C_c superiores.

Os provetes sujeitos à cura H absorvem menos água aos 90 dias do que aos 28 dias; comportamento inverso tem os provetes sujeitos à cura R.

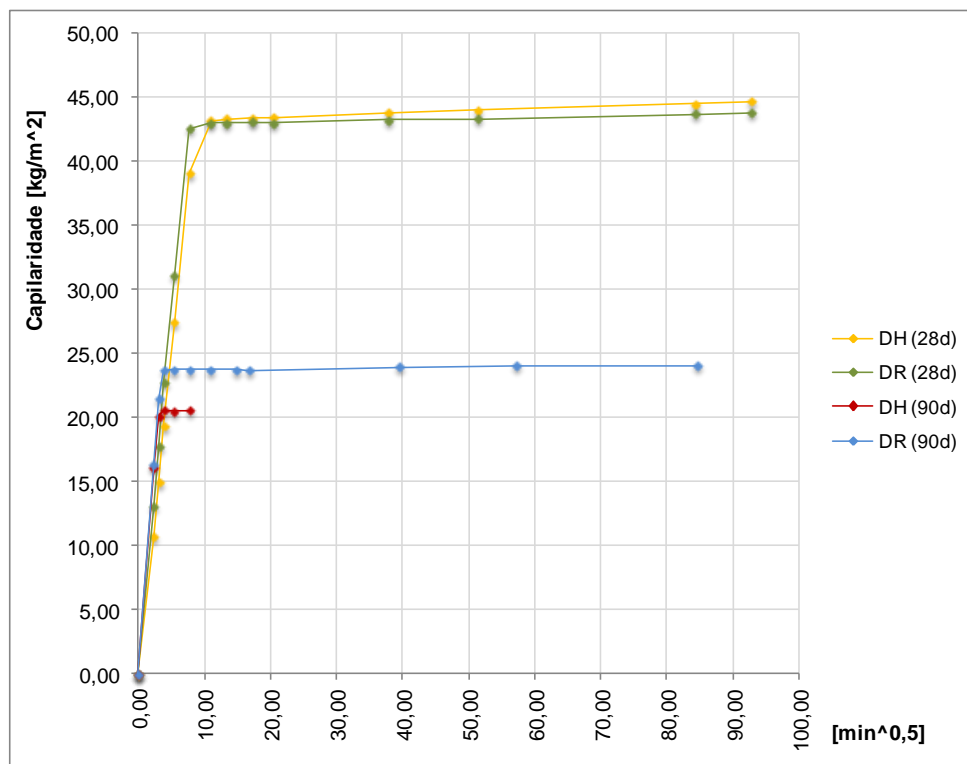


Figura 5.37 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa D

A argamassa D tem um comportamento semelhante à argamassa C no que diz respeito à quantidade total de água absorvida, com os provetes sujeitos à cura H a apresentarem maiores valores de V_a do que os provetes sujeitos à cura R, enquanto ao fim de 90 dias de idade de cura acontece o contrário.

Relativamente ao coeficiente de capilaridade, em ambas as idades, a argamassa sujeita à cura R apresenta valores superiores aos da argamassa sujeita à cura H, com essa diferença a ser mais significativa aos 28 dias de idade de cura.

5. Análise dos resultados

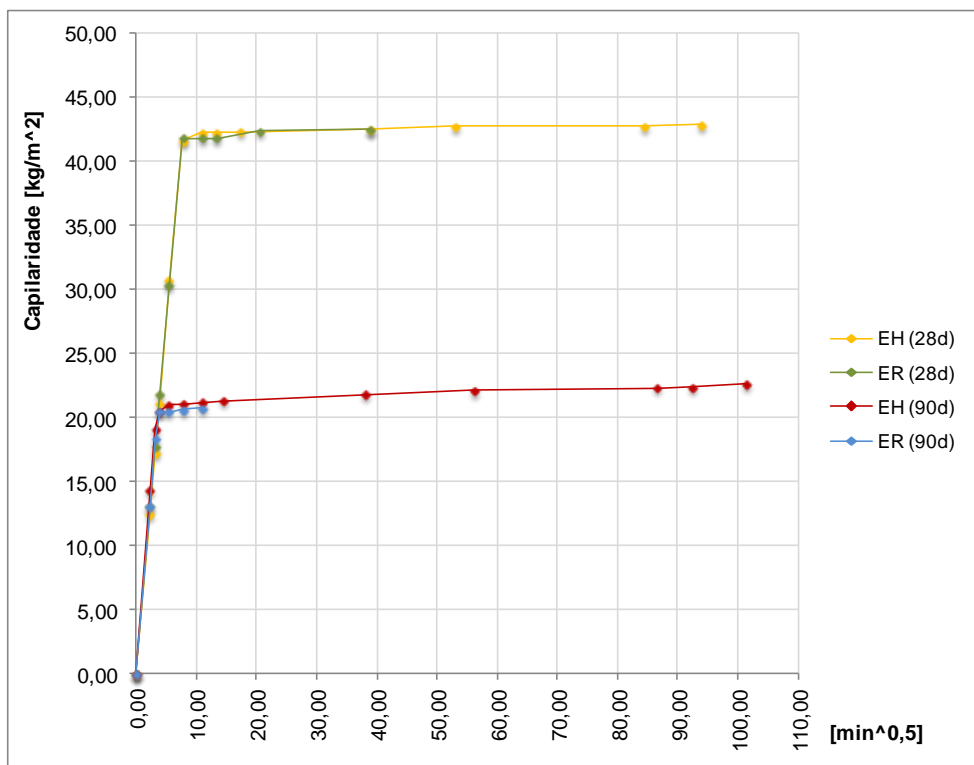


Figura 5.38 - Curvas de absorção de água por capilaridade aos 28 e 90 dias da argamassa E

Aos 28 dias de idade, os provetes sujeitos a ambas as curas apresentam valores de coeficiente de capilaridade e de valor assintótico muito próximos, com a argamassa CH a apresentar resultados ligeiramente superiores.

Ao fim de 90 dias de idade de cura, ambas as argamassas apresentam uma diminuição significativa do valor de C_c , com a argamassa sujeita à cura R, desta vez, a apresentar um valor superior do que a argamassa sujeita à cura H.

A diferença do valor assintótico apresentado pelos provetes H e R é bastante pequena, o que leva a crer que estas duas condições de cura terão muito pouca influência no comportamento à capilaridade das argamassas E.

O Quadro 5.7 e a Figura 5.39 apresentam os valores assintóticos e os coeficientes de capilaridade de todas as argamassas aos 28 e aos 90 dias de idade de cura.

Quadro 5.7 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias

Arg.	Cura	28 dias		90 dias		
		Cc	Va	Cc	Va	Va x 2
A	H	1,68	31,63	1,45	15,87	31,74
	R	1,43	27,14	1,37	15,21	30,43
B	H	4,90	41,93	3,79	20,30	40,59
	R	5,58	40,77	3,09	19,78	39,55
C	H	4,90	44,93	5,08	20,65	41,29
	R	5,06	43,40	4,55	23,62	47,25
D	H	5,14	44,69	4,35	20,29	40,57
	R	5,57	43,84	4,45	24,06	48,11
E	H	5,62	42,85	3,77	22,62	45,24
	R	5,33	41,53	4,45	20,74	41,49

Nota: Multiplicou-se o valor assintótico aos 90 dias por dois, devido ao facto de se tratar de meios provetes, para poder ser comparado ao Va aos 28 dias

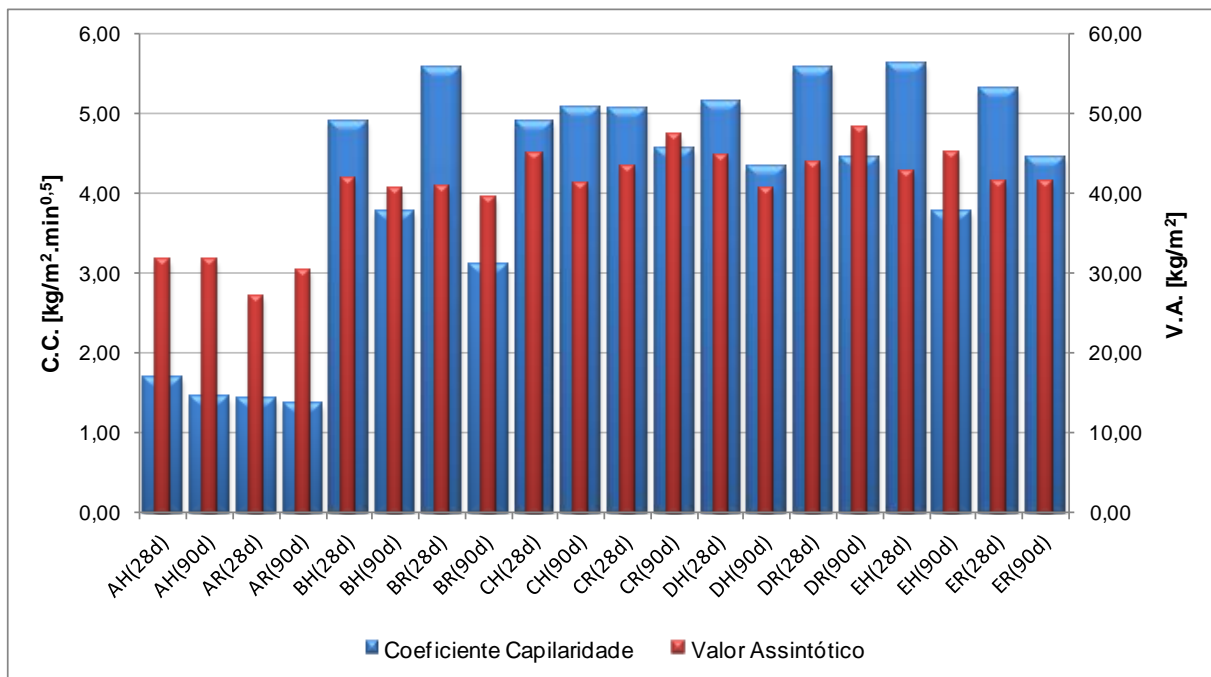


Figura 5.39 - Coeficiente de capilaridade e valor assintótico de todas as argamassas aos 28 e 90 dias

Observando o Quadro 5.7 é possível identificar uma tendência de o coeficiente de capilaridade aumentar com o aumento da dosagem de metacaulino - ou com a diminuição da quantidade de cal aérea - para as argamassas H ensaiadas aos 28 dias de idade; excepção feita às argamassas B e C que apresentam o mesmo valor.

Relativamente aos provetes da cura R ensaiados aos 28 dias, a argamassa A é aquela que absorve água mais lentamente, seguida das argamassas C e E e por último as argamassas B e D.

Para os provetes sujeitos à cura H ensaiados aos 90 dias, a argamassa C é aquela que apresenta maior valor de Cc. Verifica-se uma tendência do coeficiente de capilaridade diminuir tanto para dosagens de metacaulino superiores, como inferiores, da existente na argamassa C.

5. Análise dos resultados

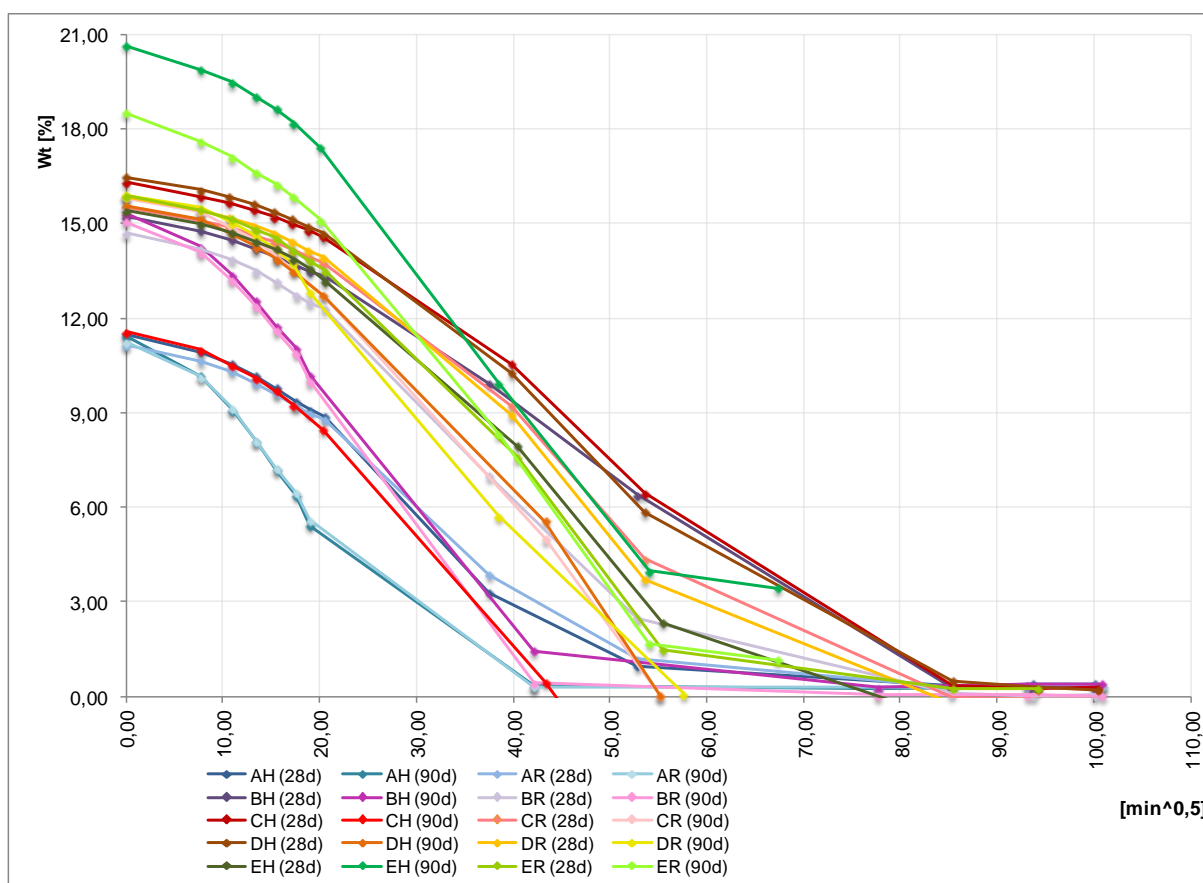
As argamassas sujeitas à cura R e ensaiadas aos 90 dias de idade mostram que o coeficiente de capilaridade máximo ocorre para uma argamassa com dosagem de metacaulino igual a 23% da quantidade de cal aérea. Qualquer dosagem superior ou inferior a essa provoca uma diminuição do coeficiente de capilaridade, o que é benéfico.

Apesar destas diferenças, salienta-se que todas as argamassas com metacaulino apresentam coeficientes de capilaridade muito elevados em comparação com as argamassas só de cal, quer aos 28 quer aos 90 dias, o que confirma resultados já obtidos por outros investigadores (VELOSA, et al., 2009); Velosa e Veiga (2004).

5.3.5. RESULTADOS DO ENSAIO DA SECAGEM

Tal como foi referido em 4.3.6. o início do ensaio da secagem coincidiu com o final do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.

A Figura 5.40 apresenta as curvas obtidas nos ensaios de secagem, de todas as argamassas, aos 28 e 90 dias de idade de cura.



A Figura 5.41 apresenta as curvas obtidas no ensaio de secagem realizado aos 28 dias de idade de cura para todas as argamassas.

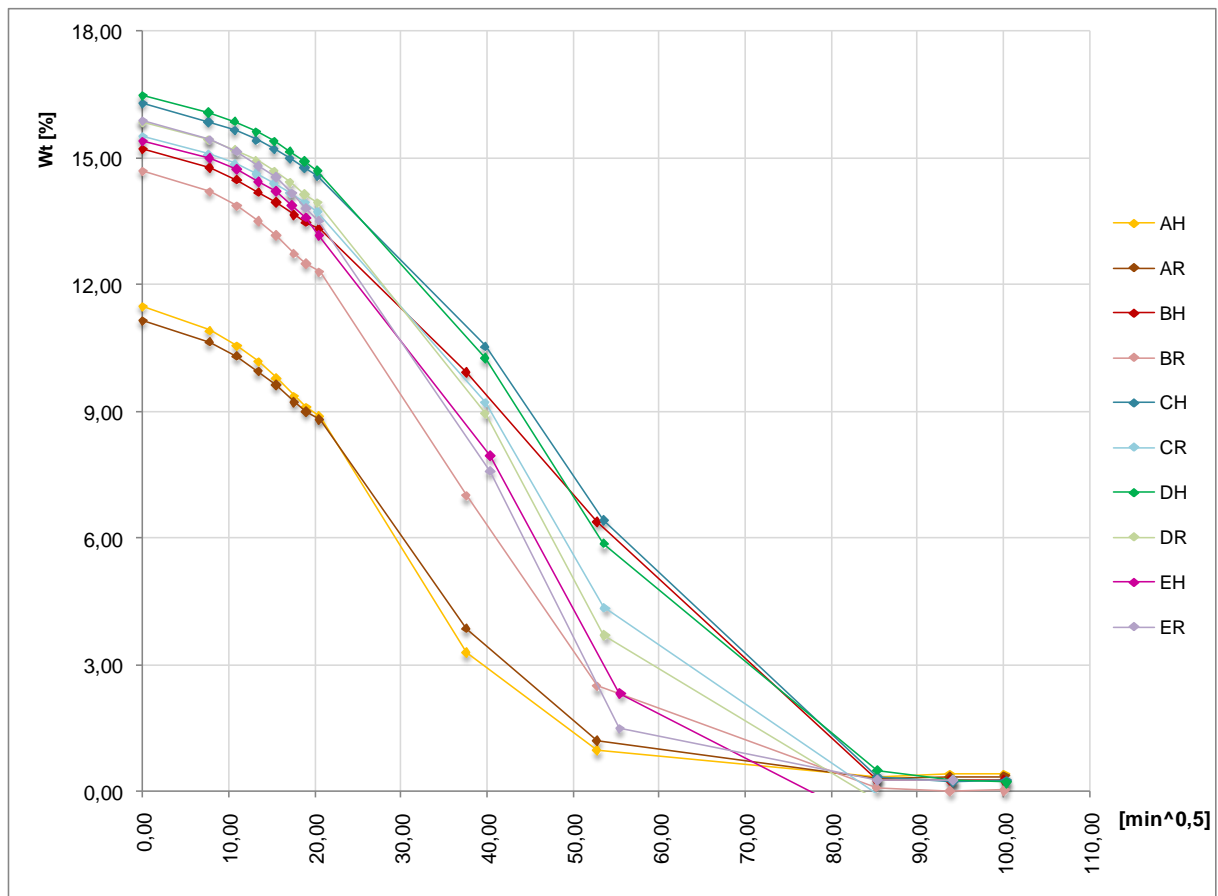


Figura 5.41 - Curvas de secagem aos 28 dias de todas as argamassas

As Figuras 5.42 e 5.43 apresentam as curvas de secagem das argamassas sujeitas à cura H e R respectivamente, aos 28 dias de idade.

Analisando a Figura 5.42 verifica-se que a argamassa A sujeita à cura H é a que seca mais rapidamente, no entanto é também a que demora mais tempo a atingir massa constante.

As argamassas CH e DH apresentam um comportamento muito semelhante ao longo do ensaio e secam mais lentamente do que a argamassa BH.

5. Análise dos resultados

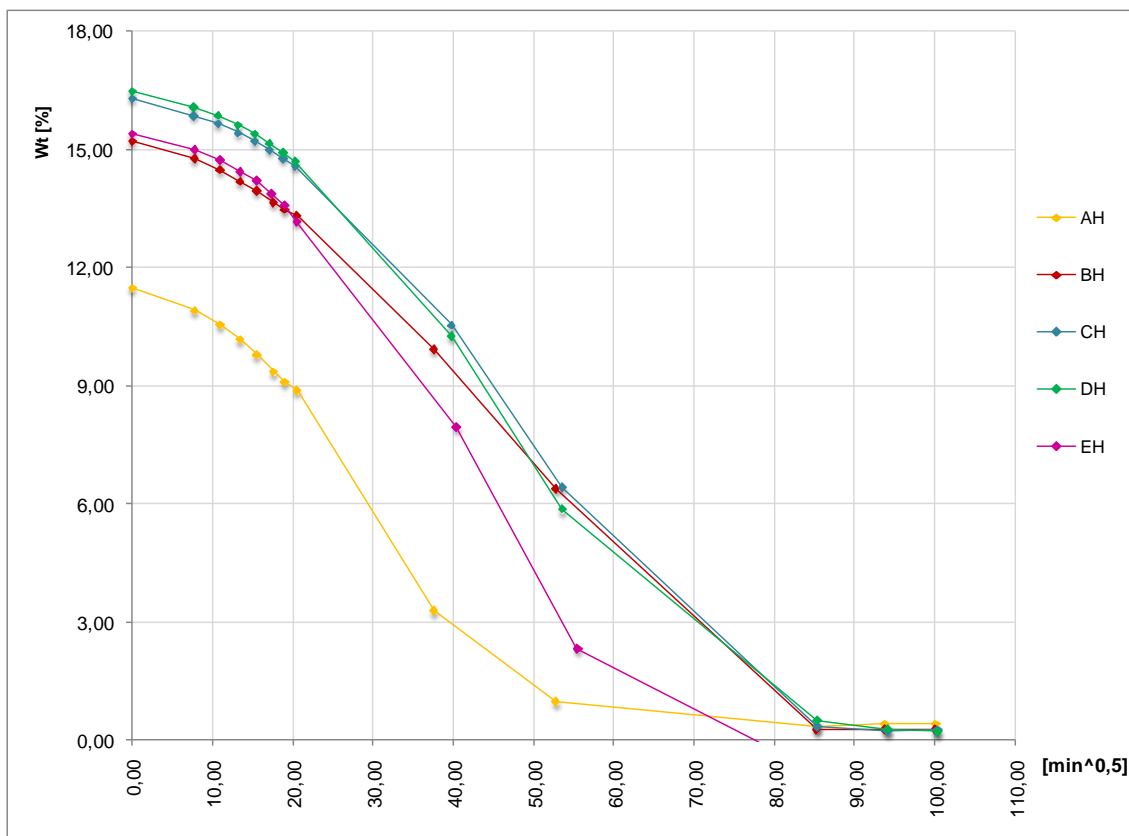


Figura 5.42 - Curvas de secagem aos 28 dias das argamassas da cura H

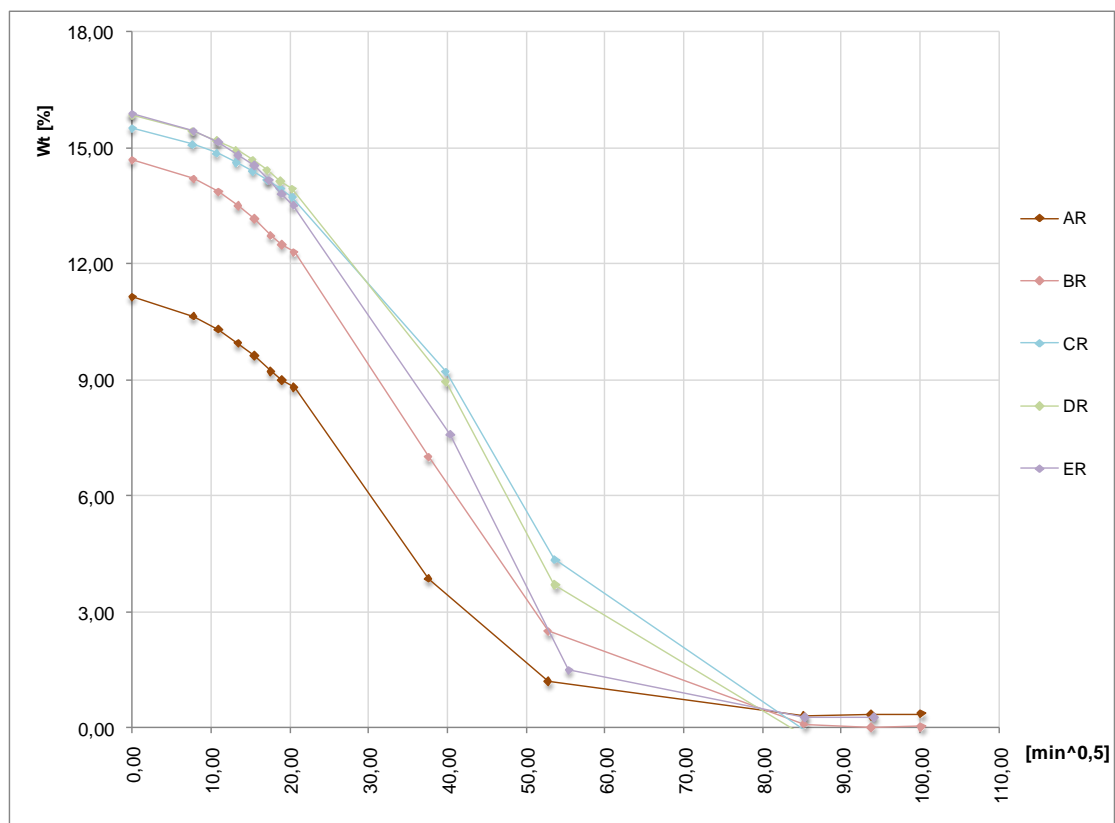


Figura 5.43 - Curvas de secagem aos 28 dias das argamassas da cura R

Relativamente à cura R, mais uma vez as argamassas A e B são aquelas que têm um processo de secagem mais rápido e as argamassas C e D voltam a apresentar um comportamento muito idêntico.

A argamassa E, à semelhança da argamassa A, necessita de mais tempo para atingir massa constante.

A Figura 5.44 apresenta as curvas de secagem de todas as argamassas aos 90 dias de idade de cura.

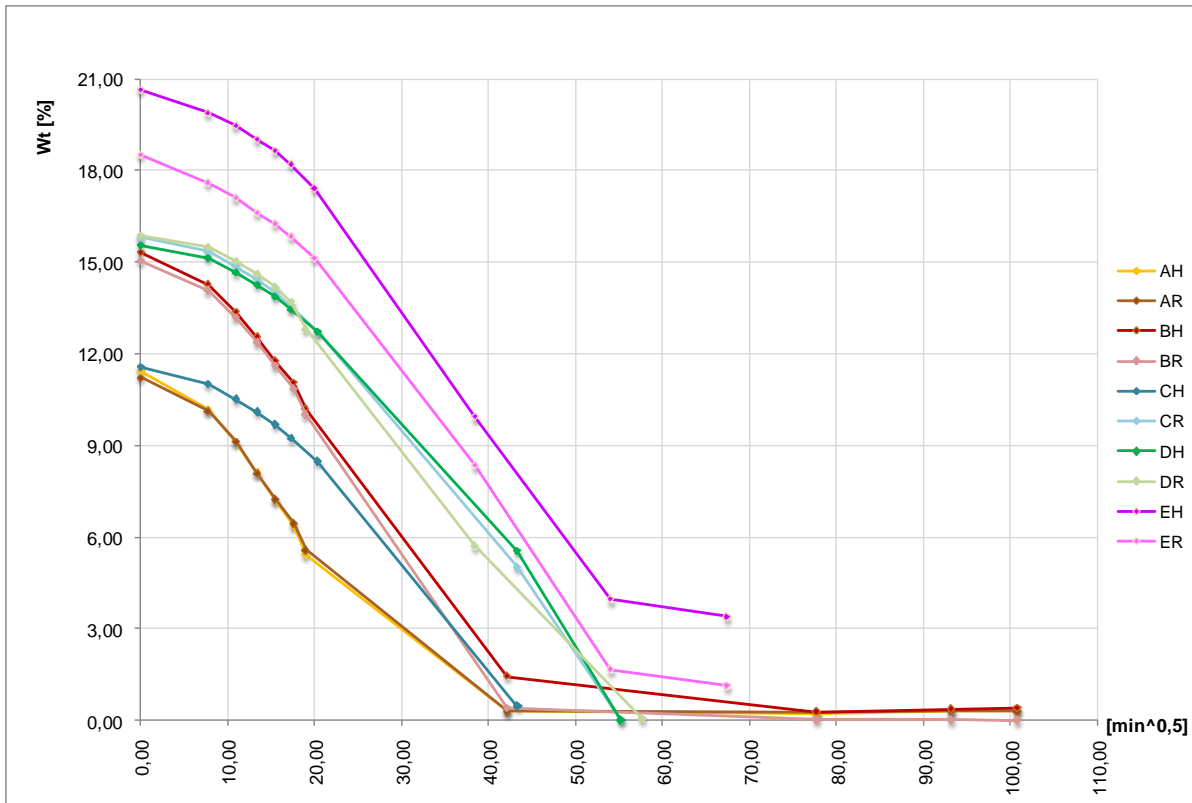


Figura 5.44 -Curvas de secagem aos 90 dias de todas as argamassas

Analisando o gráfico da Figura 5.44 verifica-se que aos 90 dias de idade de cura, as argamassas A e B são aquelas que secam mais rapidamente no entanto apresentam um processo de secagem mais prolongado. As argamassas C e D voltam a ter um comportamento muito semelhante com um processo de secagem lento.

A argamassa E é aquela que seca mais lentamente aos 90 dias de idade. Como se pode constatar observando o gráfico da Figura 5.44, o ensaio de secagem da argamassa E, por engano, terminou sem que os provetes tenham atingido massa constante.

5. Análise dos resultados

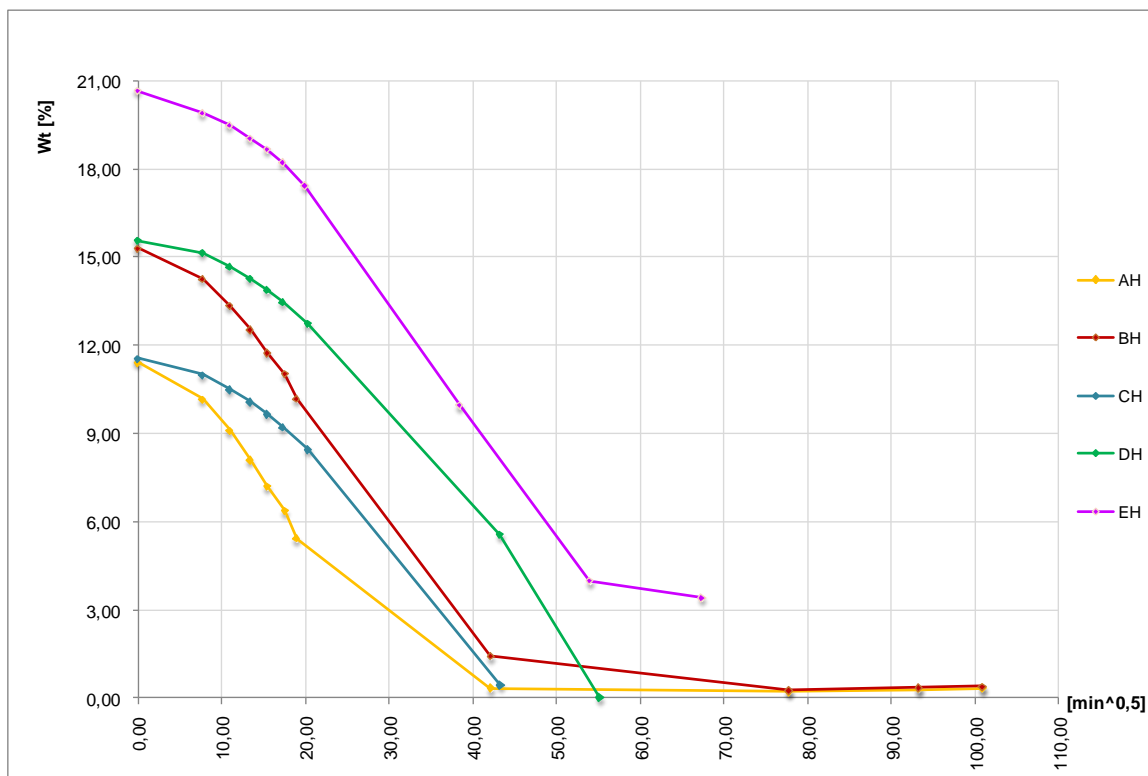


Figura 5.45 - Curvas de secagem aos 90 dias das argamassas da cura H

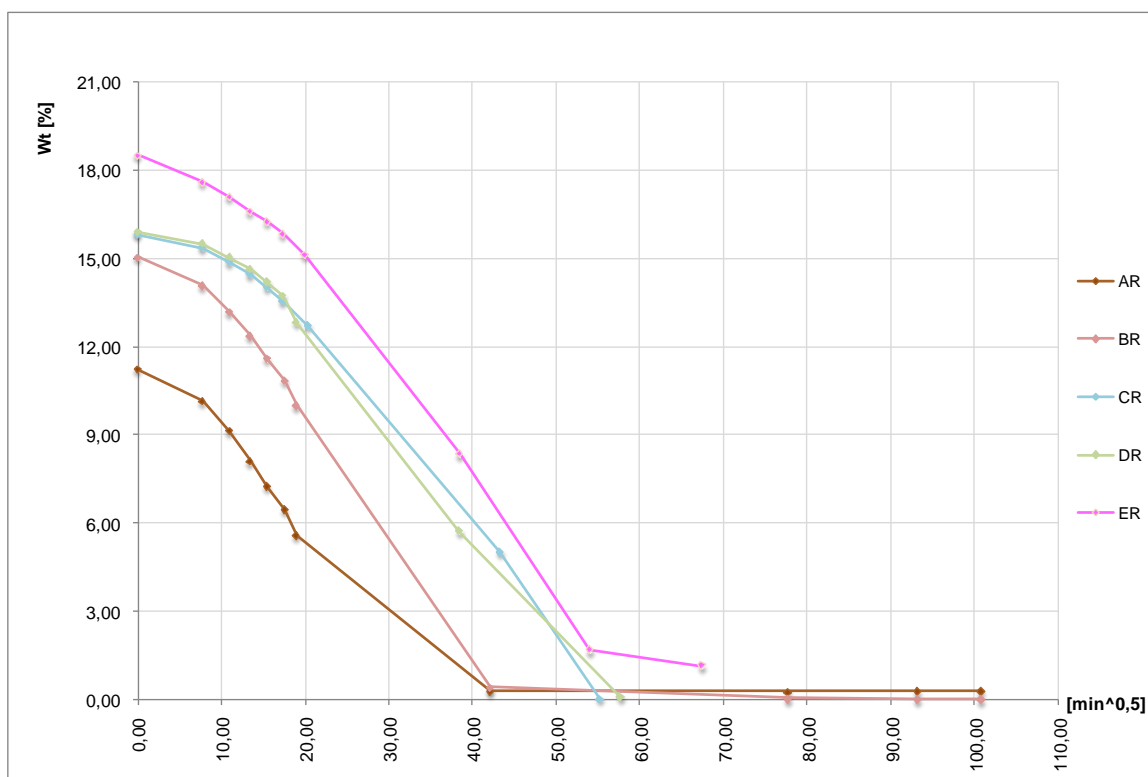


Figura 5.46 - Curvas de secagem aos 90 dias das argamassas da cura R

Observando os gráficos das Figuras 5.45 e 5.46 conclui-se que aos 90 dias de idade, para ambas as curas, as argamassas A e B são aquelas que secam mais rapidamente, seguidas das argamassas C e D que secam sensivelmente à mesma velocidade, no entanto apresentam um processo de secagem mais prolongado.

Da Figura 5.47 até à Figura 5.51 apresentam-se as curvas de secagem das argamassas A, B, C, D e E respectivamente para ambas as idades e condições de cura.

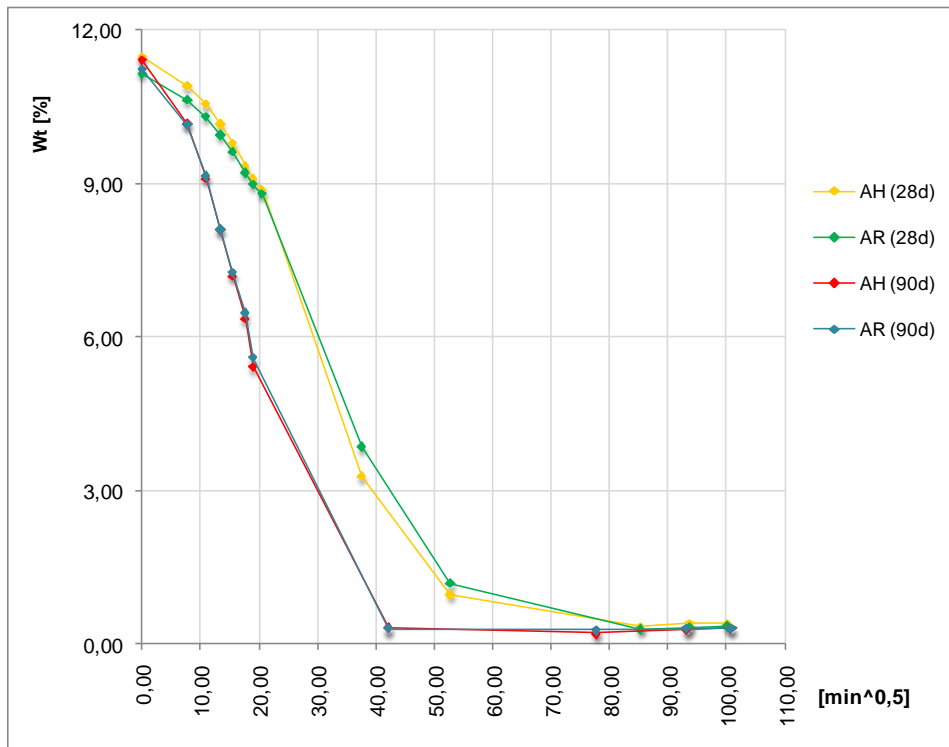


Figura 5.47 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa A

Observando a Figura 5.47 conclui-se que a argamassa A seca mais rapidamente aos 90 dias do que aos 28 dias de idade de cura. À medida a que vai ocorrendo carbonatação verifica-se uma melhoria no comportamento das argamassas de cal aérea no que diz respeito à secagem.

Presume-se que as condições de cura não tenham grande influência no comportamento das argamassas A relativamente à secagem, pois não se verificam grandes alterações da cura H para a cura R.

A argamassa B (Figura 5.48), à semelhança da argamassa A, verifica-se um processo de secagem mais acelerado aos 90 dias do que aos 28 dias, no entanto as diferenças entre as curas são maiores do que aquelas verificadas na argamassa A.

Aos 28 dias os provetes sujeitos à cura H secam mais lentamente do que os provetes sujeitos à cura R, no entanto aos 90 dias acontece o contrário.

5. Análise dos resultados

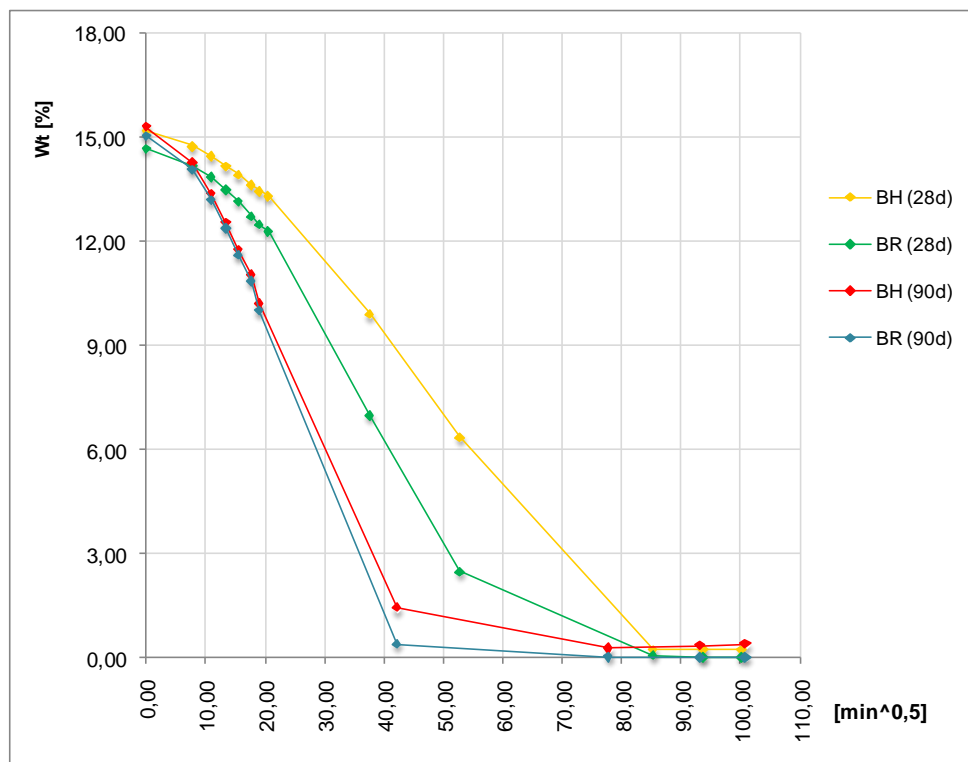


Figura 5.48 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa B

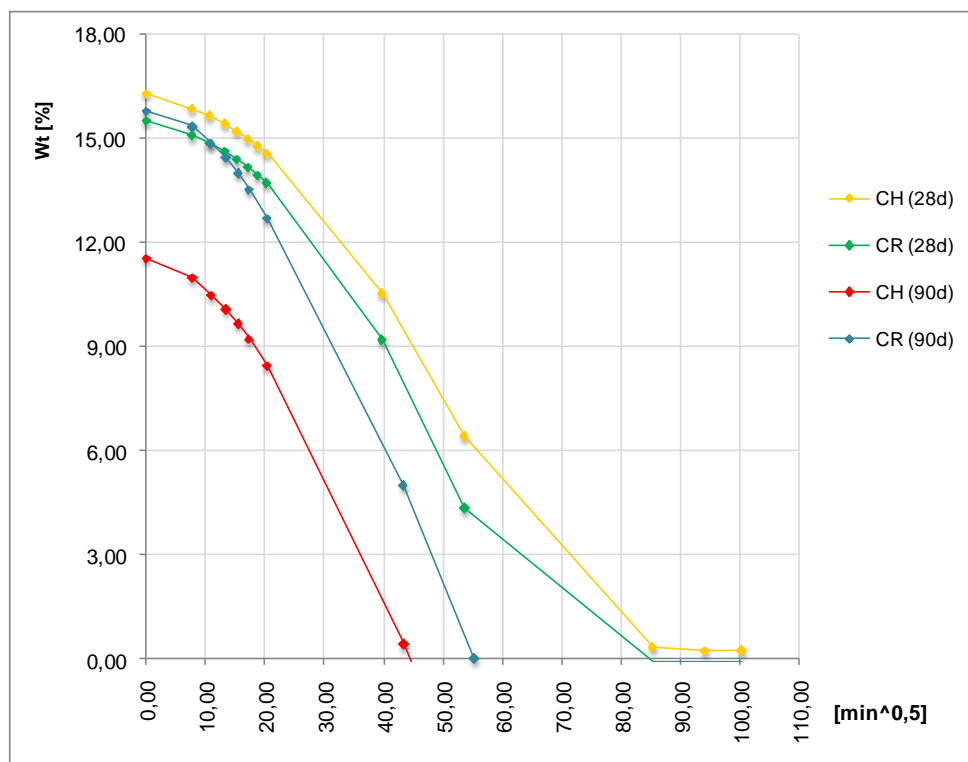


Figura 5.49 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa C

Analisando as curvas de secagem das argamassas C presentes na Figura 5.49 conclui-se que os provetes ensaiados aos 90 dias secam mais lentamente e demoram mais tempo a atingir massa constante.

Verifica-se também uma velocidade de secagem ligeiramente superior dos provetes sujeitos à cura H aos 28 dias, embora não seja uma diferença muito significativa, no entanto aos 90 dias a argamassa sujeita à cura R seca mais rapidamente.

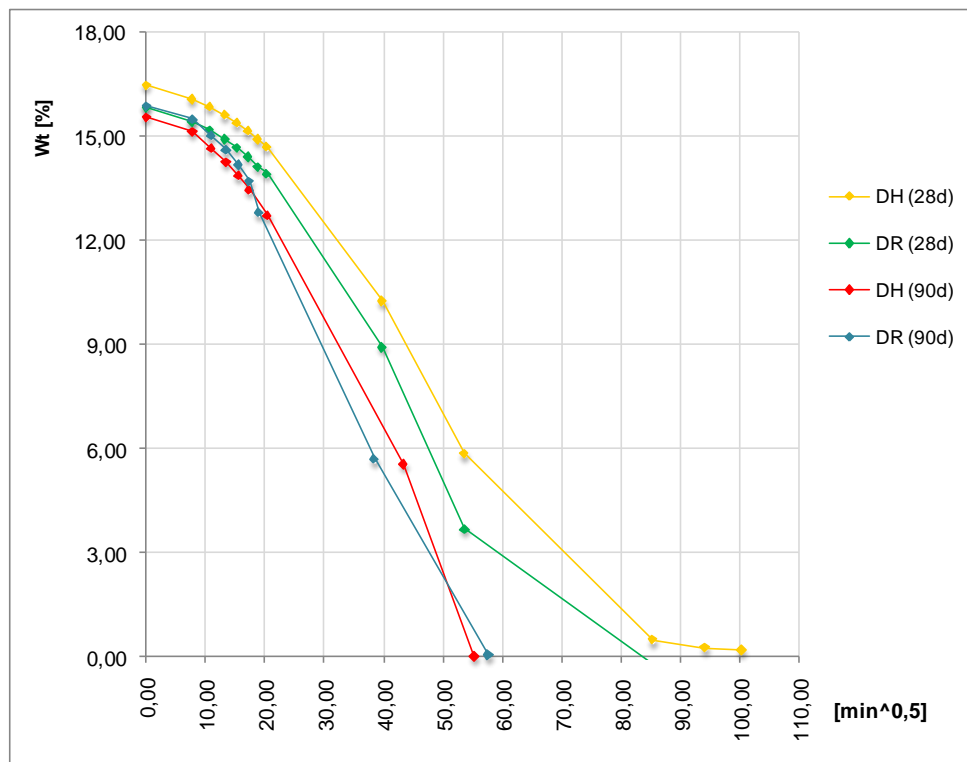


Figura 5.50 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa D

A argamassa D apresenta um comportamento muito semelhante à argamassa C no que relativamente à secagem e também demora mais tempo a atingir massa constante ao fim de 90 dias de idade de cura.

Aos 28 dias a argamassa R seca ligeiramente mais depressa do que a argamassa sujeita à cura H, aos 90 dias a velocidade de secagem é aproximadamente a mesma para ambas as curas.

As argamassas E (Figura 5.51) apresentam um comportamento um pouco semelhante ao das argamassas C e D mas com uma diferença entre curas mais significativa.

Como foi referido anteriormente, por engano, o ensaio de secagem aos 90 dias de idade terminou sem que os provetes da argamassa E tenham atingido massa constante, mas mesmo assim nota-se uma ligeira tendência para os provetes apresentarem um período de secagem bastante prolongado.

5. Análise dos resultados

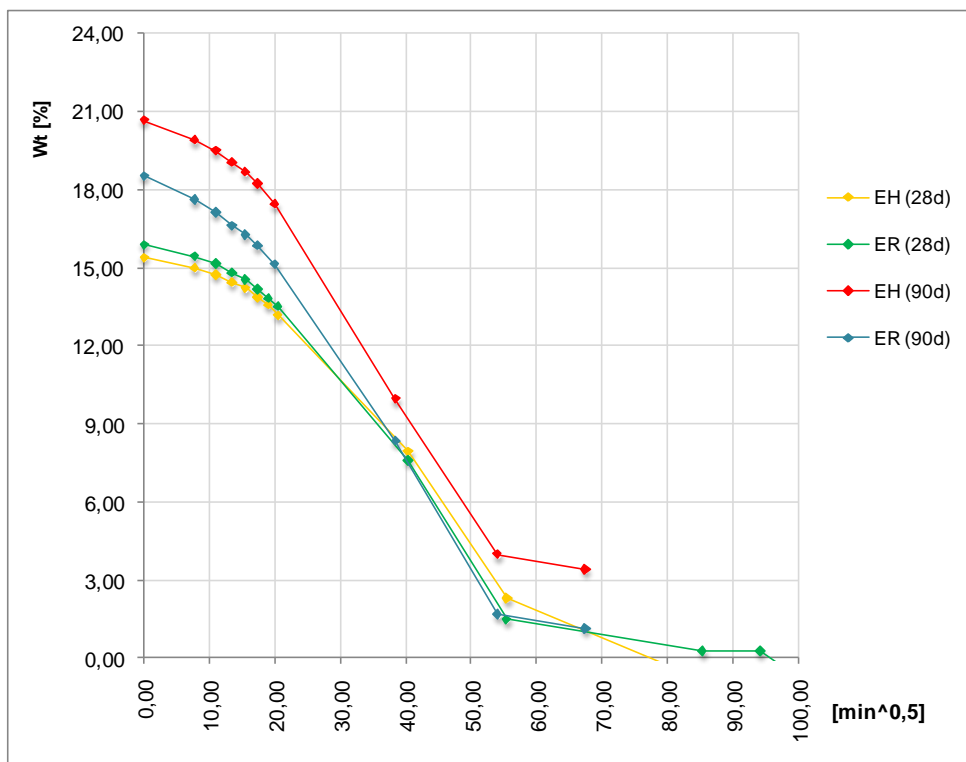


Figura 5.51 - Curvas de secagem aos 28 e 90 dias da argamassa E

O Quadro 5.8 apresenta os valores dos índices de secagem de cada argamassa, aos 28 e 90 dias de idade de cura, e o respectivo desvio padrão.

A Figura 5.52 apresenta em forma de gráfico os índices de secagem.

Quadro 5.8 - Índice de secagem de todas as argamassas aos 28 e 90 dias

Arg.	Cura	Índice de Secagem			
		28 dias		90 dias	
		Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
A	H	0,15	0,01	0,08	0,00
	R	0,16	0,03	0,08	0,00
B	H	0,29	0,01	0,11	0,02
	R	0,26	0,04	0,14	0,01
C	H	0,29	0,02	0,49	0,07
	R	0,33	0,01	0,45	0,01
D	H	0,28	0,03	0,47	0,00
	R	0,31	0,01	0,40	0,03
E	H	0,26	0,02	0,54	0,00
	R	0,32	0,16	0,45	0,21

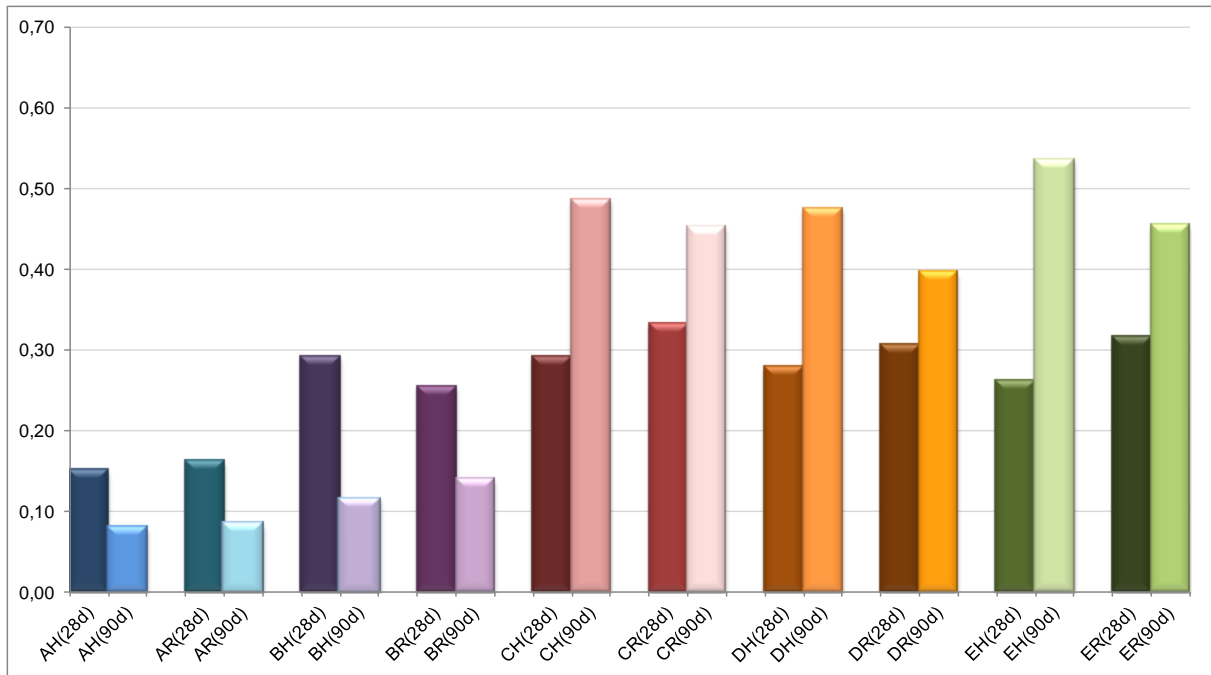


Figura 5.52 - Índice de secagem de todas as argamassas aos 28 e 90 dias

Analisando o gráfico apresentado na Figura 5.52 constata-se que nas argamassas A e B o índice de secagem, tanto para a cura H como para a cura R, diminui dos 28 para os 90 dias, o que indicia uma maior facilidade de secagem. Relativamente às restantes argamassas acontece o contrário, ou seja, o índice de secagem é maior aos 90 dias de idade de cura, o que indica uma maior dificuldade de secagem.

Pode-se considerar que aos 90 dias de idade o índice de secagem tende a aumentar com a crescente substituição de metacaulino por cal aérea em argamassas sujeitas à cura H com teores elevados de Mk (com excepção da argamassa D que apresenta valores de IS ligeiramente inferiores aos da argamassa C); nas argamassas sujeitas à cura R a tendência é em sentido contrário. Entre as argamassas com teor mais elevado de Mk a argamassa D surge como mais eficiente relativamente à secagem.

Relativamente aos 28 dias de idade, a argamassa A é aquela que tem um índice de secagem mais baixo (indicando uma grande facilidade de secagem) e as restantes argamassas a apresentarem valores relativamente próximos, a variar entre os 0,26 e os 0,33. Geralmente (excepto na argamassa B) a cura H, com menor IS, indica maior facilidade de secagem.

As argamassas com metacaulino têm mais dificuldade de secagem do que argamassas só de cal aérea, mesmo assim secam muito mais facilmente que argamassas de cimento.

No geral as argamassas A e B apresentam melhor comportamento, no que diz respeito à secagem, comparativamente com as restantes argamassas e essa diferença tende a ser ainda mais significativa com o aumento da idade de cura.

5. Análise dos resultados

5.3.6. RESULTADOS DAS POROSIDADE ABERTA

Quadro 5.9 - Porosidade aberta aos 28, 60 e 90 dias de todas as argamassas

Arg.	Cura	Porosidade Aberta [%]					
		28 dias		60 dias		90 dias	
		Média	D.Padrão	Média	D.Padrão	Média	D.Padrão
A	H	30	0,8	-	-	23	0,2
	R	31	1,2	-	-	23	0,3
B	H	32	0,3	27	0,3	26	0,2
	R	32	1,3	25	0,5	27	0,4
C	H	33	1,7	26	1,5	25	0,0
	R	32	1,0	26	1,1	28	0,3
D	H	34	0,6	-	-	28	0,0
	R	28	5,8	27	0,8	28	0,8
E	H	33	0,3	-	-	27	2,2
	R	25	5,6	25	0,0	26	0,6

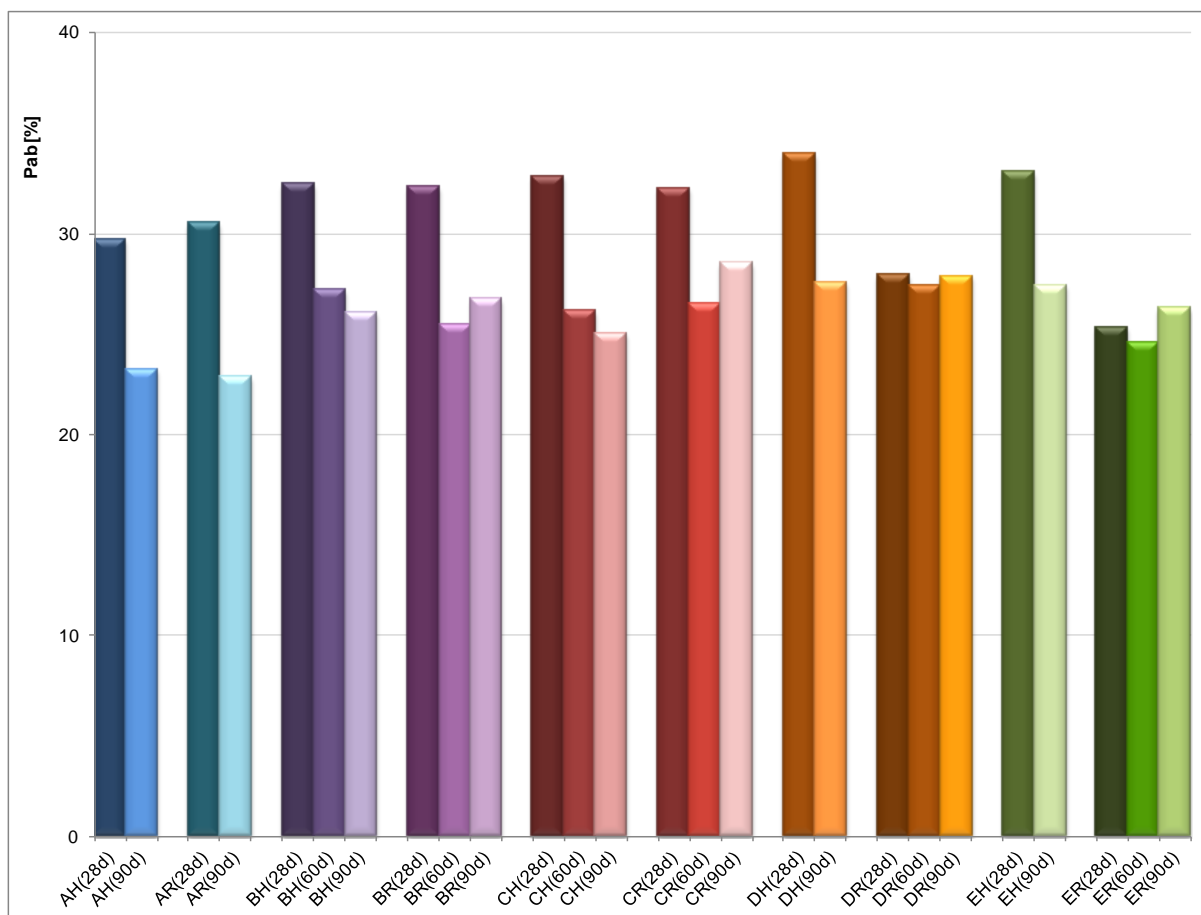


Figura 5.53 - Porosidade aberta das diversas argamassas as 28, 60 e 90 dias

Observando o gráfico da Figura 5.53 verifica-se que, à exceção da argamassa E e D sujeitas à cura R - que apresentam resultados relativamente próximos em todas as idades de cura - todas as argamassas têm maior porosidade aberta aos 28 dias de idade com valores a variar entre os 30 e os 34%.

A argamassa do tipo A é aquela que tem menor porosidade aberta ao fim de 90 dias de idade de cura com uma percentagem de 23% para ambas as condições de cura. As restantes argamassas apresentam valores ligeiramente superiores (entre 25 e os 28%). Estes resultados são consistentes com os valores relativos da absorção assintótica, já que os maiores valores de porosidade aberta correspondem a maiores valores de absorção assintótica, como era expectável.

Para os provetes A não se verifica a influência das condições de cura nos resultados da porosidade aberta.

Os provetes A e EH estavam de tal maneira degradados aos 60 dias de idade que não se conseguiu aproveitar nenhuma das três amostras de cada argamassa sujeita ao ensaio.

5.3.7. SÍNTESE DE RESULTADOS

Os Quadros 5.10 e 5.11 apresentam todos os resultados dos ensaios mecânicos e físicos respectivamente, a todas as argamassas e idades de cura.

Quadro 5.10 - Características das argamassas e das condições de cura e resultados dos ensaios mecânicos.

Argamassa	Cura	% Mk	H _R (%)	T (°C)	E _{din} [MPa]			R _t [MPa]		R _c [MPa]		
					28 dias	60 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias
A	H	0	95	23	2645	3716	3988	0,22	0,34	0,41	0,74	0,65
A	R	0	65	23	2567	3265	3380	0,20	0,38	0,49	0,74	0,92
B	H	9	95	23	1284	1105	4157	0,04	0,07	0,10	0,12	0,17
B	R	9	65	23	861	967	3803	0,09	0,09	0,18	0,26	0,30
C	H	17	95	23	898	1959	3157	0,08	0,04	0,23	0,14	0,11
C	R	17	65	23	583	2339	2329	0,05	0,05	0,17	0,22	0,26
D	H	23	95	23	1335	2035	1891	0,12	0,04	0,31	0,14	0,11
D	R	23	65	23	468	1913	1892	0,04	0,04	0,20	0,19	0,27
E	H	33	95	23	1394	1045	1808	0,15	0,03	0,43	0,10	0,14
E	R	33	65	23	885	1386	1386	0,03	0,02	0,13	0,12	0,14

5. Análise dos resultados

Quadro 5.11 - Características das argamassas e das condições de cura e resultados dos ensaios físicos.

Argamassa	Cura	% Mk	H _R	T (°C)	Absorção de água por Capilaridade				Índice de Secagem		Porosidade Aberta [%]		
					Cc		Va		28 dias	90 dias	28 dias	60 dias	90 dias
					28 dias	90 dias	28 dias	90 dias *					
A	H	0	95	23	1,68	1,45	31,63	31,74	0,15	0,08	30	-	23
A	R	0	65	23	1,43	1,37	27,14	30,43	0,16	0,08	31	-	23
B	H	9	95	23	4,90	3,79	41,93	40,59	0,29	0,11	32	27	26
B	R	9	65	23	5,58	3,09	40,77	39,55	0,26	0,14	32	25	27
C	H	17	95	23	4,90	5,08	44,93	41,29	0,29	0,49	33	26	25
C	R	17	65	23	5,06	4,55	43,40	47,25	0,33	0,45	32	26	28
D	H	23	95	23	5,14	4,35	44,69	40,57	0,28	0,47	34	-	28
D	R	23	65	23	5,57	4,45	43,84	48,11	0,31	0,40	28	27	28
E	H	33	95	23	5,62	3,77	42,85	45,24	0,26	0,54	33	-	27
E	R	33	65	23	5,33	4,45	41,53	41,49	0,32	0,45	25	25	26

* Valor assintótico real multiplicado por dois, devido ao facto de se tratar de meios provetes, para poder ser comparado ao dos 28 dias.

Verificou-se que as argamassas em que parte da cal foi substituída por metacaulino apresentaram características mecânicas inferiores e capilaridades superiores às argamassas só de cal, o que parece indicar que, mesmo em condições de cura húmida, não se deu reacção pozolânica significativa. Assim, o metacaulino funcionou como um fino e não como ligante e as argamassas resultaram pobres em ligante.

No ANEXO II são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos e físicos realizados a cada provete.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Esta dissertação está inserida no projecto FCT-METACAL e consistiu em avaliar a influência da humidade relativa na evolução das características das argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino.

Para tal foram feitas argamassas no DEC-FCT/UNL em quantidade suficiente que permitisse realizar ensaios mecânicos e físicos a diferentes idades de cura.

Assim que as amassaduras eram feitas e colocadas nos moldes, estes eram fechados em sacos, para promover o endurecimento retendo a humidade durante 7 dias.

Os provetes de argamassa A, devido ao seu endurecimento dar-se apenas por carbonatação (e ter apenas uma face em contacto com o CO₂), ao fim dos 7 dias ainda se apresentavam demasiado frescos. Por essa razão tiveram de ficar nos moldes durante mais 6 dias sujeitos a ambiente laboratorial. Comparativamente às argamassas com substituição parcial de cal aérea por metacaulino, verificou-se tratarem-se de argamassas com períodos e condições de endurecimento distintas, com vantagem para as argamassas com metacaulino em ambiente húmidos e com muito fraca renovação de CO₂).

Neste trabalho pretendeu-se submeter as argamassas a dois ambientes de cura distintos: a cura H (95±5% de humidade relativa e a 23±3°C) e a cura R (65±5% de humidade relativa e 23±3°C).

No que se refere ao efeito do metacaulino nos provetes de argamassa, constatou-se que a sua substituição não foi benéfica às argamassas, pois verificou-se uma fraca reacção pozolânica tanto na cura H como na cura R.

Em termos de resistências mecânicas, os resultados permitem concluir que para provetes de cal aérea ao traço volumétrico 1:3, a substituição parcial de cal aérea por metacaulino é tão desfavorável quanto maior for a percentagem de substituição.

Pensa-se que o endurecimento dos provetes independentemente do teor de metacaulino ou da condição de cura, deu-se essencialmente por carbonatação e esse endurecimento era mais significativo quanto maior fosse a quantidade de cal aérea nas argamassas.

Essa poderá ser a razão para que os provetes de argamassa A (só de cal aérea) se apresentassem claramente como a melhor solução, tanto nos ensaios mecânicos como nos físicos.

A fraca reacção pozolânica poderá dever-se ao facto de numa fase inicial o endurecimento dos provetes que tenha dado, eventualmente, por carbonatação, verificando-se posteriormente a falta de hidróxido de cálcio da cal aérea que reagisse com o metacaulino.

Ao analisar o módulo de elasticidade dinâmico pensou-se que a argamassa B (9% de substituição parcial de cal aérea por metacaulino) poderia apresentar-se como uma boa solução, pois obteve resultados superiores aos da argamassa A em ambas as condições de cura. No entanto, estes resultados não foram corroborados pelos restantes ensaios. Relativamente às restantes argamassas, cedo se percebeu que não apresentariam os resultados desejados.

Relativamente aos ensaios da resistência à tracção, ao contrário do que seria expectável (depois de ver os resultados do módulo de elasticidade), a argamassa A apresenta valores muito superiores às restantes argamassas. Mais uma vez verificou-se uma tendência das características mecânicas diminuírem com aumento do teor de metacaulino.

6. Conclusões e desenvolvimentos futuros

Os resultados dos ensaios à resistência à compressão, à semelhança dos ensaios à tracção voltam a mostrar que a argamassa A é aquela que apresenta melhores características mecânicas e a única solução viável numa acção de reabilitação de um edifício.

Quando se substitui cal aérea por metacaulino pretende-se garantir propriedades hidráulicas às argamassas sem alterar o respectivo traço volumétrico, no entanto o metacaulino necessita de estar na presença de água para reagir com o hidróxido de cálcio da cal aérea.

Há dois factores que podem ter tido influência nos resultados finais: o facto de os provetes terem endurecido numa fase inicial por carbonatação da cal aérea pode ter dificultado a entrada da humidade para dentro dos provetes impedindo assim a activação pozolânica do metacaulino; ou então uma grande percentagem de cal aérea pode ter carbonatado, faltando depois hidróxido de cálcio para reagir com o metacaulino.

Em qualquer das duas hipóteses não se deu a reacção pozolânica esperada, o metacaulino não foi mais do que um material fino sem qualquer actividade pozolânica, daí o facto de o interior dos provetes apresentar grãos de areia soltos e não conferir quaisquer propriedades mecânicas às argamassas.

Observando os gráficos com os resultados dos ensaios de resistência à tracção e à compressão, verifica-se que os provetes ensaiados aos 28 dias num aparelho com célula de carga de 2 kN (provetes DH e EH), apresentam valores muito superiores aos restantes provetes que foram ensaiados com uma célula de carga de 10 kN. No entanto essa diferença de valores fez-se notar apenas nos provetes sujeitos à cura H, que se apresentavam húmidos no momento em que foram ensaiados. Presume-se que a presença de água nos provetes sujeitos a ensaios em aparelhos com célula de carga inferior pode ter influência nos resultados finais. Por outro lado, é também possível que estas argamassas, com maior teor de substituição de metacaulino, tenham tido formação de alguns compostos pozolânicos instáveis. Esta hipótese está a ser investigada no LNEC, no âmbito do Projecto FCT-METACAL.

Relativamente ao ensaio de absorção de água por capilaridade, a argamassa A voltou a apresentar-se como a melhor opção, com uma absorção de água significativamente mais lenta do que as restantes argamassas e em menores quantidades.

O mesmo se sucedeu relativamente à capacidade de secagem, com a argamassa A a apresentar uma velocidade de secagem superior à das restantes. Este facto leva, mais uma vez, a pensar-se que o metacaulino não tenha reagido como seria esperado, sendo apenas um material fino que ocupou os poros maiores, tornando-os mais pequenos. Como foi referido anteriormente, segundo Henriques e Faria (2008), o facto de os poros serem mais pequenos fez com que as pressões capilares fossem maiores, dificultando assim a saída da água. Ainda assim a substituição de 9% de cal aérea por metacaulino não se revelou muito prejudicial no que diz respeito à capacidade de secagem da argamassa.

Por fim, relativamente ao ensaio de determinação da porosidade aberta, a argamassa A volta a destacar-se das outras, desta feita apresentando uma porosidade aberta inferior às restantes argamassas. Contudo este ensaio não correu como o esperado, o facto de alguns resultados apresentarem valores de desvio padrão ou até valores médios de porosidade aberta excessivamente elevados levou a que estes fossem desprezados.

As dúvidas relativas à credibilidade dos resultados devido ao facto de os ensaios não terem decorrido nas melhores condições. Os provetes encontravam-se demasiado friáveis, perdendo demasiada massa quando em contacto com a água e houve algumas dúvidas quanto ao correcto funcionamento da bomba, podendo não ter sido assegurada a existência de vácuo dentro do exsiccador no decorrer do ensaio.

Comparativamente com os ensaios mecânicos, notou-se uma pequena diferença nos resultados aos ensaios físicos. Enquanto que nos ensaios mecânicos notou-se uma diminuição das características proporcional ao aumento do teor de metacaulino, em alguns ensaios físicos verificou-se um comportamento semelhante entre as argamassas C e D e também das argamassas B e E.

Pela pesquisa efectuada sobre estudos realizados sobre o metacaulino, esperavam-se resultados bastante mais favoráveis das argamassas com metacaulino.

O traço volumétrico 1:3 revelou-se demasiado fraco de argamassas de cal aérea com substituições parciais por metacaulino muito embora os resultados obtidos nos ensaios a provetes com dimensões de 40x40x160 mm não possam ser equiparados aos de um revestimento de parede. Normalmente a espessura do reboco de uma parede varia entre 5 e 30mm e é constituído por três camadas que são aplicadas em outras tantas fases, pelo que o seu endurecimento é mais facilitado do que nos provetes usados neste trabalho experimental.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para desenvolvimentos futuros, que podem dar uma continuidade à investigação desenvolvida, consideram-se importantes os seguintes aspectos:

- Como as argamassas com base em cal aérea se apresentam muito frágeis numa curta idade de cura, deverão limitar-se ao mínimo as características a ensaiar.
- Deverão ser também realizados os mesmos ensaios a idades de cura mais avançadas de maneira a perceber de que forma é que as características das argamassas continuam a evoluir depois de 90 dias de idade.
- Deverão ser feitos estudos para argamassas com um traço volumétrico mais forte (1:2 por exemplo), para que se possa favorecer mais a reacção pozolânica.
- As argamassas e respectivos provetes para ensaio deverão ser feitas no mesmo laboratório, com o mesmo procedimento e se possível pelas mesmas pessoas.
- Deverão ser usados sempre os mesmos instrumentos nos ensaios aos provetes.
- Deverão ser asseguradas as condições ambientais desejadas e deverá decorrer, se possível, num período de tempo sem grandes variações de temperatura e humidade relativa.
- Em simultâneo poderão ser feitos ensaios a provetes de cal aérea com outras pozolanas, com a mesma idade de cura dos provetes de cal aérea com metacaulino de forma a perceber as principais diferenças entre ambos.
- Deverão ser feitas análises aos resultados químicos, mineralógicos e microestruturais, que poderão justificar alguns aspectos salientados ao nível dos resultados

BIBLIOGRAFIA

- AGOSTINHO, C. (2008). *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: UTL/IST.
- AMBROISE, J., SANDRINE, M., & PERA, J. (1994). *Proprieties of Metakaolin Blended Cements*. (Vol.1, nº4: pp. 161-168). Villeurbanne: Laboratoire des Materiaux Minéraux, Institute National des Sciences Appliquées de Lyon.
- BOTAS, S. M. (2009). *Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: FCT-UNL.
- BRITO, V. P. (2009). *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Lisboa FCT-UNL.
- 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 (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 (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 os test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels.
- CEN (2009). EN 15801:2009. Conservation of cultural property. Test, methods. Determination of water absortion by capillarity. Brussels.
- CEN (1999). EN 1936:1999. Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, of total and open porosity. Brussels.
- COUTINHO, J. S. (2006). *Materiais de Construção 2 - Ligantes e caldas*. Porto: Faculdade de Engenharia - Universidade do Porto.
- DAVIDOVITS, J. (1994). *Propierties of geopolymercements*. Kiev, Ukraine: First international conference of alkaline cements and concrets.
- DIAS, J. F., TORRAL, F. P., & JALALI, S. (2011). *Desenvolvimento de argamassas para a reabilitação de edifícios antigos. Parte 1 - Trabalhabilidade e comportamento mecânico*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.
- FARIA, M. P. (2009). *Resistence to salts of lime and pozzolan mortars. Repair mortars for histpric masonry*. RILEM PUBLICATIONS.
- FARIA, P. (2004). *Argamassas de revestimentos para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Lisboa: FCT-UNL.
- FARIA, P. (2011). *Estudo comparativo de diferentes argamassas tradicionais de cal aérea e areia*. Monte da Caparica.
- FONTES, A. C. (2011). *Influência das condições de cura na carbonatação de argamassas tradicionais com ligante à base de cal aérea- Métodos de análise*. Lisboa: IST - UTL.
- HENRIQUES, F. M. (1994). *Humidade em paredes*. Lisboa: LNEC.
- HENRIQUES, F., & FARIA, p. (2008). *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*. Rev. Engenharia Civil, Universidade do Minho, número 31, pp 36.

Bibliografia

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

IPQ (2006). NP EN 14146:2006. Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). Monte da Caparica.

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

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

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

MARGALHA, M. G., VEIGA, M. R., & BRITO, J. (2007). *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. Lisboa: APFAC.

MARQUES, A. R. (2010). *Argamassas de cal aérea com adição de cinza de casca de arroz. Influência das condições de cura*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Militar: IST - UTL.

MARTINS, A. I. (2010). *A influência das condições de cura em argamassas de cal aérea com e sem adição de metacaulino*. Barreiro: Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, IPSetúbal.

MASSENA, R. M. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de Mestrado, Lisboa: FCT-UNL.

NETTO, R. M. (2006). *Materiais pozolânicos*. Curso de especialização em Construção Civil, Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

NITA, C., JOHN, V. M., DIAS, C. M., TAKEASHI, M. S., & SAVASTANO JUNIOR, H. (2004). *Effect of metakaolin on the performance of PVA and cellulose fibers reinforced cement*. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference. University of Delaware.

PAVLIKOVÁ, M., PAVLIK, Z., & CERNY, R. (2008). *Higric and thermal properties of materials used in historical masonry*. Prague, Czech Republic: Czech Science Foundation, under project No 103/08/1531.

PEREIRA, S. A. (2010). *Procedimento executivo de revestimento externo em argamassa*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia/Universidade de Minas Gerais - Departamento de Engenharia de Materiais de Construção.

PINTO, A. T. (2004). *Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino*. Guimarães: Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Escola de Engenharia - Universidade do Minho.

RATO, V. N. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Lisboa, UNL.

REVILLA, et. al. (2006). *Modelling of Slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process variables*. Instituto de Ciências de la Construcción Eduardo Torroja: Madrid, Spain.

SIDDIQUE, R., & KLAUS, J. (2008). *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Elsevier, Applied Clay Science 43 pp 392-400.

SIMAS, M. S. (2007). *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*. Lisboa, IST - UTL: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

SOUSA, V., PEREIRA, F. D., & BRITO, J. (2005). *Rebocos tradicionais: principais causas de degradação*. Rev. Engenharia Civil, Universidade do Minho nº 23, pp 8.

- TAVARES, M., & VEIGA, M. R. (2002). *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. APTETI. Lisboa.
- TORGAL, F. P., JALALI, S., & DIAS, J. F. (2011). *Desenvolvimento de argamassas para reabilitação de edifícios antigos Parte 2 - Comportamento à água*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal.
- VALLE, J. B. (2008). *Patologias das alvenarias. Causa/Diagnóstico/Previsibilidade*. Curso de especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - Escola de Engenharia. Belo Horizonte.
- VEIGA, M. R. (2003). *As argamassas na conservação*. In actas das 1^{as} jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.
- VEIGA, M. R. (2005). *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Seminário "Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos". Lisboa, LNEC.
- VEIGA, M. R. (2007). *Revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Seminário Univer(s)cidades - desafios e propostas da candidatura, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- VELOSA, A. L., ROCHA, F., & VEIGA, M. R. (2009). *Influence of chemical and mineralogical compositions of metakaolin on mortar characteristics*. Acta Geodyn Geomater, Vol. 6, No 1, 121-126, 2009.
- VELOSA, Ana; VEIGA, M. Rosário (2001). *The use of pozzolans as additives in lime mortars for employment in building rehabilitation*. In International Seminar "Historical Constructions 2001". Proceedings. Guimarães. Universidade do Minho. Novembro de 2001.
- VELOSA, Ana; VEIGA, M. Rosário (2002). *Use of additivated lime mortars for old building rehabilitation. Adapted Test methods*. In 9th International Conference on Durability of Building Materials and Components. Proceedings. Brisbane. Austrália, Março de 2002.
- VELOSA, Ana; VEIGA, M. Rosário (2007). *Lime-metakaolin mortars - properties and applications*, In Portugal SB07: Sustainable Construction. Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium. Lisboa.IST. Setembro de 2007.

ANEXO I – DADOS DAS SALAS CLIMÁTICAS

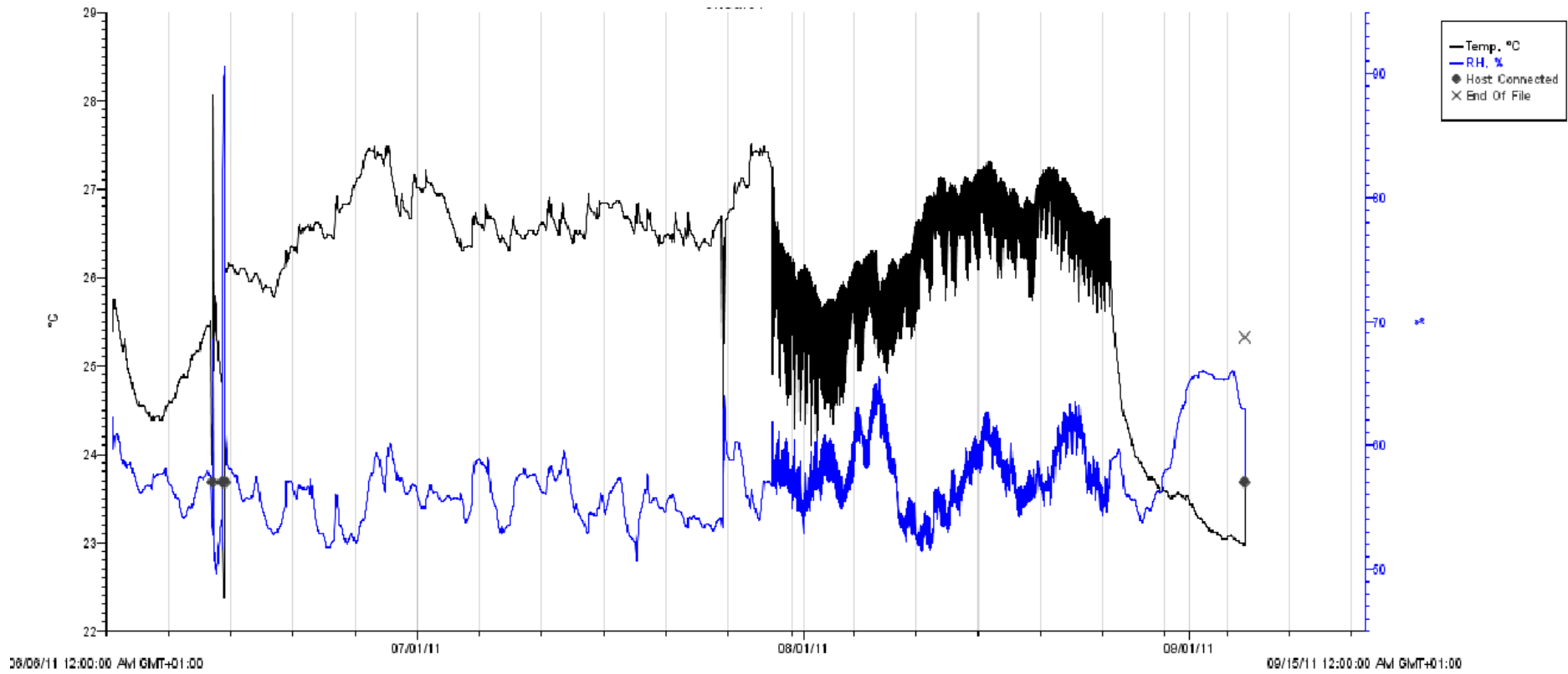


Figura II - Cura R

**ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS E FÍSICOS DE CADA
PROVETE**

Anexo II – Resultados dos ensaios mecânicos e físicos de cada provete

Quadro I – Valores de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

Tipo de Argamassa	Identificação do Provete	Massa [g]	Edin [Mpa]							Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇				
AH	1'	443	2465	2492	2485	2504				2487	16	2645	223
	2'	441	2968	2896	2953	2959				2944	33		
	3'	443	2548	2479	2483	2505				2504	32		
AR	1	441	2594	2570	2505	2576				2561	39	2567	55
	2	442	2542	2499	2517	2507				2516	19		
	3	442	2614	2574	2640	2664				2623	39		
BH	1	467	1427	1415	1388	1407				1409	16	1283	101
	2	493	1317	1291	1175	1197				1245	70		
	3	500	1175	1146	1220	1179	1304	1321	1297	1224	73		
BR	1	453	849	831	863	848				848	13	861	27
	2	451	805	899	884	898				872	45		
	3	442	858	849	871	875				863	12		
CH	1	454	801	785	740	773				775	26	898	95
	2	469	975	966	1006	975				981	18		
	3	465	936	913	934	971				939	24		
CR	1	453	658	546	662	655				630	56	583	87
	2	454	574	659	659	668				640	44		
	3	444	485	494	466	465				478	14		
DH	1	468	1276	1257	1257	1336				1282	37	1335	62
	2	479	1323	1268	1316	1440				1337	73		
	3	460	1378	1388	1379	1397				1386	9		
DR	1	437	476	457	429	447				452	20	468	17
	2	446	473	491	466	462				473	13		
	3	445	485	479	465	481				478	9		
EH	1	462	1266	1258	1256	1263				1261	5	1394	100
	2	471	1494	1470	1474	1480				1480	11		
	3	461	1444	1436	1421	1462				1441	17		
ER	10	437	335	400	386	308				357	43	885	81
	12	430	975	946	980	904				951	35		
	3	427	852	859	757	804				818	47		

Quadro II – Valores de módulo de elasticidade dinâmico aos 60 dias

Tipo de Argamassa	Identificação do Provete	Massa [g]	Edin [Mpa]							Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇				
AH	1	446	3646	3544	3665	3646				3625	55	3716	107
	2	445	3849	3832	3874	3835				3848	19		
	3	446	3661	3736	3683	3626				3677	46		
AR	1	444	3260	3270	3209	3340				3270	54	3265	48
	2	445	3235	3226	3229	3213				3226	9		
	3	444	3288	3358	3261	3292				3300	41		
BH	1	452	2865	2839	2798	2815				2829	29	1105	129
	2	451	1197	1174	1146	1193				1178	23		
	3	452	948	947	969	1263				1032	155		
BR	1	453	924	925	913	914				919	6	967	48
	2	452	1062	987	983	989				1005	38		
	3	443	947	973	1035	949				976	41		
CH	1	444	1048	1585	1485	1816				1484	322	1959	349
	2	448	2141	2297	2107	2156	2256	2254	2273	2212	75		
	3	441	2011	1982	1999	1981				1993	14		
CR	1	452	2494	2530	2483	2509				2504	20	2339	274
	2	454	2522	2561	2511	2565				2540	27		
	3	443	1870	1997	2019	2001				1972	69		
DH	1	453	1865	1884	1860	1841				1863	18	2035	511
	2	450	2555	2605	2541	2591				2573	30		
	3	411	1330	1279						1305	36		
DR	1	437	1927	1857	1805	1832				1855	52	1913	59
	2	442	1987	2003	1925	1959				1969	34		
	3	441	1913	1906	1948	1898				1916	22		
EH	2	437	638	772						705	95	1045	269
	18	442	1245	1263	1203	1147				1215	52		
										-	-		
ER	3	422	1132	1024	1190	1110				1114	69	1318	293
	10	428	1273	1255	1013	1041				1146	138		
	12	434	1572	1730	1764	1714				1695	85		

Quadro III – Valores de módulo de elasticidade dinâmico aos 90 dias

Tipo de Argamassa	Identificação do Provete	Massa [g]	Edin [Mpa]						Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]	Média E [Mpa]	Dv. Padrão [Mpa]
			E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆				
AH	1	447	3945	3947	3881	3987			3940	44	3988	100
	2	445	4121	4079	4144	4111			4114	27		
	3	446	3959	3927	3851	3905			3911	45		
AR	1	443	3344	3383	3388	3370			3371	20	3380	54
	2	445	3315	3351	3340	3367			3343	22		
	3	444	3429	3522	3392	3354			3424	72		
BH	1	441	5745	5632	5624	5629			5658	58	4157	165
	2	451	4349	4260	4356	4255			4305	55		
	3	451	3949	4012	4016	4055			4008	44		
BR	1	452	3713	3787	3685	3713			3725	44	3803	80
	2	451	3943	3834	3859	3918			3889	51		
	3	442	3840	3792	3761	3789			3796	33		
CH	7	451	3364	3509	3498	3495			3467	69	3157	335
	8	453	3814	3856	3760	3829			3815	40		
	9	450	2877	2870	2795	2849			2848	37		
CR	1	452	2455	2469	2489	2466			2470	14	2329	260
	2	453	2531	2532	2552	2528			2536	11		
	3	442	1994	2012	1934	1980			1980	33		
DH	8	448	2622	2535	2540	2543			2560	41	1891	502
	2	446	1936	1522	1468	1880	2064	1809	1780	237		
	9	448	1673	1350	1250	1281			1389	194		
DR	1	436	1831	1846	1800	1821			1825	19	1892	52
	2	440	1946	1951	1901	1934			1933	22		
	3	441	1909	1914	1925	1920			1917	7		
EH	8	446	1442	1664	1437	1710	1697		1590	138	1808	290
	9	444	1761	1361	1819	1834	1857		1726	207		
	17	442	2272	2175	2116	2169			2183	65		
ER	7	429	1248	1299	1268	1368			1296	53	1386	271
	10	432	1769	1718	1795	1635			1729	71		
	12	425	1223	1176	1118	1014			1133	90		

Quadro IV – Valores de resistências mecânicas aos 28 dias

Identificação da Argamassa	Identificação do Provete	Carga Máx. f [KN]	R_t [Mpa]	Média R_t [Mpa]	Dv. Padrão R_t [Mpa]	Carga Máx. c [KN]	R_c [Mpa]	Média R_c [Mpa]	Dv. Padrão R_c [Mpa]
AH	10	0,09	0,21	0,22	0,01	0,70	0,43	0,41	0,03
	11	0,10	0,23			0,67	0,42		
	12	0,10	0,23			0,61	0,38		
AR	10	0,06	0,14	0,20	0,05	0,80	0,50	0,49	0,01
	11	0,09	0,22			0,77	0,48		
	12	0,10	0,23			0,77	0,48		
BH	10	0,02	0,04	0,04	0,00	0,16	0,10	0,10	0,02
	11	0,02	0,04			0,18	0,11		
	12	0,02	0,04			0,13	0,08		
BR	10	0,04	0,09	0,09	0,00	0,29	0,18	0,18	0,00
	11	0,04	0,08			0,30	0,19		
	12	0,04	0,09			0,29	0,18		
CH	10	0,04	0,10	0,08	0,02	0,44	0,28	0,23	0,04
	11	0,03	0,07			0,34	0,22		
	12	0,03	0,07			0,32	0,20		
CR	10	0,02	0,05	0,05	0,00	0,29	0,18	0,17	0,02
	11	0,02	0,05			0,29	0,18		
	12	0,02	0,06			0,25	0,16		
DH	10	0,06	0,13	0,12	0,01	0,51	0,32	0,31	0,02
	11	0,05	0,12			0,52	0,32		
	12	0,05	0,11			0,46	0,29		
DR	10	0,02	0,04	0,04	0,01	0,32	0,20	0,20	0,02
	11	0,01	0,03			0,28	0,18		
	12	0,02	0,04			0,36	0,22		
EH	10	0,06	0,14	0,15	0,02	0,68	0,42	0,43	0,02
	11	0,07	0,17			0,72	0,45		
	12	0,06	0,14			0,66	0,41		
ER	10	-	-	0,03	-	0,17	0,11	0,13	0,03
	11	0,01	0,03			0,26	0,16		
	12	-	-			0,21	0,13		

Quadro V – Valores de resistências mecânicas aos 60 dias

Identificação da Argamassa	Identificação do Provete	R _c [Mpa]	Carga Máx. _c [KN]	Média R _c [Mpa]	Dv. Padrão R _c [Mpa]
AH	10,00	0,74	1,18	0,74	0,01
	11,00	0,73	1,17		
	12,00	0,74	1,19		
AR	10,00	0,77	1,23	0,74	0,04
	11,00	0,76	1,22		
	12,00	0,69	1,11		
BH	10,00	0,13	0,20	0,12	0,00
	11,00	0,12	0,19		
	12,00	0,12	0,20		
BR	10,00	0,20	0,32	0,26	0,06
	11,00	0,27	0,43		
	12,00	0,31	0,50		
CH	10,00	0,20	0,32	0,14	0,05
	11,00	0,11	0,18		
	12,00	0,12	0,20		
CR	10,00	0,20	0,32	0,22	0,04
	11,00	0,19	0,31		
	12,00	0,26	0,42		
DH	10,00	0,14	0,22	0,14	0,02
	11,00	0,16	0,25		
	12,00	0,12	0,19		
DR	10,00	0,23	0,37	0,19	0,06
	11,00	0,12	0,18		
	12,00	0,22	0,35		
EH	10,00	0,11	0,18	0,10	0,02
	11,00	0,10	0,16		
	12,00	0,07	0,11		
ER	5,00	0,11	0,18	0,12	0,01
	11,00	0,13	0,21		
	-	-	-		

Quadro VI – Valores de resistências mecânicas aos 90 dias

Identificação da Argamassa	Identificação do Provete	Carga Máx. _f [KN]	R _f [Mpa]	Média R _f [Mpa]	Dv. Padrão R _f [Mpa]	Carga Máx. _c [KN]	R _c [Mpa]	Média R _c [Mpa]	Dv. Padrão R _c [Mpa]
AH	7	0,12	0,28	0,34	0,09	0,98	0,61	0,65	0,05
	8	0,17	0,41			1,11	0,69		
	-	-	-			-	-		
AR	7	0,16	0,37	0,38	0,03	1,44	0,90	0,92	0,04
	8	0,18	0,41			1,54	0,96		
	9	0,16	0,37			1,44	0,90		
BH	7	0,03	0,06	0,07	0,01	0,28	0,18	0,17	0,01
	8	0,03	0,06			0,24	0,15		
	9	0,03	0,08			0,29	0,18		
BR	7	0,04	0,08	0,09	0,01	0,46	0,29	0,30	0,01
	8	0,04	0,09			0,49	0,31		
	9	0,04	0,10			0,50	0,31		
CH	1	-	-	0,04	0,00	0,17	0,10	0,11	0,01
	2	0,02	0,04			0,20	0,13		
	3	0,02	0,04			0,16	0,10		
CR	7	0,02	0,05	0,05	0,01	0,40	0,25	0,26	0,01
	8	0,03	0,06			0,42	0,27		
	9	0,02	0,04			0,40	0,25		
DH	7	0,03	0,06	0,04	0,02	0,30	0,19	0,11	0,08
	8	0,01	0,03			0,06	0,04		
	9	0,01	0,02			0,16	0,10		
DR	7	0,02	0,04	0,04	0,01	0,45	0,28	0,27	0,01
	8	0,02	0,05			0,45	0,28		
	9	0,02	0,04			0,41	0,26		
EH	8	0,01	0,02	0,03	0,01	0,22	0,14	0,14	0,01
	9	0,01	0,02			0,23	0,15		
	17	0,02	0,04			0,22	0,14		
ER	8	0,01	0,03	0,02	0,00	0,21	0,13	0,14	0,01
	9	0,01	0,02			0,23	0,15		
	3	-	-			0,22	0,14		

Quadro VII – Valores de índice de secagem aos 28 e 90 dias

28 dias			
Provetes	Índice secagem	Média IS	Dv. Padrão IS
AH4	0,16	0,15	0,01
AH5	0,15		
AH6	0,14		
AR4	0,13	0,16	0,03
AR5	0,17		
AR6	0,19		
BH4	0,30	0,29	0,01
BH5	0,28		
BR4	0,29	0,26	0,04
BR5	0,27		
BR6	0,21		
CH4	0,27	0,29	0,02
CH5	0,31		
CH6	0,29		
CR4	0,34	0,33	0,01
CR5	0,34		
CR6	0,32		
DH4	0,31	0,26	0,03
DH5	0,26		
DH6	0,27		
DR4	0,31	0,31	0,01
DR5	0,31		
DR6	0,30		
EH4	0,27	0,26	0,02
EH5	0,24		
EH6	0,27		
ER4	0,50	0,32	0,16
ER5	0,23		
ER6	0,21		

90 dias			
Provetes	Índice secagem	Média IS	Dv. Padrão IS
AH7	0,08	0,08	0,00
AH8	0,08		
AR7	0,09	0,08	0,00
AR8	0,08		
AR9	0,09		
BH7	0,10	0,11	0,02
BH8	0,13		
BH9	0,12		
BR7	0,13	0,14	0,01
BR8	0,15		
BR9	0,14		
CH1	0,55	0,49	0,07
CH2	0,42		
CH3	0,49		
CR7	0,44	0,45	0,01
CR8	0,46		
CR9	0,46		
DH7	0,47	0,47	0,00
DR7	0,36	0,40	0,03
DR8	0,41		
DR9	0,42		
EH17	0,54	0,54	0,00
ER8	0,31	0,45	0,21
ER9	0,60		

Quadro VIII – Valores de porosidade aberta aos 28 dias

Identificação da Argamassa	Identificação dos Provetes	Massa [g]			Porosidade e Aberta [%]	Média Porosidade aberta [%]	Dv. Padrão [%]
		M ₁	M ₂	M ₃			
AH	10	72,94	43,62	85,83	30,54	30	0,8
	11	47,25	26,86	55,52	28,86		
	12	53,48	31,56	62,80	29,83		
AR	10	42,93	25,56	50,49	30,32	31	1,2
	11	88,79	52,24	104,06	29,47		
	12	73,02	43,82	86,64	31,81		
BH	10	59,61	36,00	71,11	32,75	32	0,3
	11	57,43	34,50	68,33	32,22		
	12	60,30	36,40	71,80	32,49		
BR	10	56,20	33,51	67,13	32,51	32	1,3
	11	65,47	40,05	78,28	33,51		
	12	59,29	34,67	70,35	31,00		
CH	10	59,14	34,51	70,25	31,09	33	1,7
	11	46,73	26,96	56,48	33,03		
	12	60,39	35,97	73,22	34,44		
CR	10	62,65	37,06	74,67	31,96	32	1,0
	11	52,53	30,68	62,56	31,46		
	12	67,75	39,88	81,71	33,37		
DH	10	62,41	38,39	75,04	34,46	34	0,6
	11	60,79	37,82	72,65	34,05		
	12	65,28	40,12	77,88	33,37		
DR	10	50,63	30,74	59,27	30,28	28	5,8
	11	32,89	18,70	36,73	21,30		
	12	77,07	47,57	91,05	32,15		
EH	10	78,56	48,40	93,55	33,20	33	0,3
	11	73,07	44,20	87,08	32,67		
	12	55,92	34,17	66,77	33,28		
ER	10	63,67	38,56	73,55	28,24	25	5,6
	11	63,65	37,66	74,18	28,83		
	12	50,99	29,01	56,10	18,86		

Quadro IX – Valores de porosidade aberta aos 60 dias

Identificação da Argamassa	Identificação dos Provetes	Massa [g]			Porosidade Aberta [%]	Média Porosidade aberta [%]	Dv. Padrão [%]
		M ₁	M ₂	M ₃			
AH	AH10	65,48	35,10	72,45	18,67	19	0,6
	AH11	77,18	42,89	85,56	19,63		
	AH12	78,11	43,47	86,65	19,79		
AR	AR10	90,27	49,47	99,66	18,71	30	17,9
	AR11	68,27	37,77	99,80	50,83		
	AR12	76,44	42,04	85,57	20,99		
BH	BH10	47,18	27,24	54,68	27,34	27	0,3
	BH11	54,08	31,19	62,71	27,38		
	BH12	52,69	30,67	60,77	26,86		
BR	BR10	55,01	31,65	63,15	25,83	25	0,5
	BR11	61,69	35,51	70,74	25,69		
	BR12	68,50	39,54	78,14	24,98		
CH	CH10	57,45	33,91	66,55	27,88	26	1,5
	CH11	40,93	23,26	46,95	25,42		
	CH12	40,80	23,18	46,71	25,13		
CR	CR10	43,53	25,29	50,38	27,33	26	1,1
	CR11	41,69	23,92	47,70	25,29		
	CR12	46,91	26,80	54,28	26,81		
DH	DH10	59,23	4,44	9,74	-934,48	8	476,8
	DH11	62,94	32,28	65,61	8,02		
	DH12	50,35	7,62	13,82	-589,23		
DR	DR10	21,16	11,39	22,95	15,50	27	0,8
	DR11	59,98	34,07	69,46	26,78		
	DR12	48,45	28,18	56,32	27,95		
EH	EH10	34,82	-	-	-	-	-
	EH11	42,06	-	-	-		
	EH12	63,09	6,99	12,32	-		
ER	ER11	37,34	21,32	42,57	24,60	25	0,0

Quadro X – Valores de porosidade aberta aos 90 dias

Identificação da Argamassa	Identificação dos Provetes	Massa [g]			Porosidade Aberta [%]	Média Porosidade aberta [%]	Dv. Padrão [%]
		M ₁	M ₂	M ₃			
AH	AH7	69,40	39,61	78,49	23,39	23	0,2
	AH8	62,46	35,70	70,48	23,06		
AR	AR7	74,64	42,11	84,11	22,55	23	0,3
	AR8	79,24	45,23	89,47	23,12		
	AR9	88,51	50,19	99,90	22,91		
BH	BH7	77,45	44,85	89,05	26,24	26	0,2
	BH8	68,21	39,18	78,44	26,07		
	BH9	63,08	36,63	72,32	25,87		
BR	BR7	80,87	47,47	93,13	26,84	27	0,4
	BR8	75,12	44,12	86,64	27,10		
	BR9	57,09	33,43	65,54	26,31		
CH	CH1	49,78	28,75	56,81	25,04	25	0,0
CR	CR7	25,41	14,99	29,50	28,19	28	0,3
	CR8	46,82	27,90	54,48	28,83		
	CR9	49,01	28,72	57,07	28,44		
DH	DH7	63,36	36,81	73,45	27,55	28	0,0
DR	DR7	39,66	23,20	45,79	27,14	28	0,8
	DR8	53,85	31,69	62,31	27,62		
	DR9	49,56	29,23	57,74	28,69		
EH	EH8	34,02	19,78	38,99	25,85	27	2,2
	EH17	57,05	33,71	66,54	28,92		
	EH9	23,97			-		
ER	ER3	37,62	21,20	43,30	25,71	26	0,6
	ER8	46,69	26,91	53,92	26,79		
	ER9	54,06	31,50	62,17	26,45		

Valores excluídos